

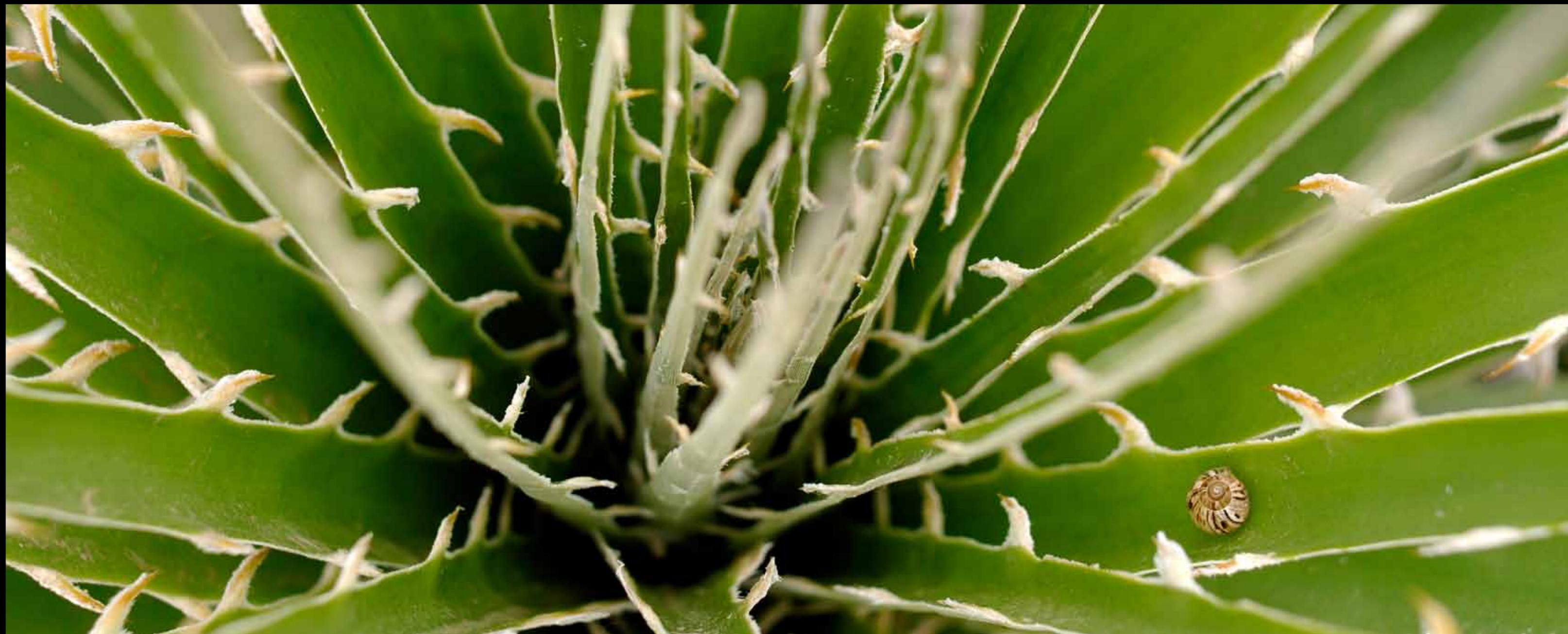
Biodiversidad:  
**Flora y Vegetación**  
en Minera Los Pelambres



Biodiversidad:  
**Flora y Vegetación**  
en Minera Los Pelambres

Biodiversidad:  
**Flora y Vegetación**  
en Minera Los Pelambres







## Edición

F. Fernando Novoa Cortez

Manuel Contreras Leiva

## Diseño y Diagramación

Iunta Creativa

## Fotografías

Alan Warren: fotos páginas: Portada, 1, 4, 5, 6, 12, 17, 22, 29, 34, 38, 43, 46, 53, 60, 69, 72, 77, 80, 91, 101, 106, 114, 119, 123, 126, 136, 147, 150, 155, 158, 164, 171, 177, 182, 188, 193, 198, 205, 210, 215, 221, 226, 233, 238, 246, 253, 260, 267, 296, Contraportada.

### Resto de las fotos:

Claudia Hernandez

Centro de Ecología Aplicada Limitada

Jaime Illanes y Asociados Consultores S.A.

ATM Ingeniería

## Impresión

Ograma

## Como citar este libro

Biodiversidad: Flora y Vegetación en Minera Los Pelambres (2010). Novoa FF & M Contreras (Eds). Ediciones del Centro de Ecología Aplicada Ltda. 296 páginas.

7.



I. Uso de Imágenes Hiperespectrales en el Seguimiento de la Vegetación Zona Laguna Conchalí, Comuna Los Vilos

39.



II. Representatividad de la flora regional en el área de uso de Minería Los Pelambres, comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

61.



III. Diversidad de comunidades vegetales de la Provincia de Choapa y efecto del gradiente altitudinal sobre variables comunitarias

81.



IV. Vivero Monte Aranda

115.



V. Reforestaciones PID

143.



VI. Investigación en Técnicas de Vegetación de Tranques de Relaves en Etapa de Cierre



## Presentación

Minera Los Pelambres cumple 10 años de vida y desde sus inicios nuestros valores integraron con decisión lo que hoy se denomina “Desarrollo Sustentable”, término que expresa la permanente preocupación de nuestra empresa por equilibrar adecuadamente las dimensiones sociales, ambientales y económicos que tiene nuestra actividad en la Provincia del Choapa.

En lo que respecta a la dimensión ambiental trabajamos continuamente no sólo respetando la flora, fauna, la biodiversidad; vamos más allá “agregando valor sustentable” a nuestro quehacer .

Divulgar los conocimientos generados a través de varios años de monitoreo ambiental es sin duda uno de estos aportes , que mejoran el conocimiento de nuestro entorno.

En nuestro aniversario Minera Los Pelambres (MLP) y el Centro de Ecología Aplicada (CEA) se complacen en presentar a la comunidad local y al público general el libro: Biodiversidad: Flora y Vegetación en Minera Los Pelambres.

Este libro complementa los dos aportes anteriores generados en materia de conocimiento de la biodiversidad regional. Así, en 2008 elaboramos el libro: Biodiversidad de Fauna en Minera Los Pelambres, donde se describen los principales componentes faunísticos presentes en la zona de estudio (vertebrados acuáticos y terrestres e invertebrados acuáticos). Posteriormente, en 2009 publicamos el libro: Flora y Fauna Laguna Conchalí, donde se describen las especies más frecuentes de flora y fauna de vertebrados presentes en este humedal costero protegido por MLP. Ahora, en 2010, aportamos esta tercera recopilación sobre el componente florístico presente en las áreas utilizadas por Minera Los Pelambres.





En este libro se resumen diversos estudios y actividades sobre el componente florístico realizadas por más de una década en sectores del área mina, fundo El Mauro y en laguna Conchalí. En él encontrarán estudios ecológicos que utilizan la información que se ha obtenido durante 12 años de seguimiento de la flora del sector (capítulos 2 y 3), y paralelamente, estudios más aplicados, donde se describen las actividades realizadas para la restauración de vegetación nativa con especies amenazadas y experiencias de revegetación de un tranque de relave (capítulos 4, 5 y 6). También encontrarán un estudio de la condición fisiológica de vegetación, utilizando técnicas de sensoramiento remoto.

El conocimiento nuevo aportado en este documento apoya la conservación de la biodiversidad, lo cual es una tarea prioritaria para lograr un desarrollo sustentable.

Este libro está dirigido no sólo a profesionales especialistas del área biológica y ambiental (biólogos, botánicos, ecólogos, biólogos ambientales), sino que también a toda la comunidad regional (incluyendo profesores y estudiantes de enseñanza básica, media y universitaria en las áreas naturalistas), y al público en general que disfruta de los ambientes naturales y que se interesa por conocer y proteger parte de nuestra diversidad biológica.

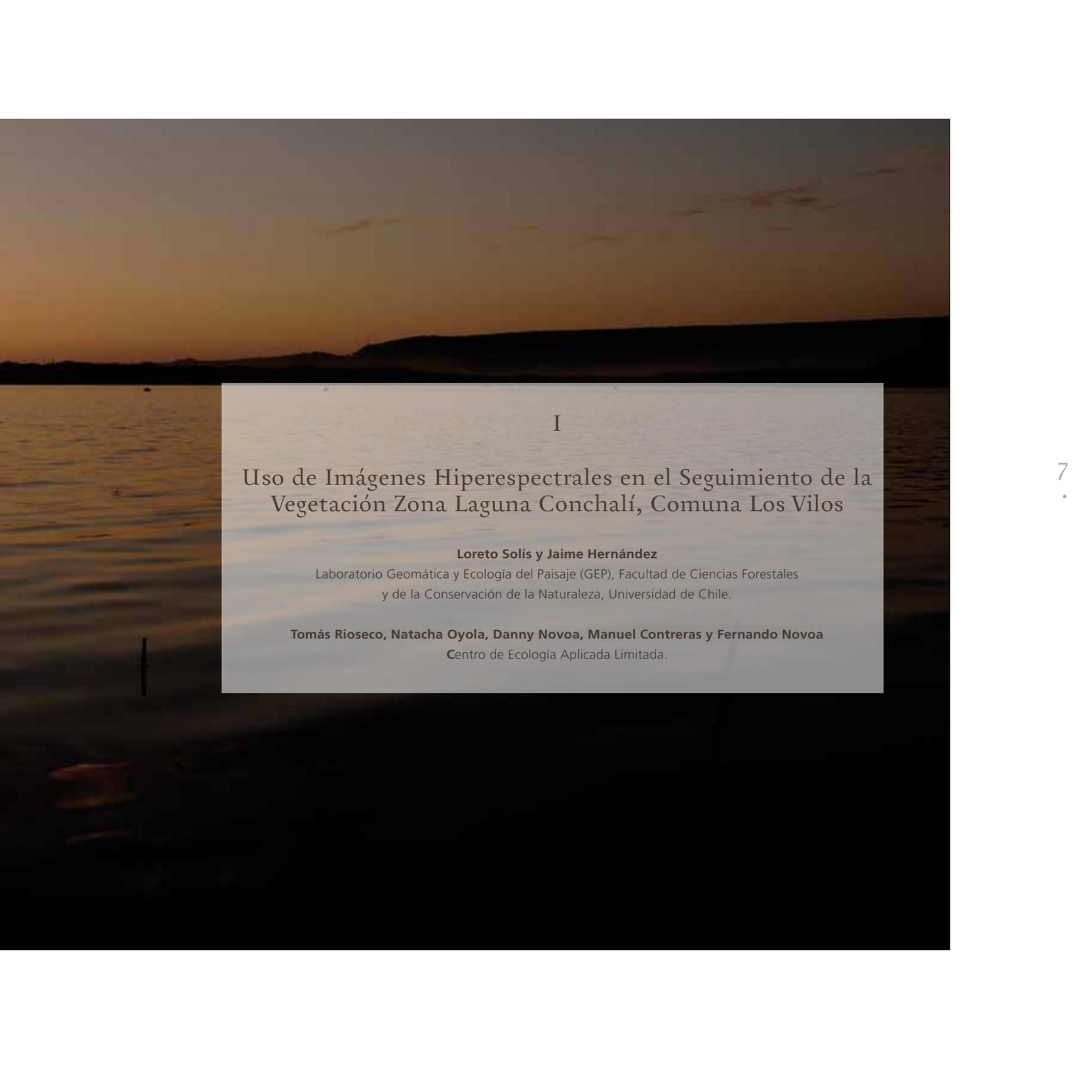
Es de esperar que este libro sea una eficaz contribución al conocimiento de la biodiversidad regional y sea utilizado como una información básica en el manejo de los ambientes naturales de la Región de Coquimbo.

**Oscar Leal**  
Gerente de Medio Ambiente  
Minera Los Pelambres

**Dr. F. Fernando Novoa**  
**Dr. Manuel Contreras**  
Directores  
Centro de Ecología Aplicada







I

Uso de Imágenes Hiperespectrales en el Seguimiento de la  
Vegetación Zona Laguna Conchalí, Comuna Los Vilos

**Loreto Solís y Jaime Hernández**

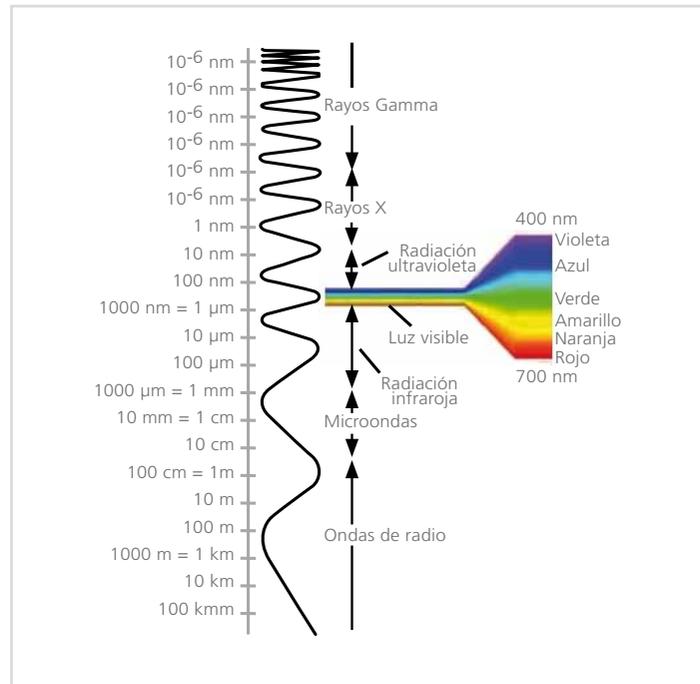
Laboratorio Geomática y Ecología del Paisaje (GEP), Facultad de Ciencias Forestales  
y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

**Tomás Rioseco, Natacha Oyola, Danny Novoa, Manuel Contreras y Fernando Novoa**

Centro de Ecología Aplicada Limitada.

## Introducción

Para la percepción remota, en sensores pasivos, la energía solar es la base de todos los principios sobre los que se fundamenta esta tecnología. La luz proveniente del sol es una combinación de distintas vibraciones de ondas electromagnéticas que viajan, cada una con su propia longitud de onda característica. Organizadas por longitud de onda, conforman el espectro electromagnético. Este espectro electromagnético (Figura 1.1) va desde los rayos gamma hasta las ondas de radio siendo la fracción visible una pequeña parte de este espectro entre los 400 (violeta) a los 700 (rojo) nanómetros, fuera de este rango se encuentran zonas espectrales no visibles al ojo humano como el ultravioleta e infrarrojo (Randall, 2001).



**Figura 1.1.**

Espectro electromagnético (Rivas, 2004).

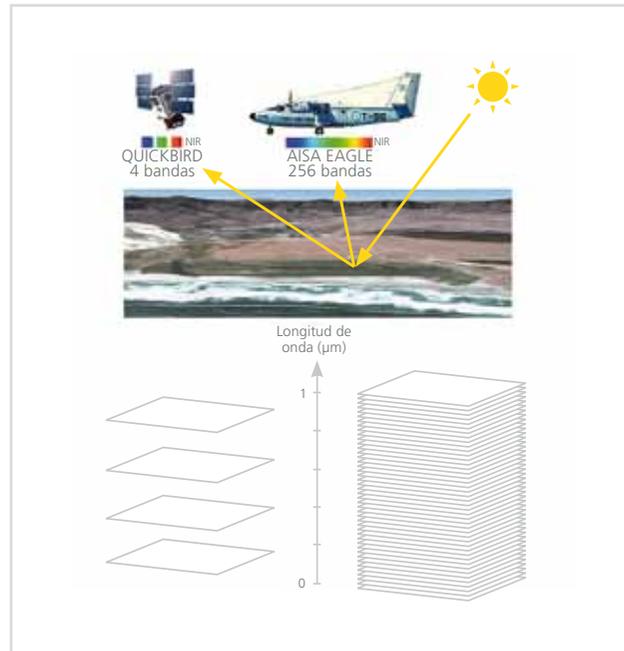
Una firma es un patrón característico que identifica a un objeto. Si conocemos la respuesta asociada a ese objeto o una cobertura terrestre cualquiera la podemos identificar en una imagen, obtenida por sensores remotos aerotransportados o satelitales, evaluar su estado y efectuar un seguimiento de los cambios que experimenta. Las firmas obtenidas por sensores remotos pasivos pueden ser descritas en al menos cuatro dominios complementarios: espectral, espacial, angular y temporal (Hernández, 2009).

En el dominio espacial interesa describir la variación de los valores asociados a los píxeles sobre la escena, los que comúnmente son llamados niveles digitales o ND. Se debe considerar que la información de la superficie terrestre es adquirida a través de sensores que operan a distintas resoluciones espaciales. La firma espacial depende de esta resolución y de la variación local de un determinado objeto en el espacio y del contraste con objetos vecinos. Las firmas espaciales caracterizan la dependencia espacial de los valores de los píxeles, los cuales presentan comportamientos más o menos auto-correlacionados, dependiendo de la continuidad del tipo de superficie que representan y del grado de anisotropía que pueda exhibir (direcciones preferenciales de variación).

Las firmas angulares son observaciones de la respuesta espectral en diferentes direcciones de observaciones (geometría de observación). Este tipo de respuestas han sido usadas para estimar propiedades de aerosoles atmosféricos, coberturas vegetacionales, albedos superficiales, y otros parámetros bioquímicos.

Las firmas temporales se derivan de observaciones repetidas en el tiempo y son particularmente relevantes para seguir cambios de la superficie terrestre. Se han usado para clasificar tipos de vegetación, evaluar sus fenologías, extraer parámetros biofísicos, seguir desarrollos urbanos, modelar procesos de degradación, deforestación y desertificación, en conjunto con muchos otros campos de aplicación.





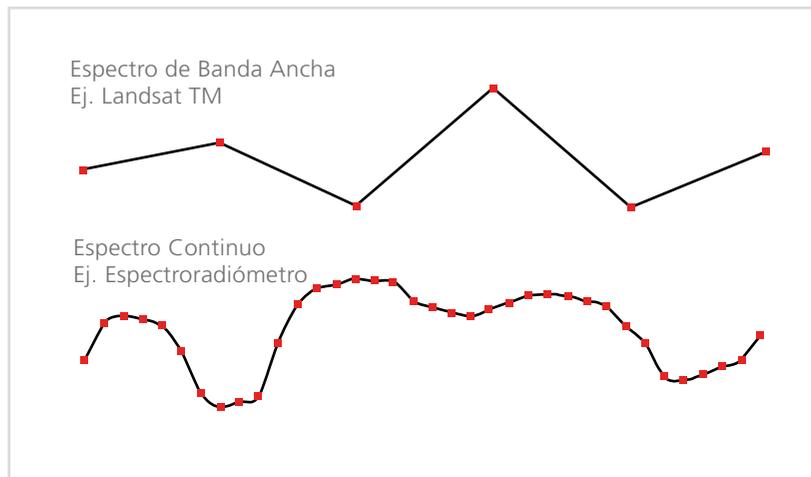
**Figura 1.2.**

Comparación de resolución espectral entre el sensor multispectral QUICKBIRD y el sensor hiperespectral AISA EAGLE.

Por último, las firmas espectrales describen el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada o emitida desde algún tipo de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético. Este patrón se usa para poder identificar o clasificar distintos tipos de coberturas en imágenes multispectrales e hiperespectrales.

Los sensores hiperespectrales son capaces de entregar datos de alta resolución espacial con alta resolución espectral (cientos de bandas). Ello hace que la cantidad de datos sea extremadamente elevada y se hable más bien de “cubos” de datos (Figura 1.2). Esta característica ha llevado al límite los métodos tradicionales de clasificación tales como mínima distancia o máxima verosimilitud (CMP), siendo los enfoques no paramétricos los que se han sido aplicados con mayor éxito, en especial la aplicación de redes neuronales (De Jong y Van der Meer, 2004).

En términos prácticos, la diferencia entre imágenes multispectrales e hiperespectrales es que esta últimas son sensibles a las pequeñas variaciones de la energía reflejada en bandas mucho más angostas que las multispectrales, permitiendo construir firmas espectrales con mayor continuidad (Figura 1.3.).

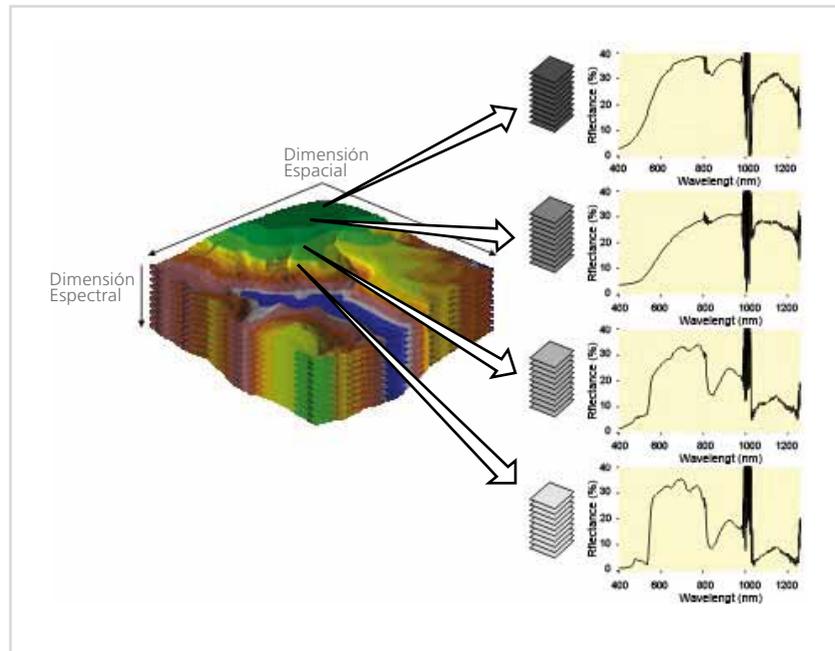


**Figura 1.3.**

Firma Espectral Sensor Multiespectral v/s Hiperespectral (Elaboración propia).

Los sensores remotos hiperespectrales, colectan datos simultáneamente en cientos de bandas espectrales angostas y adyacentes. Estas mediciones hacen posible derivar un espectro continuo para cada celda de imagen, como se muestra en la Figura 1.4. Luego de realizar una serie de correcciones, que dan cuenta de los efectos atmosféricos y de topográficos sobre la reflectancia, estas imágenes pueden ser comparadas con reflectancias espectrales de campo o de laboratorio, de referencia, para reconocer y mapear superficies de distintos tipos de materiales tales como tipos de vegetación, minerales, o la cantidad de clorofila en el agua.

Debido a que contienen una gran cantidad de datos, interpretarlos requiere una comprensión de las propiedades de los materiales sobre la superficie terrestre que estamos evaluando, y de cómo se relacionan con los datos de generados por los sensores hiperespectrales. El resultado permite extraer una información más completa y específica de las coberturas observadas, y de esta forma poder derivar índices cuantitativos que dan cuenta de su estado, por ejemplo el nivel de estrés de un cultivo e incluso poder identificar sus causas. Conocer rápidamente si las plantaciones sufren por falta de agua, ataque de insectos o déficit de fertilizantes es vital para gestionar y mejorar sus condiciones de productividad.



**Figura 1.4.**

Firma Espectrales de distintos elementos de una escena hiperespectral. (ASD Inc. 2008)

Al igual que las imágenes multispectrales, las imágenes hiperespectrales requieren de ciertos pre-procesamientos (correcciones y mejoramientos), entre los cuales los más importantes son las correcciones atmosféricas dado que una mayor resolución espectral presenta mayores efectos en de absorción y dispersión atmosférica. Algunos métodos posibles de aplicar son:

- Corrección plana de campo Flat Field Correction (Goetz and Srivastava, 1985; Roberts et al., 1986)
- Reflectancia interna promedio relativa Internal Average Relative Reflectance (IARR) ((Kruse et al., 1985; Kruse, 1988).
- Calibración empírica en línea Empirical Line Calibration (Roberts et al., 1985; Conel et al., 1987; Kruse et al., 1990).

## Comportamiento Espectral de la vegetación

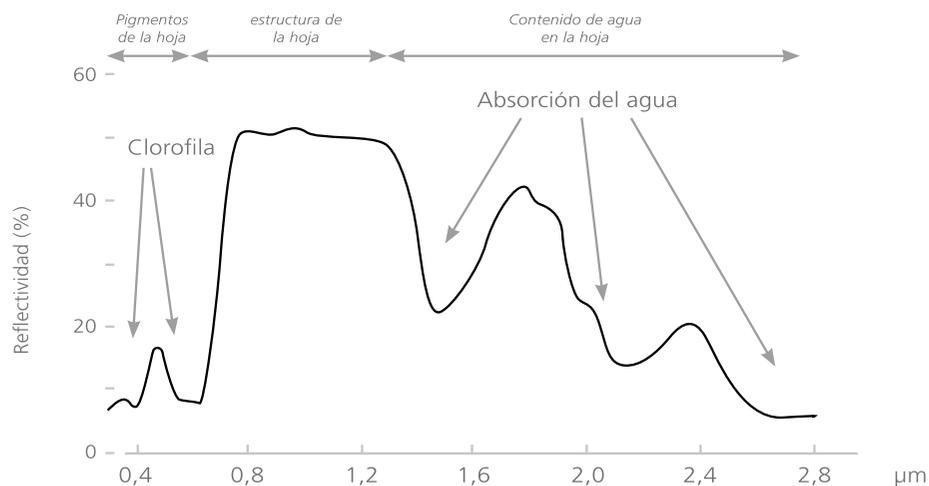
La caracterización espectral de las masas vegetales constituye una de las tareas más interesantes en teledetección pero, pese a su gran importancia, aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que afectan la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores son los derivados de geometría de la observación, para la cual las condiciones topográficas son las de mayor influencia: pendiente, orientación, altitud, posición geográfica.

A pesar de las variaciones que introducen estos factores, es importante analizar más detenidamente el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa (Figura 1.5.). Para ello existen varios estudios teóricos (Gates, et al., 1965; Knipling, 1970; Colwell, 1974; Curran 1980; Jensen 1983; Lusch, 1989) que dan cuenta de este comportamiento. Típicamente, la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a  $0.55 \mu\text{m}$ ). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio. Estas características se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua que almacenan las hojas. La baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos (65, 29 y 6 %) (Gates et al., 1965). Todos ellos absorben en las bandas del espectro situadas en torno a los  $0.445 \mu\text{m}$ , mientras que la clorofila presenta una segunda banda  $0.645 \mu\text{m}$ . Entre ambas proporciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los  $0.55 \mu\text{m}$ , donde el efecto absorbente es menor. Por esta causa aparece un máximo relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa.

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en definitivamente, su color amarillento (verde + rojo). En algunas especies resulta destacada la acción de otro pigmento, la antocianina, buen reflector de la porción roja del espectro, que causa ese color en épocas de senescencia (caso de los arces canadienses o la lenga chilena).

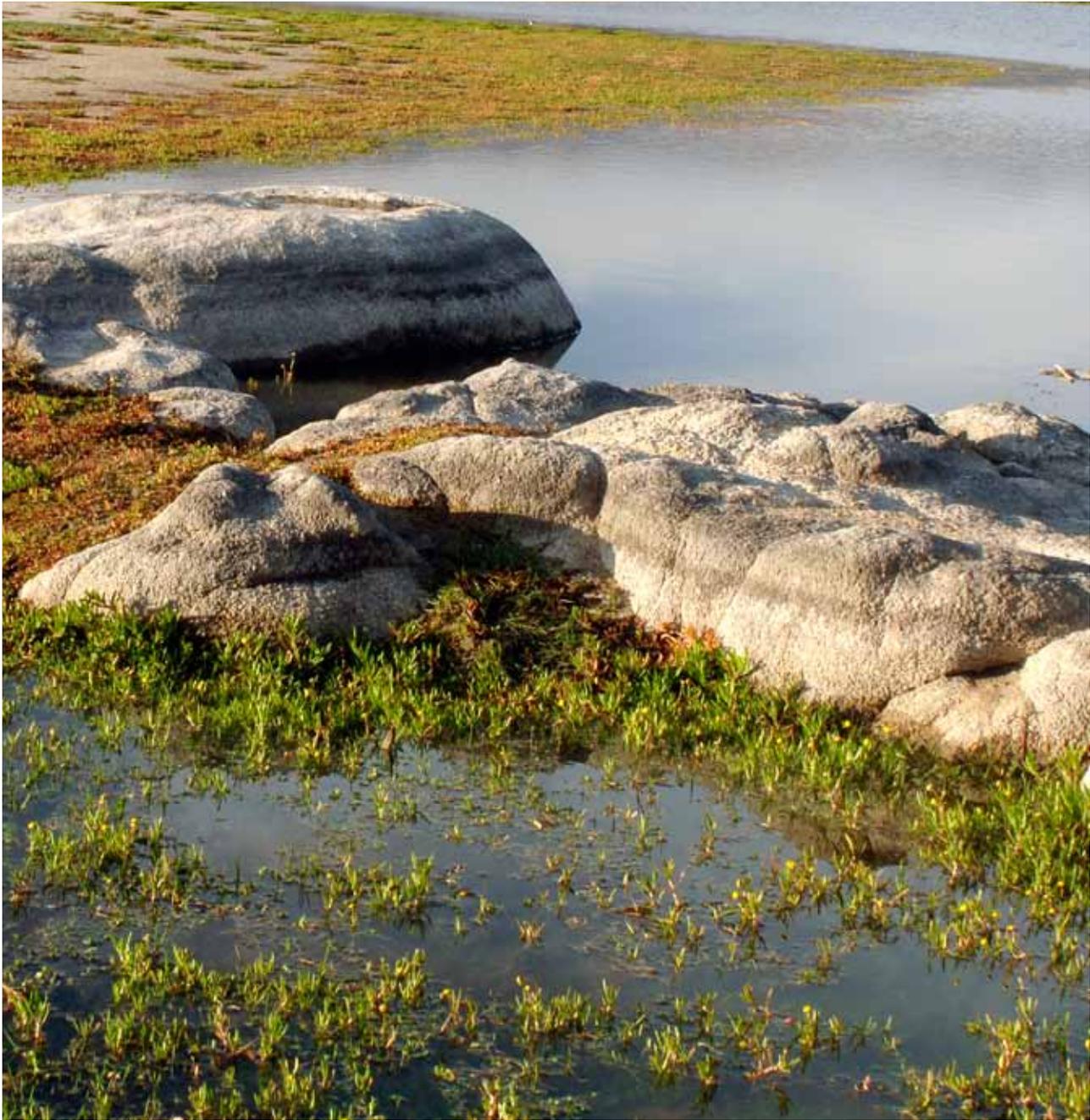
En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto, ejerce un papel protagonista la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente en esta banda del espectro (Harris, 1987). Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano, en claro contraste con la banda reflectiva que ofrece en el espectro visible, especialmente en la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según la especie, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible. Finalmente, entre los rangos 1.4 a 1.8  $\mu\text{m}$ , infrarrojo medio, la reflectividad depende del contenido de agua entre y dentro de las células, en condiciones de hidratación normales ambos valles son profundos y marcados, en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Moreno, et al., 2001).

Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación gatillará un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto. La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y, en consecuencia, a ofrecer una menor absorptividad en las bandas azul y roja. El aumento consecuente de la reflectividad de estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja. La curva espectral, por tanto, se hace más plana, menos cromática (Murtha, 1978; Knipling, 1970).



**Figura 1.5.**

Firma Espectral de la Vegetación Vigorosa (de Molina, 1984).



Zona Laguna Conchalí, Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## Objetivos del Estudio

Determinar la variación estacional del estado de la vegetación azonal de la laguna de Conchalí y plantaciones forestales del sector de Los Vilos, por medio de patrones espectrales provenientes imágenes hiperespectral de invierno y verano.

## Metodología

### Toma de Imágenes

Se utilizó el sensor aerotransportado AISA EAGLE de la compañía Finlandesa Specim Inc. instalado sobre una plataforma aérea. Este sensor abarca desde los 0.4 a los 0.97  $\mu\text{m}$  del espectro electromagnético con una resolución espectral de hasta 256 bandas y resolución espacial 1 m., manteniendo una altura de vuelo de 1500 m. El sensor va acompañado de un sistema GPS diferencial el cual en forma automática georreferencia la imagen asociando así cada pixel a una coordenada específica. Finalmente como una forma de corregir los diferentes movimientos que puede presentar el avión en su traslado y poder ortorrectificar la imagen es que éste equipo va unido a una Unidad de Medida Inercial (IMU) el cual corrige la oscilación propia del avión en vuelo (Figura 2.1.).

**Figura 2.1.**

Sensor hiperespectral Aisa y esquematización del vuelo.



Con los datos obtenidos por el GPS y el IMU a bordo del avión, como resultado se obtiene una imagen representativa, ortorectificada y georreferenciada. Se realizaron dos vuelos en invierno 2009, en el mes de Agosto, y verano 2010, en el mes de Enero. Con el fin de poder hacer un análisis temporal en la vegetación del área.

Todas las imágenes poseen resolución:

- espectral 128 bandas.
- espacial 1 m.
- radiométrica 12 bits.
- temporal 6 meses.

### Área de estudio

La toma de imágenes hiperspectrales se realizó en dos líneas de vuelo, de 500 m. de ancho con un traslape del 25%, para abarcar las dos áreas de estudio: el humedal Santuario de la Naturaleza Laguna Conchalí y la Plantación Forestal de Eucaliptus globulus (LABILL) sector Ex INIA, ubicadas en la comuna de Los Vilos, IV región, (Figura 2.2.).



**Figura 2.2.**

Imagen oblicua que muestra el trazado de las líneas de vuelo en el Área de estudio.

## Descripción Santuario de la Naturaleza Laguna Conchalí

Los humedales del centro-norte de Chile poseen una biodiversidad de importancia regional en América Latina. Sin embargo, se encuentran fuertemente deteriorados y en peligro, por lo que su conservación es prioritaria a escala regional. En particular, los 12 humedales de la Región de Coquimbo tienen un alto valor para la conservación de la biodiversidad local, debido a que abastecen la fauna en un área de alta aridez. Entre ellos, se encuentran las bahías de Coquimbo, Guanaqueros, Tongoy, la desembocadura del río Limarí, y los esteros Cebada, Conchalí y Quilimarí (Tabilo et al. 2001).

En esta región el Sistema de Áreas Protegidas del Estado, incluye cuatro áreas de protección, aunque ninguna de ellas constituye un humedal. La protección de las zonas húmedas en esta Región se reduce al Santuario de la Naturaleza Laguna Conchalí (Los Vilos, Provincia del Choapa), la cual se encuentra protegida por Minera Los Pelambres.

La laguna de Conchalí es un humedal costero que posee un alto valor ecológico, dado que es un elemento representativo de los humedales costeros de la zona mediterránea de Chile Central (Ramsar 2004). Según la estrategia y plan de acción de biodiversidad IV región de Coquimbo, se establece sitios prioritarios de conservación en condición urgente al humedal de la laguna de Conchalí, esta laguna de tipo salobre es un área de parada de rutas migratorias de aves neotropicales e interhemisfericas, además de ser una zona de alto endemismo, riqueza y diversidad de especies, además de encontrarse con Fauna en Peligro de Extinción (Conama 2002).

Este humedal está asociado a una dinámica semiárida, es un sistema léntico de alimentación mixta: Continental (fluvial) y Litoral (mareas). La laguna recibe agua dulce desde un estero, presentando dinámicas interanuales variables en su contacto con el mar. Es así que durante periodos de alta precipitación la barrera litoral se inunda y la laguna se convierte en un estuario.

En término de su flora el humedal de Conchalí presenta marismas cubiertas principalmente por el pasto *Distichlis spicata*, el arbusto enano halófilo *Frankenia salina* y *Sarcocornia peruviana*. El paisaje se complementa con dunas costeras, pajonales, matorral estepario costero y matorral costero arborescente, este último de alta prioridad de conservación.

De acuerdo a lo señalado en la RCA N° 38, minera Los Pelambres desarrollará un “Plan Integral de Seguimiento y Monitoreo para el Proyecto Integral de Desarrollo”, el cual para la componente suelo en Punta Chungo considera actividades que apuntan a dar cumplimiento a los siguientes objetivos:

### **Descripción Plantación de *Eucalyptus globulus* (LABILL) Ex INIA**

De acuerdo a lo señalado en la RCA N° 38, minera Los Pelambres desarrollo un “Plan Integral de Seguimiento y Monitoreo para el Proyecto Integral de Desarrollo”, en los sectores plantados con la especie *Eucalyptus globulus* al aplicar como riego, el efluente de la Planta FAD, lo que forma parte del sistema de disposición de este residuo industrial líquido a través del método de evapotranspiración. El objetivo del seguimiento y el monitoreo apuntan a:

- Efectuar un seguimiento de la salinización del suelo al aplicar como riego el residuo industrial.
- Cuantificar las concentraciones de macro y microelementos presentes en los suelos sometidos a riego, y establecer las características y dinámica de los componentes fundamentales del suelo.
- Evaluar la calidad del agua del efluente de la Planta FAD (piscina de acumulación).
- Evaluar la absorción de elementos por la especie arbórea *Eucalyptus globulus*, y su potencial impacto sobre estos.

Los suelos del sector Ex INIA, sometido a riego con aguas de la piscina de acumulación, potencialmente podrían modificar las características fisicoquímicas del suelo y por ende afectar la vegetación circundante. Hasta la fecha el plan de seguimiento y monitoreo del sector, comprende hasta la fecha, doce campañas de muestreo desarrolladas entre el periodo junio de 2004 y octubre de 2009, dando cuenta de la dinámica de los suelos y sus potenciales efectos al ser sometidas a riego utilizando RILes de actividades mineras. Detectando metales como cobre y molibdeno con una dinámica temporal en las calicatas analizadas, de aumento o disminución de sus concentraciones en el tiempo, lo que puede deberse a la extracción de estos elementos por las plantas sustentadas en estos suelos, ó bien por el aporte de estos elementos desde aguas de riego con contenidos metálicos, además de la heterogeneidad propia de los suelos medidos. Además al aumentar o disminuir el pH de las aguas, el estado de oxidación de los metales varía, alcanzando condiciones de mayor o menor estabilidad, variando su disponibilidad para la biota. Al disminuir el pH de las aguas, aumenta la disponibilidad de algunos metales, debido a que disminuye la estabilidad en los suelos. Sin embargo, las condiciones del agua se ven afectadas por las características de los suelos regados.

Una evaluación integral de las matrices analizadas, mostró para cobre valores superiores en las hojas respecto las registradas en la fracción disponible de los suelos de un mismo sector, pudiendo estar acumulándose en la parte aérea de los eucaliptus, lo que evidenciaría que esta especie arbórea es un adecuado extractante de cobre desde los suelos. En cuanto a molibdeno, se observó una disminución de concentración. Por otra parte, el aporte de sodio desde aguas de riego con altos contenidos salinos, afecta directamente la zona aérea de los eucaliptus con concentraciones muy superiores a las registradas en suelos de un mismo sector. Este hecho podría estar afectando las plantaciones provocando la necrosis de las hojas de eucaliptus, además de cambiar las propiedades del suelo como infiltración y porosidad, debido a las propiedades dispersantes del sodio sobre las partículas de suelo, compactándolo y formando costras impidiendo el escurrimiento vertical del agua.

### Procesamiento de las imágenes

Mediante el software ENVI 4.4., se realizó una corrección radiométrica utilizando la extensión Caligeo. Además se realizó una co-registración con coordenadas una imagen Quickbird II.

Se realizaron los siguientes análisis:

- a) Vigoridad con NDVI (*The Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice se relaciona con la biomasa, conocido el tipo de vegetación, o con su vigor, y para su cálculo se utiliza las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Las áreas de alto vigor (densidad vegetal) poseen una mayor reflectividad en las bandas infrarrojas cercanas y menor en las rojas. Los valores entregados por esta relación varían entre -1 y 1. Si el valor se acerca a 1 está indicando una vegetación vigorosa y sana, los valores cercanos a cero se relacionan con suelo fraccionado a desnudo, valores negativos generalmente corresponden a nubes o cuerpos de agua. Mediante el empleo de este índice podemos identificar diferentes grados de cobertura vegetal. El índice se calcula utilizando la siguiente ecuación (Kalacska y Sánchez-Azofeifa, 2008):

$$NDVI = (R900 - R679)/(R900+R679)$$

b) Contenido de agua en el dosel WBI (*Water Band Index*): a medida que el contenido de agua aumenta se incrementa la absorción alrededor de los 900 a 970 nm, es por ello que la ecuación que lo define utiliza la siguiente relación (Kalacska y Sánchez-Azofeifa, 2008):

$$WBI = R900/R970$$

c) Pigmentos foliares SIPI (*The Structure Insensitive Pigment Index*): este índice utiliza la relación de la respuesta espectral de los carotenoides y la clorofila de la vegetación. Un incremento de este índice indica estrés en el dosel. Se utiliza para monitoreos de estado de salud de vegetación y producción agrícola principalmente. La ecuación que lo define es la siguiente (Kalacska y Sánchez-Azofeifa, 2008):

$$SIPI = (R800-R445)/(R800-R689)$$

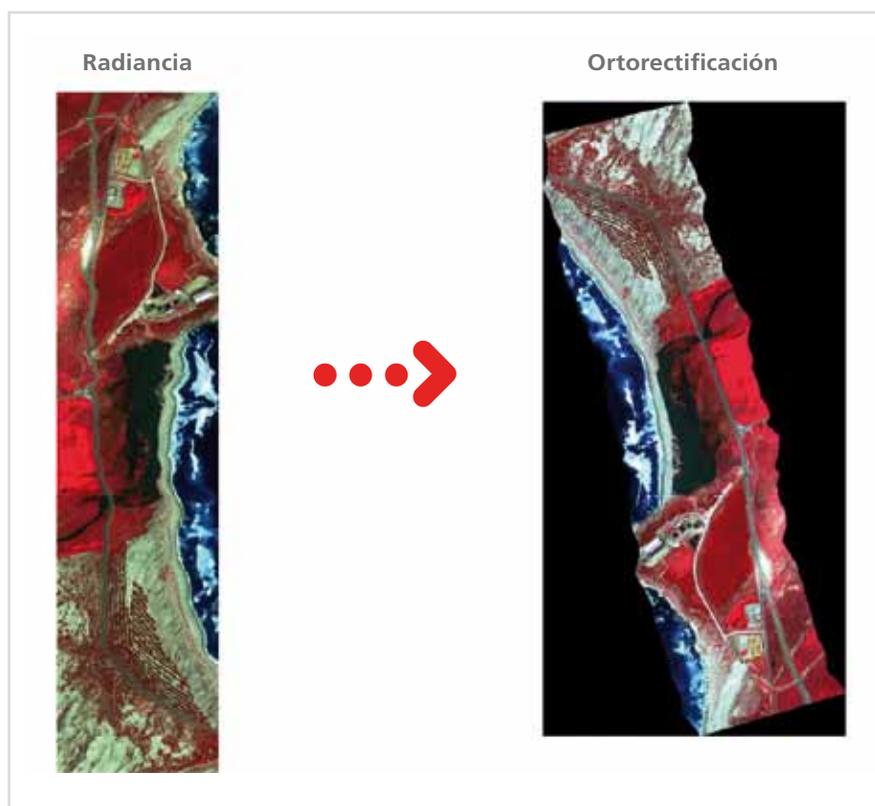
d) Además de la herramienta de salud forestal incorporada en el programa ENVI 4.4., que está determinada en función de tres índices de vegetación: índices de vigor, índices de agua en la canopia e índices de pigmentos en la hoja (Carotenos, antocianos), que permiten representar espacialmente la sanidad del cultivo.



Zona Laguna Conchalí, Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## Resultados

Mediante las herramientas del software ENVI 4.4 y los datos del IMU colectados durante el vuelo, se realizaron las correcciones radiométricas y geométricas de todas las imágenes (figura 3.1).



**Figura 3.1.**

Proceso de Corrección de una línea de vuelo

Al visualizar el área próxima a la Laguna de Conchalí, es evidente que existe un efecto en la vegetación provocado por el cambio estacional entre invierno y verano (Figura 3.2. combinación color real), donde las zonas con disminución de agua presentan fuertes cambios en la vegetación.

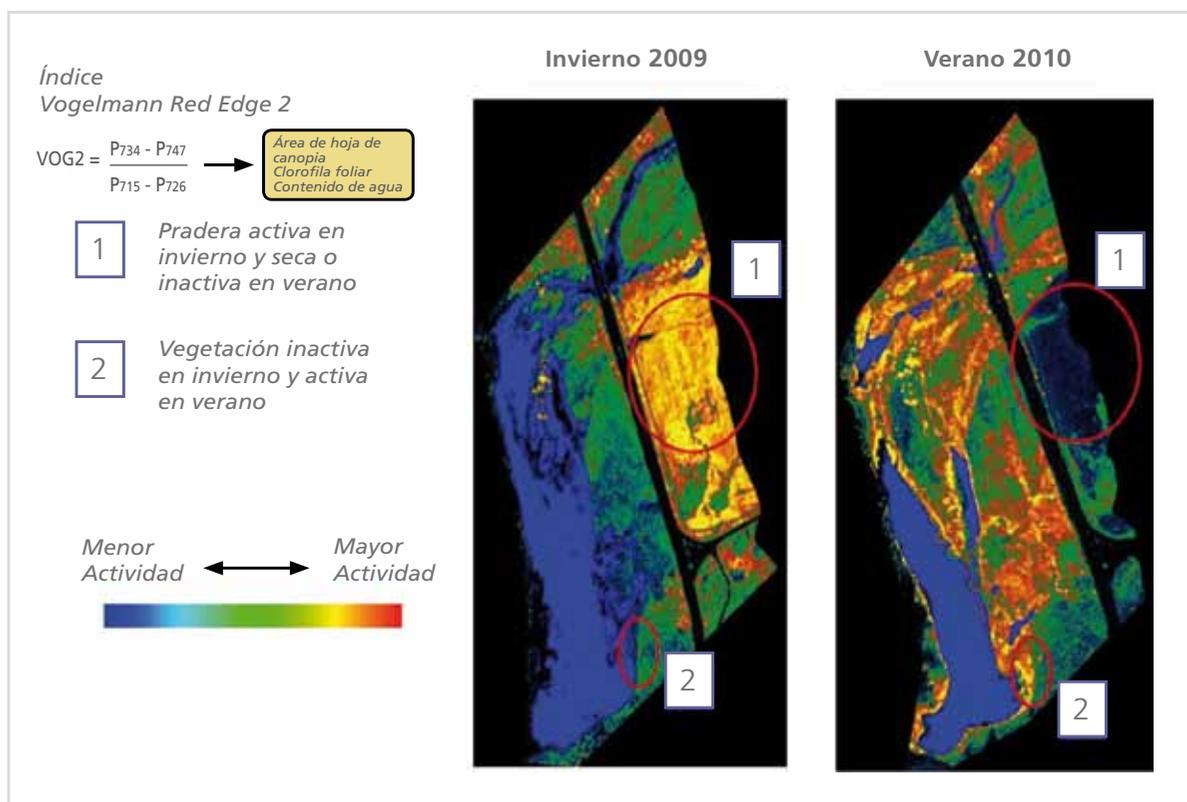


**Figura 3.2.**

Área Laguna Conchalí en invierno y verano.

El cambio visualizado en la figura anterior, se potencia al analizarlo mediante el índice de Vogelmann Red Edge 2 (Figura 3.3), el cual permite identificar el estado de la actividad de la vegetación. En el punto 1, se puede identificar una zona de pradera natural, que en Agosto se encuentra cercana a la máxima actividad, en cambio al secarse en verano esta área pierde casi por completo la actividad tendiendo a convertirse en suelo desnudo. En el punto 2, al igual que en todos los bordes de la laguna, la disminución en el nivel freático activa el crecimiento de vegetación (mayor actividad del índice en época estival).

Además el índice permite identificar con claridad el cambio en la superficie de agua de la Laguna, que en Agosto de 2009 tenía una superficie de 21.9 ha y en Enero de 2010 de 7.5 ha, lo que significa que en ese período disminuyó en un 66% su capacidad.



**Figura 3.3.**

Análisis Temporal del índice Vogelmann Red Edge 2 en el Sector Laguna Conchalí.

Respecto al Análisis de índices utilizados en la zona de la Plantación Forestal de Eucaliptus globulus (LABILL) sector Ex INIA, el área de estudio se acoto a una superficie de 10.6 ha (Figura 3.4).

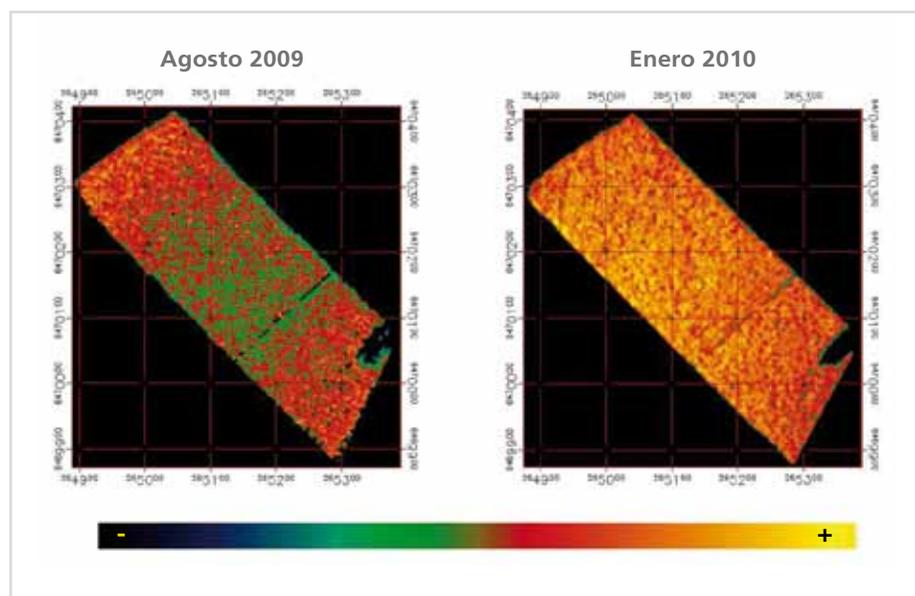


**Figura 3.4.**

Plantación ex INIA, área analizada en polígono rojo.

Los resultados por índice indican lo siguiente:

**Análisis espacial de vigor:** se utilizó un índice de banda estrecha NDVI705 (Figura 3.5.), diseñado para proporcionar una medida de la cantidad y calidad de material fotosintético de la vegetación, que es esencial para comprender el estado de la vegetación. Hacer mediciones de bandas estrechas permite obtener una mayor sensibilidad para detectar cambios más pequeños en salud de la vegetación en comparación con los índices de bandas anchas, especialmente en condiciones de densa vegetación, donde estas últimas se pueden saturar.



**Figura 3.5.**

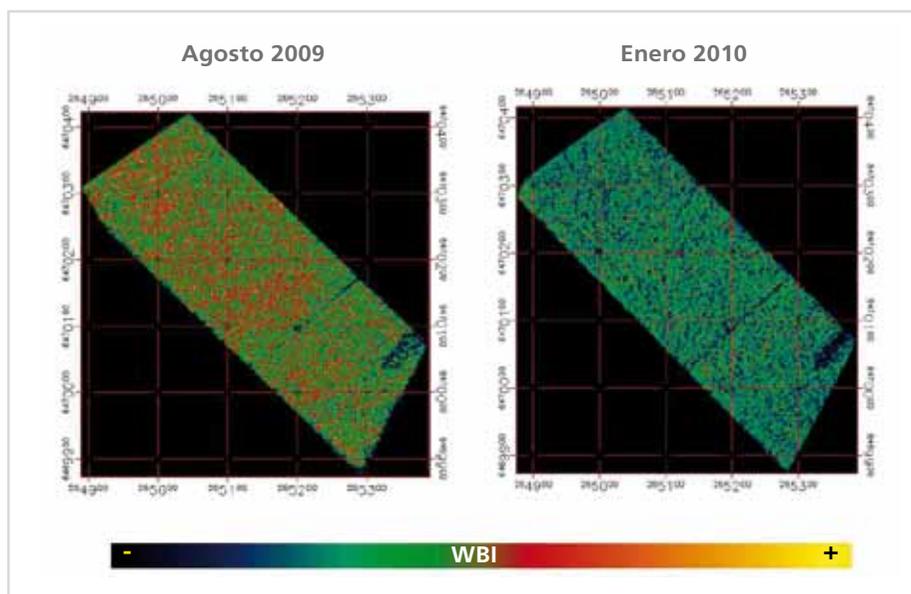
Diferencia de vigor mediante el índice NDVI705 entre agosto 2009 y enero 2010

En relación al comportamiento espacial del vigor en la plantación de eucalipto, éste se vio alterado en la imagen de invierno ya que había llovido recientemente, y tal como lo señala la literatura del índice, esto conlleva a valores negativos.

La zona central del área de estudio presenta un cultivo menos denso, que también influye en los valores de la imagen de invierno, estado que cambia en verano por el aumento de sotobosque. Por otra parte, en la imagen de verano se cubre de vegetación vigorosa lo que se relaciona directamente con el cambio en el follaje del eucalipto.

**Análisis espacial del estatus hídrico:** se obtiene mediante un índice de contenido de agua, los cuales están diseñados para proporcionar una medida de la cantidad contenida en el dosel de follaje. Aquí se utiliza principalmente el Water Band Index (WBI) (Figura 3.6.). En esta imagen se puede apreciar claramente que el contenido de agua en la hoja es mayor durante agosto 2009, debido a presencia de lluvias invernales, registradas dos días

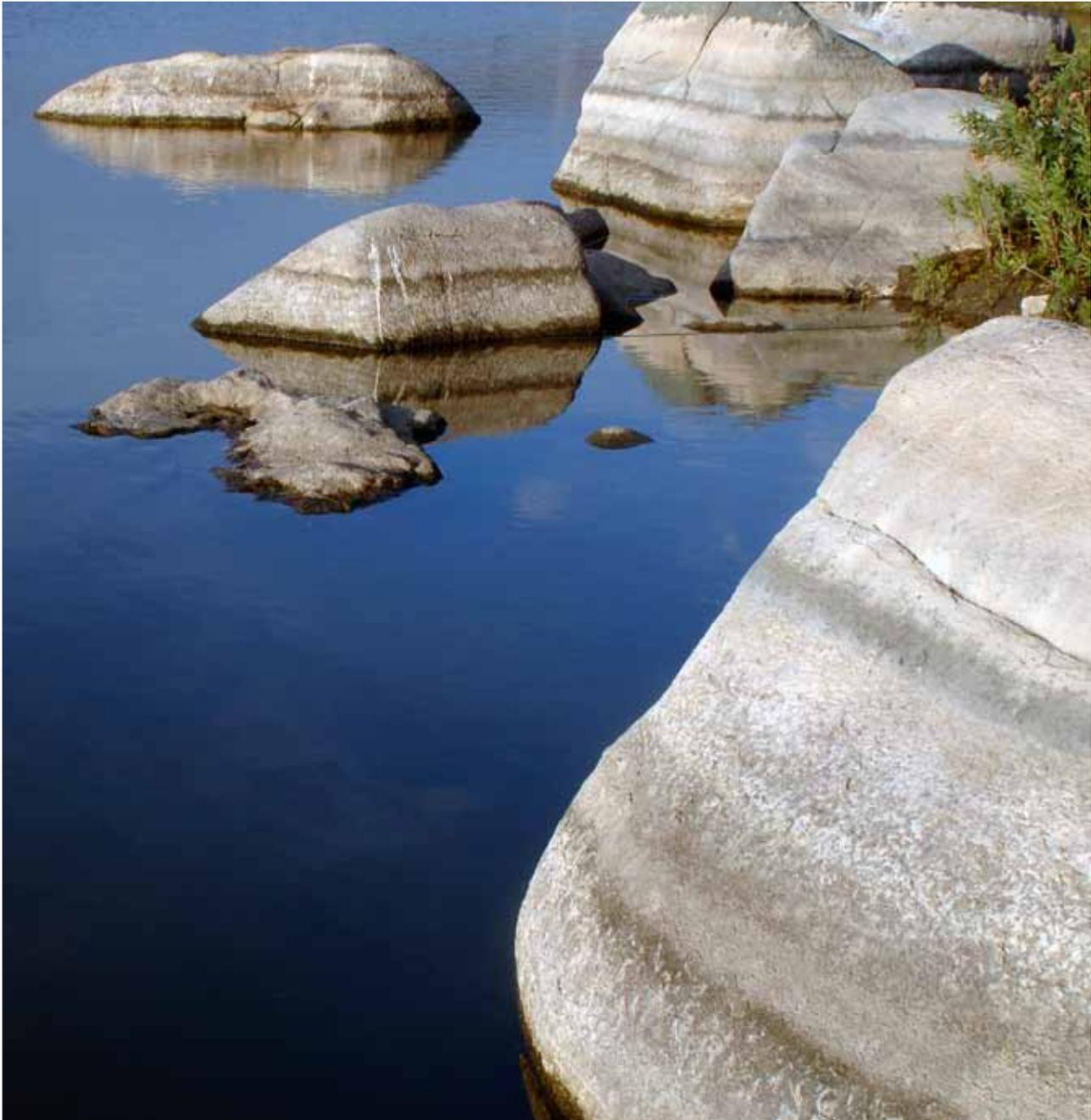
anteriores al vuelo. En este caso los factores de humedad ambiental pueden alterar significativamente el comportamiento del índice teniendo mayores posibilidades de que este capture la humedad en primavera-verano debido al cambio de follaje de la especie, pudiendo esperar valores más altos en Enero que en Agosto, en el caso que las condiciones climáticas fuesen similares.



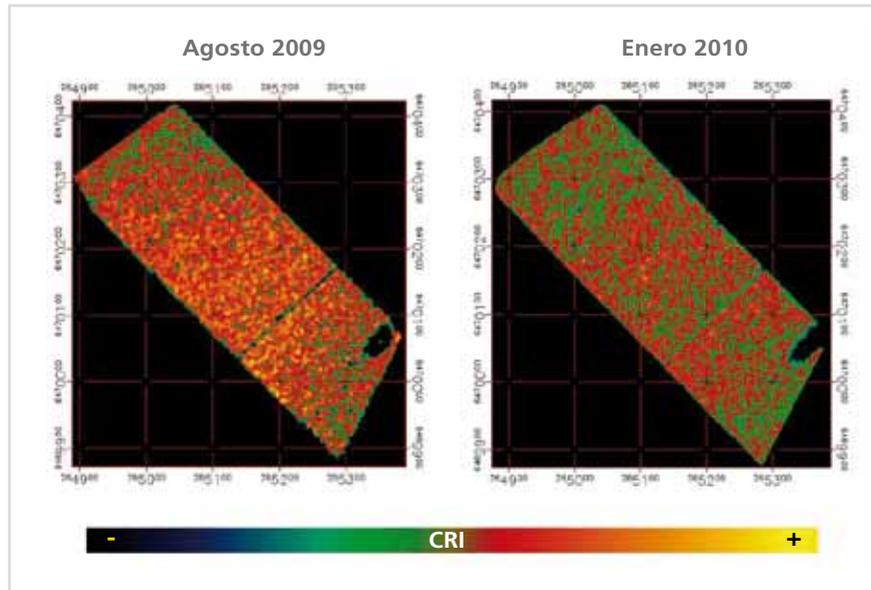
**Figura 3.6.**  
Water Band Index (WBI)

**Análisis espacial de la sanidad del cultivo:** Se realiza mediante el estudio de índices de pigmentos foliares tales como antocianinas y carotenos que permite establecer zonas de estrés. Índices asociados Carotenoid Reflectance Index (CRI), Anthocyanin Reflectance Index (ARI) y Plant Senescence Reflectance Index (PSRI).

Durante la temporada invernal se aprecia un mayor contenido de carotenos en la zona central de la plantación, lo que concuerda con el vigor detectado con el NDVI indica que esos sectores presentan mayor senescencia de hojas lo que trae aparejado la disminución del vigor.



Zona Laguna Conchalí, Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.



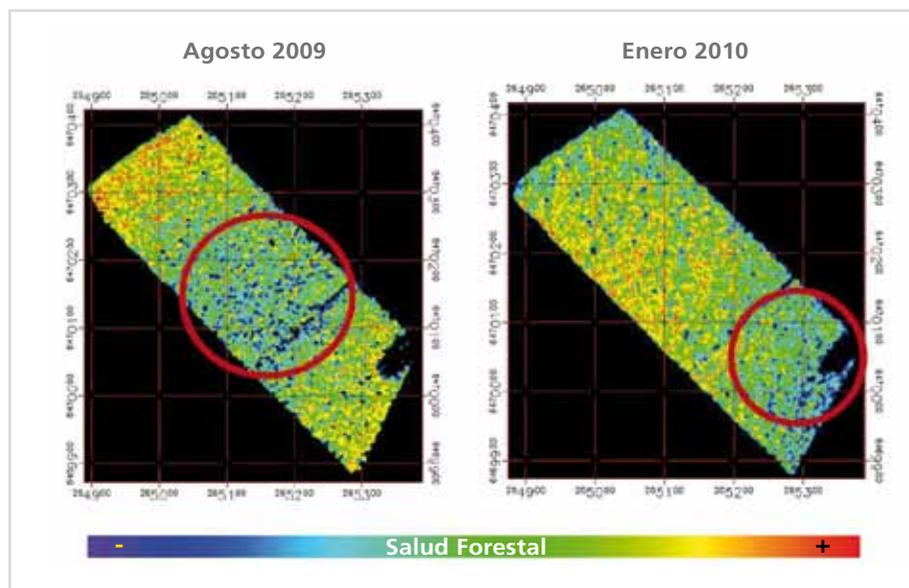
**Figura 3.7.**

Carotenoid Reflectance Index (CRI).

Distinto es el caso de la imagen de verano donde la disminución de los carotenos coincide plenamente con el aumento del vigor en la plantación. Se debe poner atención a zonas medias en enero de 2010 ya que estas presentan áreas con alto contenido en pigmentos de la senescencia pese al cambio de de follaje en el eucalipto (Figura 3.7.).

**Análisis espacial de Salud Forestal (ENVI):** Esta herramienta está determinada en función de los tres índices antes señalados (NDVI, WBI, CRI) que permiten representar espacialmente la sanidad del cultivo.

Respecto a este índice la imagen invernal evidencia un decremento de salud en la plantación, dado principalmente por el menor vigor y el mayor contenido de carotenos. Durante el periodo estival se aprecia un comportamiento más estable, excepto en las orillas de camino y el área sur-este de suelo desnudo (Figura 3.8.).



**Figura 3.8.**  
Salud Forestal

Finalmente en los índices calculados, el comportamiento del *Eucaliptus globulus* se ve afectado por factores que estresan a la plantación en zonas específicas, al centro y en la esquina sur-este. Al relacionar el análisis espectral con la evaluación realizada en terreno, queda en evidencia el impacto que provoca el riego con el residuo industrial, en donde se detectó que la acumulación del cobre, el molibdeno y sodio provenientes del riego se están acumulando en la parte aérea de los árboles, lo que evidenciaría que esta especie arbórea es un adecuado extractante de minerales desde los suelos, mayoritariamente cobre.

Este hecho podría estar afectando las plantaciones provocando la necrosis de las hojas de eucalipto, además de cambiar las propiedades del suelo como infiltración y porosidad, debido a las propiedades dispersantes del sodio sobre las partículas de suelo, compactándolo y formando costras impidiendo el escurrimiento vertical del agua. Situación que se acentúa en el invierno según lo registrado en los índices analizados.

## Discusión

Nuestro país presenta una fisonomía llena de contrastes, a pocos kilómetros de distancia se nos presentan disparidades físicas en los territorios, que generan particularidades vegetativas de gran valor. Por esta razón es fundamental la importancia que tienen las firmas espectrales que proveen las bases para la discriminación y la descripción de todas las coberturas terrestres, su variabilidad espacial y sus cambios en el tiempo. En Chile aún no se cuenta con catálogos de este tipo de patrones, lo cual dificulta su aplicación práctica en las labores de evaluación y seguimiento de los recursos naturales.

Establecer correlaciones entre procesos fisiológicos y respuestas espectrales, identificar fenología de plantas, correlacionando productividad y calidad, establecer métodos de alerta temprana frente a riesgos naturales como plagas e incendios, son desafíos que requiere profundizar continuamente el análisis de la información obtenida con el sensor hiperespectral y que prontamente serán parte de la gama de herramientas de análisis espacial, aumentando la disponibilidad de herramientas adecuadas a la realidad nacional.

Conocer el estado de la vegetación de forma precisa, estudiar de forma sencilla y rápida recursos como bosques y aguas, analizar suelos contaminados o detectar si hay presencia de algas en la desembocadura de los ríos, son actividades que empresas y científicos realizan de forma habitual para mejorar la producción y conservación de nuestros recursos naturales. Evaluar la salud de los cultivos, las condiciones potenciales de suelo y aguas, detectar enfermedades en los bosques, valorar los sitios afectados por incendios forestales o realizar análisis y seguimientos de zonas contaminadas son actividades fundamentales para la correcta gestión de los espacios naturales de un país.

Si bien estas tareas pueden realizarse mediante procedimientos sobre el terreno, éstos se ven limitados y encarecidos en superficies extensas y de difícil acceso.

La percepción remota ofrece la alternativa más eficaz de gestionar y analizar grandes extensiones con la máxima precisión. Esta disciplina científica permite obtener información de un elemento mediante la detección y análisis de la energía que radia a través de diferentes longitudes de onda, pudiendo identificar y caracterizar los distintos elementos que componen la cobertura terrestre.

La cantidad y calidad de información que puede ser extraída de estos elementos depende principalmente del ancho del levantamiento espectral que puede medir el sensor remoto que detecta su energía radiada. Con el avance de la tecnología, los sensores remotos han incrementado su resolución espectral y espacial. El último paso en esta materia es la combinación de sensores hiperespectrales, que permiten medir la energía en numerosas unidades dentro de cada banda espectral y a la vez detectar radiación desde elementos muy pequeños. El resultado permite extraer una información mucho más completa y específica. Hasta el momento, las imágenes hiperespectrales se han aplicado en estudios cartográficos y de caracterización de los recursos naturales. Gracias a la última tecnología desarrollada, la aplicación de estas imágenes permite ir mucho más allá y determinar de forma más detallada estados vegetacionales, identificar fuentes termales, analizar suelos contaminados o detectar vertederos incontrolados.

En este rumbo la gestionar los recursos naturales de un país o región es una tarea de enorme importancia. Contar con las herramientas que permiten hacer de esta gestión algo más fácil y preciso es, sin duda, la mejor vía para sacarle el máximo rendimiento a nuestros recursos naturales a la vez que los conservamos.

## Conclusión

Gran parte de las zonas silvestres protegidas existentes carecen de información básica como riqueza y abundancia de especies, y de monitoreos que indiquen como fluctúan los cambios a través del tiempo (Mares 1986). Monitoreos periódicos son necesarios para poder detectar cambios en las dinámicas del territorio y tomar medidas que favorezcan la conservación de la biodiversidad.

Los resultados obtenidos permiten aseverar que los patrones espectrales provenientes de una imagen hiperespectral pueden indicar en forma precisa el vigor de la vegetación y su estado hídrico. Las múltiples bandas de una imagen hiperespectral pueden proporcionar mayor información que aquella entregada por sensores multispectrales, indicando incluso los motivos de este estrés. Conocer rápidamente si las plantaciones sufren por falta de agua, ataque de insectos o déficit de fertilizantes es vital para gestionar y mejorar las condiciones de productividad de los cultivos.



Zona Laguna Conchalí, Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## Bibliografía

**Chuvieco, E. 1996.** Fundamentos de Teledetección Espacial. Ed. Rialp S.A. 3era edición, Madrid, España.

**Conel, J. E., R. O. Green, G. Vane, C. J. Bruegge, R. E. Alley, and B. J. Curtiss, 1987,** Airborne imaging spectrometer-2: radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere: in Proceedings, SPIE, v. 834, p. 140-157.

**Colwell, J. 1974.** Vegetation canopy reflectance. Remote Sensing of Environment, vol 3. Pp. 175-183.

**Curran, P. 1980.** Remote Sensing systems for monitoring crops and vegetation. Progress in Physical Geography, vol 4, pp. 315-341.

**De Jong, S. & Van der Meer, F. 2004.** Remote sensing image analysis: including the spatial domain. Dordrecht: Springer-Kluwer Academic Publishers.

**Gates, D.; Keegan, H.; Schleter, J. y Weidner, V. 1965.** Spectral properties of plants. Applied Optocs, vol 4, pp. 11-20.

**Goetz, A. F. H., and V. Srivastava, 1985,** Mineralogical mapping in the Cuprite Mining District, Nevada: in Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, JPL Publication 85-41, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, p. 22-29

**Gomez. 2004.** Métodos de Clasificación Aplicados al reconocimiento de Campos de Cultivos a partir de imágenes hiperespectrales. Dissertation.com. Universidad de Valencia, Valencia, España.

**Harris, J.; Murray, R. y Hirose, T. 1990.** HIS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 56, pp 1631-1641

**Hernández, J. 2009.** Patrones de Respuesta Espectral. En: Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al estudio y Gestión del Territorio (Cap. 3). Ed. Carlos Mena. Ediciones SAF.

**Hernández, J. 2007.** Percepción Remota. En: Manejo y Conservación de Recursos Forestales (Cap. 3.1). Editorial Universitaria, 771 p.

**Inoue, Y., Peñuelas, J., Miyata, A., Mano, M. 2008.** Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO2 flux measurements in rice. *Remote Sensing of Environment* 112 (2008) 156–172

**Jensen, J. 1983.** Biophysical remote sensing, *Annals of the Association of America Geographers*, vol 73, pp. 111-132.

**Kalacska, M; Sánchez-Azofeifa, G. 2008.** *Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-tropical Forest*. Ed. Taylor & Francis Group.

**Knipling, E. 1970:** Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 1, pp. 155-159.

**Kruse, F. A., K. S. Kierein-Young, and J. W. Boardman, 1990,** Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63 channel imaging spectrometer: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 56, no. 1, p. 83-92.

**Kruse, F. A., 1988,** Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California: *Remote Sensing of Environment*, v. 24, no. 1, p. 31-51.

**Kruse F. A., G. L. Raines, and K. Watson, 1985,** Analytical techniques for extracting geologic information from multichannel airborne spectroradiometer and airborne imaging spectrometer data: in *Proceedings, 4th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), Ann Arbor, p. 309-324.

**Lamb, D. 2000.** *Vineyard Monitoring and Management Beyond 2000 Precision Viticulture* Vineyard monitoring and management beyond 2000 – Wagga Wagga.

**Lush, D. 1989.** Fundamental considerations for teaching the spectral reflectance characteristics of vegetation, soil and water, en Current Trend in Remote Sensing Education (M.D: Nellis, R. Lougeay y K. Lulla, Eds.), Geocarto International Centre, Hong Kong, pp. 5-2.

**Mares, Ma. 1986.** Conservation in South America: Problems, consequences, and solutions, Science 233:734-739.

**Molina, Isabel C. de. 1984.** "Fotointerpretación de Bosques Manejados", Centro Interamericano de Fotointerpretación, Unidad de Ingeniería Forestal y Ecología, Bogotá.

**Moreno, J.; Alonso, L.; González, M.; García, J.; Cuñat, C.; Montero, F; Brasa, A; Botella, O.; Zomer, R.; Ustin, S. 2001.** Vegetation Properties from Imaging Data Acquired at Barrax in 1998, 1999 and 2000. The Digital Airborne Spectrometer Experiment (DAISEX), Proceeding of the Worldshop held July, 2001. Edited by M. Wooding and R.A. Harris. European Space Agency, ESA SP- 499, 197 p.

**Murtha, P. 1978.** Remote Sensing and vegetation damage: a theory for detection and assessment, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44, pp. 1147-1158.

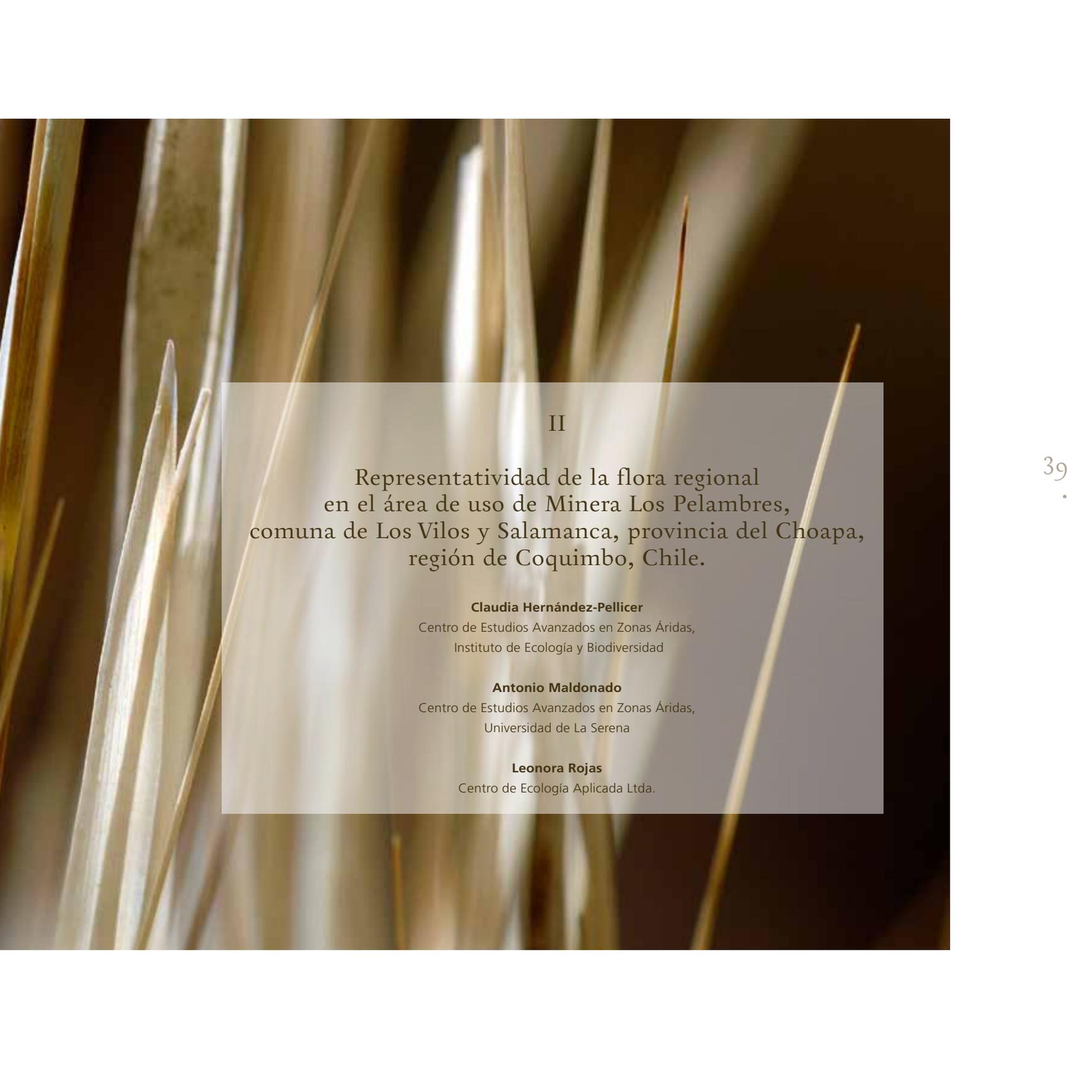
Randall, S. 2001 Introducción a imágenes hiperespectrales. Microimagenes Inc. Lincoln, Nebraska .

**Roberts, D. A., Y. Yamaguchi, and R. J. P. Lyon, 1985,** Calibration of Airborne Imaging Spectrometer data to percent reflectance using field measurements: in Proceedings, Nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, MI, October 21-25, 1985.

**Tabilo, E. y Pulido, V 2001.** Costa del Perú y Norte de Chile. Diagnóstico de los humedales de América del Sur. Wetlands International. <http://www.wetlands.org/saa> Cap. 19.

**Zarco-Tejada, P. Miller, J.R., Mohammed, T.H. Canadá, 1999.** Índices ópticos obtenidos mediante datos hiperespectrales del sensor CASI como indicadores de estrés en zonas forestales.





II

Representatividad de la flora regional  
en el área de uso de Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa,  
región de Coquimbo, Chile.

**Claudia Hernández-Pellicer**

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas,  
Instituto de Ecología y Biodiversidad

**Antonio Maldonado**

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas,  
Universidad de La Serena

**Leonora Rojas**

Centro de Ecología Aplicada Ltda.

## Introducción

La región de Coquimbo se ubica geográficamente entre la zona mediterránea de Chile central y la zona árida del norte de Chile (Miller 1976), esta ubicación le otorga un carácter de transición, tanto climática como florística, siendo un ecotono entre las últimas formaciones boscosas esclerófilas de Chile Central y las formaciones áridas de matorrales, suculentas, bulbosas y anuales que caracterizan la flora del desierto de Atacama (Fuenzalida 1965, Villagrán et al. 1983). Dentro de la región de Coquimbo se encuentra poco más del 30% del total de la flora vascular de Chile continental y, dentro de las especies nativas presentes en la región, una gran proporción son endémicas, es decir, solamente existen naturalmente en Chile (Squeo et al., 2001a; 2001b).

La pérdida de biodiversidad es el impacto más evidente y directo generado por la transformación de las principales coberturas naturales (Aguayo et al. 2009).

El nivel de endemismo que presenta la flora de un lugar es importante, considerando que las especies endémicas, que presentarían distribuciones más restringidas, serían las más afectadas por las perturbaciones antrópicas, por ejemplo cambio de uso del suelo.

Pese a este alto valor de endemismo, en la región de Coquimbo existen solo 4 áreas protegidas del SNAPE (Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado), Parque Nacional Bosque de Fray Jorge, Reserva Nacional Pingüino de Humboldt, Reserva Nacional Las Chinchillas y Monumento Natural Pichasca, diversos antecedentes científicos indican que el nivel de protección de la biodiversidad del país es aún insuficiente (Muñoz et al., 1997). Atendiendo a esta situación, en el Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo (Squeo et al. 2001), se proponen 91 sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad vegetal de la región, 28 de los cuales se encuentran en la provincia del Choapa (Squeo et al. 2001c). A su vez, dos de estos sitios se encuentran dentro del área de influencia de Minera Los Pelambres, estos son El Mauro, incluido en el listado debido a la presencia de especies representantes del bosque esclerófilo como Peumo (*Cryptocarya alba*), Canelo (*Drimys winteri*), Quillay (*Quillaja saponaria*), Boldo (*Peumus boldo*) y Lilén (*Azara sp.*) y Quebrada Chellepín (área protegida por Minera Los Pelambres) por la presencia de Olivillo (*Kageneckia angustifolia*) y Quillay (*Quillaja saponaria*) en la parte baja de la quebrada.

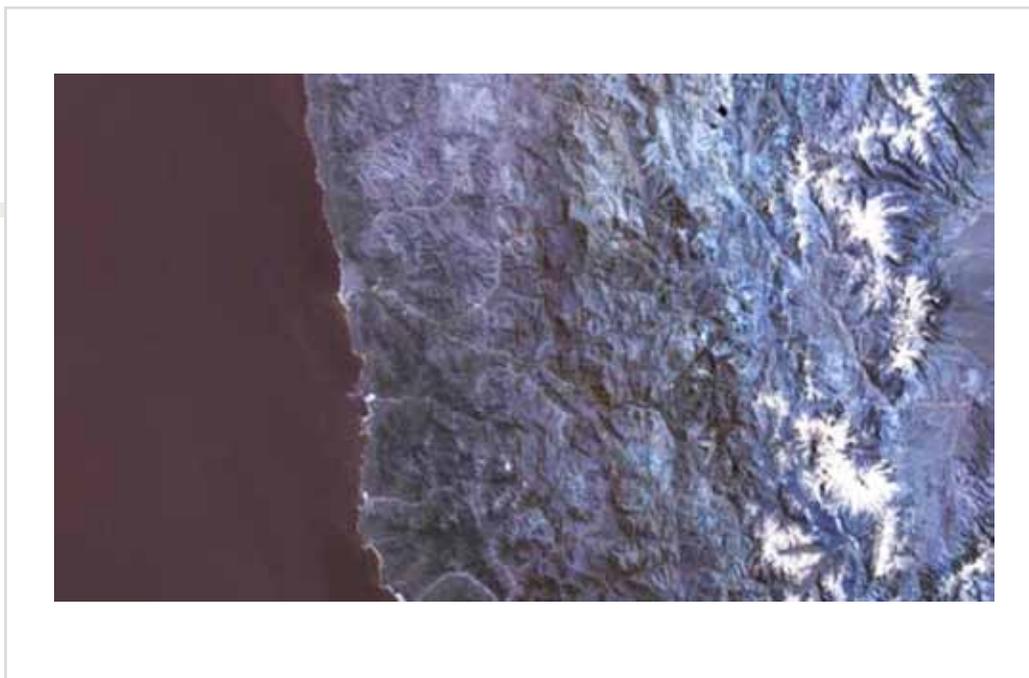
La conservación y usos sustentable de la biodiversidad es uno de los mayores desafíos que enfrentamos, considerando que un gran número de estudios científicos han señalado que la sustentabilidad ecológica del planeta depende de la biodiversidad (Arroyo et al. 2003). El conocer la representación de la flora en el área de influencia de Minera Los Pelambres es de gran utilidad a la hora de priorizar sectores para la conservación de la biodiversidad y para hacer un uso sustentable de estos sectores.

El objetivo de este trabajo es analizar la representatividad y singularidades de la flora presente en dos áreas de uso de Minera Los Pelambres con respecto de la diversidad florística presente en toda la región de Coquimbo.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El área incluida en este estudio comprende la zona de explotación de Minera Los Pelambres ubicada en la cordillera de la región de Coquimbo (Comuna de Salamanca) y sector El Mauro en la zona de interfluvios (Comuna de Los Vilos), abarcando un intervalo altitudinal que va desde los 1.000 a los 3.500 msnm. Se comparó la representación de la flora del área de intervención de Minera Los Pelambres, en ambos sectores respecto a la flora regional. La base de datos de la flora regional se obtuvo del Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo (Squeo et al., 2001), mientras que la base de datos del área de intervención de Minera Los Pelambres se obtuvo de los estudios de impacto ambiental y de los monitoreos de flora que se realizan periódicamente.



### Análisis de los datos

Con la información disponible se realizó la clasificación de la flora respecto a su representación taxonómica considerando número de familias, número de géneros y número de especies. También se analizó el origen, estado de conservación y forma de vida de las especies. Las categorías de origen consideradas fueron: nativa cuando la especie ha crecido naturalmente en el país desde antes de la colonización hispana a Chile, nativa no endémica si la especie es nativa pero además crece naturalmente en otros países, nativa endémica si la especie es nativa y solo crece naturalmente en Chile y adventicia cuando la especie es introducida en el ambiente natural (traída de otros países). Las categorías para el estado de conservación son las que considera la literatura (Benoit, 1989, Squeo et al., 2001, Squeo et al., 2008), mientras que las categorías de formas de vida obedecen a la misma clasificación utilizada en el Libro Rojo de la Flora Nativa y los sitios Prioritarios para su Conservación de la Región de Coquimbo (Squeo et al., 2001)



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## Resultados

### Representación Taxonómica

El total de especies de plantas vasculares registradas tanto en el sector Mina, como en El Mauro, corresponde a 164 y 370 respectivamente, distribuidas en 102 géneros y 44 familias en el sector Mina y 237 géneros y 79 familias en el sector de El Mauro (Tabla 1). En comparación al total de la flora regional esto corresponde a cerca de un 30% de las especies de la región, considerando ambos sitios en conjunto.

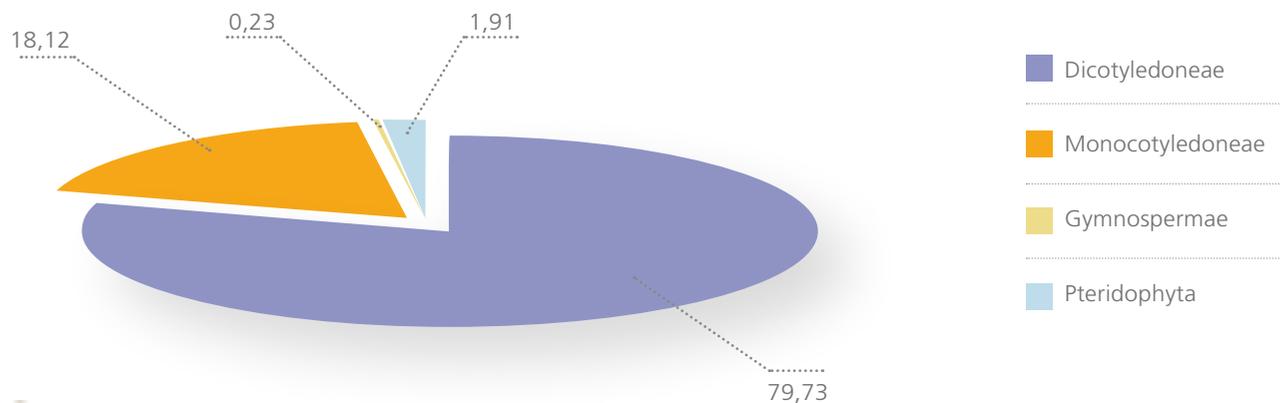
**Tabla 1.**

Nº de familias, géneros y especies en los sectores Mina, El Mauro y en la Región de Coquimbo. Entre paréntesis se muestra el porcentaje con respecto a la flora regional.

Nivel Taxonómico	Flora La Mina	Flora El Mauro	Flora Regional
Familias	44 (30,6%)	79 (54.9%)	144
Géneros	102 (18,2%)	237 (42.2%)	561
Especies	164 (9.5%)	370 (21,4%)	1.727

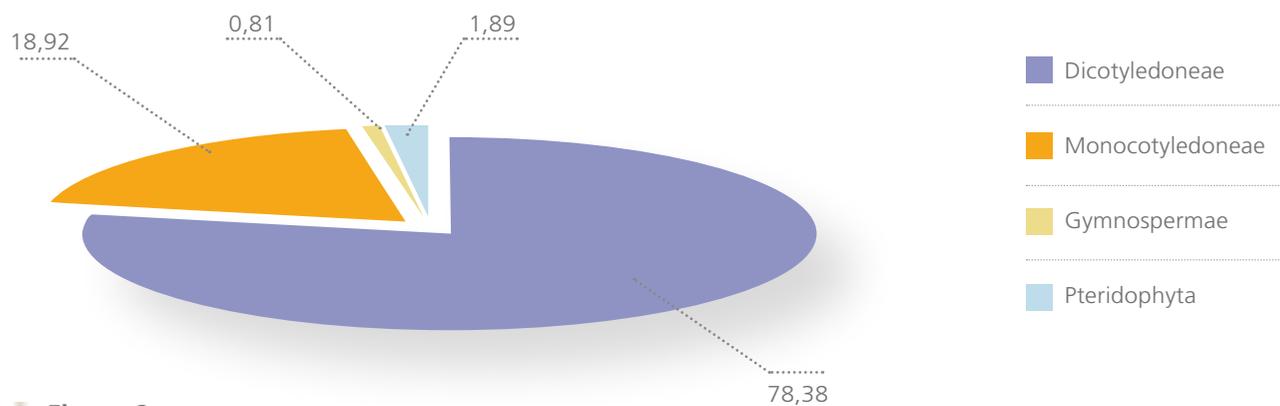
Tanto en el sector Mina como en El Mauro hay una alta representación de las familias de la flora regional, porcentaje que disminuye cuando se consideran los niveles taxonómicos de género y especie. Además, a nivel de especie, el sector El Mauro es más diverso que el sector Mina (Tabla 1).

La flora de la región de Coquimbo está representada por 1.727 especies, de las cuales la mayoría son Angiospermas Dicotiledóneas (Figura 1), este patrón se repite al analizar la flora de los sectores estudiados (Figura 2 y 3) ya que, en ambos casos las Angiospermas Monocotiledóneas representan aproximadamente una cuarta parte de las Dicotiledóneas.



**Figura 1.**

Representación de las categorías superiores de clasificación en la flora regional. Se consideran las Divisiones (Angiosperma, Gimnosperma y Pteridophyta) y Clases (Monocotiledonea y Dicotiledónea).

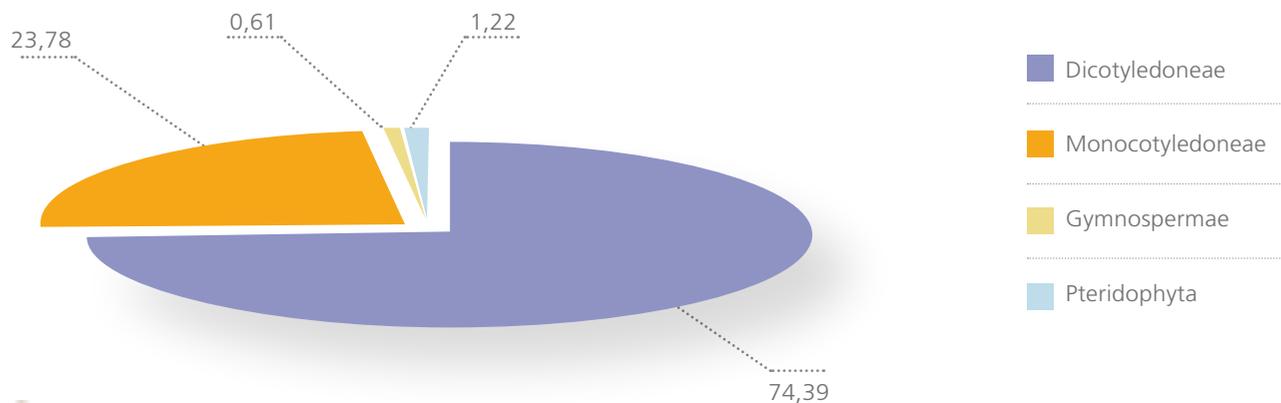


**Figura 2.**

Representación de las categorías superiores de clasificación en la flora del sector El Mauro. Se consideran las Divisiones (Angiosperma, Gimnosperma y Pteridophyta) y Clases (Monocotiledonea y Dicotiledónea).



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.



**Figura 3.**

Representación de las categorías superiores de clasificación en la flora del sector Mina. Se consideran las Divisiones (Angiosperma, Gimnosperma y Pteridophyta) y Clases (Monocotiledonea y Dicotiledónea).

En la Tabla 2 se muestra la riqueza a nivel de Divisiones y Clases de la flora de ambos sectores estudiados, así como su proporción respecto a la flora regional. En el sector El Mauro está representado más del 20% de la flora regional en cada categoría, destacándose la presencia de 2 de las 4 especies de gimnospermas (*Ephedra breana* y *Ephedra chilensis*), (Tabla 2, Figura 4).

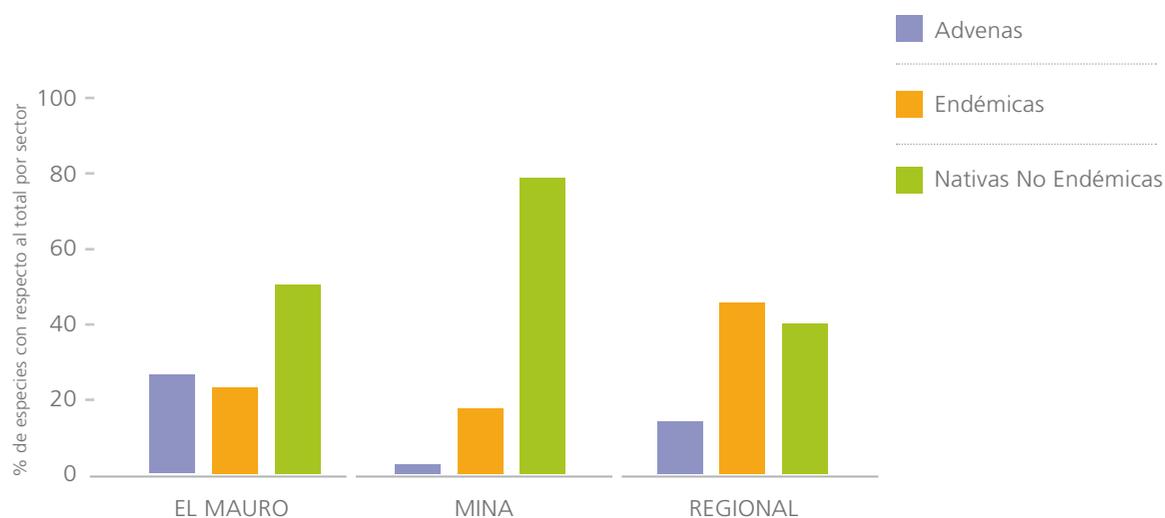
**Tabla 2.**

Riqueza de la flora en cada sector estudiado y a nivel regional. Entre paréntesis la proporción respecto de la flora regional y nacional respectivamente.

	Flora Sector Mina	Flora Sector El Mauro	Flora Regional
Angiospermae	161 (9,53%)	360 (21,30%)	1690 (97,86%)
Dicotyledoneae	122 (8,86%)	290 (21,06%)	1377 (79,73%)
Monocotyledoneae	39 (12,46%)	70 (22,36%)	313 (18,12%)
Gymnospermae	1 (25,00%)	2 (50,00%)	4 (0,23%)
Pteridophyta	2 (6,06%)	7 (21,21%)	33 (1,91%)
<b>Nº TOTAL ESPECIES</b>	<b>164</b>	<b>370</b>	<b>1.727</b>

## Origen florístico

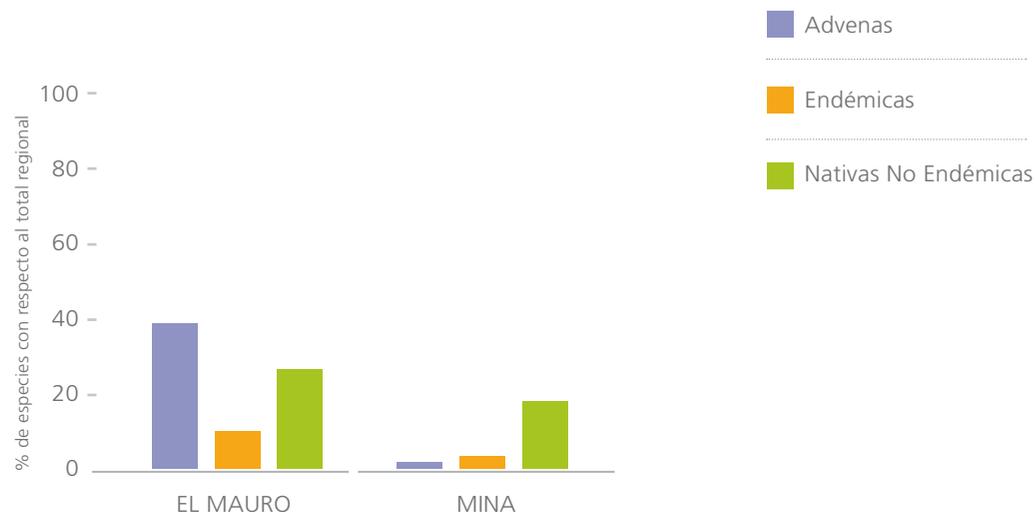
A nivel regional las especies endémicas y las nativas no endémicas en conjunto, tienen una representación mayor que las especies adventicias (Figura 4), patrón que se repite en ambos sectores estudiados. Además, en ambos sectores las especies nativas no endémicas presentan una alta proporción respecto a la flora regional, mientras que las especies endémicas presentan una proporción más baja que la flora regional. Al considerar ambos sectores estudiados, el sector El Mauro presenta una proporción levemente mayor de especies endémicas que el sector Mina (Figura 4). Destaca también la mayor proporción de especies advenas en la flora de El Mauro, esto posiblemente debido a un mayor acceso y uso por más tiempo de este lugar respecto al sector de la Mina.



**Figura 4.**

Proporción de especies advenas, endémicas y nativas no endémicas en cada sector estudiado y a nivel regional.

En la Figura 5 se comparan ambos sectores respecto de su proporción con el total regional. Todas las categorías de origen tienen la más alta representatividad de la flora regional en el sector El Mauro. En este sector se encuentran representados el ~40% de las especies adventicias de la región, el ~27% de las especies nativas no endémicas y el ~11% de las especies nativas endémicas.



**Figura 5.**

Proporción de especies advenas, endémicas y nativas no endémicas en cada sector estudiado, en relación a la representación a nivel regional de estas categorías.

### Estado de conservación

En la región de Coquimbo encontramos 850 especies (57,5%) en categoría de estado de conservación Extinta (EX), En Peligro (EP), Vulnerable (VU) o Fuera de Peligro (FP) y 587 especies (39,8%) en categoría de Insuficientemente conocida (IC) o No Evaluada (Squeo et. al., 2001a). En la Tabla 3 se muestra el porcentaje de especies por comuna que están en las diferentes categorías descritas por Squeo et al. (2001). Podemos observar que las comunas de Los Vilos y Salamanca, donde se ubican los sitios de estudio El Mauro y Mina, encontramos un 57,56% y 70,90% respectivamente, de especies Fuera de Peligro. También observamos un 24,02% y 20,79% respectivamente, de especies que están Insuficientemente Conocidas, cabe notar que son los valores más altos de la región, junto con la comuna de Ovalle y Monte Patria. Finalmente solo un 18,43% en Los Vilos y un 8,31% en Salamanca se encuentran con algún grado de amenaza (o extinta) para su preservación.

**Tabla 3.**

Especies que se encuentran clasificadas en alguna de las categorías de conservación definidas en Squeo et al., 2001a, para cada comuna de la región de Coquimbo.

Comunas	N° total de especies	N° especies FP	% especies FP	N° ESP (EX-EP-VU)	% ESP (EX-EP-VU)	N° ESP (IC)	% ESP (IC)
Andacollo	143	122	85,31	12	8,39	9	6,29
Canela	325	223	68,62	63	19,38	39	12,00
Combarbala	319	243	76,18	32	10,03	44	13,79
Coquimbo	446	288	64,57	81	18,16	77	17,26
Illapel	523	357	68,26	75	14,34	91	17,40
La Higuera	426	295	69,25	68	15,96	63	14,79
La Serena	375	260	69,33	65	17,33	50	13,33
<b>Los Vilos</b>	<b>483</b>	<b>278</b>	<b>57,56</b>	<b>89</b>	<b>18,43</b>	<b>116</b>	<b>24,02</b>
Monte Patria	599	402	67,11	65	10,85	132	22,04
Ovalle	647	360	55,64	135	20,87	152	23,49
Paihuano	335	274	81,79	26	7,76	35	10,45
Punitaqui	153	122	79,74	20	13,07	11	7,19
Río Hurtado	300	248	82,67	29	9,67	23	7,67
<b>Salamanca</b>	<b>433</b>	<b>307</b>	<b>70,90</b>	<b>36</b>	<b>8,31</b>	<b>90</b>	<b>20,79</b>
Vicuña	632	443	70,09	67	10,60	122	19,30

Si analizamos el estado de conservación de la flora en los sitios de interés, podemos observar que el 15,41% de la flora de El Mauro y el 20,73% de la flora de la Mina están en algún grado de amenaza (Tabla 4). En ambos sectores la mayor cantidad de especies insuficientemente conocidas pertenecen a la forma de vida hierba perenne (Tabla 5). Se adjunta listado de especies (Tablas 6 y 7).

**Tabla 4.**

Estado de conservación de la flora en los sitios El Mauro y Mina.

CATEGORIA DE CONSERVACION	El Mauro	Mina
En Peligro	4 (1,08%)	1 (0,61%)
Insuficientemente Conocida	35 (9,46%)	28 (17,07%)
No Evaluada	1 (0,27%)	1 (0,61%)
Vulnerable	17 (4,59%)	4 (2,44%)
<b>Total</b>	<b>57 (15,41%)</b>	<b>34 (20,73%)</b>

**Tabla 5.**

Estado de conservación según forma de vida en ambos sectores.

<b>Sector El Mauro</b>					
<b>Forma de Vida</b>					
FV	EP	IC	NE	VU	Total
Arbol	2	0		5	7
Arbusto	1	2		5	8
Helecho		2			2
Hierba Anual		5	1	1	7
Hierba Perenne	1	22		2	25
Suculenta		0		1	1
Sufrútice		4		3	7
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>35</b>	<b>1</b>	<b>17</b>	<b>57</b>

<b>Sector Mina</b>					
<b>Forma de Vida</b>					
FV	EP	IC	NE	VU	Total
Arbusto		0			
Arbusto Voluble		0			
Helecho		1			1
Hierba Anual		3	1	1	5
Hierba Bianual		0			
Hierba Perenne	1	20		1	22
Suculenta		0		1	1
Sufrútice		4		1	5
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>28</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>34</b>

**Tabla 6.**

Listado de especies en alguna categoría de conservación para el sector Mina. También se indica su origen y forma de vida.

Categoría	Clasificación	Familia	Nombre científico	Nombre científico	Origen	Forma de Vida	Categoría de Conservación
Angiospermae	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Calceolaria picta</i>		Endémica	Hierba Perenne	En Peligro
	Dicotyledoneae	Portulacaceae	<i>Calandrinia caespitosa</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Cyperaceae	<i>Carex pleioneura</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Orchidaceae	<i>Chloraea disoides</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Rytidosperma virescens</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Amaryllidaceae	<i>Alstroemeria pallida</i>	Lirio del Campo	Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Boraginaceae	<i>Cryptantha glomerulifera</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Leucheria viscida</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Loasaceae	<i>Loasa heterophylla</i>		Endémica	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio illapelinus</i>	Senecio	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio looseri</i>	Senecio	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Papilionaceae	<i>Adesmia aspera</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Bromus tunicatus</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Cyperaceae	<i>Carex andinal</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Cyperaceae	<i>Carex aphylla</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Chenopodiaceae	<i>Chenopodium chilense</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Cruciferae	<i>Draba gilliesii</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Erigeron andicola</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Euphrasia adenonota</i>		Endémica	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Festuca panda</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Rubiaceae	<i>Galium corymbosum</i>	Lengua de Gato	Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Cruciferae	<i>Lepidium morrisonii</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Leucheria floribunda</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
Dicotyledoneae	Compositae	<i>Nassauvia lagascae</i>	Repollito	Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)	
Dicotyledoneae	Hydrophyllaceae	<i>Phacelia sinuata</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)	
Pteridophyta	Filicopsida	Dryopteridaceae	<i>Polystichum plicatum</i>	Helecho	Nativa	Helecho	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
Angiospermae	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio lorentziella</i>	Senecio	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio polygaloides</i>	Senecio	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Cruciferae	<i>Sisymbrium andinum</i>	Mostacilla de Cordillera	Advena	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Loasaceae	<i>Loasa illapelina</i>		Endémica	Hierba Anual	No Evaluada
	Dicotyledoneae	Phytolaccaceae	<i>Anisomeria coriacea</i>	Pircún	Endémica	Sufrútice	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Mimulus glabratus</i>	Berro Amarillo	Nativa	Hierba Anual	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Cactaceae	<i>Opuntia glomerata</i>		Endémica	Suculenta	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Caryophyllaceae	<i>Spergularia pissisii</i>	Taisana	Nativa	Hierba Perenne	Vulnerable



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

**Tabla 7.**

Especies en alguna categoría de conservación para el sector El Mauro. También se indica su origen y forma de vida.

Categoría	Clasificación	Familia	Nombre científico	Nombre científico	Origen	Forma de Vida	Categoría de Conservación
Angiospermae	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Calceolaria picta</i>		Endémica	Hierba Perenne	En Peligro
	Dicotyledoneae	Winteraceae	<i>Drimys winteri</i>	<i>Canelo</i>	Nativa	Arbol	En Peligro
	Dicotyledoneae	Saxifragaceae	<i>Escallonia revoluta</i>	<i>Lun</i>	Endémica	Arbusto	En Peligro
	Monocotyledoneae	Palmaceae	<i>Jubaea chilensis</i>	<i>Palma chilena</i>	Endémica	Arbol	En Peligro
	Dicotyledoneae	Flacourtiaceae	<i>Azara serrata</i>	<i>Lilen</i>	Endémica	Arbusto	Insuficientemente Conocida
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Baccharis rhomboidalis</i>	<i>Chilca</i>	Nativa	Arbusto	Insuficientemente Conocida
	Dicotyledoneae	Portulacaceae	<i>Calandrinia caespitosa</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Cyperaceae	<i>Carex pleioneura</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Orchidaceae	<i>Chloraea disoides</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Rytidosperma virescens</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida
	Monocotyledoneae	Orchidaceae	<i>Chloraea bletioides</i>	<i>Orquidea</i>	Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Extinta?)
	Monocotyledoneae	Amaryllidaceae	<i>Alstroemeria pallida</i>	<i>Lirio del Campo</i>	Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Boraginaceae	<i>Cryptantha glomerulifera</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Leucheria viscida</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Loasaceae	<i>Loasa heterophylla</i>		Endémica	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio illapelinus</i>	<i>Senecio</i>	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio looseri</i>	<i>Senecio</i>	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Fuera de Peligro?)
Dicotyledoneae	Papilionaceae	<i>Adesmia aspera</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)	
Pteridophyta	Filicopsida	Azollaceae	<i>Azolla filiculoides</i>	<i>Flor del Pato</i>	Nativa	Helecho	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
Angiospermae	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Bromus tunicatus</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Cyperaceae	<i>Carex andina</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Cyperaceae	<i>Carex aphylla</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Chenopodiaceae	<i>Chenopodium chilense</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Cruciferae	<i>Draba gilliesii</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Erigeron andicola</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Euphrasia adenonota</i>		Endémica	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Festuca panda</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Rubiaceae	<i>Galium corymbosum</i>	<i>Lengua de Gato</i>	Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Cruciferae	<i>Lepidium morrisonii</i>		Endémica	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Leucheria floribunda</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Loasaceae	<i>Loasa triloba</i>	<i>Ortiga blanca</i>	Nativa	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Onagraceae	<i>Ludwigia peploides</i>	<i>Pasto de la Rana</i>	Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Nassauvia lagascae</i>	<i>Repollito</i>	Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Hydrophyllaceae	<i>Phacelia sinuata</i>		Nativa	Hierba Perenne	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Phalaris amethystina</i>	<i>Falaris</i>	Advena	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)	

Categoría	Clasificación	Familia	Nombre científico	Nombre científico	Origen	Forma de Vida	Categoría de Conservación
Pteridophyta	Filicopsida	Dryopteridaceae	<i>Polystichum plicatum</i>	<i>Helecho</i>	Nativa	Helecho	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
Angiospermae	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio lorentziella</i>	<i>Senecio</i>	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Senecio polygaloides</i>	<i>Senecio</i>	Nativa	Sufrútice	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Cruciferae	<i>Sisymbrium andinum</i>	<i>Mostacilla de Cordillera</i>	Advena	Hierba Anual	Insuficientemente Conocida (Vulnerable?)
	Dicotyledoneae	Loasaceae	<i>Loasa illapelina</i>		Endémica	Hierba Anual	No Evaluada
	Dicotyledoneae	Euphorbiaceae	<i>Adenopeltis serrata</i>	<i>Lechón</i>	Endémica	Arbusto	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Phytolaccaceae	<i>Anisomeria coriacea</i>	<i>Pircún</i>	Endémica	Sufrútice	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Flacourtiaceae	<i>Azara celastrina</i>	<i>Lilen</i>	Endémica	Arbusto	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Sapindaceae	<i>Bridgesia incisifolia</i>	<i>Rumpiato</i>	Endémica	Arbusto	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Calceolaria corymbosa</i>	<i>Topa -topa</i>	Endémica	Sufrútice	Vulnerable
	Monocotyledoneae	Gramineae	<i>Chusquea cumingii</i>	<i>Quila</i>	Nativa	Arbusto	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Lauraceae	<i>Cryptocarya alba</i>	<i>Peumo</i>	Endémica	Arbol	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Compositae	<i>Erigeron fasciculatus</i>		Endémica	Sufrútice	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Rosaceae	<i>Kageneckia oblonga</i>	<i>Bollén</i>	Endémica	Arbusto	Vulnerable
	Monocotyledoneae	Liliaceae	<i>Leucocoryne ixioides</i>	<i>Huilli</i>	Nativa	Hierba Perenne	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Celastraceae	<i>Maytenus boaria</i>	<i>Maitén</i>	Nativa	Arbol	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Scrophulariaceae	<i>Mimulus glabratus</i>	<i>Berro Amarillo</i>	Nativa	Hierba Anual	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Cactaceae	<i>Opuntia glomerata</i>		Endémica	Suculenta	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Zygophyllaceae	<i>Porlieria chilensis</i>	<i>Guayacán</i>	Endémica	Arbol	Vulnerable
	Dicotyledoneae	Mimosaceae	<i>Prosopis chilensis</i>	<i>Algarrobo</i>	Endémica	Arbol	Vulnerable
Dicotyledoneae	Rosaceae	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Quillay</i>	Endémica	Arbol	Vulnerable	
Dicotyledoneae	Caryophyllaceae	<i>Spergularia pissisii</i>	<i>Taisana</i>	Nativa	Hierba Perenne	Vulnerable	

## Conclusiones

- Existe una alta representación de las familias de la flora regional en ambos sectores estudiados.
- El sector El Mauro presenta una mayor representación de la diversidad florística que el sector Mina, respecto a la flora regional.
- La flora de los sectores Mina y El Mauro, sigue los mismos patrones de la flora regional en cuanto a la proporción de monocotiledóneas y dicotiledóneas.
- En ambos sectores estudiados, el sector El Mauro presenta una mayor concentración de especies adventicias.
- En ambos lugares predominan las nativas no endémicas.
- El sector El mauro tiene dos de las cuatro especies de Ephedra de la región.
- En ambos sectores predominan las especies en la categoría “Insuficientemente Conocida”
- El porcentaje de especies insuficientemente conocidas en los sitios de interés, es concordante con la tendencia comunal, lo que no dej a ser preocupante a la hora de definir criterios de conservación.
- Se hace necesario fortalecer las campañas para conocer la flora regional para poder categorizar las especies y así mejorar los criterios de selección de sitios prioritarios para la conservación de las especies.
- En ambos sectores la hierba anual endémica Loasa illapelina Phil. (Loasaceae), aparece como no evaluada.
- En ambos sectores la forma de vida predominante de las especies insuficientemente conocidas, es la de hierba perenne, tendencia que también ocurre en la flora regional.
- A nivel regional hay un 39,8% (588 especies) para las cuales no hay información suficiente que permita evaluar el estado de conservación de ellas (Squeo et al., 2001a), por lo tanto será de gran valor la información que se obtenga en el futuro para la vegetación regional en disciplinas científicas como la botánica, la ecología, la fisiología vegetal y la genética.

## Literatura citada

**AGUAYO, M, A. PAUCHARD, G. AZÓCAR Y O. PARRA. (2009).** Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. Revista Chilena de Historia Natural 82: 361-374.

**ARROYO, MTK, D. ROUGIER, F. PEREZ, P. PLISCOFF Y K. BULL. 2003.** La flora de Chile central y su protección: Antecedentes y prioridades para el establecimiento del Jardín Botánico Chagual. Revista Chagual.

**FUENZALIDA H 1965.** Biogeografía. In: Geografía Económica de Chile: 228-267. Editorial Universitaria S.A., Santiago, Chile.

**MILLER, A. 1976.** The Climate of Chile. In Schwerdtfeger, W. (ed.), Climates of Central and South America. World Survey of Climatology, Elsevier, Amsterdam, pp. 113-130.

**MUÑOZ, M, HERMÁN NÚÑEZ & JOSÉ YÁÑEZ. 1997.** Libro rojo de los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad en Chile. Ambiente y Desarrollo. VOL XIII – No 2. pp. 90 -99.

**SQUEO, F.A., G. ARANCIO y J.R. GUTIÉRREZ. 2001.** Libro Rojo de la Flora de la Región de Coquimbo, y de los Sitios Prioritarios para su Conservación. Ediciones Universidad de La Serena. ISBN: 956-7393-12-2, 386 pp., 196.

**SQUEO, F.A., G. ARANCIO, L. CAVIERES, J.R. GUTIÉRREZ, M. MUÑOZ Y C. MARTICORENA. 2001a.** Análisis del estado de conservación de la flora nativa de la IV región de Coquimbo. En Libro Rojo de la Flora de la Región de Coquimbo, y de los Sitios Prioritarios para su Conservación. Ediciones Universidad de La Serena. ISBN: 956-7393-12-2, 386 pp., 196.

**SQUEO, F.A., G. ARANCIO, C. MARTICORENA., M. MUÑOZ Y J.R. GUTIÉRREZ, 2001b.** Diversidad vegetal de la IV región de Coquimbo, Chile. En Libro Rojo de la Flora de la Región de Coquimbo, y de los Sitios Prioritarios para su Conservación. Ediciones Universidad de La Serena. ISBN: 956-7393-12-2, 386 pp., 196.

**SQUEO, F.A., G. ARANCIO, L. CAVIERES, 2001c.** Sitios prioritarios para la conservación de la flora nativa con riesgos de extinción en la IV región de Coquimbo, Chile. En Libro Rojo de la Flora de la Región de Coquimbo, y de los Sitios Prioritarios para su Conservación. Ediciones Universidad de La Serena. ISBN: 956-7393-12-2, 386 pp., 196.

**SQUEO F, MTK ARROYO, A MARTICORENA, G ARANCIO, M MUÑOZ-SCHICK, M NEGRITO, G ROJAS, M ROSAS, R RODRÍGUEZ, AM HUMAÑA, E BARRERA & C MARTICORENA. (2008).** Catálogo de la flora vascular de la Región de Atacama. In. Squeo F, G Arancio & JR Gutiérrez (Ed) Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena. 97 – 120 pp

**VILLAGRÁN C, MT KALIN-ARROYO & C MARTICORENA 1983.** Efectos de la desertización en la distribución de la flora andina de Chile. Revista Chilena de Historia Natural 137-157.

## Anexo Fotografías



Peumo: *Cryptocarya alba* (Foto Antonio Maldonado)



Canelo: *Drimys winteri* (Foto Antonio Maldonado)



Boldo: *Peumus boldus* (Foto Antonio Maldonado)



Lilén: *Azara celsastrina* (Foto Antonio Maldonado)



Olivillo: *Kageneckia angustifolia* (Foto Antonio Maldonado)



Olivillo: *Kageneckia angustifolia* (Foto Antonio Maldonado)



Quillay: *Quillaja saponaria*  
(Foto Antonio Maldonado)



Ortiga: *Loasa illapelina*  
(Foto Alain de Trenqualye Howard)



Ephedra *breana* (*Gymnosperma*)  
(Foto Antonio Maldonado)





### III

## Diversidad de comunidades vegetales de la Provincia de Choapa y efecto del gradiente altitudinal sobre variables comunitarias

**Cristián Delpiano & Patricio Medina**  
Centro de Ecología Aplicada Ltda.

## Introducción

La zona central de Chile es una isla ecológica que se encuentra desconectada del resto de Sud América por la presencia de la Cordillera de los Andes por el Este, el Desierto de Atacama por el Norte y el Océano Pacífico por el Oeste. Este aislamiento geográfico ha generado un camino evolutivo diferente al resto del continente, situación que se refleja en un marcado límite biogeográfico alrededor de los 30° S (Villagrán & Hinojosa, 1997; 2005). Esta característica le otorga a esta zona un alto grado de endemismo, convirtiéndola en uno de los 25 sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad a nivel mundial (Hot spot) (Myers et al., 2000)

La región de Coquimbo representa el límite septentrional de este Hot spot de biodiversidad y constituye una zona transicional entre la zona mediterránea y la árida desértica característica del norte de Chile (Maldonado & Villagrán, 2002). Esta calidad de ecotono climático que caracteriza a la Región, le otorga una heterogeneidad de ecosistemas que sostienen una alta diversidad biológica (Squeo et al., 2001), condición que se acentúa por factores geográficos en el que destaca un fuerte gradiente altitudinal (Squeo et al., 2008).

En efecto son diversos los factores climáticos y geográficos que determinan una alta diversidad vegetal en la Región de Coquimbo (Squeo et al., 2008), y esta puede ser apreciada tanto en escala espacial como temporal. En términos temporales, estudios paleoclimáticos han encontrado como a lo largo de 10.000 años, el clima ha sufrido variaciones con etapas húmedas y secas. Estas variaciones fueron responsables de la modificación en la fisonomía de la vegetación, variando de bosques en épocas húmedas a praderas en épocas más secas (Maldonado & Villagrán, 2006; Maldonado & Rozas, 2008). Estos cambios climáticos aparentemente estarían exclusivamente relacionados a la interacción que existe entre el Cinturón de Vientos del Oeste (CVO) y el Anticiclón Subtropical del Pacífico (Maldonado & Rozas, 2008). En ese contexto, la influencia estacional o permanente de las masas de aire oceánicas procedentes del CVO al sur de los 30° S (La Serena), es responsable de prácticamente todas las lluvias de Chile central y sur. Así queda marcado un límite biogeográfico con bosques subtropicales (esclerófilo) y templado-lluviosos, al sur de esta latitud, la cual es denominada Subregión Chilena central y, semidesiertos y desiertos hiperáridos hacia el norte, denominada Subregión del Páramo Puneña (Morrone, 2001; Villagrán & Hinojosa, 2005).

Por su parte, variables geográficas tales como la latitud, topografía y altitud son capaces de modelar factores climáticos que inciden en la composición y estructura de la vegetación. En un país como Chile con 4.200 km de largo la latitud es una variable importante capaz de afectar la temperatura, las precipitaciones y la radiación solar (Donoso, 1997). Por su parte, la topografía en especial en la zona mediterránea, incide de manera significativa a nivel microclimático. Mientras las pendientes con exposición hacia el norte reciben mayor cantidad de luz y calor, las que miran hacia el sur reciben menos, esto hace que la fisionomía de la vegetación sea radicalmente opuesta. En tanto el principal efecto que tiene la altitud es en la declinación de la temperatura a medida que aumenta el gradiente. Esto se debe a que la atmósfera se hace más seca y menos densa a medida que aumenta la altitud, siendo por lo tanto, menos capaz de absorber calor (Donoso, 1997). Este efecto se hace más evidente en la zona cordillerana donde existen cinturones o pisos de vegetación asociados a esta variable geográfica. Este último aspecto tiene especial relevancia en la Provincia de Choapa ya que, es justo aquí donde Chile es más angosto, y por lo tanto, el gradiente altitudinal es más drástico, pasando de 0 a 4.000 m.s.n.m. en menos de 100 km.

De esta manera el objetivo de este capítulo se enfoca en una primera instancia en describir las diferentes comunidades vegetales que existen en esta Provincia desde el Océano Pacífico hasta la Cordillera de los Andes, analizando en segunda instancia el efecto que tiene la altitud sobre variables comunitarias, con énfasis en la zona andina.

# Materiales y Método

## Área de Estudio

La Provincia de Choapa se ubica en el extremo sur de la Región de Coquimbo y cuenta con una superficie estimada de 10.079,8 km<sup>2</sup>. Desde el punto de vista climático, se encuentra en una transición entre clima mediterráneo desértico y semidesértico, con diferentes matices: húmedo y nuboso en el litoral, y estepario cálido en el interior. La zona costera se caracteriza por la presencia de mucha humedad (85%) y mucha nubosidad, con temperaturas muy moderadas, mientras que la zona interior se caracteriza por la ausencia de nubosidad. Las temperaturas y la oscilación térmica diaria aumentan con respecto a la costa, en tanto, las precipitaciones tienden a disminuir, salvo en la zona de la Cordillera de Los Andes donde vuelven a aumentar. En términos geográficos físicos Novoa & López (2001), identifican cuatro grandes unidades para la Región y la Provincia: la alta cordillera de Los Andes, la montaña media que corresponde a los “cordones transversales”, los grandes valles fluviales transversales, y la franja costera o litoral. Es así como en esta zona la Cordillera de Los Andes excepcionalmente sobrepasa los 4.000 m.s.n.m. dando paso bajo los 3.000 m.s.n.m. a la montaña media la cual se encuentra fragmentada debido a la intensa erosión fluvial. Por último, la zona litoral muestra un trazado rectilíneo sin bahías importantes a excepción de la desembocadura del río Choapa (Novoa & López, 2001).

## Comunidades vegetales de la Provincia de Choapa

Para determinar y describir las diferentes comunidades vegetales que componen la Provincia de Choapa se utilizó esencialmente la clasificación de Gajardo (1994) y Luebert & Pliscoff (2007). Utilizando herramientas de SIG se obtuvieron datos espaciales de distribución y de superficie de las comunidades descritas. La información digital se obtuvo del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) (<http://territorial.sinia.cl/portal/descargas.php>).

## Efecto de la altitud sobre la vegetación

Para evaluar el efecto de la altitud sobre la vegetación, se utilizaron datos recopilados por seis años (2004 – 2009) de promedios de cobertura y riqueza de especies de 15 sitios monitoreados por minera Los Pelambres en la Provincia de Choapa en la época estival (Tabla 1). Para analizar el efecto de la altitud sobre la riqueza y la cobertura, los datos de dichas variables fueron correlacionados con la altitud (variable independiente log-trans-

formada). Además utilizando los datos de riqueza de monitoreos hechos entre los años 2008 - 2010, se evaluó la distribución de las especies según su tipo de hábito a lo largo del gradiente altitudinal.

**Tabla 1:**

Sitios monitoreados, altitud y coordenadas

Sitio	Altitud (m)	Coordenadas (UTM)		Piso de Vegetación (Luebert & Pliscoff, 2007)
		norte	este	
Laguna Conchalí	0	6470322	264042	Matorral costero de <i>Peumus boldus</i> y <i>Schinus latifolius</i>
Monte Aranda	480	6461046	295557	Matorral interior de <i>Trevoa quinquinervia</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>
Llau-Llau	620	6463579	304708	Matorral interior de <i>T. quinquinervia</i> y <i>C. odorifera</i>
El Mauro	976	6458219	309734	Matorral interior <i>Quillaja saponaria</i> y <i>Porlieria chilensis</i>
Cuncumén	1.136	6469058	346887	Matorral interior <i>Q. saponaria</i> y <i>P. chilensis</i>
Tencadán	1.369	6470872	349810	Matorral interior <i>Q. saponaria</i> y <i>P. chilensis</i>
Quebrada Talca	1.468	6481224	340626	Bosque andino de <i>Kageneckia angustifolia</i> y <i>Guindilia trinervis</i>
Quillayes	1.527	6474562	348993	Bosque andino de <i>K. angustifolia</i> y <i>G. trinervis</i>
Manque	2.597	6486410	345545	Matorral andino de <i>Chuquiraga oppositifolia</i> y <i>Nardophyllum lanatum</i>
Piuquenes	2.946	6488023	349996	Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Laretia acaulis</i> y <i>Berberis empetrifolia</i>
Vega Circo	3.433	6458536	377205	Herbazal mediterráneo de <i>Nastanthus spathulatus</i> y <i>Menonvillea spathulata</i>
Laguna Circo	3.455	6458322	377138	Herbazal de <i>N. spathulatus</i> y <i>M. spathulata</i>
Cerro Amarillo	3.586	6493090	359477	Herbazal de <i>N. spathulatus</i> y <i>M. spathulata</i>
Hualtatas	3.623	6491063	355456	Herbazal de <i>N. spathulatus</i> y <i>M. spathulata</i>
Laguna El Pelao	3.628	6458755	379334	Herbazal de <i>N. spathulatus</i> y <i>M. spathulata</i>

## Resultados

### Comunidades vegetales de la Provincia de Choapa

Gajardo (1994), reconoce para la Provincia de Choapa dos Regiones, tres Subregiones y cinco Formaciones Vegetales. En tanto para Luebert & Pliscoff (2007), existen doce pisos de vegetación (Tabla 2 y Figura 2). Todos los pisos de vegetación tienen su límite septentrional en la Región de Coquimbo y en el caso de los pisos Matorral desértico mediterráneo interior de *Flourensia thurifera* y *Colliguaja odorifera* y Matorral desértico mediterráneo costero de *Bahia ambrosioides* y *Puya chilensis* su distribución está acotada solo a la Región de Coquimbo.

De los 12 pisos registrados 8 son dominados por matorrales (Figura 1a y 1b), 3 por bosques y solo 1 corresponde a herbazales. Los pisos de vegetación con mayor superficie son el Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior de *Quillaja saponaria* y *Porlieria chilensis* (Figura 1a), el Bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Kageneckia angustifolia* y *Guindilia trinervis* y el Matorral desértico mediterráneo interior de *F. thurifera* y *C. odorifera*, siendo este último piso el con mayor distribución altitudinal con un límite inferior situado a los 300 m.s.n.m. y el superior a los 2.300 m.s.n.m. (Tabla 2 y Figura 2). En tanto, los pisos con menor superficie son el Matorral espinoso mediterráneo interior de *Puya coerulea* y *C. odorifera* y el Bosque esclerófilo mediterráneo costero de *Cryptocarya alba* y *Peumus boldus*.





**Figura 1.**

a) Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior *Quillaja saponaria* y *Porlieria chilensis*. b) Matorral bajo mediterráneo andino de *Laretia acaulis* y *Berberis empetrifolia*.

**Tabla 2:**

Pisos de vegetación presentes en la Provincia de Choapa, comunidades vegetales características, superficie, altitud y distribución regional

Pisos de Vegetación	Comunidades zonales	Área (ha)	Altitud (m)	Distribución regional
Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo costero de <i>Peumus boldus</i> y <i>Schinus latifolius</i>	<i>Peumus boldus</i> - <i>Podanthus mitique</i> ; <i>Azara celastrina</i> - <i>Schinus latifolius</i> ; <i>Schinus latifolius</i> - <i>Cryptocarya alba</i>	91.503	0-500	IV, V
Matorral desértico mediterráneo costero de <i>Bahia ambrosioides</i> y <i>Puya chilensis</i>	<i>Adesmia tenella</i> - <i>Erodium cicutarium</i> ; <i>Puya chilensis</i> - <i>Eulychnia acid</i>	65.208	0-500	IV
Bosque esclerófilo mediterráneo costero de <i>Lithrea caustica</i> y <i>Cryptocarya alba</i>	<i>Cestrum-Trevoetum</i> ; <i>Puya berteroniana</i> - <i>Trichocereus chilensis</i> ; <i>Peumus boldus</i> - <i>Trevoa trinervis</i>	40.693	0-1.300	IV, V, VI
Bosque esclerófilo mediterráneo costero de <i>Cryptocarya alba</i> y <i>Peumus boldus</i>	<i>Puya berteroniana</i> - <i>Trichocereus chilensis</i> ; <i>Gutierrezio-Baccharidetum linearis</i> ; <i>Lithrea caustica</i> - <i>Peumus boldus</i>	29.781	200-1.200	IV, V, VI
Matorral espinoso mediterráneo interior de <i>Trevoa quinquinervia</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>	<i>Colliguaja odorifera</i> - <i>Adesmia mycrophylla</i> ; <i>Colliguaja odorifera</i> - <i>Proustia cinerea</i>	76.229	300-1.400	IV, V
Matorral desértico mediterráneo interior de <i>Flourensia thurifera</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>	<i>Colliguaja odorifera</i> - <i>Proustia cinerea</i> ; <i>Heliotropium stenophyllum</i> - <i>Trichocereus chilensis</i> ; <i>Gutierrezia resinosa</i> - <i>Atriplex semibaccata</i>	117.410	300-2.300	IV
Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior <i>Quillaja saponaria</i> y <i>Porlieria chilensis</i>	<i>Puya berteroniana</i> - <i>Adesmia arborea</i> ; <i>Trevoa trinervis</i> - <i>Colliguaja odorifera</i>	214.042	500-1.500	IV, V
Bosque esclerófilo mediterráneo andino de <i>Kageneckia angustifolia</i> y <i>Guindilia trinervis</i>	<i>Fabiana imbricata</i> - <i>Ephedra chilensis</i> ; <i>Austrocedrus chilensis</i> - <i>Schinus montanus</i> ; <i>Colliguaja intergerrima</i> - <i>Tetraglochim alatum</i>	118.552	1.400- 2.200	IV, V, RM, VI
Matorral espinoso mediterráneo interior de <i>Puya coerulea</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>	<i>Puya berteroniana</i> - <i>Adesmia arborea</i> ;	14.485	1.400-2.000	IV, V, RM
Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Chuquiraga oppositifolia</i> y <i>Nardophyllum lanatum</i>	<i>Mulinum spinosum</i> - <i>Chuquiraga oppositifolia</i> ; <i>Fabiana imbricata</i> - <i>Ephedra chilensis</i>	88.117	2.000-2.600	IV, V, RM, VI
Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Laretia acaulis</i> y <i>Berberis empetrifolia</i>	<i>Azorella madreponica</i> - <i>Laretia acaulis</i> ;	95.934	2.600-3.300	IV, V, RM, VI, VII
Herbazal mediterráneo de <i>Nastanthus spathulatus</i> y <i>Menonvillea spathulata</i>	<i>Nastanthus spathulatus</i> - <i>Menonvillea spathulata</i>	49.809	> 3.300	IV, V, RM, VI

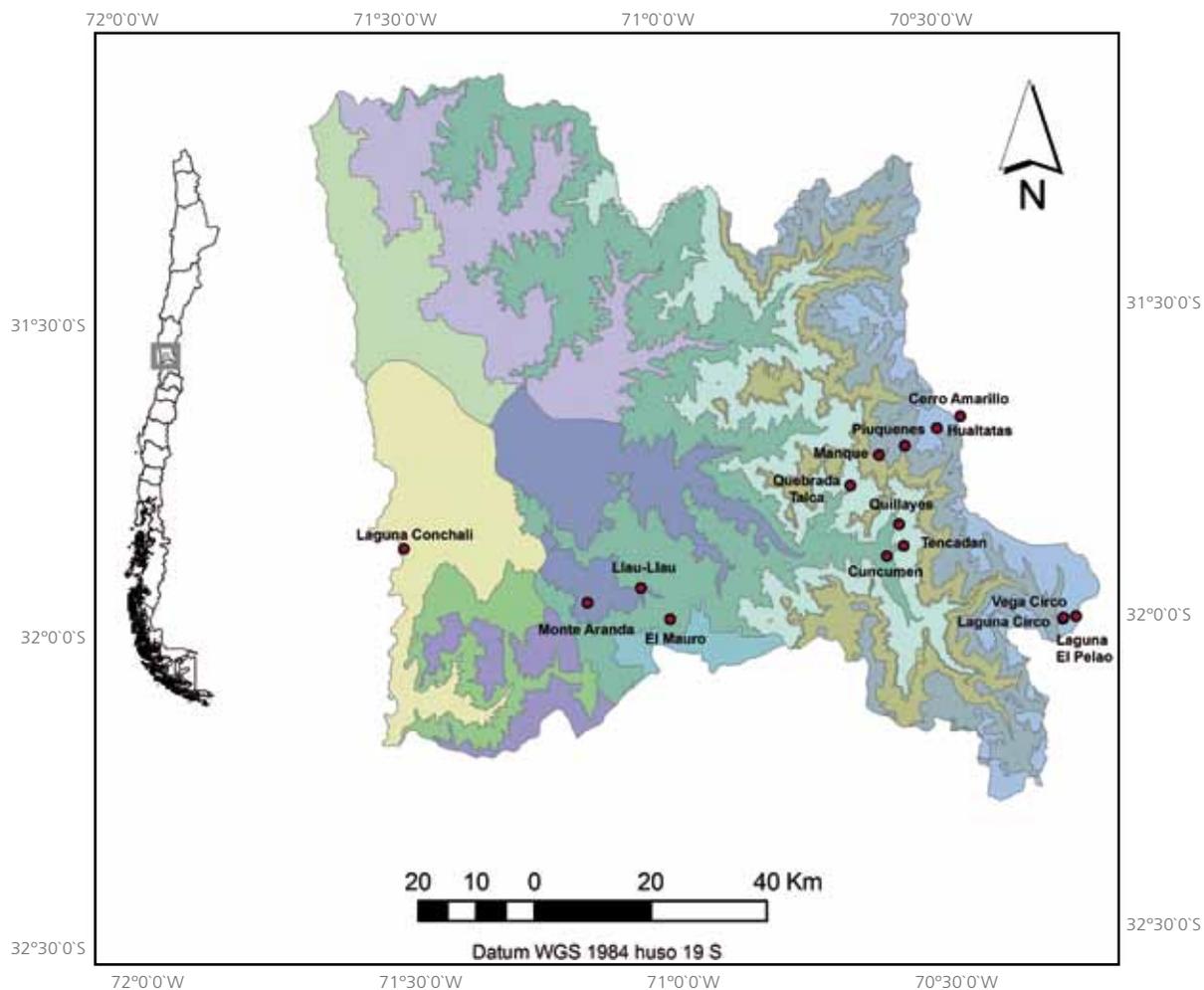
Fuente: Luebert & Pliscoff (2007), con excepción de los datos de área.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

**Figura 2:**

Mapa de la Provincia de Choapa con los pisos de vegetación presentes. Fuente: Elaboración propia

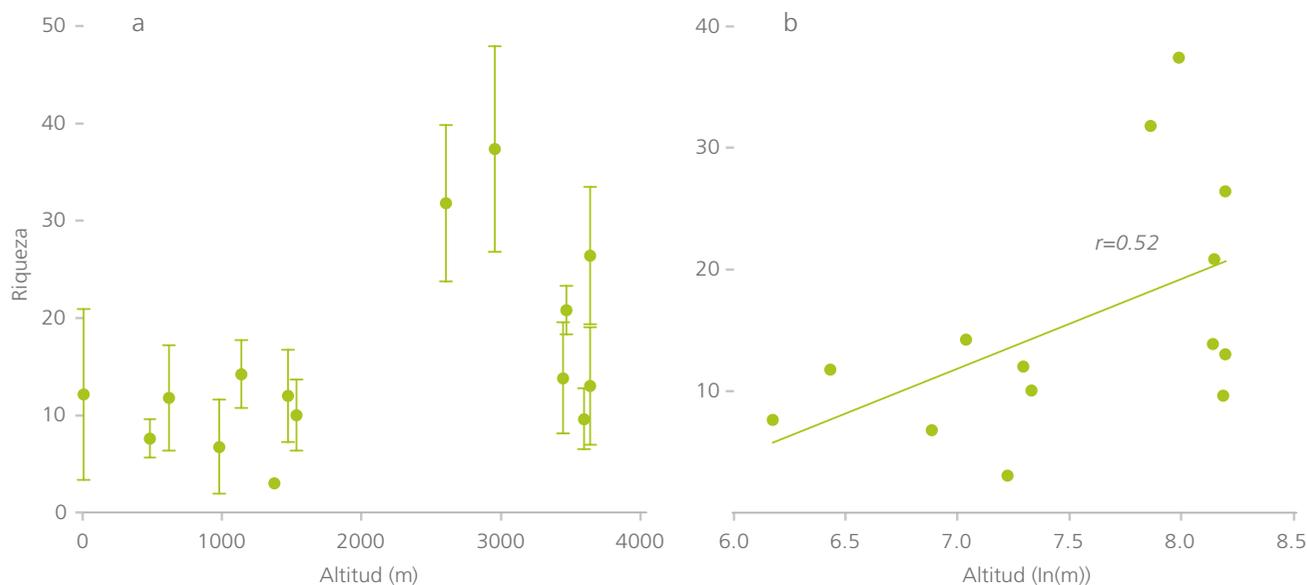


● Sitios de Monitoreo

	Bosque esclerófilo mediterráneo andino de <i>Kageneckia angustifolia</i> y <i>Guindilia trinervis</i>		Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Chuiraga oppositifolia</i> y <i>Nardophyllum lanatum</i>
	Bosque esclerófilo mediterráneo costero de <i>Cryptocarya alba</i> y <i>Peumus boldus</i>		Matorral bajo mediterráneo andino de <i>Laretia acaulis</i> y <i>Berberis empetrifolia</i>
	Bosque esclerófilo mediterráneo costero de <i>Lithrea caustica</i> y <i>Cryptocarya alba</i>		Matorral desértico mediterráneo costero de <i>Bahia ambrosioides</i> y <i>Puya chilensis</i>
	Herbazal mediterráneo de <i>Nastanthus spathulatus</i> y <i>Menonvillea spathulata</i>		Matorral desértico mediterráneo interior de <i>Flourensia thurifera</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>
	Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo costero de <i>Peumus boldus</i> y <i>Schinus latifolius</i>		Matorral espinoso mediterráneo interior de <i>Puya coerulea</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>
	Matorral arborescente esclerófilo mediterráneo interior <i>Quillaja saponaria</i> y <i>Porlieria chilensis</i>		Matorral espinoso mediterráneo interior de <i>Trevoa quinquinervia</i> y <i>Colliguaja odorifera</i>

## Efecto de la altitud sobre la vegetación

La riqueza promedio aumenta considerablemente entre los 2.500 m.s.n.m. y los 3.000 m.s.n.m. (Figura 2a), encontrándose a esta altitud el mayor número de especies (37), luego la riqueza tiende a declinar llegando a 26 especies después de los 3.500. En tanto, los menores valores promedio se encuentran entre los 1.000 y los 1.500 m.s.n.m., valores que fluctúan entre 3 y 14 especies respectivamente. En tanto, las mayores variaciones en la riqueza de especies se encuentran en la zona cordillerana sobre los 2.500 m.s.n.m.. El análisis muestra que la riqueza de especies se correlaciona de manera positiva con la altitud, aunque no de manera ajustada ( $r=0,52$ ) (Figura 3b).



**Figura 3.**

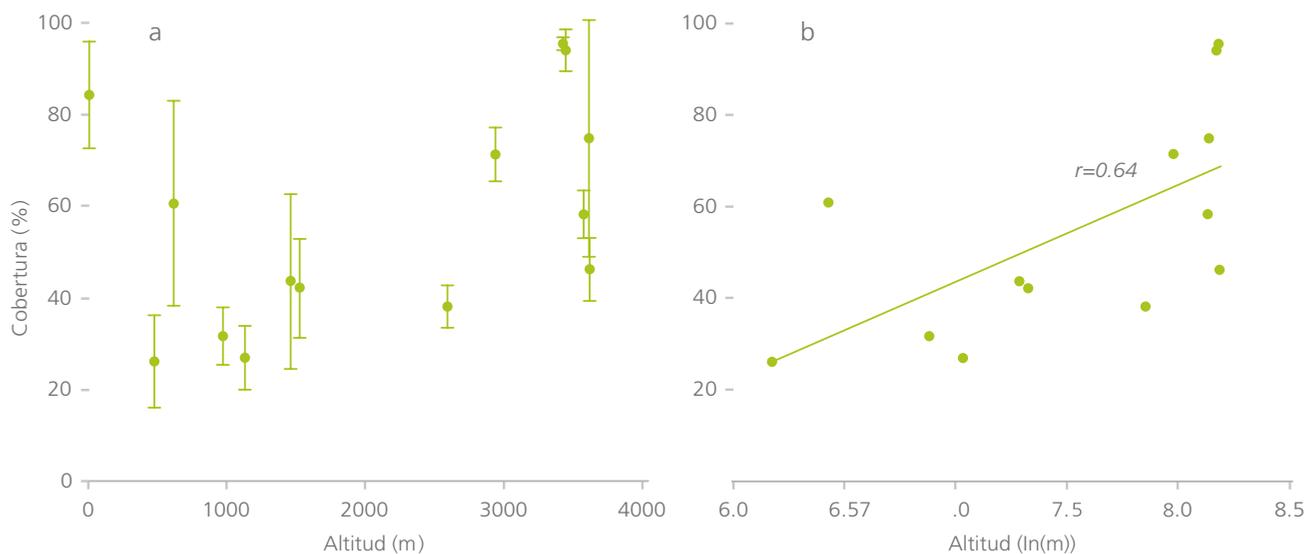
a) Porcentaje promedio de la riqueza de especies en relación con la altitud en la Provincia de Choapa. b) Correlación entre la riqueza y la altitud.

Se observa que la cobertura vegetal comienza a disminuir a medida que aumenta la altitud (Figura 3a), encontrando sus mínimos entre los 1.000 y 1.500 m.s.n.m.. Pasado los 2.000 m.s.n.m. comienza a aumentar encontrando su máximo pick en los 3.400 m.s.n.m. aproximadamente. Por otro lado, es apreciable en algunos casos



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

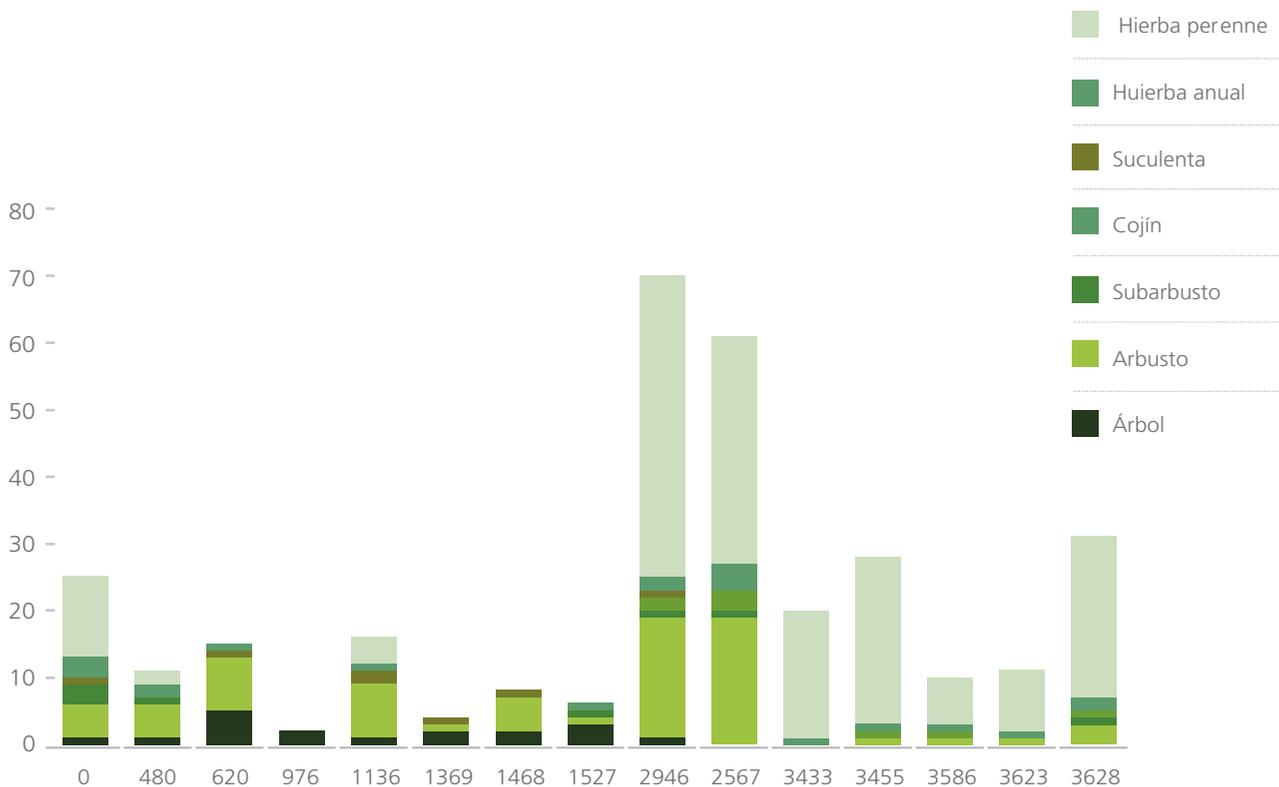
la existencia de una alta variación en los porcentajes de cobertura, los cuales superan el 19% de variación en tres oportunidades. Al igual que con la riqueza, la cobertura se correlaciona de manera positiva con la altitud y de manera más ajustada ( $r = 0,64$ ) (Figura 3b).



#### Figura 4.

a) Porcentaje promedio de la cobertura vegetal en relación con la altitud en la Provincia de Choapa. b) Correlación entre la cobertura y la altitud.

El tipo de hábito herbáceo perenne es el que contiene mayor número de especies (110 de 207) (Figura 4), siendo dominante sobre los 2.900 m.s.n.m., mientras que, el tipo arbustivo es el más frecuente (13 de 15 altitudes) y segundo en número de especies, en tanto, el tipo cojín y subarbusto son los que presentan menor riqueza entre todos los tipos. Por otro lado, es posible determinar que el límite superior para el tipo arbóreo y suculento se presenta a los 2.900 m.s.n.m., siendo esta misma altitud el límite inferior para el tipo cojín.



**Figura 5.**

Tipos de hábito de las especies presentes en los sitios de monitoreo según la altitud.

## Discusión

Acorde a la condición de límite biogeográfico que posee la Región de Coquimbo (Morrone et al., 2001), se aprecia que todos los pisos de vegetación presentan su límite septentrional en esta Región (Tabla 2), mientras que la presencia de comunidades dominadas por *F. thurifera* podría sugerir que la zona de transición entre la Subregión Chilena central y la Subregión del Páramo Puneña encuentra su límite sur en la Provincia de Choapa. Además se distingue de acuerdo a la distribución sur de los pisos que todos ellos, con excepción del antes mencionado, son endémicos de la zona mediterránea de Chile central (Tabla 2). Sin embargo, según Luebert & Gajardo (2004) los

elementos andino-mediterráneos podrían circunscribirse a una provincia fitogeográfica separada que incluye las zonas altas de Los Andes de Chile y Argentina entre 28° S y 35° S.

Respecto a la riqueza, existe un aumento en el sector andino en relación a sectores más bajos, el cual podría estar dado por la presencia de vegetación azonal presente en la época estival asociada a vegas y bofedales. A pesar de este aumento, la riqueza tiende a decrecer en la zona andina a medida que aumenta el gradiente altitudinal (> 3.000 m.s.n.m.). Este resultado no sería solo causado por el efecto que tiene la altitud sobre las variables climáticas, sino que también sería consecuencia de una disminución en la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Gutiérrez et al., 1998). En ese sentido Cavieres et al. (2000), encontraron que el contenido de Nitrógeno en el suelo es el segundo factor más relevante que determina la distribución altitudinal de la vegetación en la Cordillera de Los Andes de Chile central, condición que al parecer podría replicarse para el sector cordillero de la Provincia de Choapa si se considera que poseen los mismos pisos de vegetación y similar distribución (Luebert & Pliscoff, 2007). A su vez el aumento de la cobertura sobre los 2.500 m.s.n.m. podría estar asociado a un mejor estado de la vegetación, ya que es conocido el fuerte deterioro que ha sufrido la zona media de la Provincia a causa del sobrepastoreo y la producción de carbón (Dubroeuq & Livenais, 2004). En comparación con la Cordillera de Doña Ana ubicada en la Provincia de Elqui, la zona andina de la Provincia de Choapa presenta mayor cobertura con valores que superan el 40% sobre los 3.500 m.s.n.m., mientras que en la Cordillera de Doña Ana la cobertura no supera el 40% a esa altitud y disminuye a valores inferiores al 1% por sobre los 4.250 m.s.n.m.. Esta diferencia podría estar explicada por un aumento en las precipitaciones producto de latitud ya que la cordillera en la Provincia de Choapa se encuentra 4° más al sur que la de Doña Ana (Squeo et al., 1994).

Por último, se distingue un efecto de la altitud sobre la distribución de los tipos de hábito. Esto se refleja en la dominancia de especies herbáceas perennes en los sitios de mayor altitud (Figura 5), lo que sugiere que hay un limitado número de hábitos adaptados a sitios con períodos cortos libres de nieve y sin temperaturas congelantes (Cavieres et al., 2000). Otro elemento que destaca es la baja presencia de hierbas anuales a elevaciones altas. Esto se debe esencialmente a que estas especies deben completar su ciclo de vida en un solo período, el cual decrece a medida que aumenta la altitud. Esto fue constatado por Squeo et al. (1994) en la Cordillera de Doña Ana, quienes encontraron que sólo las hierbas perennes alcanzan el límite altitudinal de la vegetación, mientras que las hierbas anuales solo se presentan en años lluviosos y bajos los 4.200 m.s.n.m.

## Conclusiones

Los 12 pisos de vegetación presentes en la Provincia de Choapa se circunscriben a la Subregión biogeográfica de Chile central, con excepción de las formaciones dominadas por *F. thurifera* que indicarían el límite sur de la zona de transición biogeográfica.

Por su parte, la altitud tiene un efecto positivo tanto en la riqueza de especies como en la cobertura, pero no se presenta como buena predictora. También tiene efecto sobre la distribución de los diferentes tipos de hábitos, siendo el tipo herbáceo perenne el dominante en los sectores cordilleranos, situación que se corrobora con otros sitios cordilleranos de la zona central de Chile. Por último y para poder determinar una mejor correlación entre estas variables comunitarias y la altitud, se debe continuar con los mecanismos de monitoreo y en lo posible aumentar los sitios de muestreo de manera espacial, con especial énfasis entre los 1.500 y 2.500 m.s.n.m. debido a que este intervalo altitudinal no está representado.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## Literatura citada

**CAVIERES, L., A. PEÑALOZA, A y MT KALIN-ARROYO. 2000.** Altitudinal vegetation belts in the high-Andes of central Chile (33°S). *Revista Chilena de Historia Natural*. 73: 331-344.

**DONOSO, C. 1997.** *Ecología Forestal. El Bosque y su Medio Ambiente*. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.

**DUBROEUCQ, D. Y P. LIVEAIS. 2004.** Land cover and land use changes in relation to social evolution—a case study from Northern Chile. *Journal of Arid Environments* 56: 193–211

**GAJARDO, R. 1994.** *La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica*. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.

**GUTIÉRREZ, J., P. LÓPEZ-CORTES y MARQUET, P. 1998.** Vegetation in an altitudinal gradient along the Río Loa in the Atacama Desert of northern Chile. *Journal of Arid Environments*. 40: 383-399.

**LUEBERT, F. & R. GAJARDO. 2004.** Antecedentes sobre la vegetación de la cordillera de los Patos, Andes de Chile central (Región de Valparaíso, V). *Chloris Chilensis* Año 7. N° 2. URL: <http://www.chlorischile.cl>

**LUEBERT, F. y P. PLISCOFF. 2007.** *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.

**MALDONADO, A. y C. VILLAGRÁN. 2002.** Changes in the Semiarid Coast of Chile (32°S) during the Last 6200 cal Years Inferred from a Swamp-Forest Pollen Record. *Quaternary Research*. 58: 130-138

**MALDONADO, A. y C. VILLAGRÁN. 2006.** Climate variability over the last 9900 cal yr BP from a swamp forest pollen record along the semiarid coast of Chile. *Quaternary Research*. 66:246–258

**MALDONADO, A. y E. ROZAS. 2008.** Clima y paleoambientes durante el cuaternario tardío en la Región de Atacama. En: *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama*. Squeo FA, G Arancio & JR Gutiérrez (Eds.). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena. 293-304.

**MORRONE, J. J. 2001.** Biogeografía de America Latina y el Caribe. Manuales & Tesis Sociedad Entomológica Aragonesa, Vol. 3, Zaragoza. Spain.

**MYERS, N., R. A. MITTERMEIER, C. G. MITTERMEIER, G. DA FONSECA y J. KENT. 2000.** Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403: 853-858.

**NOVOA, J. E. y D. LÓPEZ. 2001.** IV Región: El Escenario Geográfico Físico. En: Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. F.A. Squeo, G. Arancio y J.R. Gutiérrez (Eds). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 13-28

**SQUEO, F. A, R. OSORIO y G. ARANCIO. 1994.** Flora de Los Andes de Coquimbo: Cordillera de Doña Ana. Ediciones de la Universidad de La Serena, La Serena.

**SQUEO, F. A., G. ARANCIO, C. MARTICORENA, M, MUÑOZ y J. GUTIÉRREZ. 2001.** Diversidad Vegetal de la IV Región de Coquimbo, Chile. En: Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. F.A. Squeo, G. Arancio y J.R. Gutiérrez (Eds). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 149-158.

**SQUEO, F. A., Y. TRACOL, D. LÓPEZ, M. LEÓN y J. GUTIÉRREZ. 2008.** Vegetación nativa y variación temporal de su productividad en la Provincia de Elqui. En: Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y cambio del clima. Cepeda PJ (ed). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 168-191.

**VILLAGRÁN, C. y L. F. HINOJOSA. 1997.** Historia de los bosques del sur de Sur América, II: Análisis fitogeográfico. Revista Chilena de Historia Natural. 70: 241-267

**VILLAGRÁN, C. y L. F. HINOJOSA. 2005.** Esquema biogeográfico de Chile. En: Regionalización Biogeográfica en Iberoamérica y tópicos afines. Jorge Llorente Bousquets & Juan J. Morrone, Eds. Ediciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, Jiménez Editores, México. 551-577.





#### IV

### Vivero Monte Aranda

**Juan Pablo Ruiz, Carolina Urtubia y Mauricio Muñoz,**  
Jaime Illanes & Asociados Consultores S.A.

## Introducción.

El Proyecto Integral de Desarrollo (PID) de Minera Los Pelambres abarca una serie de factores ambientales en su diseño y construcción. La realización de las obras afecta a distintos componentes de la vegetación y flora, que fueron identificados y evaluados en el Estudio de Impacto Ambiental del PID, aprobado mediante Resolución Exenta (RCA) N° 038/2004. La principal obra considerada en este proyecto es la construcción del tranque de relaves en parte de la cuenca del Estero Pupío en el Fundo El Mauro, y el emplazamiento de tuberías para el transporte de los relaves (plataforma del relaveducto) desde las instalaciones de MLP hasta el tranque El Mauro con una extensión aproximada de 50 km.

Para compensar la pérdida de la vegetación existente se realizó un completo Plan Integral de Revegetación que contempla la ejecución de diversas obras para la reforestación y revegetación y las características de manejo de la masa que se generará.

El área afectada al interior de la IV región ha sido intensamente impactada por el hombre en los últimos siglos, lo que ha modificado gravemente el paisaje natural.

El Fundo Mauro se inserta dentro de un sector estepario, con presencia de matorral y bosque esclerófilo que son afectados por situaciones de topografía o relieve, producto de la posición intermedia entre el mar y la cordillera. La estructura y el nivel de desarrollo de la vegetación están fuertemente determinadas por la exposición, presentándose una mayor cantidad de elementos arbóreos en los sectores de exposición sur, en tanto que la presencia de vegetación leñosa bajas y suculentas se observan principalmente en los sectores de exposición norte y oeste. La vegetación presente es heterogénea con dominancia de mosaicos vegetacionales xéricos, principalmente con arbustos espinosos (Gajardo 1994), con un clima mediterráneo árido, presentando un largo periodo de aridez de alrededor de 9 meses (Di Castri, 1968). Este tipo de estructura es similar a la observada en todos los sectores de la cuenca del Choapa y en la zona central del país, destacándose especies como *Colliguaja odorífera* (colliguay), *Adesmia confusa* (palhuén), *Flourensia thurifera* (maravilla del campo), *Puya berteroaana* (chagual), *Retanilla trinervis* (tevo), *Acacia caven* (espino), *Lithrea caustica* (litre) y *Quillaja saponaria* (quillay).

Dentro de la cuenca del Fundo El Mauro se encuentra una formación de bosque hidrófilo denso de fondo de quebrada, con una cobertura entre el 70 y 90%, restringido a los esteros y quebradas más importantes que

componen la cabecera del Estero Pupio. Se observa la presencia de una matriz compuesta por *Luma chequén* (chequén) y *Shinus polygamus* (huingán), mezcladas con algunos individuos de *Drimys winteri* (canelo), *Maytenus boaria* (maitén), *Quillaja saponaria* (quillay) y *Salix humboldtiana* (sauce amargo). La presencia de canelo y chequén hacen de estas unidades sitios de alto interés tanto a nivel local como regional, siendo la formación vegetal de mayor relevancia a ser afectadas por el PID.

Debido a la envergadura del proyecto se están implementando medidas para minimizar las pérdidas de las formaciones vegetales. Estas son:

- Conservación de áreas biológicamente similares, y
- Enriquecimiento, a través de la reforestación de individuos de diferentes especies, en zonas que presenten hábitats y condiciones similares.

Dentro del marco general del plan de manejo de la vegetación afectada por el proyecto, se plantea en uno de los objetivos generales la restauración de la vegetación nativa existente en la zona del proyecto, especialmente los bosques de fondo de quebrada.

Dentro del espíritu de compensación y restauración del ecosistema dañado se deberá rescatar el material del germoplasma presente en el área afectada, donde se identificaron las unidades que constituyen bosque de acuerdo con el D.L. 701, esto es, aquellas formaciones que presenten un cubrimiento de copas de la estrata arbórea superior al 10%, en un área mayor a 0,5 ha, y más de 40 metros de ancho. En estas unidades se identificaron todos los componentes de la flora dentro de los bosques esclerófilos e hidrófilos incluyendo las especies en categoría de conservación presentes a nivel de árboles, arbustos, hierbas, suculenta y cactácea.

Para el cumplimiento de los compromisos de revegetación y reforestación se acondicionó un Vivero ubicado en el Fundo Monte Aranda (V.M.A.) cuyo objetivo es generar las plantas que serán utilizadas para las reforestaciones y revegetaciones utilizando material de germoplasma principalmente de los sectores del Fundo El Mauro y los sectores afectados por el Proyecto, para mantener y conservar las características propias del bosque hidrófilo de fondo de quebrada, así como su material genético.

## Vegetación afecta al proyecto.

La vegetación y la flora presente en los sectores afectados por el proyecto fueron evaluados y cuantificados generándose para el Vivero Monte Aranda 5 tipos de requerimientos vegetacionales, estos son:

- Bosques. Se identificaron las unidades que conformaban bosques de acuerdo a la definición del D.L. 701.
- Quillayes. En el marco de la aplicación del D.S. 366 del 17 de febrero de 1944 del Ministerio de Tierras y Colonización, el Proyecto requirió solicitar ante el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) permisos para la corta de todos los ejemplares de la especie *Quillaja saponaria* (quillay) que no constituyan bosque, de acuerdo con la definición del bosque establecida en el DL 701/74.
- Especies en categoría de conservación. Se han considerado las especies leñosas bajas y no leñosas que se encuentran en alguna categoría de conservación, utilizando como referencia el "Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo" (Squeo et al., 2001).
- Palma Chilena (*Jubaea chilensis*). Se considera dentro del Fundo Monte Aranda un área para potenciar el desarrollo de grupos de Palma chilena.
- Canelo (*Drimys winteri*). Se considera dentro del Fundo Monte Aranda un área de enriquecimiento de las actuales formaciones boscosas hidrófilas de fondo de quebrada con ejemplares de Canelo.

### Bosques asociados al D.L.701

Para cuantificar la vegetación que será afectada por el PID se identificaron las formaciones boscosas en los sectores asociados a la cubeta y obras asociadas al tranque Mauro, los sectores del trazado de la plataforma del relaveducto y los sectores de los túneles, caminos de accesos y botaderos (obras anexas). La cuantificación de las superficies se desglosa en la Tabla N°1.

**Tabla 1:**

Superficie general de bosques afectados en el desarrollo del Proyecto Integral de Desarrollo (PID).

Tipología de Bosque	Superficie afecta a corta (ha)		
	El Mauro	Plataforma	Obras Anexas
Bosque esclerófilo	463,46	77,14	8,95
Bosque hidrófilo	135,06	2,2	0
<b>TOTAL</b>	<b>598,52</b>	<b>79,34</b>	<b>8,95</b>

## Ejemplares de Quillaja saponaria (quillay) asociados al PID.

En las unidades vegetacionales que no constituyen bosque se realizó un censo de los ejemplares de quillayes, contabilizando los individuos mayores a 2 m de altura y DAP (Diámetro a la altura del Pecho, 1,3 m aprox.) superior a 5 cm. En el caso de los ejemplares multifustales se consideraron los 3 fustes de mayor DAP.

De acuerdo al compromiso adquirido en el EIA del PID, se establece como medida de compensación la reforestación en una razón de 10:1, es decir se deben plantar 10 individuos por cada quillay cortado.

A continuación se presenta en la Tabla N°2 la abundancia de ejemplares de Quillaja saponaria que se desarrollan fuera de las formaciones boscosas en los sectores del Tranque El Mauro, el trazado de la Plataforma y las Obras Anexas (portales de túneles, caminos de acceso y botaderos) y el número de ejemplares a reforestar.

**Tabla N°2.**

Cortas de ejemplares de Quillaja saponaria (quillay) dispersos en las diferentes obras del PID.

Especie	Número de Ejemplares Dispersos	Número de ejemplares a plantar
El Mauro	1.944	19.440
Plataforma	426	4.260
Obras Tempranas	105	1.050
<b>Total</b>	<b>2.475</b>	<b>24.750</b>

## Especies con Problemas de Conservación.

Dentro de los compromisos adquiridos en el PID se identificaron las especies leñosas bajas y no leñosas que no se incluyeron en la descripción de las masas boscosas. A partir de estos antecedentes se elaboró la lista de especies con problemas de conservación a compensar y el número de ejemplares a afectar.

En el sector del Tranque El Mauro se identificaron 23 especies, de las cuales las mas abundantes, sobre 1000 ejemplares son: *Adesmia confusa* (Figura 1a); *Chloraea bletioides*; *Chusquea cumingii*; *Haploppapus integerr-*

*mus*; *Leucocoryne ixioides*; *Loasa triloba*; *Mimulus glabratus*; *Phycella ignea* (Figura 1b); *Trevoa quinquinervia*. Mientras que las menos abundantes, con menos de 100 ejemplares en el área de estudio son: *Astragalus amatus*; *Bridgesia incisifolia* (Figura 1c); *Escallonia rubra*.

A



B



C



**Tabla 1:**

Especies en categoría de conservación en Fundo El Mauro. A) *Adesmia confusa* (vulnerable); B) *Physella ignea* (insuficientemente conocida) y C) *Bridgesia incisifolia* (Vulnerable).

Del mismo modo, de manera general y a lo largo del trazado de la plataforma se identificó la presencia de 51 especies con problemas de conservación. Las especies observadas con amplia distribución fueron: *Alstroemeria pallida*, *Carex setifolia*, *Cynanchum chilense*, *Eriosyce sandillon* (= *Eriosyce aurata*), *Galium suffruticosum*, *Homalocarpus dissectus*, *Ligaria cuneifolia*, *Madia chilensis*, *Oxalis illapelina*, *Porlieria chilensis* y *Quillaja saponaria*. En tanto que las especies que presentaron la distribución más restringida fueron: *Adesmia papposa*, *Agoseris chilensis*, *Anemone decapetala*, *Azolla filiculoides*, *Chaetanthera tenella*, *Cheilanthes glauca*, *Colliguaja salicifolia*, *Galinsoga parviflora*, *Gymnophyton isatidicarpum*, *Kageneckia angustifolia*, *Mimulus glabratus*, *Mutisia spectabilis*, *Schizanthus parvulus*, *Sisyrinchium graminifolium*, *Solenomelus pedunculatus*, *Tetilla hydrocotylifolia*, *Tristagma nivale* y *Valeriana bridgesii*.

### **Palma Chilena (*Jubaea chilensis*).**

Dentro del Fundo Monte Aranda se consideró un área para potenciar el desarrollo de pequeños grupos de *Jubaea chilensis* (palma chilena) que actualmente crecen en la cabecera de la Quebrada Bodega. Dentro de esta área, de 193 ha, se ha destinado la plantación de 20 ejemplares por ha, lo que genera un total de 3.869 nuevos ejemplares. Las semillas serán de procedencias locales para mantener la base genética presente en el sector.

### **Canelo (*Drimys winteri*).**

El Canelo es una especie que actualmente se encuentra en categoría de Peligro de Extinción en la IV Región de Coquimbo destinándose grandes esfuerzos en recrear el área de fondo de quebrada donde se encuentran presentes. En este marco se pretenden establecer medidas que permitan recrear los bosques de fondos de quebradas y enriquecer los sectores en que se presenta esta especie y que no serán afectadas por el PID.

## Requerimiento de plantas.

Las reforestaciones y enriquecimientos comprometidos generan un alto número de plantas que deben ser propagadas y mantenidas por una o dos temporadas hasta que estén en condiciones adecuadas de ser plantadas en los sectores de reforestación. Para cada compromiso se ha estimado un número de plantas, sin embargo estas podrían tener algunas variaciones por la magnitud del proyecto. El número total de plantas ha propagar bordea las 850.000, que se desglosan en cinco (5) compromisos, presentados en la Tabla N°3. Dentro de los requerimientos totales se debe aumentar un 15 % de la producción total a modo de holgura por eventualidades naturales que puedan ocurrir como falta de agua, problemas fitosanitarios, o plantas rechazadas de plantación porque no alcanzar la altura necesaria para ser llevadas a terreno. Del mismo modo se aumenta la producción un 25 % para reponer las plantas que no logran sobrevivir durante los dos primeros años de establecimiento de la plantación.

**Tabla N°3.**

Requerimientos de plantas según el compromiso adquirido en el PID.

Compromiso	Cantidad de plantas
Bosque nativo afecto a DL 701	391.883
Individuos aislados D.S. 366 (quillay)	19.821
Enriquecimiento Palma chilena	3.869
Enriquecimiento Canelo	4.470
Especies en categoría de conservación	185.424
<b>Subtotal</b>	<b>605.467</b>
15% holgura en producción	90.820
25% reposición en mortalidad en plantaciones	151.367
<b>TOTAL</b>	<b>847.654</b>

Se cuenta con una producción estable de 16 especies cuyos requerimientos varían anualmente. Desde el año 2006 al 2011 se han producido (o están en producción) cerca de 440 mil plantas (Tabla N°4), destacándose la propagación de más de 50.000 plantas de espino, litre, quillay y huingán, ampliamente utilizados en las reforestaciones debido al ambiente de seco presente en el sector. De estas 16 especies 11 son requeridas para generar las revegetaciones y reforestaciones. Las otras 5 especies (adesmia, bollen, quilo, palma chilena y tral-huen) son generadas para completar el estrato arbustivo y enriquecimiento de las plantaciones. Los bosques de

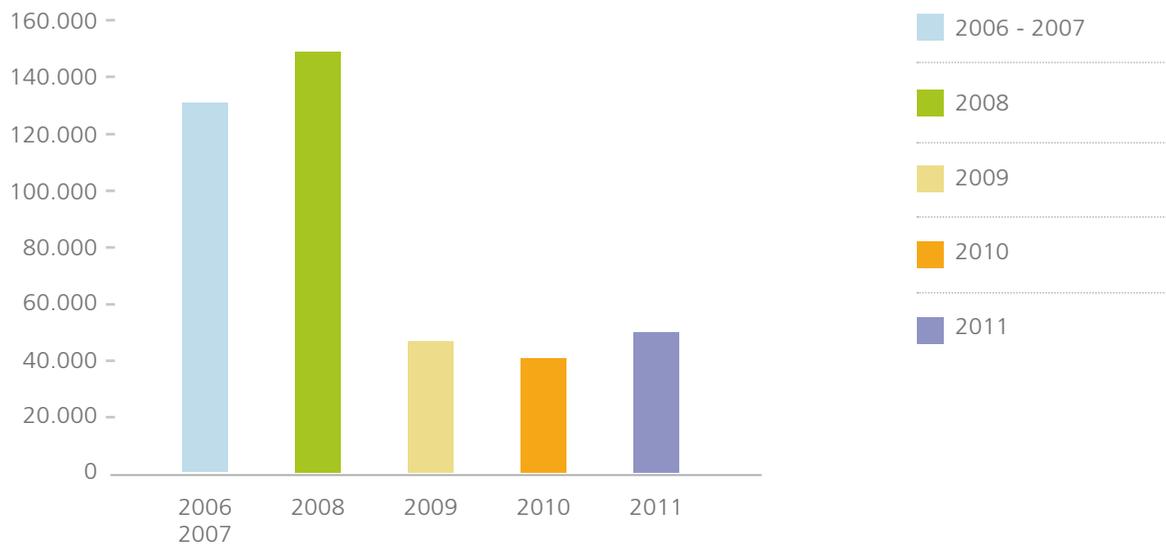
fondo de quebradas deben ser enriquecidos con especies hidrófilas como canelo y chequén de los que se han generado más de 30.000 plantas. Las especies son mezcladas de acuerdo al tipo de reforestación a realizar, ya sea de tipo esclerófila, ó hidrófila y del sector a utilizar por sus características de exposición y edáficas.

**Tabla N°4.**

Requerimiento de plantas por especie, considerando la producción desde al año 2006 hasta el 2011.

<b>Especie</b>	<b>Cantidad</b>
<i>Acacia caven</i> (espino)	66.617
<i>Adesmia sp.</i> (adesmia)	579
<i>Cryptocaria alba</i> (peumo)	7.862
<i>Drimys winteri</i> (canelo)	32.568
<i>Jubaea chilensis</i> (palma chilena)	3.869
<i>Kageneckia oblonga</i> (bollén)	5.268
<i>Lithrea caustica</i> (litre)	72.984
<i>Luma chequen</i> (chequén)	35.764
<i>Maytenus boaria</i> (maitén)	36.457
<i>Muehlenbeckia hastulata</i> (quilo)	579
<i>Porlieria chilensis</i> (guayacán)	4.119
<i>Prosopis chilensis</i> (algarrobo)	6.455
<i>Quillaja saponaria</i> (quillay)	72.232
<i>Salix humboldtiana</i> (sauce)	4.297
<i>Schinus polygamus</i> (huingán)	82.471
<i>Talquenea quinquenervia</i> (tralhuen)	7.800
<b>TOTAL PLANTAS</b>	<b>436.052</b>

Los requerimiento anuales varían entre las 40 y 60 mil plantas, sin embargo entre los años 2006, 2007 y 2008 se produjo un aumento en la producción por sobre las 120.000 plantas debido a que se las reforestaciones comprometidas se realizaron en paralelo en los Fundos Monte Aranda y El Mauro. Los años posteriores las reforestaciones se han concentrado solo en el Fundo Monte Aranda. En la Figura N°2 se observan los requerimientos anuales comprometidos hasta el año 2011.



**Figura N°2.**

Número de plantas requeridas anualmente al vivero Monte Aranda.

A la producción de las especies anteriores se debe agregar la producción de 73 especies que se encuentran en alguna categoría de conservación. Algunas de estas especies son estacionales, principalmente bulbosas, por lo que su producción se focaliza en algunos meses.

En total en el vivero se propagan 16 especies en forma permanente, para cumplir con los compromisos de reforestación. A esto se debe agregar la producción de 47 de las 73 especies en categoría de conservación, debido a que las demás se espera la recolonización natural en el Fundo Monte Aranda, generando un total de 63 especies, lo que hace al Vivero Monte Aranda un pionero en la producción de especies nativas en Chile.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## Vivero.

Con el objetivo de lograr un adecuado funcionamiento y desarrollo de las actividades del Vivero existente en el Fundo Monte Aranda, y con miras a obtener la provisión de plantas necesaria para la implementación del PIR del Proyecto Integral de Desarrollo, se diseñó un Plan de Trabajo para este efecto.

En la ejecución del presente plan se establecieron cinco tareas, las cuales han sido realizadas de manera paralela en función de los requerimientos del vivero forestal y cuya intensidad estará determinada por los requerimientos emanados de la implementación del Plan Integral de Revegetación.

### Plan de Trabajo

El plan de trabajo del vivero Monte Aranda implica la ejecución de cinco (5) actividades, las cuales tienen un carácter de permanentes en el tiempo, complementarias, no excluyentes y dinámicas en su implementación y tareas que la componen. Las actividades definidas son:

- **Actividad 1: Capacitación del personal.**

Todo el personal ha sido y es constantemente capacitado en distintas áreas de viverización de plantas, educación ambiental y seguridad laboral. De acuerdo a las capacidades y responsabilidades del personal se han asignado labores específicas a realizar dentro del funcionamiento normal del vivero.

- **Actividad 2: Definición de especies y colecta de germoplasma.**

El personal está capacitado y entrenado para realizar colectas en sectores donde se encuentran las especies requeridas. Esta actividad se realizará durante toda la vida útil del vivero y se adecuará a los requerimientos de revegetaciones solicitadas.

### • **Actividad 3: Infraestructura.**

Se diseñó un vivero que permite el óptimo uso de los espacios y recursos disponibles, adecuándose a los altos requerimientos y estándares de calidad que deben tener las plantas. Para esto se generaron zonas de tratamientos de germinación y camas calientes, sector de compostaje, bodegas, instalaciones para el personal, entre otras. El diseño permite que algunos sectores se adecuen o se modifiquen de acuerdo a los requerimientos anuales de plantas.

### • **Actividad 4: Programa de producción.**

Se ha diseñado un completo programa de producción que establece los requerimientos y metas anuales, con una proyección mínima de dos (2) años más. Estas metas son ajustadas según los nuevos requerimientos que surjan en el transcurso del proyecto. Todas las actividades de producción son supervisadas y asesoradas en forma permanente por personal idóneo en el tema durante todo el periodo contemplado del proyecto.

Junto con el programa de producción se ha diseñado un programa sanitario para evitar enfermedades que comprometan la producción de las plantas. Este programa cuenta además con el apoyo constante de especialistas en el tema que supervisa constantemente el estado de las plantas. En caso de contingencias mayores se realizan protocolos específicos según el problema fitosanitario presentado.

### • **Actividad 5: Informes y comunicación.**

Durante todo el tiempo de funcionamiento del vivero se ha mantenido y se mantiene una comunicación inmediata de las actividades y contingencias que se producen, generándose informes mensuales con las tareas del vivero y las metas cumplidas en cada periodo. Esta información está disponible en las dependencias del vivero para consulta de la autoridad.

El Vivero Monte Aranda comenzó a construirse en el año 2003 con una producción de 15 mil plantas (Figura 3), principalmente de canelo, quillay y maitén. Con la generación del PID no era posible satisfacer los requerimientos de plantas por capacidad y falta de una infraestructura específica para el manejo de ciertas especies. Con el aumento de los requerimientos en el año 2005-06 se realizó la primera expansión de 4.500 m<sup>2</sup>, para

mantener alrededor de 220.000 plantas de 15 especies diferentes (Figura 4) permitiendo optimizar los espacios y los recursos. El diseño consideró la utilización de vigas con un distanciamiento de 5 m X 5 m y una altura de 2,5 m. El techo se cubrió con macha Rachel de diferentes densidades para generar diferentes niveles de sombra según los requerimientos de las especies. En cada pasillo se construyeron platabandas de 20 m de largo por 1 m de ancho, con capacidad para 2.000 bolsas por platabanda. Antes de la instalación de las bolsas el suelo se cubrió con plástico de color negro para evitar el crecimiento de malezas. En conjunto con la construcción de las platabandas se construyó un sistema de riego con tuberías instaladas subterráneamente y riego mediante aspersores, que permite el abastecimiento de agua para toda la vida útil del proyecto.



**Figura 3.**

Aspecto del Vivero Monte Aranda antes de su ampliación en el año 2005, destinado principalmente a la producción de Canelo, quillay y maitén.



**Figura 4.**

Secuencia de ampliación del vivero. Superior izquierda, sector del emplazamiento del vivero. Superior derecha, instalación de los postes y macha Rachel. Inferior izquierda, construcción de platabandas e inferior derecha, sistema de riego operando.

Debido a que los requerimientos generados aumentaron durante los 2 últimos años se realizó la construcción de un invernadero 200 m<sup>2</sup> (Figura 5) destinado a la propagación vegetativa y a la estratificación de semillas de palma chilena, además se realizó una nueva ampliación del vivero de 1000 m<sup>2</sup> (Figura 5b) para mejorar las condiciones de humedad, luminosidad y aireación de plantas de tipo hidrófilas como canelos, peumos y chequenes.

A



**Figura 5.**

Ampliación del vivero con mayor aireación y menor luminosidad. Página siguiente, aspecto del invernadero destinado a la propagación vegetativa o por estacas.

B



Dentro del funcionamiento normal del vivero se trabaja con tres tipos de contenedores para la germinación de las semillas, directamente en bolsas o mediante almacigueras, emplazadas en el suelo o en bandejas de plumavit (speedling). El sistema a utilizar depende del tipo y del tamaño de las semillas (Figura 6).



**Figura 6.**

Diferentes contenedores para la germinación de las semillas. Izquierda bolsas de plástico, centro almacigueras emplazadas en el suelo y derecha almacigueras en bandejas de plumavit.

El sustrato utilizado para las bolsas, almacigo en suelo y en bandejas son preparados y mezclados en el vivero, adecuados a cada tipo de contenedor.

## Propagación de plantas.

En el vivero Monte Aranda la propagación de las especies se realiza según los dos (2) métodos convencionales de propagación que permiten mantener y aumentar la variabilidad genética propia del sector de secano y de los bosques de fondo de quebrada. Estos métodos son la propagación sexual y la asexual.

En la propagación sexual, se utilizan las semillas como material genético inicial lo que permite aumentar la variabilidad genética de las especies debido a la recombinación de genes de diferentes individuos de una misma especie, en la mayoría de los casos. Además permite obtener un alto número de plantas en los años de mayor fructificación.

En el caso de la propagación asexual, se utilizan explantes de la planta madre como estacas, bulbos, rizomas, entre otros. La principal ventaja es que mantiene las características originales de la planta madre, generando clones, los que permiten mantener las características genéticas de un individuo. Una segunda ventaja es que permite la propagación de especies en años de muy baja producción de semillas o cuando éstas no son viables o su capacidad de germinación es muy reducida.

### Propagación sexual o por semillas.

Este tipo de propagación se inicia con la colecta de las semillas en diferentes sectores dentro del Fundo El Mauro y Monte Aranda, en laderas y en bosques de fondo de quebradas (Figura 7a). La colecta se realiza cuando la semilla ha alcanzado la madurez necesaria para su germinación, lo que se observa con el cambio de color del fruto o la apertura de las cápsulas para la expulsión de las semillas (Figura 7b y c).



**Figura 7.**

A) Sectores de colecta en fondos de quebradas en el Fundo El Mauro. B) y C) frutos maduros de maitén y canelo, respectivamente, cosechados para extraer sus semillas.

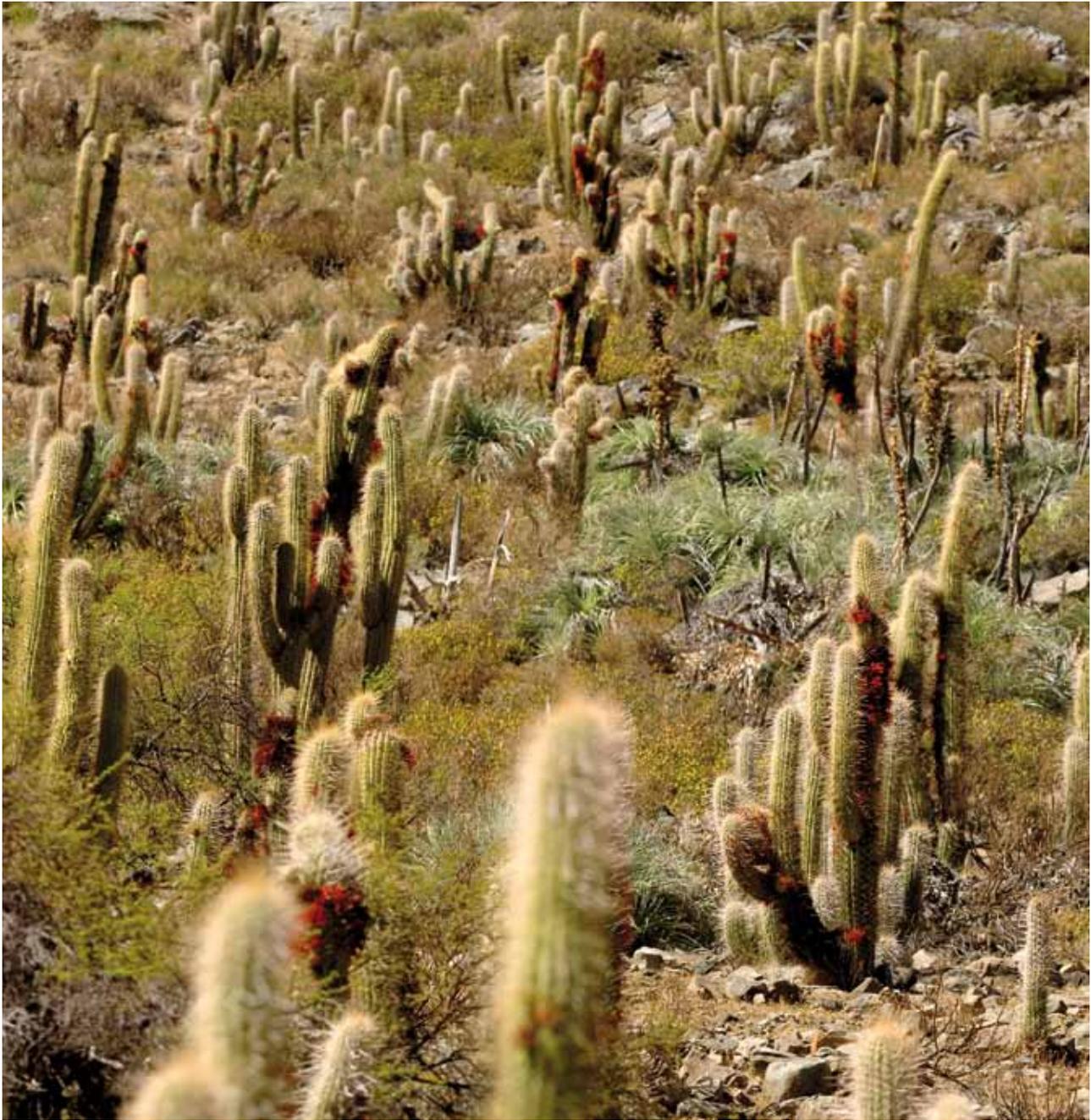
### Colecta de semilla.

Las fechas de colecta, así como el periodo de almacenamiento y épocas de siembra son específicas para cada especie, concentrando la colecta en los meses de diciembre a marzo, y la siembra desde marzo a junio aproximadamente (Figura 8).



### Figura 8.

Diferentes tipos de semillas colectadas. Se mantienen bajo sombra hasta su procesamiento, que incluye limpieza y pesaje y almacenamiento. Foto superior, semillas de haplopapus (izquierda) y espino (derecha), foto inferior huigán (izquierda) y Colliguay (derecha).



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.



**Figura 9.**

Limpieza y pesaje de semillas colectadas.

102

### Siembra.

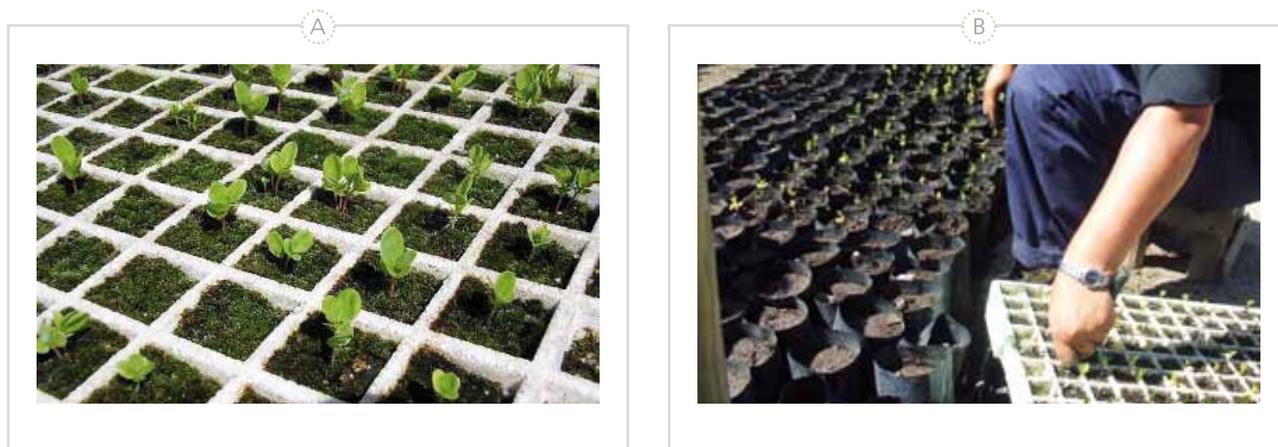
Antes de sembrar las semillas son hidratadas por 24 horas aproximadamente. Cada tipo de semilla se destina a diferentes contenedores dependiendo de su tamaño y facilidad de manipulación por parte de los operarios, por ejemplo se siembran directamente a bolsas el litre, espino y algarrobo (Figura 10a), a bandejas de plumavit se siembran el maitén, quillay, arrayán, entre otras (Figura 10b), y en almácigos se siembran el canelo palma, bollén huingán entre otras (Figura 10c). En algunas ocasiones una misma especie se puede utilizar dos tipos de contenedores dependiendo de la disponibilidad de semillas.



**Figura 10.**

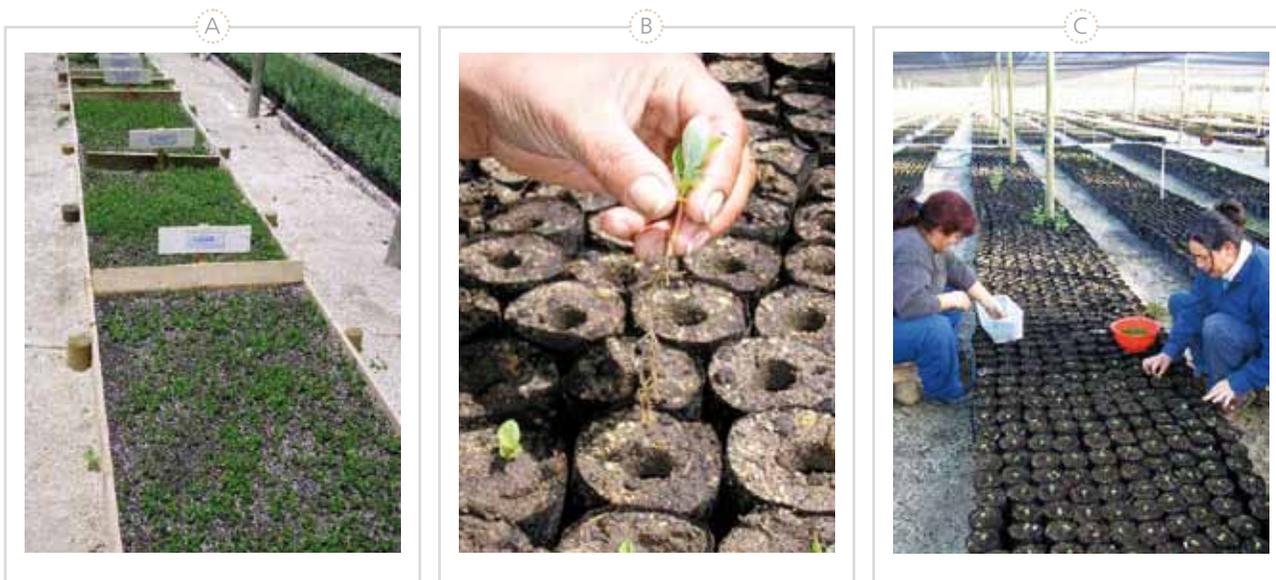
Siembra en diferentes tipos de contenedores. Izquierda, directamente a bolsas, centro, en bandejas de plumavit y derecha en almacigueras a nivel del suelo.

Una vez germinadas las semillas en las bandeja de plumavit (Figura 11a y b) y desde las almacigueras, las plántulas son repicadas a bolsas para su desarrollo y crecimiento hasta su completar el tiempo de viverización y ser trasladadas a plantación (Figura 12a, b y c).



**Figura 11.**

a) Semillas germinadas en bandejas de plumavit. Luego son repicadas directamente a bolsas (b).



**Figura 12.**

a) Germinación masiva de plántulas en almacigueras a nivel del suelo, las que son en forma individual repicas a bolsas (b y c).

### **Propagación vegetativa o por estacas.**

Este tipo de propagación se realiza para algunas especies que se requiere conservar su potencial genético como el canelo y chequén y para otras especies cuyas semillas no son viables o muy difíciles de coleccionar.

Inicialmente se coleccionan ramas largas, en sectores del bosque con buena luminosidad y aireación, disminuyendo los riesgos de enfermedades fungosas, y de diferentes árboles para mantener una diversidad de la población.

Las ramas son trasladadas al vivero manteniendo la humedad en la base del corte. Durante el procesamiento son cortadas en trozos de menor tamaño entre 15 a 20 cm dejando sólo un par de hojas en la zona apical. A cada estaca se le aplican fungicidas durante su manejo y antes de ser plantadas se aplica un enraizante comercial en la base (Figura 13).



**Figura 13.**

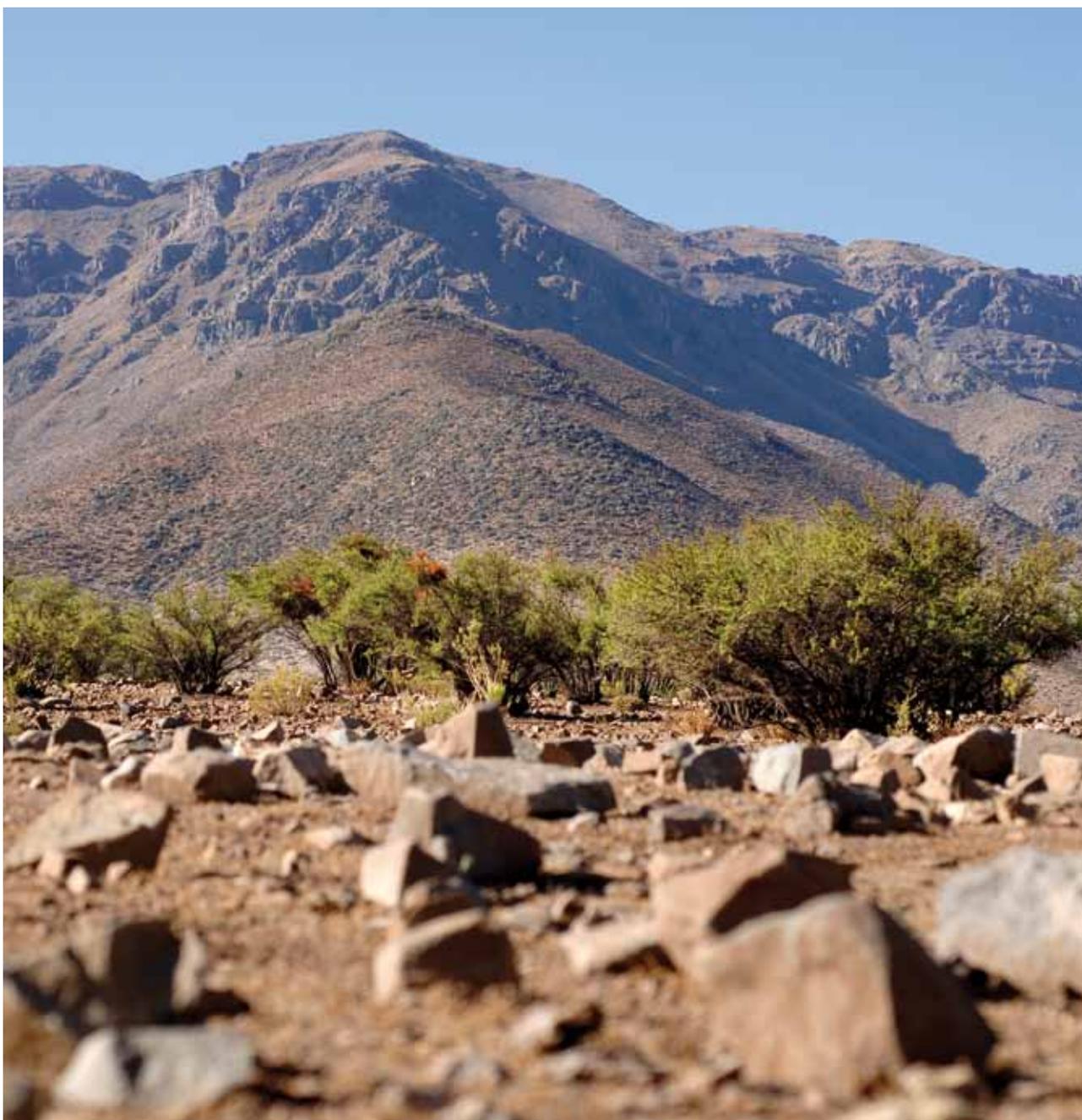
a) Aspecto de las ramas de canelo colectadas desde El Fundo El Mauro. b) corte de las ramas en estacas más pequeñas de 15 a 20 cm. c) aplicación de enraizante en la base de las estacas.

Las estacas son mantenidas en invernadero por un periodo de tiempo que permita el desarrollo de raíces adventicias. Luego de esto las estacas enraizadas son cambiadas a bolsas y se trasladan a vivero para continuar su proceso de crecimiento (Figura 14).



**Figura 14.**

Estacas de canelo (izquierda) y chequén (centro) mantenidas en invernadero hasta la formación de raíces adventicias en la base como se observa en la estaca de chequén (derecha).



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### Desarrollo y crecimiento de las plantas.

Las plántulas son mantenidas en bolsas de polietileno durante todo el proceso de viverización que puede ser desde un año hasta los tres (3) dependiendo de la velocidad de crecimiento y de los requerimientos de plantación establecidos. Se ha desarrollado un completo plan de fertilización a nivel foliar y radicular que ayudan al adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas, además de mantener un estricto control en la frecuencia, tiempo de riego y caudal aplicado. Las plantas, dependiendo de la especie, se distribuyen en distintos sectores del vivero según su tolerancia a la sombra y al sol (Figura 15).



**Figura 15.**

Desarrollo y crecimiento de plántulas de quillay, se observa el proceso de crecimiento a partir de la germinación en bolsas (A) el desarrollo de nuevas hojas (B) y su crecimiento en altura (C).

En cada temporada de viverización es posible obtener un crecimiento cercano a los 30 a 40 cm en promedio dependiendo de la especie y el hábito de crecimiento (Figura 16).



**Figura 16.**

Crecimiento de las plantas en vivero en diferentes años. En esta página aspecto de las plantas en septiembre del año 2006 (arriba) y enero 2007 (abajo). En la página siguiente, crecimiento observado en febrero de 2008 (arriba) y marzo 2009 (abajo).



## Control nutricional

Para mantener un adecuado crecimiento, desarrollo aéreo, radicular y vigor de las plantas es necesaria la aplicación de fertilizantes que complementen los nutrientes más limitantes o que estén presentes en menor cantidad en la mezcla de sustrato. La carencia de los macro o micronutrientes se puede manifestar generalmente con el amarillamiento hasta la clorosis de las hojas, disminución de su tamaño y manchas en las láminas y disminución del vigor. Los síntomas pueden estar asociados a la escasez de uno o más nutrientes (Figura 17).



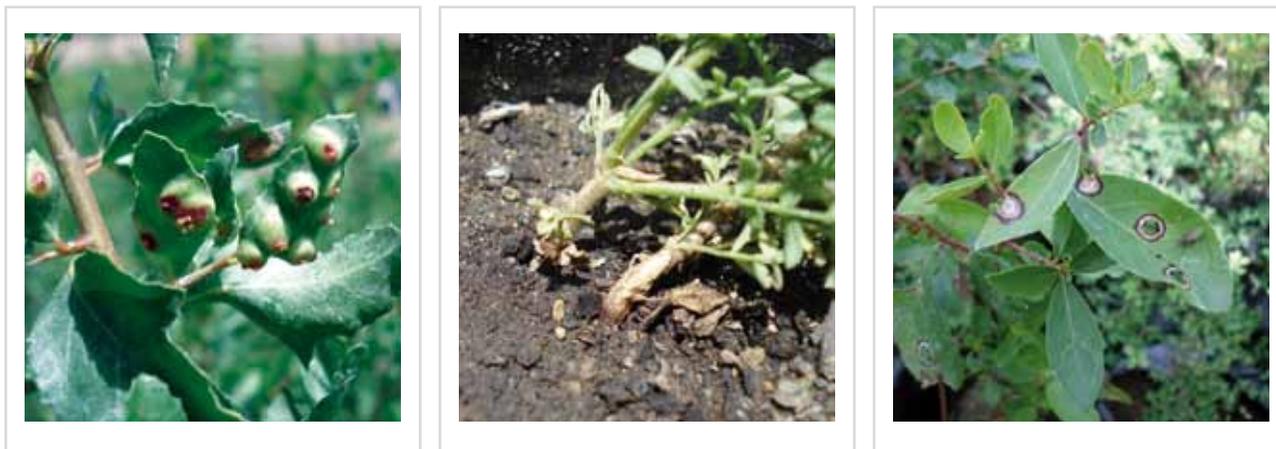
**Figura 17.**

Clorosis presentes en las hojas superiores de quillay y bollén (izquierda y centro) y en plantas completas de quillay (derecha).

## Control Fitosanitario.

La producción masiva de planta implica un riesgo de presentarse enfermedades fitosanitarias comunes en las plantas nativas como la presencia de hongos o insectos. Es común que en viveros se observen la presencia de ciertos hongos de pudrición en las raíces, tallos y hojas debido a la humedad, nutrientes y temperaturas cálidas que permiten el desarrollo de estos patógenos. Se suman a estos las plagas típicas de algunas especies como pústulas presentes en huinganes y pimientos.

Para evitar que estas situaciones no afecten la producción de plantas se hizo necesario primero la identificación de los patógenos que afectaban y posteriormente la generación de un plan fitosanitario que permite la aplicación de productos químicos específicos para cada situación que se presente, de forma preventiva y/o curativa (Figura 18).



**Figura 18.**

Problemas fitopatológicos presentados en distintas especies. Izquierda, se observan pústulas en hojas de huigán. Centro, presencia de hongos de pudrición en tallos de adesmia y derecha, hongos foliares en maitén.

### **Preparación de plantas antes de plantación.**

Antes del inicio de las labores de reforestación las plantas deben ser pre acondicionadas manteniendo una forma y altura definida, lo que se realiza mediante podas aéreas o radiculares, o ambas según sea el caso (Figura 19). Adicionalmente se aplican fertilizantes en base a macroelementos NPK (nitrógeno, fósforo y potasio) para fortalecer el sistema aéreo y fertilizantes en base a fósforo para aumentar el crecimiento de las raíces.

**Figura 19.**

Poda aérea realizada a plantas de litre y planta de espino cuya raíz principal debe ser cortada antes de la poda de raíces.

Las plantas calificadas como aptas para la reforestación deben cumplir con requisitos de altura mínima, follaje de color verde homogéneo, vigorosas, pan de raíces firme y compacto y sin presencia de enfermedades ni plagas. Estas son depositadas en caja plásticas y trasladadas en camiones hasta el sector de destino (Figura 20).



**Figura 20.**

Aspecto de una planta apta para ser llevada a plantación, las que presentan un follaje verde, vigorosas y sin presencia de enfermedades.

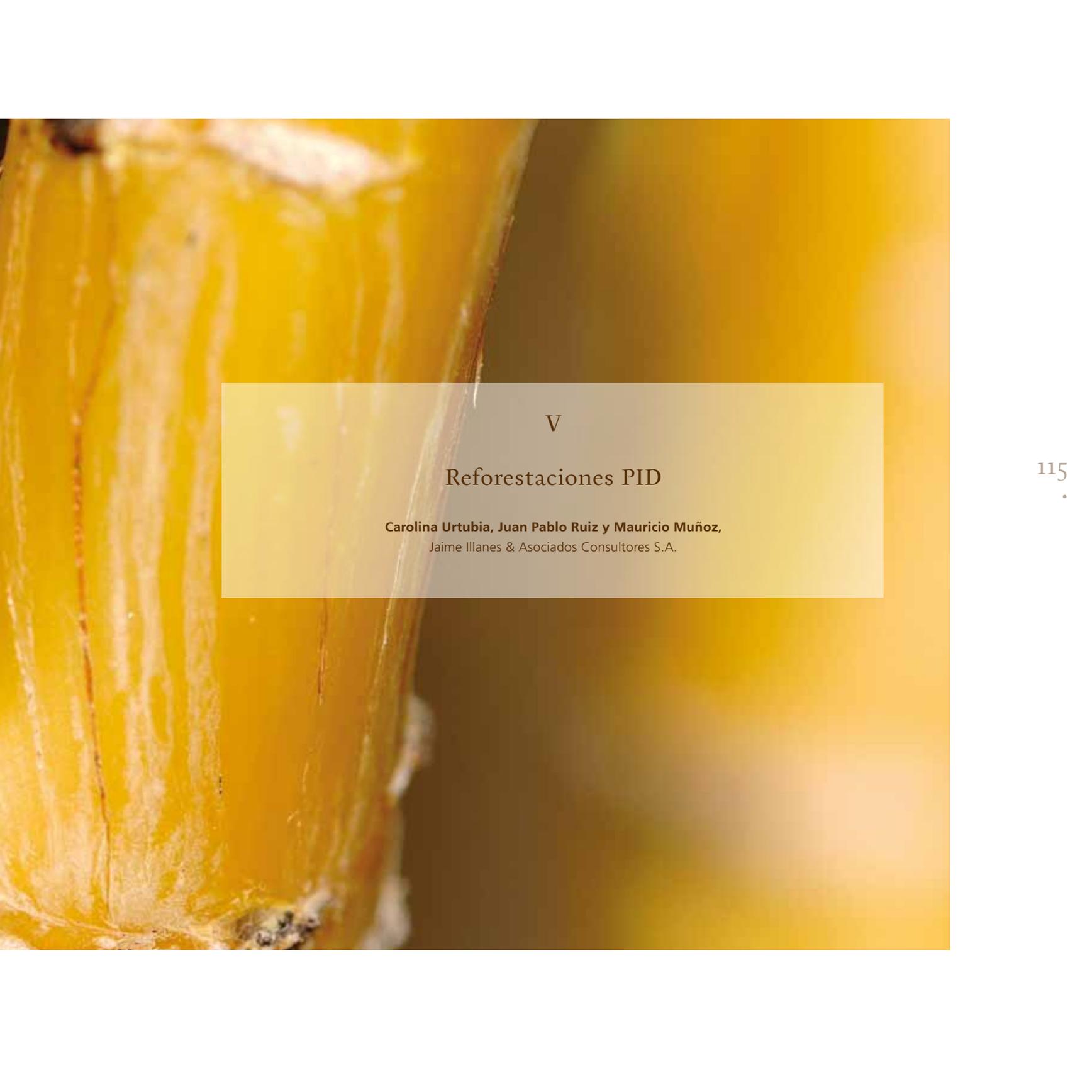
## Ordenamiento del vivero.

Después de despachadas las plantas el vivero debe ser reordenado, agrupando las plantas remanentes según su altura, las que serán utilizadas en futuras reforestaciones. El nuevo orden conlleva a realizar un nuevo inventario de la disponibilidad de plantas y se despejan sectores en las platabandas que permiten que el ciclo de producción masiva comience nuevamente con el llenado de bolsas, siembra y repique de nuevas plantas.

## Agradecimientos.

Los autores reconocen y agradecen el trabajo realizado por los Ingenieros Forestales Señores Gustavo Girón y Daniel Green, durante los primeros años de implementación del Vivero Monte Aranda.





V

## Reforestaciones PID

**Carolina Urtubia, Juan Pablo Ruiz y Mauricio Muñoz,**  
Jaime Illanes & Asociados Consultores S.A.

## Introducción.

Desde el inicio de las actividades asociadas al Proyecto Integral de Desarrollo (PID) de Minera Los Pelambres, se han focalizado los esfuerzos en el manejo adecuado, eficiente, y responsable con el medio ambiente.

El Proyecto Integral de Desarrollo (PID), aprobado mediante Resolución Exenta (RCA) N°038/2004, tiene como obra principal la construcción y posterior operación del tranque de relaves Mauro, el emplazamiento de una plataforma para conducción de relaves y agua, y obras anexas como accesos y caminos.

El desarrollo de estas nuevas obras que apoyan y sustentan las labores mineras han desembocado en una serie de impactos a nivel de vegetación y flora presentes en los distintos sectores donde se realizan las obras. La magnitud de las alteraciones depende de las obras a realizar, ya sea mediante la corta de los árboles o la inundación de sectores previa la corta de la vegetación, pero que finalmente conllevan a la pérdida total de las masas vegetacionales.

Como medida de compensación se implementó un Plan Integral de Revegetación (PIR) orientado a generar un detalle de los sectores a intervenir por las obras del PID, los sectores a reforestar y revegetar, y las características de manejo de la masa vegetal a generar, con el fin de recrear los ecosistemas afectados, en sectores cercanos al área afectada con características ecológicas similares.

La formación de estas nuevas masas boscosas debe estar compuesta por el material genético proveniente del sector afectado, conservando la diversidad y las características genéticas de las diferentes especies. Esto se realiza a través de la propagación y desarrollo de las especies en el vivero Monte Aranda mediante la colecta de semillas, esquejes, bulbos y rescate de los ejemplares con problemas de conservación y aquellas que constituyen los elementos estructurales de los sistemas vegetacionales.

El manejo de las revegetaciones y reforestaciones asociadas al Plan Integral de Revegetación (PIR) considera tres principios esenciales del manejo de la vegetación:

- Conservar el pool genético presente en los sectores afectados por el PID.
- Generar masas vegetales autosustentables en el mediano y largo plazo.
- Replicar ecosistemas afectados a partir del establecimiento de elementos y funciones claves.

Para determinar la envergadura de las áreas que se verían afectados se realizó un levantamiento detallado de las características de la vegetación y flora a intervenir, cuantificando los recursos vegetacionales que se encontraban bajo los regimenes legales aplicables al proyecto, estos son: los bosques asociados al PID (D.L. 701/74), los ejemplares de *Quillaja saponaria* (quillay) que se desarrollan fuera de las formaciones boscosas (D.S. 366/44), y las especies con problemas de conservación de acuerdo con el Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación en la Región de Coquimbo (Squeo *et al.*, 2001). El manejo de las cortas y reforestaciones de masas boscosas realizadas durante el desarrollo del PID son presentadas a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) mediante Planes de Manejo de Obras Civiles cumpliendo con el D.L.701 (1974), y en el caso de individuos que no formen bosque se presentan Planes de Manejo al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), de acuerdo al D.S. 366 de 1944.

## Formaciones boscosas asociadas al PID.

### Cuantificación de las masas boscosas

Dentro del área afectada se realizó un levantamiento de la vegetación y flora presente en las áreas del Tranque, plataforma del relaveducto y obras anexas (camino, accesos, piscinas, botaderos, etc.). Las formaciones boscosas fueron definidas de acuerdo a la definición de bosque establecida en D.L.701/74: "Sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos 5.000 m<sup>2</sup>, con un ancho mínimo de 40 metros, con cobertura de copa arbórea que supere el 10% de dicha superficie en total en condiciones áridas y semiáridas y el 25% en circunstancias más favorables".

Los bosques identificados se agruparon en tres (3) sectores: Tranque Mauro, Plataforma y obras anexas.

#### a) Tranque Mauro

El tranque de relaves del Proyecto Integral de Desarrollo se ubica en el Fundo "El Mauro", ubicado en la comuna de Los Vilos, Provincia de Choapa, IV región de Coquimbo. Sus coordenadas UTM (PSAD 56) de referencia son: Portón Ingreso Fundo "El Mauro" 6.462.539 N – 305.096 E, y la casa patronal del Fundo "El Mauro" 6.460.527 N – 309.798 E.

b) Plataforma.

Considera la apertura y habilitación de la faja para los ductos y las obras anexas necesarias para su construcción y operación como botaderos, caminos de mantención, estaciones de regulación entre otros.

c) Obras Anexas.

Se denominó así a las obras tempranas que son parte de la plataforma, y que incluyen la construcción de los portales para los túneles, depósitos de marinas, caminos de accesos y botaderos.

Para determinar las formaciones boscosas presentes en el Tranque Mauro se realizó una cartografía de la vegetación mediante la metodología de la "Carta de Ocupación de Tierras" (COT) desarrollada por la escuela fitoecológica Loui Emberger (CEPE/CNRS) Montpellier, Francia y adaptada para las condiciones ecológicas de Chile por Etienne y Contreras (1981) y Etienne y Prado (1982).

Las unidades vegetacionales se discriminaron inicialmente mediante fotointerpretación a partir de una imagen digital georeferenciada, la que fue validada y corregida en terreno, verificándose los límites de la unidad, el cubrimiento por estrato vegetal y las especies dominantes.

En los sectores de la plataforma y de obras anexas se identificaron las formaciones boscosas a lo largo de todos los trazados, considerando el área total de las servidumbres.

El levantamiento consideró además la presencia de ejemplares aislados de *Quillaja saponaria* (quillay), de acuerdo con la aplicación del D.S. 366/1944 del Ministerio de Tierras y Colonización, solicitando al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) los permisos de corta para todos los ejemplares que no constituyen bosque de acuerdo a la definición del D.L.701/74.

### **Bosques afectos a cortas.**

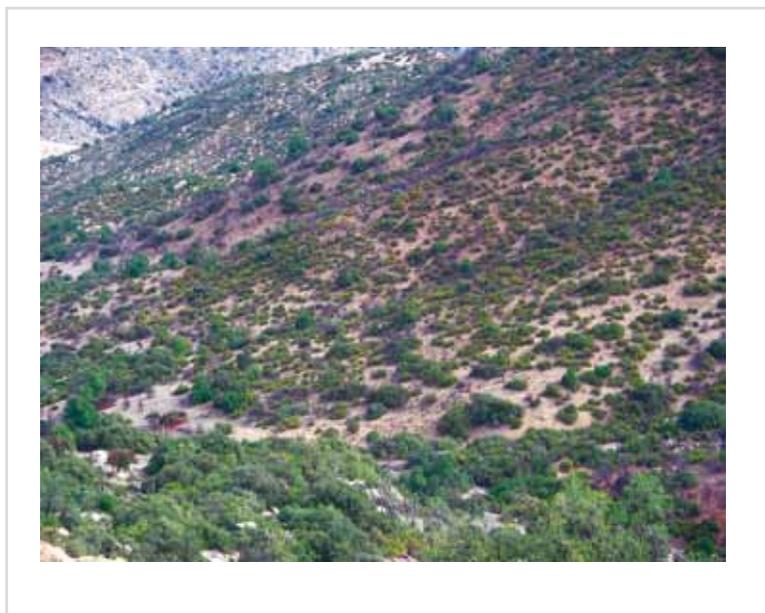
Con el análisis de la evaluación del recurso vegetal se determinó que en el área de influencia del proyecto fue posible definir dos (2) tipos de bosques: Esclerófilo e Hidrófilo, los que presentan subtipos según la composición arbórea.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

El bosque esclerófilo corresponde a las formaciones vegetacionales de tipo zonal, es decir, la vegetación que se desarrolla bajo las condiciones ambientales presentes en el área, donde destacan especies como *Quillaja saponaria* (quillay), *Lithrea caustica* (litre), *Acacia caven* (espino) y *Cryptocaria alba* (Peumo) (Fotografía N°1).

A su vez, el bosque hidrófilo corresponde a las formaciones de tipo azonal, es decir, aquellas formaciones que se desarrollan gracias a la presencia de un factor ambiental discreto en el espacio. En este caso corresponde a la presencia agua superficial, presente en el estero Pupío y sus afluentes, restringiendo su distribución a los fondos de quebradas con agua permanente, destacándose especies dominantes como Luma chequén (chequén), *Maytenus boaria* (maitén), *Quillaja saponaria* (quillay), *Lithrea caustica* (litre) y *Drimys winteri* (canelo) (Fotografía N°2).



**Figura 1.**

Bosque esclerófilo presenten en el Fundo El Mauro, con especies dominantes como espino, litre, quillay entre otras.



**Figura 2.**

Bosque esclerófilo presenten en el Fundo El Mauro, con especies dominantes como espino, litre, quillay entre otras.

La implementación de las obras del PID afectara cerca de 686,8 ha de bosque, cerca de un 80% de estas de tipo esclerófilo y un 20% corresponde a Bosque hidrófilo (Tabla N°1). En conjunto con la evaluación de los bosques se cuantificaron los individuos aislados de la especie Quillaja saponaria (quillay), las que se estiman a la fecha 2.475 ejemplares en todo el proyecto.

**Tabla 1.**

Áreas de cortas de bosques según sector y tipología en sectores afectados por el PID.

Sector	Vegetación arbórea a cortar		
	Bosque Esclerófilo (ha)	Bosque hidrófilo (ha)	N° Quillayes aislados
Tranque El Mauro	463,46	135,06	1.944
Plataforma	77,14	2,2	426
Obras Anexas	8,95	0	105
<b>Total</b>	<b>549,55</b>	<b>137,26</b>	<b>2.475</b>

Las intervenciones de las superficies de bosques se realizan en forma parcializada durante toda la duración del proyecto, a partir desde el año 2004. La calendarización de las cortas, históricas y para el futuro cercano, se presenta en la Tabla N°2 en las diferentes áreas de influencia del proyecto.

**Tabla 2.**

Calendarización de las cortas por año y por sector de obras derivadas del PID.

Sector	Año de intervención							Total (ha)
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010+	
Tranque El Mauro	3,5	42,3	80,5	7,5	19,4	40,2	405,1	<b>598,5</b>
Plataforma		43,87	35,47					<b>79,34</b>
Obras Anexas		0,88		8,07				<b>8,95</b>
<b>Total (ha)</b>	3,5	87,05	115,97	15,57	19,4	40,2	405,1	

Las cortas de bosques son planificadas y formalizadas a CONAF mediante Planes de Manejo de Obras Civiles. A la fecha se han presentado 4 Planes de Manejos para las operaciones del Tranque Mauro, 6 para la construcción de la Plataforma y 5 pertenecientes a las Obras Anexas. En el caso de la corta de ejemplares aislados de quillay se han presentado 13 planes de manejo al SAG. De acuerdo al avance de las obras del proyecto se presentarán los permisos correspondientes a las autoridades pertinentes.



## Reforestaciones

Los compromisos respecto de las cortas sobre los bosques presentes en el área de influencia del proyecto se refiere a la reforestación en una superficie de bosque equivalente y composición similar a la del sector afectado.

La definición de reforestación establecida en el D.L.701/74 señala que es “la acción de repoblar con especies arbóreas o arbustivas, mediante siembra, plantación o manejo de la regeneración natural, un terreno que haya estado cubierto con bosque y que haya sido objeto de explotación extractiva con posterioridad al 28 de octubre de 1974” (Fecha promulgación del D.L.701).

En el caso de las compensaciones para la corta de especies de quillay dispersos consiste en la reforestación a razón de 1:10, es decir, por cada ejemplar cortado deben plantarse 10. Esto según el compromiso de MLP contenido en el Capítulo 8 del EIA del PID y en la respuesta a la pregunta 60-2 del adenda 2 del EIA del PID aprobado mediante la Resolución de Calificación Ambiental N° 038/2004, COREMA Región de Coquimbo.

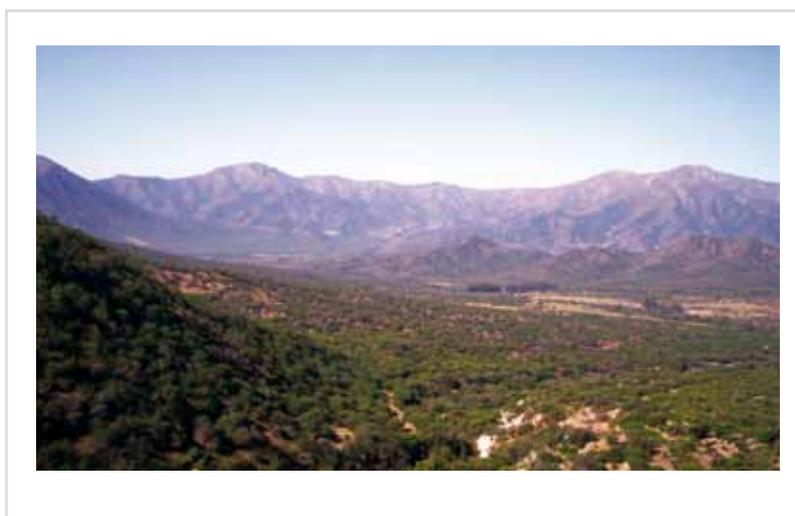
Actualmente MLP dispone de dos (2) fundos, a saber, Monte Aranda y El Mauro, en cuyas terrenos se están cumpliendo los compromisos adquiridos de reforestación y revegetación.

El Fundo Monte Aranda se ubica en la localidad de Caimanes, comuna de Los Vilos, Provincia de Choapa, IV Región de Coquimbo. Sus coordenadas UTM (PSAD 56) son: portón de ingreso al fundo 6.465.434 N – 295.843 E. El fundo tienen una superficie de 5.446 ha, los que se dividieron en nueve (9) tipologías de uso del territorio, donde se implementarán actividades específicas. Para las reforestaciones se destinaron 153,4 ha distribuidas en 35 sectores desde al año 2006 al año 2011 (Tabla N°3). El resto de la superficie se distribuye en zonas de enriquecimiento de Palma chilena, canelo y quillay, Parque de Arte Rupestre, área de protección del Santuario de Monte Aranda y la zona del vivero y otras instalaciones (Figura 3).

**Tabla 3.**

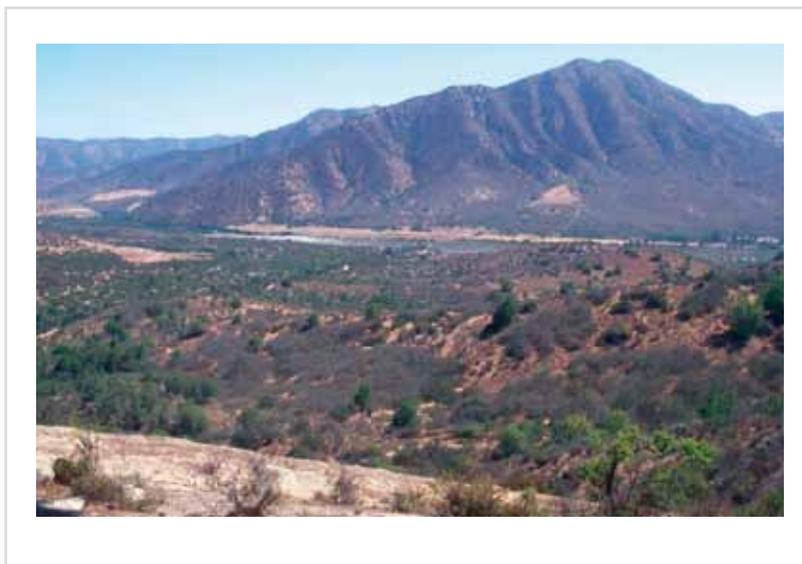
Tipos de uso de suelos definidos para el Fundo Monte Aranda.

TIPO DE USO DE SUELO	SUPERFICIE	
	(há)	(%)
Área enriquecimiento palma chilena	193,4	3,55%
Área enriquecimiento con quillay (DS 366)	135,6	2,49%
Área enriquecimiento con canelo	17,8	0,33%
Parque arqueológico	84,2	1,55%
Áreas de reforestación de tipo esclerófilo	105,8	1,94%
Áreas de reforestación de tipo hidrófilo	10,5	0,19%
Áreas de reforestación de tipo hidrófilo con canelo	37,1	0,68%
Área de protección Santuario Monte Aranda	710,3	13,04%
Área enriquecimiento otras especies y liberación de fauna	4.127,3	75,79%
Sector de vivero, oficinas y otras instalaciones	24	0,44%
<b>Total General</b>	<b>5.446,0</b>	<b>100,0%</b>

**Figura 3.**

Aspecto general del Fundo Monte Aranda, destinado a las reforestaciones, revegetaciones, áreas de enriquecimiento y santuario.





**Figura 5.**

Sectores destinados al enriquecimiento de quillay (*Quillaja saponaria*) dentro del Fundo El Mauro.

El PIR considera un manejo intensivo de las condiciones de los sitios para promover el establecimiento de los ejemplares plantados incorporando diversas actividades intermedias como riego, control de malezas, control de lagomorfos, reposiciones de plantas, entre otras, tendientes a apoyar el desarrollo de los ejemplares después de plantados.

Para facilitar las labores de reforestación se creó el concepto de “Módulos de reforestación” que consiste en una unidad o parche de vegetación con una determinada composición y densidad de especies, no restringido a un tamaño específico, sobre el cual se aplican actividades homogéneas de manejo. Estos módulos pueden ser dispuestos más de una vez en el espacio de manera discontinua, lo que permitirá generar una configuración distinta a parcelas o unidades regulares de reforestación, dando al paisaje un aspecto de mayor naturalidad.

Para las reforestaciones se establecieron dos (2) tipos de formaciones boscosas: bosque esclerófilo y bosque hidrófilo, los que difieren en composición de especies, ubicación topográfica y particularmente requerimientos hídricos. Dentro de cada uno de estos tipos se subdividen de acuerdo a la composición de las especies leñosas a plantar.

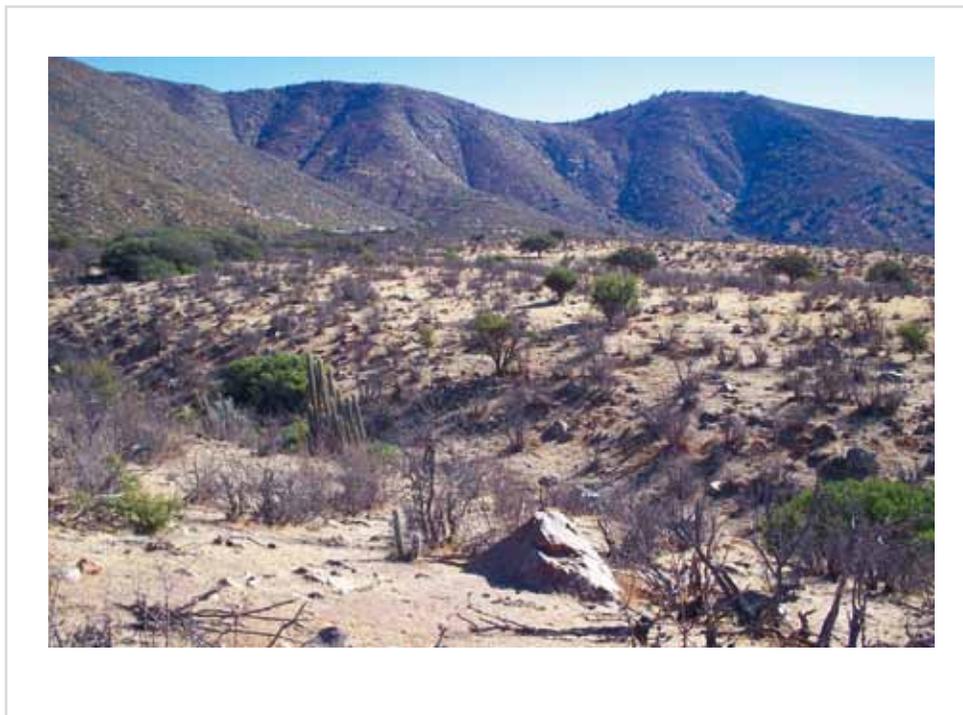
## Sistema de reforestaciones

### Reforestaciones de bosques (D.L.701/74)

Se establecieron una serie de actividades comunes de habilitación de los sectores de reforestación independientes de las especies a utilizar (Figura 6). Estas son:

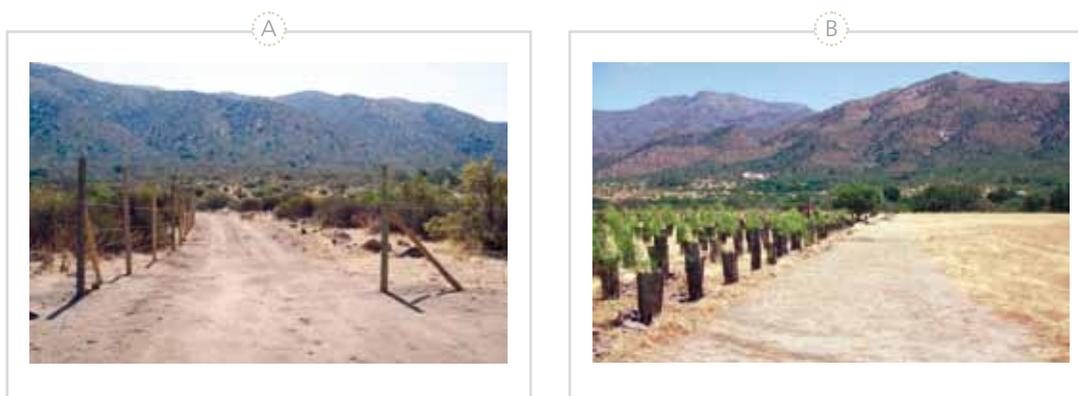
- Habilitación de accesos que faciliten el ingreso de vehículos menores para la implementación de las plantaciones (Figura 7a).
- Cercado del perímetro de cada unidad de reforestación contra ganado domestico.
- Se mantendrá, de ser posible, la vegetación presente, que se utilizará como nodriza para el establecimiento de las plantas. Su permanencia se evalua en función del crecimiento y desarrollo de los árboles plantados.
- Establecimiento de cortafuego en el perímetro de cada unidad de reforestación, eliminando la vegetación presente mediante roce (Figura 7b).





**Figura 6.**

Sectores habilitados para el inicio de las reforestaciones en los Fondos Monte Aranda y El Mauro.



**Figura 7.**

A) Habilitación de caminos interiores con cerco y establecimientos de cerco de protección. B) Cortafuego realizado en el perímetro de las áreas reforestadas.

- Cada planta se protege con malla fijada con tutores que buscan impedir o minimizar el riesgo de ser atacados principalmente por algún tipo de lagomorfos o roedores que roan el tallo de la planta, y además permite mantener la humedad en la casilla de plantación por un tiempo más prolongado (Figura 8).



**Figura 8.**

Izquierda, Tutores puestos alrededor de la planta, que sirven de soporte a la malla de protección contra lagomorfos y ganado domestico (derecha).

- En cada área de reforestación se establece un Plan de Control de los Incendios, donde se definen como medidas de protección una instrucción a todo el personal que trabaje en las áreas de reforestación y zonas aledañas respecto del riesgo de las actividades que puedan generar actividades como cigarrillos mal apagados, fogatas para calentar alimentos, disposición de residuos, etc. Además, se cuenta con un equipo de profesionales en terreno, que vela por el cumplimiento de los compromisos ambientales del proyecto y por minimizar la generación de contingencias. Este equipo cuenta con el constante apoyo y comunicación con la Gerencia de Medio ambiente de MLP. Se establece como medidas básicas, en casos de incendios o siniestros de pequeña escala el aviso en forma oportuna a las brigadas de CONAF, y además a Carabineros en casos de mayor envergadura.

- Cada planta es fertilizada con macronutrientes que permiten un crecimiento más óptimo y equilibrado luego de ser plantadas.

Además, se especificaron algunas medidas de acuerdo al tipo de plantas a disponer en cada sector. Así:

a) Bosque esclerófilo.

En la preparación del sitio de plantación se realiza un hoyo o casilla de 50 cm de profundidad por 30 X 30 cm. En cada casilla se realiza una mezcla de sustrato con tierra local en mayor proporción y materia orgánica como tierra de hoja o material compostado, en menor proporción (Figura 9). El tipo de manejo del suelo, ya sea mediante subsolado, surcos o casillas independientes se define en función del sector a reforestar por sus características de suelo y por las especies a utilizar. Los distintos tipos de plantación permiten optimizar las áreas por el tipo de suelo, los recursos de agua, y además crear un aspecto visual más natural e integrar las reforestaciones al paisaje natural (Figura 10).



**Figura 9.**

Se presentan tres tipos diferentes de preparación del suelo. Subsulado completo del área a reforestar (izquierda), surcos en hileras (centro) y hoyos de plantación en bosquetes (derecha).



**Figura 10.**

A) Habilitación de caminos interiores con cerco y establecimientos de cerco de protección. B) Cortafuego realizado en el perímetro de las áreas reforestadas.

Para el riego de las plantas reforestadas en Monte Aranda se diseñaron dos (2) tranques artificiales más un completo sistema de redes de riego que permite, mediante el manejo del agua captada desde los esteros naturales, el abastecimiento periódico y estable de agua a todos los sectores de reforestación tanto en Monte Aranda como en El Mauro (Figura 11).

Se realizan riegos de establecimiento durante la estación desfavorable de las primeras dos temporadas (noviembre a marzo). La frecuencia de riego es quincenal y se entrega una cantidad mínima de 10 lt por planta, en cada ocasión (Figura12).



**Figura 11.**

Aspecto del tranque N°1 de Monte Aranda que abastece de agua y la instalación de tuberías subterráneas en los sectores de las reforestaciones.



**Figura 12.**

Ejemplar de litre plantado en casilla con sistema de riego con dos goteros que dosifican el agua.

b) Bosque hidrófilo.

Este tipo de bosque se diferencia según la presencia de *Drimys winteri* (canelo), considerando las siguientes medidas específicas.

- Al igual que para la plantación del bosque esclerófilo los ejemplares se plantan en hoyos de 30 x 30 cm y 50 cm de profundidad, en los que se descompacta el sustrato y se realizan mezclas compuestas por material vegetal semicompostado tierra de hoja, y sustrato de la casilla. En este caso el porcentaje la mezcla de sustratos se realiza en partes iguales.
- Los riegos son permanentes con una frecuencia quincenal y se entrega una cantidad mínima de 20 lt por planta, en cada ocasión.

134

## • **Enriquecimientos**

### **Enriquecimiento con Quillaja saponaria (quillay)**

En el caso de los enriquecimientos se realizan plantaciones a menores densidades por hectárea, ya que el objetivo es potenciar el desarrollo de nuevas masas boscosas y aumentar la diversidad estructural y florística. Las densidades de plantación varían entre 150 a 300 quillay/ha., en promedio, de acuerdo con las características locales para establecer los individuos (Figura 13).

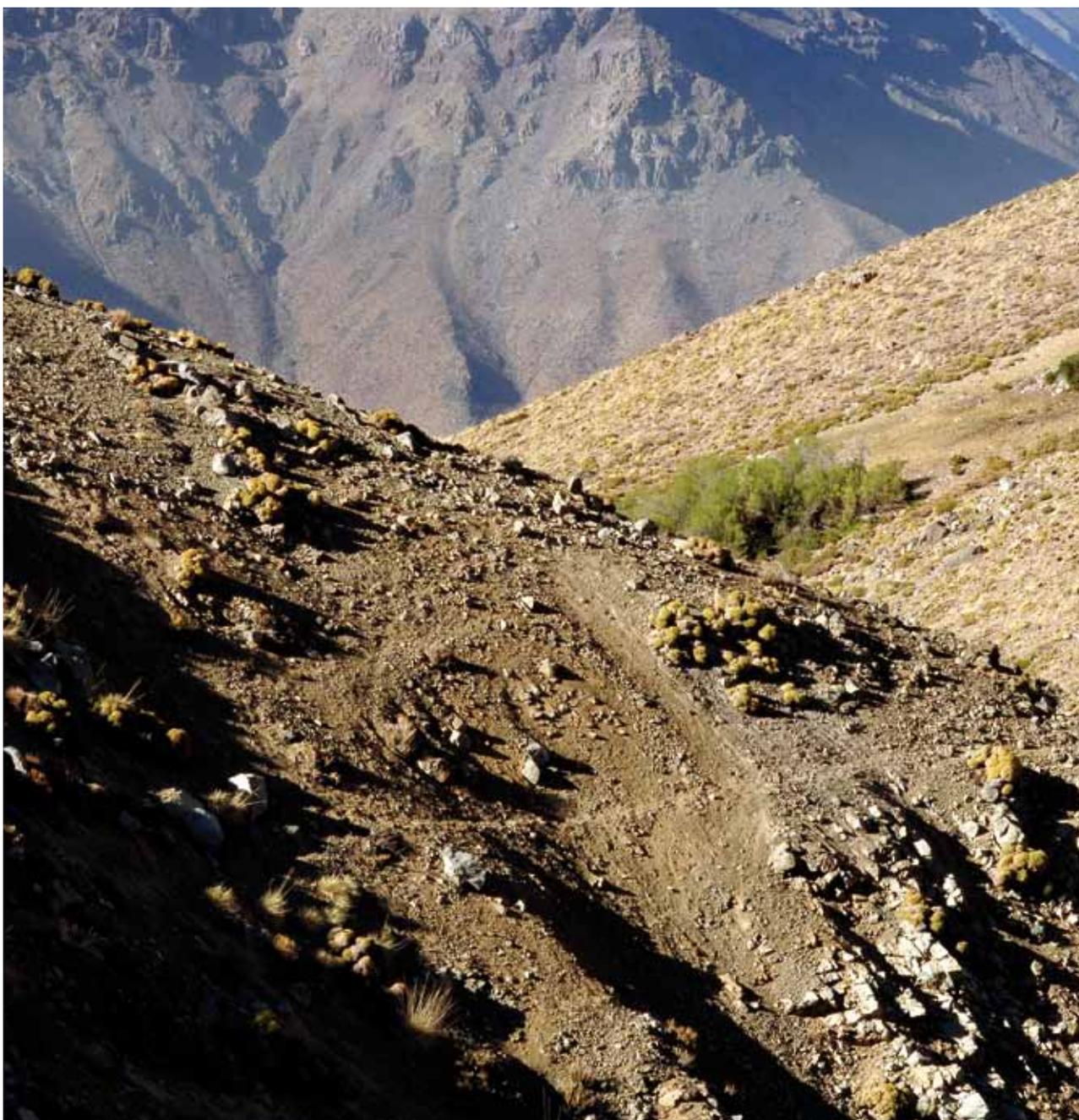
Los individuos de quillay se plantan en casillas de las mismas características que las utilizadas para el bosque esclerófilo, en sectores principalmente donde el dosel de otros ejemplares arbóreos o arbustivos proporcione un nodrizaje o abrigo a las plantas.

Se realizan riegos de establecimiento durante la estación desfavorable (noviembre a marzo) la primera temporada. La frecuencia del riego es mensual y se entrega con una cantidad entre 10 a 15 lt por planta, en cada ocasión.



**Figura 13.**

Plantas de quillay plantadas en sectores de enriquecimiento y protegidas con malla para evitar ataque de lagomorfos y ganado.



### Enriquecimiento con *Drimys winteri* (canelo) en Situaciones Hidrófilas en Monte Aranda

Dentro del Fundo Monte Aranda se estableció un área de enriquecimiento con *Drimys winteri* (canelo) en las formaciones boscosas hidrófilas de fondo de quebrada y con agua permanente (Figura 14).



**Figura 14.**

Plantación de canelo a diferentes distancias del curso del agua y luminosidad.

Las plantaciones de canelo se realizan de la misma manera que las plantaciones de bosque hidrófilo y se disponen bajo la protección de otros ejemplares arbóreos o arbustivos, y a una distancia máxima de 2 metros del curso de agua permanente, en su condición de estiaje (Figura 15). Cada ejemplar es protegido con malla contra lagomorfos. Dada las características de los ambientes donde se dispusieron las plantas, es decir con agua permanente, no se consideró realizar riegos de establecimiento (Figura 16).



**Figura 16.**

Plantación de canelo cercano al curso de agua, en quebrada bodega, Fundo Monte Aranda.

### **Enriquecimiento con *Jubaea chilensis* (palma chilena)**

Dentro del Fundo “Monte Aranda” se considera un área de enriquecimiento para potenciar el desarrollo de los grupos de *Jubaea chilensis* (palma chilena) que actualmente crecen en la cabecera de la Quebrada Bodega. La superficie destinada es cerca de 193 hectáreas (Figura 17) y corresponde a una ampliación del sector donde actualmente se encuentra dicha especie (Figura 18).

Las palmas se plantan en casillas de 30 x 30 x 30 cm, a las que se les mejorará el sustrato mediante una mezcla de 30% de tierra vegetal y 70% de sustrato de la casilla. Los individuos de palma chilena son dispuestos bajo el abrigo de ejemplares de *Lithrea caustica* (litre), y cada ejemplar es protegido mediante una malla de protección.

Para potenciar el desarrollo de nuevos individuos se dispondrán semillas de palma en el área de enriquecimiento, protegidas entre los matorrales y a un costado de los ejemplares de palma plantados.



**Figura 17.**

Aspecto de un sector destinado a la protección y enriquecimiento de la palma chilena.



**Figura 18.**

Actual sector de palma chilena en Fundo Monte Aranda, con presencia de ejemplares en estado adulto.

## Mantenimiento y Monitoreo de las Reforestaciones

La mantención y el monitoreo de las reforestaciones establecidas en el PIR se realizarán hasta que las masas vegetales estén establecidas, estimado en tres (3) temporadas posterior a la plantación y abarca todas las áreas que se incorporen a las compensaciones de los efectos que las obras del PID generen sobre la flora y vegetación.

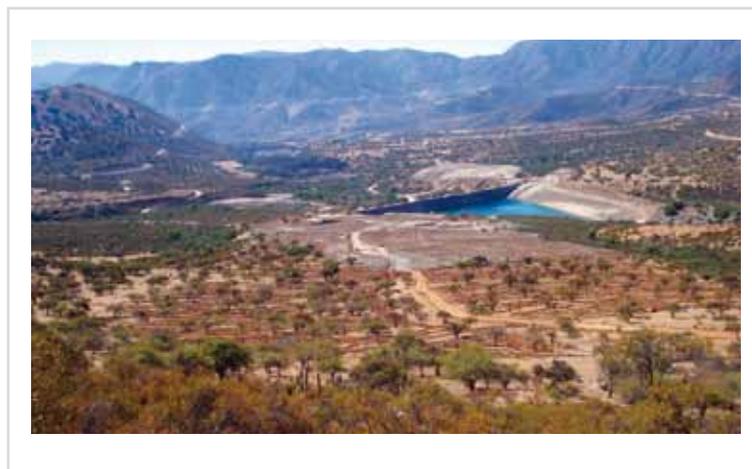
Se realizan monitoreos periódicos a los sectores de reforestación donde se evalúan cualitativa y cuantitativamente, con lo que se establecen medidas de manejo y solución de contingencias (Figura 19).

Con los resultados de las evaluaciones se elaboran informes periódicos que dan cuenta de los avances y contingencias en las actividades implicadas en el PID. Se espera que con estos resultados se genere una retroalimentación técnica con las autoridades para compartir esta actividad de gran envergadura en aspectos técnicos y medioambientales (Figura 20).



**Figura 19.**

Mantenimiento a las plantas reforestadas el año 2006 y 2007, con manejo manual de la vegetación no deseada en las casillas de plantación (Izquierda) y un aspecto del crecimiento de las reforestaciones luego de dos períodos de ser plantadas.



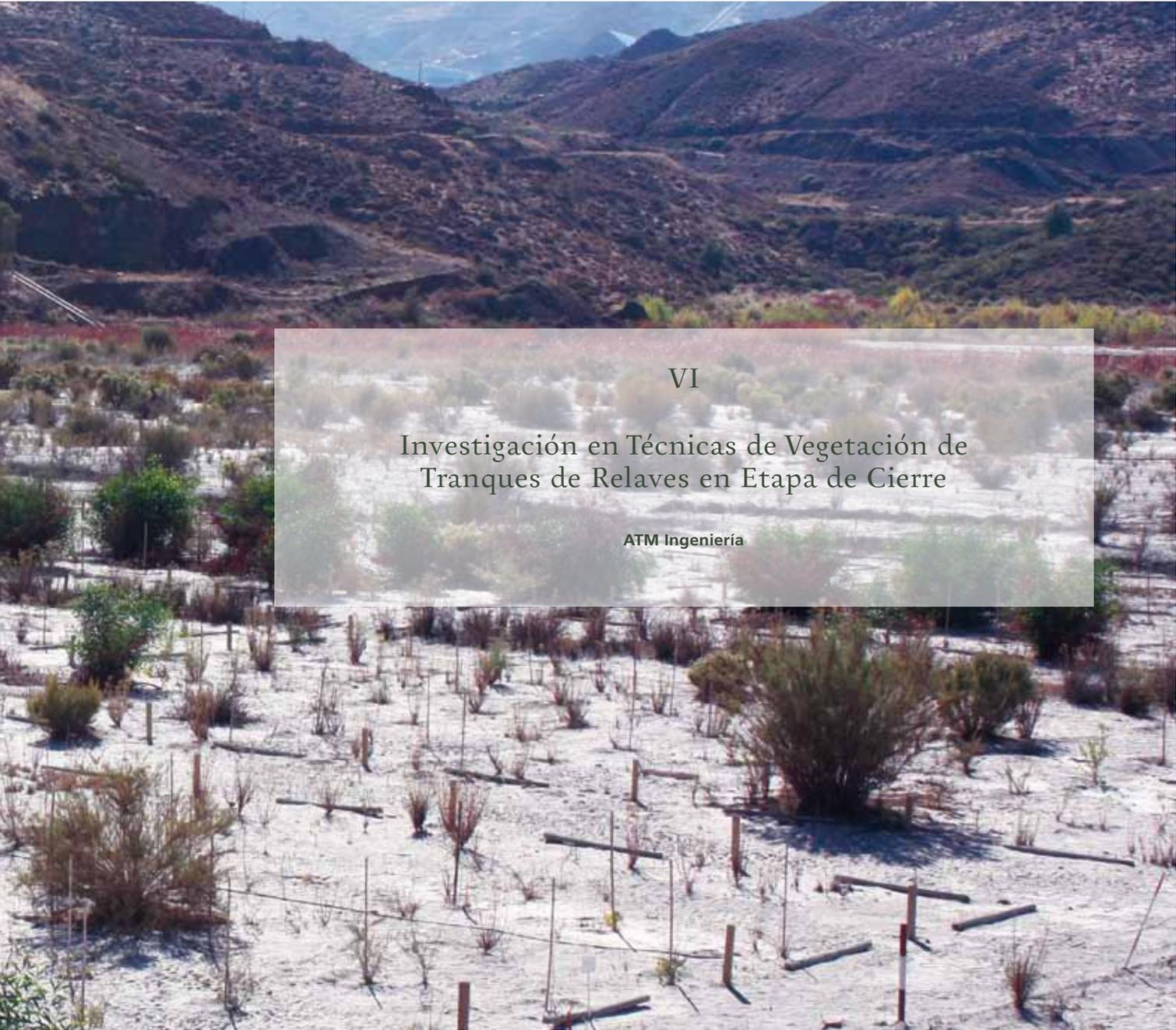
**Figura 20.**

Fundo El Mauro en sectores de reforestación después de ser preparado el terreno mediante surcos (izquierda) y luego de ser realizada la plantación (derecha). Se observa la magnitud y las condiciones imperantes en los sectores reforestados.

## Agradecimientos.

Los autores reconocen y agradecen el trabajo realizado por los Ingenieros Forestales Señores Gustavo Girón y Patricio Bobadilla, durante los primeros años de implementación de las reforestaciones.





VI

Investigación en Técnicas de Vegetación de  
Tranques de Relaves en Etapa de Cierre

ATM Ingeniería

## 1. Introducción

Minera Los Pelambres (MLP) ha encargado a la empresa ATM Ingeniería Limitada la realización de un estudio de investigación orientado hacia la generación de información sobre técnicas de forestación en tranques de relaves en etapa de cierre (abandono), con fines de acelerar la repoblación vegetal en los ecosistemas donde éstos se insertan.

Aunque existen diversas técnicas para estabilizar estos sistemas, después del cese de las operaciones mineras, es reconocido mundialmente que el uso de vegetación presenta importantes ventajas comparativas, respecto a otros métodos, en relación a cumplir con tres aspectos relevantes: es permanente, visualmente atractivo y económicamente viable (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

Sin embargo, el ambiente de estos sustratos generalmente es adverso para el desarrollo de diferentes especies debido a que éstos presentan altos niveles de metales pesados, baja fertilidad e inadecuada estructura para uso en vegetación. Pese a lo anterior, las plantas pueden superar estas restricciones cumpliendo una importante función en la rehabilitación de tranques en etapa de cierre y/o abandono.

Por otra parte, en nuestro país existe una creciente necesidad, de contar con información científica, aplicada a la realidad nacional de los tranques abandonados y/o en etapa presente o futura de cierre de las distintas mineras y espacialmente las de cobre. Lo anterior, sumado a las exigencias ambientales que regulan la actividad minera en Chile, ha motivado a MLP a investigar sobre este tema disponiendo para ello el Tranque de Relaves El Chinchu, localizado aledaño y aguas arriba del tranque en operaciones Los Quillayes, en la Cordillera de Los Andes, a 1.460 msnm; comuna de Salamanca, IV Región de Chile.

En consecuencia, el desarrollo del presente estudio de investigación ha tenido como finalidad determinar el potencial real que presenta los sustratos de relaves de soportar cobertura vegetal y qué tipo de especies favorece en mayor grado la rehabilitación, a modo de acelerar procesos de estabilización que, de manera natural, podrían ocurrir a muy largo plazo.

Bajo este marco de trabajo, ATM Ingeniería presentó a MLP una proposición de estudio que consideró probar diez especies vegetales de interés con predominancia de especies nativas, seleccionadas en función de experiencia práctica, del reconocimiento del entorno vegetal de los tranques de relaves, y en función de la bibliografía disponible sobre el tema.

Parte de las especies investigadas, provinieron de los viveros de MLP los que tienen como finalidad recolectar, germinar y plantar especies nativas del entorno.

Los ensayos se iniciaron en mayo de 2005, mediante el establecimiento de parcelas experimentales de seguimiento, donde se aplicaron dos tratamientos al sustrato del tranque de relaves con fines de mejorar su calidad como "Medio para Sustento Vegetal": T1 (Tierra vegetal) y T2 (compost). Ambos tratamientos, se contrastaron con relación a un testigo o control (T0 = Sustrato de Relaves).

Establecido los ensayos, se iniciaron las mediciones basales sobre los diferentes componentes del sistema: fuente hídrica cercana, sustrato y vegetales.

Sobre la base de 3 temporadas de seguimiento, se obtienen los resultados y conclusiones en relación con la evolución química del sustrato de relaves y vegetales más la sobrevivencia y desarrollo de estos organismos. Los resultados obtenidos a la fecha, se analizaron estadísticamente y se contrastan con datos históricos referenciales y bibliografía existentes sobre la materia.

Se espera que estos antecedentes sean de utilidad para complementar estudios de similar naturaleza y que sirvan como un marco de referencia para la recuperación mediante forestación con especies nativas, de tranques de relaves en etapa de cierre.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Desarrollar una metodología de tratamiento y/o pautas de acción tendientes al aceleramiento de la forestación natural de tranques de relaves en etapa de cierre y de este modo, dar cumplimiento al compromiso asumido por MLP a través de la RCA N°71/98, en relación a desarrollar un programa de Investigación en Técnicas de Vegetación en Relaves.

### 2.2 Objetivos específicos

- Identificar especies nativas y/o introducidas que sean capaces de autosustentarse en el sustrato de relaves, a través del tiempo.
- Analizar la factibilidad de utilizar plantas nativas provenientes de los viveros de MLP, que fueron recolectadas y germinadas, a partir de material vegetal presente, en la propiedad de la empresa minera.
- Conocer la respuesta, al manejo técnico aplicado, del sistema sustrato-vegetales, en relación a procesos químicos asociados a conceptos de fertilidad y toxicidad.
- Determinar la factibilidad de utilizar compost, como un componente remediador del sustrato con fines de sustentar sistemas vegetales.
- Confirmar la detección de especies tolerantes a este tipo de sustratos y que fueron observadas, en estudios realizados con anterioridad, a través monitoreos de sustrato y vegetación realizado por ATM Ingeniería Ltda. (Enero de 2003).
- Obtener antecedentes de terreno que permitan recomendar manejo técnico para forestar Tranques de Relaves con similares características físico – químicas y climáticas, durante la etapa de cierre.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### 3. Revisión Bibliográfica

Los tranques de relaves, generados como consecuencia de la explotación de minerales, muestran dificultad para su rehabilitación con vegetales, debido a la presencia de altos niveles de metales pesados (potencial fitotóxico), baja fertilidad e inapropiada estructura para sustento radical. Debido a lo anterior, la mayoría de los tranques metalíferos no desarrollan vegetación natural permaneciendo en estas condiciones muchos años después de su abandono (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

Adicionalmente, estos sistemas ocasionan un deterioro en el paisaje como consecuencia del efecto visual que causan sobre la comunidad y/o entorno humano cercano (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000). Lo anterior, incide de manera adversa en la imagen pública de la empresa minera responsable, situación que se evidencia en países como Chile, donde las explotaciones de minerales se efectúan en áreas de belleza escénica natural y cercana a comunidades y/o centros poblados.

Existe una amplia gama de técnicas de recuperación para sustratos metalíferos; sin embargo, el uso de vegetación es el único método que permite cumplir con tres aspectos relevantes: ser una solución permanente, generar un positivo impacto visual y ser económicamente factible de implementar.

En general, la experimentación con vegetación se ha orientado hacia dilucidar y superar limitaciones particulares tales como los niveles de toxicidad del relave y las limitaciones físicas del sustrato, las restricciones climáticas locales. De allí que el éxito resultante en estos ensayos, no necesariamente es replicable hacia otros tranques, ya que, por lo indicado anteriormente, existe una gran variación física-química y ecológica entre ellos.

Pese a lo anterior, se presenta a continuación aspectos comunes de interés a considerar para el establecimiento de vegetación en tranques metalíferos, considerando información bibliográfica proveniente de ensayos realizados en diferentes partes del mundo. Esta revisión, expone características generales asociadas a problemas de establecimiento de vegetación y potenciales soluciones a aplicar, según detallan estudios realizados en diversos países, y por lo tanto, bajo diferentes climas, especies disponibles y parámetros físico-químicos asociados a los tranques de relaves en proceso de rehabilitación.

### 3.1 Ventajas del uso de vegetales en la estabilización tranques de relave

Actualmente es ampliamente aceptado que el uso de vegetales, para estabilizar tranques de relave en cierre o abandono, presenta mayores ventajas comparativas respecto a métodos físicos y químicos, los que evidencian diferentes tipos de limitación para su uso.

En el caso de los métodos físicos, éstos presentan restricciones al no poder aplicarlos en forma extensiva, básicamente por escasez de material útil a emplear y por ser económicamente inviable (alto costo en transporte) (Johnson y Bradshaw, 1977). Adicionalmente, este sistema no soluciona problemas asociados a potenciales procesos de lixiviación, provenientes de los relaves rehabilitados mediante este método. Por otra parte, la estabilización física no produce un efecto escenográfico positivo, permaneciendo en el tiempo el impacto visual que produce la presencia del tranque de relaves en el paisaje.

En contraste a los dos métodos anteriores, el uso de vegetación no presenta estas limitaciones y adicionalmente aporta efectos positivos. Así, una cubierta vegetal reduce la erosión superficial, a través de la acción mecánica de las raíces con el sustrato, minimiza potenciales lixiviaciones de metales pesados solubles reponiendo a la atmósfera aguas lluvias infiltradas, mediante procesos de evapotranspiración; y mitiga el impacto visual incorporando al paisaje natural los tranques rehabilitados. Por otra parte, una cubierta vegetal puede permitir el posterior uso recreativo de la zona e incluso y, si las condiciones son favorables, las áreas rehabilitadas pueden ser posteriormente usadas en agricultura o silvicultura.

Cabe destacar que, al seleccionar la técnica de vegetación, para recuperar tranques en abandono, es importante considerar las condiciones locales: características físico-químicas del relave, clima, niveles de toxicidad, especies vegetales presentes en el entorno, etc. Muchas veces los estudios se inician en invernaderos donde se reproduce, a escala pequeña, las situaciones limitantes con fines de evaluar diversos tratamientos de remediación. Posteriormente, el resultado que presenta mayor éxito en la sobrevivencia y capacidad de crecimiento vegetal, es aplicado de manera extensiva en los tranques a rehabilitar (Williamson y Johnson, 1981).



150

Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### 3.2 Establecimiento de la vegetación según naturaleza de los relaves

La explotación metalífera produce dos formas físicas de residuos:

- a) Roca inútil muy gruesa de diámetro generalmente entre  $2\pm 20$  centímetros. Consiste principalmente en material excavado para destapar el mineral.
- b) Relaves de diámetro  $< 2$  milímetros. Roca pulverizada de donde se extrae el metal.

El establecimiento de vegetación, en ambos tipos de residuos, está sujeto a restricciones físicas severas. En el caso de la roca gruesa, la principal limitación es la escasa capacidad de retención de agua, evidenciando, este tipo de fragmento, una sequía superficial prolongada. Bajo estas condiciones, el establecimiento directo de la vegetación es casi imposible por limitaciones severas en la germinación (para semillas) y en el trasplante (para plántulas). En contraste, los fragmentos finos (relaves), que corresponden a la mayoría de los residuos mineros, presentan mejor retención de agua, respecto a la roca gruesa. Sin embargo, éstos son depositados en tranques donde la superficie generalmente sufre procesos de compactación y cementación, generando una barrera impermeable (Bradshaw *et al.*, 1978). De no compactarse, el relave queda expuesto a la acción del viento que produce erosión y consecuentemente incide en la calidad del aire y de las aguas superficiales (Bradshaw y Chadwick, 1980).

Aunque los factores físicos pueden afectar seriamente el establecimiento de la vegetación, son las características químicas de los tranques metalíferos las que presentan mayor relevancia en el éxito o fracaso de este método de rehabilitación. Particularmente, los efectos tóxicos de los metales residuales y la escasez de nutrientes, en los relaves, son la principal limitante para el crecimiento vegetal. Los mecanismos que inciden en causar fitotoxicidad son poco conocidos. Sin embargo, se sabe que inhiben el crecimiento de las raíces, situación que afecta severamente al vegetal disminuyendo su capacidad de resistencia a la escasez hídrica.

La concentración residual de metales pesados varía considerablemente entre sitios mineros y entre los tipos de relaves. Así, los contenidos fluctúan entre niveles bajos de  $0,1\pm 0,5\%$  del peso del relave (tranques modernos) a niveles altos que superan el 5% del peso del relave (tranques antiguos) con potencial tóxico mayor respecto a tranques más nuevos (Bradshaw *et al.*, 1978).

Adicionalmente, los relaves pueden presentar concentraciones elevadas de otros metales y metaloides como el arsénico, el cadmio y la plata (Bradshaw y Johnson, 1992). Cuando los niveles totales de metales en el tranque superan el 0,1% del peso se considera con potencial fitotóxico (Williamson y Johnson, 1981). Sin embargo, existen otros parámetros que también son de relevancia en el análisis de fitotoxicidad, entre los que destaca el pH. Éste último, determina las fracciones de metales disponibles para ser absorbidos por las plantas. Por otra parte, los vegetales también muestran variaciones inter e intra-específicas respecto a los niveles de sensibilidad a la toxicidad por metales pesados. En consecuencia, los resultados químicos en tejidos no siempre representan la vulnerabilidad de la especie a determinado metal y sólo las mediciones biológicas (parámetros de crecimiento, desarrollo y productividad) permiten una adecuada evaluación de la capacidad de los vegetales a adaptarse a un determinado sustrato (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

Con relación a la fertilidad de los relaves, está probado que éstos sustratos son deficientes en los nutrientes esenciales y particularmente en nitrógeno y fósforo, situación que se magnifica al evidenciar que los relaves carecen de arcilla y materia orgánica. Estas fracciones, en suelos normales, proporcionan sitios de intercambio catiónico, esenciales para la retención de nutrientes, que al estar ausentes, causan la lixiviación rápida de cualquier nutriente inorgánico, adicionado mediante fertilización.

El potencial fitotóxico de los relaves, varía según provengan de rocas calcáreas o ácidas. En el caso de los relaves calcáreos, de pH alcalino, la asimilación de metales pesados, es restringida debido a la formación de hidróxidos y carbonatos o complejos "calcio-metales pesados" (Bradshaw *et al.*, 1978). De este modo, se favorece el crecimiento de las plantas al disminuir la presencia de elementos solubles con potencial fitotóxico (Johnson y Bradshaw, 1977). En contraste, los relaves de rocas ácidas, de pH ácido, son limitantes para el crecimiento de las plantas debido a que en estas condiciones se incrementa la solubilidad de metales pesados como el plomo, zinc, cobre y otros metales asociados, tales como manganeso y aluminio. Adicionalmente, la acidez extrema puede ocasionar una liberación de pirita ( $FeS_2$ ) que a través de los procesos bacteriológicos de oxidación causan la producción de ácido sulfúrico "libre" conocido por su alta fitotoxicidad. Cabe destacar que, los relaves metalíferos, localizados en climas áridos, presentan a menudo altos niveles fitotóxicos debido a la salinidad extrema que los caracteriza. Sin embargo, frente a lixivitaciones naturales de sales, pueden disminuir sus efectos adversos sobre la vegetación (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

Existen otros factores ambientales, que se producen en zonas de actividad minera, que también originan efectos deletéreos sobre la vegetación. Entre ellos se puede citar: temperaturas extremas, fuerte viento e inestabilidad por severas pendientes. Por otra parte, existen factores biológicos que también influyen en el establecimiento de especies, como los niveles de microflora del suelo. Éste parámetro es un componente integral del funcionamiento de todos los ecosistemas, y su ausencia en los relaves incide de manera adversa en el ciclo del carbono y de los nutrientes, afectando principalmente la velocidad de estos procesos, los que se realizan comparativamente respecto a suelos normales, de manera más lenta.

Sobre la base de lo expuesto, se concluye que las plantas que se establecen sobre sustratos de relaves deben superar obstáculos físicos, químicos y biológicos que, además, actúan de manera sinérgica en estos ecosistemas. Pese a estas limitaciones, muchos tranques derivados de la minería de cobre, zinc y plomo que muestran ser adversos para el sustento de diversas especies, presentan vegetación natural agrupada, en forma de pequeñas islas, situación que demuestra la factibilidad de rehabilitar estos sustratos mediante el uso de éste método de remediación.

### **3.3 Métodos utilizados para establecer vegetación en tranques de relaves**

Existen diversos métodos de vegetación desarrollados y aplicados a nivel práctico, según indica la bibliografía consultada. Todos ellos presentan ventajas e inconvenientes sin que exista solo una técnica universalmente aplicable. Los principales métodos utilizados, en varias partes del mundo, y las condiciones que deben imperar para que éstos sean aplicados, se discuten y analizan en detalle a continuación.

#### **3.3.1 Establecimiento directo sobre los relaves**

La principal ventaja del establecimiento directo de vegetación, sobre tranques de relaves, es su bajo costo en comparación a otros métodos. Sin embargo, es factible el uso de esta técnica en tranques donde el sustrato es de pH neutro a básico y presenta niveles bajos de metales pesados. En sustratos donde la acidez es alta y existen mayores niveles de metales residuales disponibles, la sobrevivencia se afecta significativamente observando que las especies establecidas directamente sobre estos sustratos, resisten sólo unas pocas semanas, observándose síntomas severos de fitotoxicidad hasta originar necrosis de tejidos y muerte de individuos (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

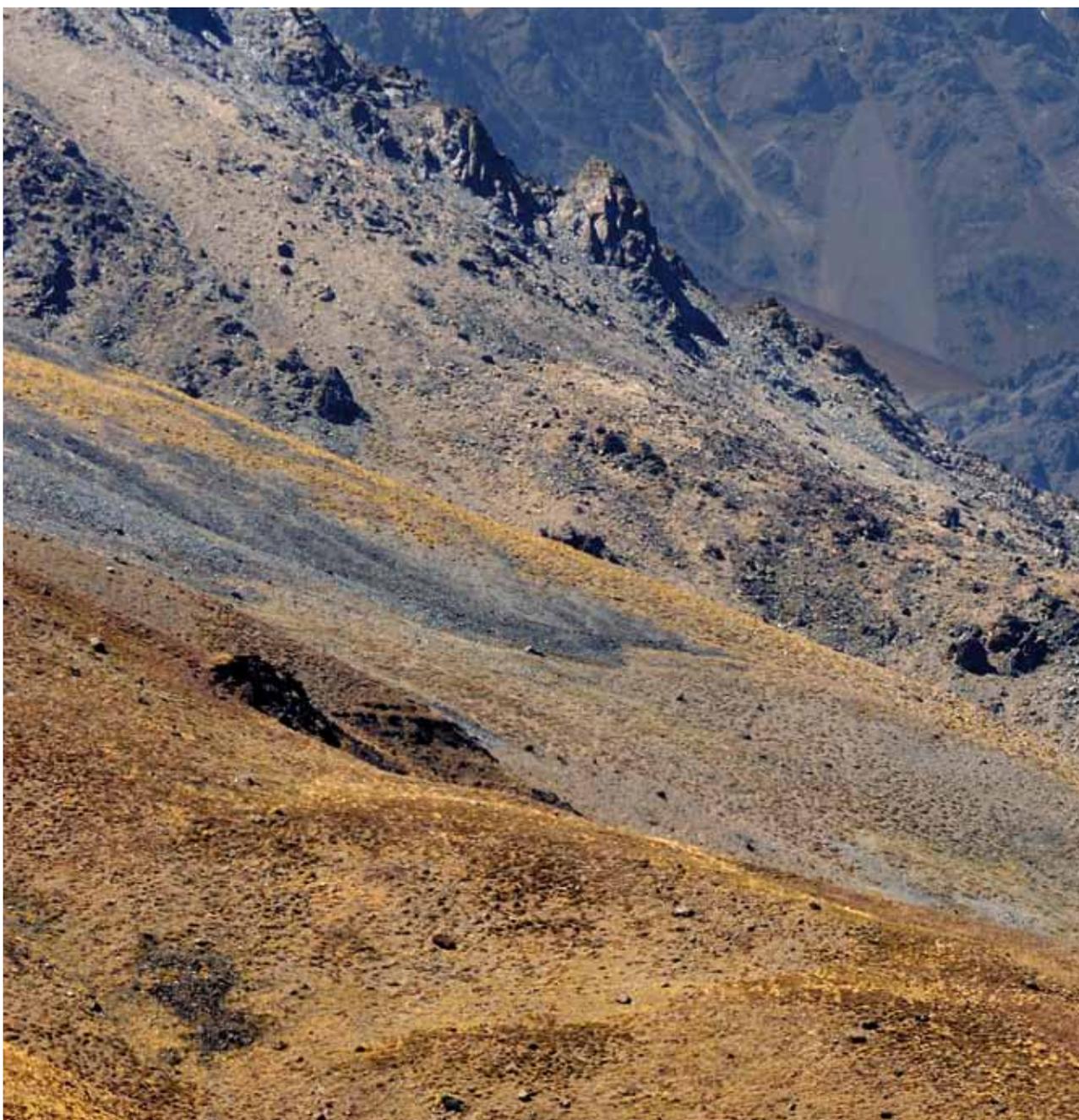
A menudo, se requiere implementar un sistema de riego para obtener el establecimiento de las plantas. El riego, en algunos casos puede cumplir doble finalidad: aportar agua a la planta y lavar sales o metales solubles (proceso de lixiviación) (Peterson y Nielson, 1978). La adición de agua mediante goteo (flujo bajo durante largos períodos) ha sido probada en varios tranques metalíferos áridos después de la plantación directa de herbáceas, arbustos y árboles nativos para facilitar el establecimiento. Estudios realizados por Bach (1973), han demostrado la factibilidad de utilizar irrigación por goteo en tranques de minas no metalíferas en Arizona, estableciendo de este modo diversas especies vegetales.

Está probado que la irrigación lixivia elementos y componentes existentes en los relaves, proporcionando un medio estéril desprovisto de nutrientes. Debido a ello, es importante adicionar al sistema de riego por goteo, fertilizantes que faciliten el establecimiento de las plantas (Bach, 1973). El establecimiento de vegetación directa, en depósitos de relaves de Broken Hill (Australia), que contienen plomo y zinc en el sustrato, ha sido muy exitosa debido al uso de irrigación mediante goteo, donde adicionalmente se ha aplicado lodos de aguas residuales como fuente de nutrientes (Thorne y Hore-Lacy, 1979). Incluso, después del cese del riego, se ha observado que las plantas no se vieron afectadas y, adicionalmente, a través del tiempo, han aportado a este medio con una capa de humus, situación que ha favorecido la rehabilitación de este ecosistema (Thorne y Hore-De encaje, 1979).

De manera general, debido a los bajos niveles de nutrientes que contienen los relaves, se requiere el uso de fertilizantes durante la fase de establecimiento de las plantas y la fase de generación de un ciclo de los nutrientes suficiente después del establecimiento.

### **3.3.1.1 Siembra directa con plantas disponibles en el comercio**

Aunque los relaves son a menudo muy desfavorables para diversas especies, los avances tecnológicos recientes, con fines de extracción eficiente de minerales, han incidido en disminuir los niveles de metales, con potencial fitotóxico, en los tranques modernos. En algunas situaciones, las concentraciones de metales pesados disponibles para las plantas pueden ser bastante bajas y permitir el establecimiento directo de la vegetación sin causar efectos adversos. Esta alternativa resulta de significativo interés debido a que es fácil de implementar (siembra directa con mezclas agrícolas de semilla), y adicionalmente representa un bajo costo.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

156

El método generalmente exige sembrar con una mezcla equilibrada de herbáceas, con especies de la familia de Fabaceae (leguminosas), más adición de fertilizantes inorgánicos que compensan el déficit de nutrientes. La materia orgánica (tal como lodo de aguas residuales, compost u otro) puede ser aplicada en finas capas con el objeto de mejorar la estructura del sustrato y para aportar los nutrientes de manera lenta. De este modo, se favorece el establecimiento de vegetación. Logrado el establecimiento, las leguminosas tales como tréboles (*Lotus corniculatus* y *Trifolium repens*) proporcionan nitrógeno mediante procesos de fijación atmosférica que caracteriza a esta familia. Estudios realizados por Johnson et al. (1976), demostraron la factibilidad de sustento vegetal, en tranques de relave, a través del tiempo, aplicando esta técnica, donde el fertilizante adicionado presentaba como característica ser rico en fósforo. De este modo, se estableció vegetación en minas metalíferas abandonadas en Derbyshire, Inglaterra. Estos sustratos presentaban niveles residuales de plomo y de zinc bajos y se adicionó una mezcla comercial de herbáceas / leguminosas combinada con fertilizante que fue aportado al sistema mediante hydrosiembra. A los seis meses de iniciado el ensayo, se desarrolló una óptima cobertura de vegetación que ha perdurado a través del tiempo. En particular, en este ensayo, el trébol creció abundantemente, reduciendo la necesidad de usos repetidos de fertilizante.

En resumen, los estudios de vegetación en tranques de relaves han demostrado que sustratos calcáreos, donde los metales pesados están no disponibles o precipitados y la acidez no es una limitante, la técnica de siembra directa funciona exitosamente cumpliendo objetivos de mitigación de contaminación y rehabilitación de belleza escénica (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

Cabe destacar que en varias experiencias de forestación de tranques de relaves, se ha observado la factibilidad de establecimiento de plantas nativas directamente sobre los relaves. El uso de plantas nativas ofrece una mejor incorporación del tranque al paisaje y ecosistema del entorno.

### **3.3.1.2 Siembra directa con plantas tolerantes a metales**

La mayoría de los tranques con una estructura física moderadamente favorable demuestran una tendencia a colonización natural por especies de la zona. Observaciones realizadas en Inglaterra, han indicado que esta vegetación se compone principalmente de plantas herbáceas. Así, en relaves ácidos predominan las especies *Agrostis capillaris* y *Festuca ovina*. En sustratos calcáreos, se observa dominancia de *Agrostis stolonifera*, *Festuca rubra* y *Deschampsia cespitosa* que pertenecen al orden de las Poaceae (Smith y Bradshaw, 1972).

Todas estas especies, que también crecen en suelos normales, se denominan "pseudometalófitas". El estudio en estas plantas ha demostrado que son tolerantes a los metales pesados presentes en los sustratos donde crecen, y que esta tolerancia es altamente hereditaria (Bradshaw y Snaydon, 1959; Urquhart, 1971; Gartside y McNeilly, 1974).

Las poblaciones metal-tolerantes son el resultado de la evolución por selección natural (Bradshaw *et al.*, 1978). Los genes asociados a la tolerancia por un determinado metal se presentan con baja frecuencia cuando las poblaciones de plantas pseudometalófitas se localizan en suelos normales. Sin embargo, estos individuos al localizarse en tranques metalíferos, evolucionan rápidamente hacia la tolerancia. Especies que no presentan esta variabilidad genética (no pseudometalófitas), no tendrán éxito en sustratos con alta presencia de metales (Baker, 1987).

Los pastos metal-tolerante, localizados en sustratos de relaves, son a menudo resistentes a otras presiones asociadas al ambiente hostil de los tranques. Por ejemplo, *Agrostis capillaris* de una mina ácida de plomo ha presentado tolerancia a condiciones nutritivas bajas, debido a su relativamente baja velocidad de crecimiento, en comparación a esta misma planta desarrollada en suelos normales (Jowett, 1959). La tolerancia a un nivel bajo de nutrientes, es sólo una de las adaptaciones que se evidencian dentro de un conjunto de características presentes en plantas metal-tolerantes. Lo anterior, permite que estos individuos se desarrollen bajo presiones ambientales severas observadas en algunos sitios mineros (Bradshaw *et al.*, 1978).

Antecedentes bibliográficos sobre ensayos de campo en Lower Swansea Valley (Inglaterra), también muestran la factibilidad de utilizar especies metal - tolerantes para vegetación en áreas de actividad minera abandonada. Se trata de estudios realizados en una zona extensa donde existió antes del año 1800 un centro mundial para la fundición de muchos metales, particularmente Cu, Pb y Zn. Una vez que cesaron las actividades de fundición, la región se convirtió en uno de las áreas más grandes de abandono industrial en Inglaterra, conteniendo substanciales áreas intoxicadas con metales pesados. Experimentos de Gadgil (1969), en estas zonas, con plantas metal-tolerantes obtenidas de varias otras minas del País de Gales e Inglaterra, mostraron el éxito del uso de esta vegetación cuando se adicionaban, de manera complementaria, abonos (nutrientes). Los ensayos posteriores de siembras indicaron que la planta metal-tolerante *A. capillaris* crecía bien por varios años en tierra contaminada con Zn y Cu (Gemmell y Goodman, 1978). Después de estos ensayos, Bradshaw y sus compañeros de trabajo investigaron, en la universidad de Liverpool, sobre el potencial de plantas tolerantes en la vegetación de muchos



sitios metalíferos en Inglaterra y País de Gales (Smith y Bradshaw, 1972, 1979). Hierbas tolerantes de varias poblaciones demostraron que podían crecer con éxito en una amplia gama de tierras metalíferas, aunque siempre fue necesario el apoyo de fertilizantes.

En general, se ha observado que especies herbáceas tolerantes arraigan exitosamente en sustratos tóxicos y, por lo tanto, presentan menor vulnerabilidad a la sequía, que es la causa principal de la muerte en plantas no-tolerantes. Experimentos preliminares en invernadero, seguido por ensayos de campo a escala reducida, demostraron que las plantas tolerantes son además eficientes en crecer y desarrollarse incluso bajo condiciones de extrema sequía, nueve años después del establecimiento (Smith y Bradshaw, 1979).

Cabe destacar que, en el caso de los relaves más recientes, con bajas concentraciones de metales residuales, el uso de plantas tolerantes puede ser innecesario.

La técnica de siembra directa de plantas tolerantes es en general muy económica, requiriendo complementariamente adicionar la semilla en el sustrato en conjunto con algún fertilizante estándar NPK. Por otra parte, como las raíces de los pastos tolerantes pueden penetrar y consecuentemente estabilizar el sustrato con eficacia, los riesgos de contaminación vía polución se minimizan. Aunque el paisaje nunca puede recuperar su aspecto original, es importante indicar que tranques vegetados con estos pastos permiten producir una armonización con el entorno, y, de ese modo, mitigar el efecto visual.

Sin embargo, a pesar de los beneficios económicos y prácticos de este método de rehabilitación, el uso de cultivares metal-tolerantes no se ha masificado según lo previsto. Palmer (1990a), indica que esto se debe a que las plantas tolerantes no eliminan la contaminación. El material superficial, después de la lixiviación, mantiene importantes niveles de metales pesados. Además, si el establecimiento de los pastos es lento (situación que caracteriza a este tipo de plantas), la erosión puede ocurrir antes de cubrir el tranque completamente de vegetación. Por otra parte, el establecimiento de la cobertura vegetal también está limitado debido a que no existen poblaciones metal-tolerantes de leguminosas (Bradshaw *et al.*, 1978), las que ayudan a mantener una fuente de nitrógeno permanente, gracias a la fijación simbiótica. Por lo tanto, este déficit puede limitar el crecimiento de cobertura vegetal, aunque los cultivares tolerantes se adaptan a condiciones bajas en nutrientes. Otra limitación de este método es la alta especificidad de los sistemas asociados a cultivares tolerantes. Es decir, una planta particular es establecida en tranques que contienen sólo metales para los que ha desarrollado tolerancia. Este

especificidad impide que la especie metal-tolerante pueda ser utilizada en tranques de contenido heterogéneo y, por lo tanto, con concentraciones elevadas de varios metales pesados.

Aunque, bajo similares condiciones, las plantas tolerantes contienen menos metales pesados, en sus partes aéreas, que las plantas no-tolerantes (Smith y Bradshaw, 1972), debido a la inmovilización producida en las raíces, igual se evidencian concentraciones elevadas en estos tejidos. Estos niveles, alcanzan fácilmente valores de 5000 mg/kg de Pb y 1000 mg/kg de Zn (Smith y Bradshaw, 1979), contenidos demasiados altos para que las áreas vegetadas puedan servir de pastos para ganado. Por otra parte, una cubierta metal-tolerante tiene baja resistencia para uso como pasto recreativo (Bradshaw y Johnson, 1992).

Las investigaciones desarrolladas sobre cultivares tolerantes se han realizado casi exclusivamente en Inglaterra. Por lo tanto, se han desarrollado cultivares para clima templado y no es aplicable para la amplia gama de condiciones climáticas, físicas y químicas que se producen en otras regiones del mundo (climas tropicales y zonas áridas). Por lo tanto, existe la necesidad de investigar y desarrollar especies tolerantes adaptadas a otras condiciones medio ambientales.

Se sabe que existen poblaciones naturales de individuos metal-tolerantes en regiones áridas y tropicales (Smith y Bradshaw, 1972). Pareciera ser bastante fácil desarrollar variedades comerciales de éstos grupos de plantas (Bradshaw y Johnson, 1992). Algunas de estas especies, tienen beneficios adicionales tales como ser tolerantes a la salinidad y realizar fijación de nitrógeno (Bradshaw y Chadwick, 1980).

EL desarrollo comercial de plantas tolerantes para regiones tropicales y áridas, hasta la fecha no se ha iniciado. Sin embargo, se espera que éste pronto se active con fines de aportar soluciones económicas y prácticas en el tema tal y como ha funcionado en las regiones templadas (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

### **3.3.2 Uso de sistemas de cobertura**

Este método ha sido investigado y utilizado en rehabilitación de tranques de relaves (Palmer, 1990a). Se reconocen dos sistemas de cobertura:

- Mejoramiento mediante enmienda
- Cobertura inerte

### 3.3.2.1 Mejoramiento mediante enmienda

Este sistema consiste en aplicar enmiendas orgánicas baratas usadas principalmente para diluir efectos tóxicos de los relaves, o producir algunas barreras para aislar la vegetación de estos.

La enmienda mejora condiciones del sustrato y así permite el establecimiento relativamente rápido de plantas no tolerantes. Materiales orgánicos tales como aguas residuales y lodos, basuras orgánicas domésticas, turba y tierra vegetal son los que habitualmente se utilizan en esta técnica. Estos componentes, aplicados directamente sobre los relaves, desempeñan tres papeles importantes:

- 1.- Mejora la naturaleza física del medio para las raíces (aumento de la capacidad de retención del agua y de los nutrientes)
- 2.- Permite la liberación lenta de nutrientes hacia las plantas (favorece el establecimiento de la vegetación)
- 3.- Favorece formación de complejos con los metales pesados, y por lo tanto, los inmoviliza (reduce efectos fitotóxicos)

Estudios realizados por Jessica E. Halofsky and Larry H. McCormick (2005), indican que el uso de la tierra de compost municipal, en minas de carbón abandonada, ayudan el establecimiento de la vegetación arbórea a utilizar para rehabilitar áreas afectadas por la actividad minera. Sin embargo, el uso de compost introduce otras especies herbáceas pioneras, limitando el establecimiento de las especies arbóreas y, de este modo, el potencial silvícola de estas zonas rehabilitadas mediante éste sistema.

Al igual que las enmiendas, la adición de cal (generalmente proveniente de piedras calcáreas de suelo) es habitualmente utilizada para tranques ácidos. Ésta aumenta el pH y reduce la disponibilidad de metales (Down, 1975). Las enmiendas también consideran adicionar fertilizantes estándares donde se aplica, de manera complementaria NPK. Aplicado el tratamiento, se incorpora una mezcla agrícola de semillas que incluyen una especie de la familia Fabaceae (leguminosa). De este modo, se logra obtener una cobertura vegetal que se desarrolla rápidamente. Sin embargo, este crecimiento es temporal y posteriormente, después de algunos años, la tendencia es a una disminución de esta cobertura vegetal (proceso de regresión). Lo anterior responde a que los niveles

de nutrientes tienden a disminuir a través del tiempo al igual que la materia orgánica (Goodman *et al.*, 1973). Para evitar que ocurra este proceso, es recomendable realizar aplicaciones regulares de fertilizante con fines de prolongar la permanencia de vegetación.

La regresión de cobertura vegetal también se debe a la reaparición de metales pesados causantes de toxicidad. Éste proceso ocurre debido a diferentes causas tales como:

- movimientos ascendentes de sales de metales solubles que se producen cuando el equilibrio neto del agua es desfavorable,
- descomposición de residuos orgánicos (Johnson y Bradshaw, 1977) y/o;
- penetración de la raíz en el substrato subyacente tóxico.

Al igual que el uso de pastos metal-tolerantes, el efecto de regresión de cobertura vegetal se estudió en detalle en los tranques metalíferos en Lower Swansea Valley. Las investigaciones a largo plazo indicaron que la vegetación podía permanecer al aplicarse regularmente materia orgánica después del establecimiento (Gemmell y Goodman, 1978).

La regresión de la cobertura vegetal debido a la toxicidad de los metales es generalmente inevitable y, en los tranques con alto nivel de metales, las enmiendas sólo pueden ser utilizadas con cultivares metal-tolerantes, o en el caso de requerir solamente de una cubierta temporal.

Estudios realizados por Z.H. Ye, J.W.C Wong, M.H. Wong, C.Y. Lan, A.J.M. Baker (1999), en tranques de Pb/Zn al norte de India, se ha evaluado el efecto de la cal, (0,5; 1; 2; 4 t/ha) combinado con purines de cerdo (12, 25, 38, 50, 75 t/ha) sobre la vegetación. Las especies utilizadas fueron *Agropyron elongatum* (Poaceae) y *Trifolium repens* (Fabaceae). Los resultados muestran que las aplicaciones de cal y de purines de cerdo aumentan el pH, disminuye la conductividad eléctrica. En comparación con tranques sin enmienda, la aplicación sola de cal (2 t/ha) no aumenta el crecimiento de las especies. Sin embargo, al suplementar con fertilizante (150 kg/ha de N), incrementa el crecimiento de *A. Elongatum*. Cuando estos resultados se comparan con el efecto combinado de purines más cal (sin fertilizantes), también aumenta el crecimiento y, adicionalmente, reduce la toxicidad.

Otros estudios realizados, referente a enmiendas, en tranques de minas de Pb/Zn en la región de Guangdong, China (Z.H. Ye, J.W.C. Wong, M.H. Wong, A.J.M. Baker, W.S. Shu, C.Y. Lan, 2000), consideraron probar distintos tratamientos sobre el crecimiento de tres poaceas (*Agropyron elongatum*, *Cynodon dactylon*, *Lolium multiflorum*) y una fabacea (*Trifolium repens*). Los tratamientos fueron:

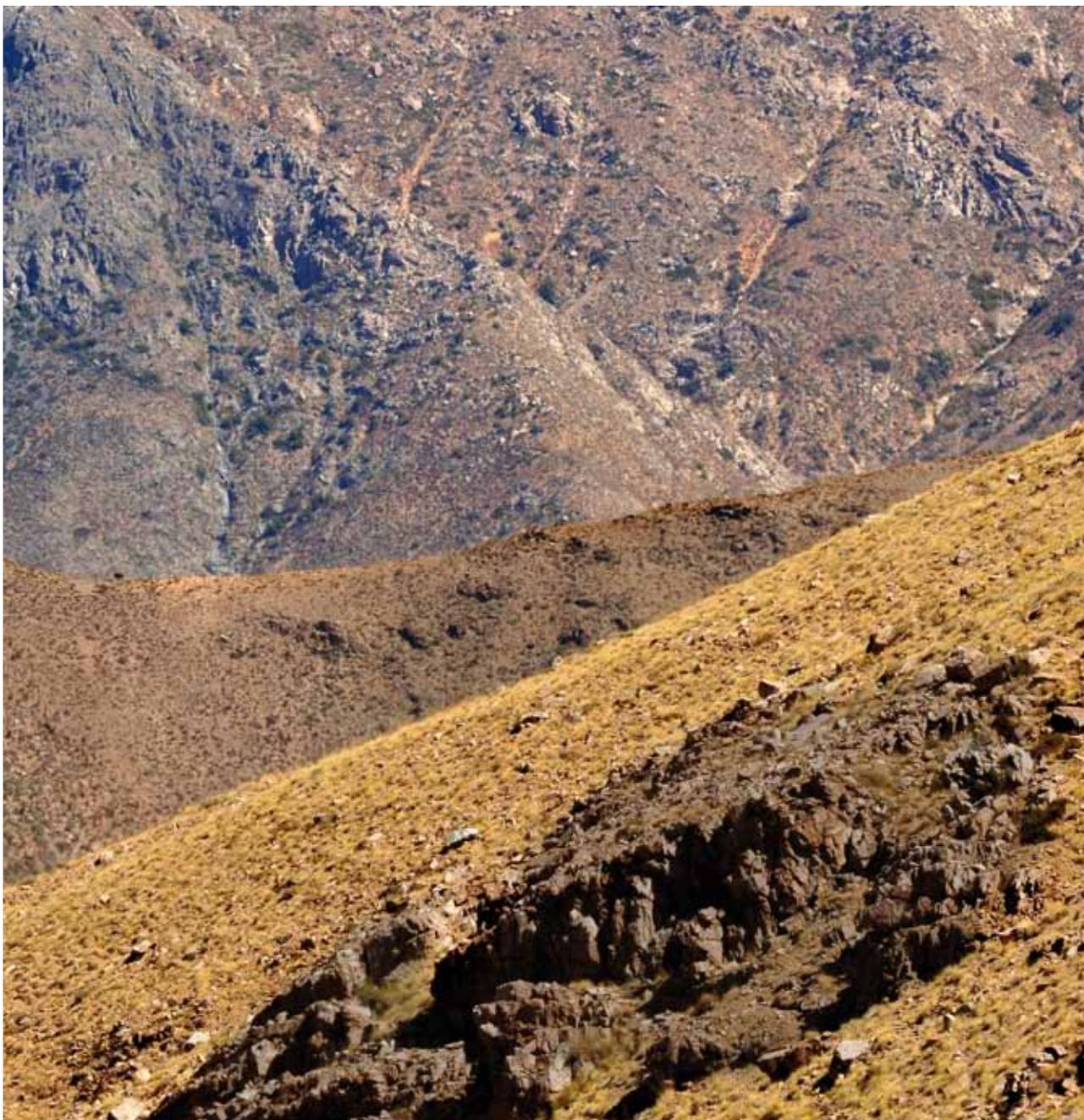
- purines de cerdos (PC),
- compost de hongos (CH),
- residuos de carbón quemado (RC),
- cenizas volantes (CV) y
- tierra superficial.

Los resultados indicaron que CV (10cm) y PC (15cm) aumentan el pH. *C. Dactylon* crece bien y tiene una alta cobertura (90-100%) en todos los tratamientos, respecto al testigo, donde el crecimiento es débil. *A. elongatum* y *L. multiflorum* tienen una cobertura más alta cuando crecen con RC y CV. Estas mismas especies, también crecen en enmienda de tierra superficial. Los resultados indican que el uso de 15cm de RC o 10cm de CV, o el uso de 38 t/ha de CH son eficaces para la vegetación en tranque de Pb/Zn. Sin embargo, la especie *C. Dactylon* es la que mejor se adapta a este medio.

### 3.2.2.2 Material de cobertura inerte

En Inglaterra, este enfoque fue iniciado por experimentos de Johnson *et al.* (1977) en dos minas de Pb/Zn. En ensayos experimentales se observó que el uso de enmiendas inertes, deficientes en macronutrientes, era más conveniente para la estabilización vegetativa a largo plazo que enmiendas de alta fertilidad inherente.

Los últimos sustratos (enmiendas de alta fertilidad), apoyan producciones agrícolas para un futuro próximo. Sin embargo, se acelera la regresión ya que las raíces penetran rápidamente al estrato más tóxico. En contraste, las enmiendas inertes pueden permitir un restablecimiento permanente, con una cobertura vegetal que presenta raíces poco profundas compuesta de una mezcla probada de pastos / leguminosas. Este sistema inicialmente requiere del uso regular de fertilizante rico en fósforo, con fines de estimular el crecimiento de las leguminosas. Al obtener una cobertura con raíces poco profundas, éstas no entrarán en contacto con el sustrato tóxico subyacente.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

Por otra parte, los materiales inertes gruesos y granulares reducen la migración ascendente de iones solubles de metales pesados. Por lo tanto, la aparición de fitotoxicidad debido a esta causa se reduce en comparación a enmiendas orgánicas.

Para aplicar enmiendas inertes, éstas deben estar localmente disponibles y deben ser de bajo costo. Lo anterior se fundamenta en que éstas son requeridas en grandes cantidades en los esquemas de vegetación de tranques de relaves. Al considerar que en minería se generan múltiples desechos libres de metales, resulta de interés el poder utilizarlos en faenas de vegetación con enmienda inerte (Bradshaw y Johnson, 1992).

La desventaja de usar materiales gruesos es que pueden favorecer la lixiviación y el movimiento lateral de los metales pesados (Palmer, 1990a). Para evitar este tipo de efecto, se puede aplicar una capa de polietileno, que cubra superficialmente los relaves, antes de utilizar el material inerte. Ensayos realizados en la mina Y-Fan fueron evaluados 12 años después del establecimiento y, debido a sus exitosos resultados, el esquema de vegetación aplicado fue extrapolado a gran escala. Esto implicó cubrir grandes áreas de relaves con una membrana del polietileno la que se cubrió con una capa de 500 milímetros de fragmentos de pizarra localmente disponible en una mina de carbón. Posteriormente se sembró con una mezcla estándar de pasto / trébol. Los resultados obtenidos indicaron una cobertura superior al 90% (UK Department of the Environment, 1994). Esquemas similares han sido aplicados en otros sitios mineros, como por ejemplo, la mina de plomo Goginan. En este caso, se adicionó una capa de 300 milímetros de material granular y 200 milímetros de subsuelo (Palmer, 1990b).

El método de cobertura inerte puede presentar resultados aún más eficientes en los climas áridos, donde el movimiento ascendente de los metales puede ocurrir a largo plazo (Palmer, 1990a), y; en tranques extremadamente fitotóxicos donde incluso las plantas metal-tolerantes no pueden persistir.

Enmiendas inertes más suelo agrícola han sido utilizados en la rehabilitación de tranques en Captains Flat, New South Wales, donde existía contaminación extrema. En este caso, el establecimiento directo de una cubierta vegetal parecía imposible debido a los altos niveles residuales de Cu, Zn, Pb y Fe, sumado a una acidez extrema ( $\text{pH} = 2,8$ ) y salinidad significativa (Craze, 1979). Los tranques fueron sellados con una cubierta de arcilla compactada, 450 milímetros de pizarra y 300 milímetros de suelo. Aunque el costo de esta técnica era considerable, el establecimiento de la vegetación fue, en gran parte, exitoso y logrando reducir significativamente la contaminación crónica del río más cercano. La desventaja principal de las cubiertas inertes es que requieren una

profundidad óptima mayor respecto a otros materiales con el consecuente efecto de elevar los costos de este tratamiento (Johnson y Bradshaw, 1977). Lo anterior se puede contrarrestar al utilizar material inerte de desecho de la propia empresa minera localizado en sectores cercanos al tranque bajo rehabilitación. De no contar con la disponibilidad del material, esta técnica de rehabilitación debe ser nuevamente evaluada y considerada como última alternativa a aplicar.

### 3.3.3 Combinación de métodos

166  
• Existe la alternativa de probar métodos combinados de rehabilitación mediante vegetación (material de cobertura con cultivares metal-tolerantes) con fines de obtener un mayor éxito en la rehabilitación de tranques de relaves. A modo de ejemplo, se cita el esquema de vegetación de Parc Mine, North Wales. La explotación minera de Pb/Zn había dejado grandes tranques que se erosionaban gravemente después del abandono y contaminaban de manera severa el río Conwy y los sistemas agrícolas adyacentes. No había un sistema de recuperación conveniente; el material de cobertura era demasiado costoso para ser utilizado en grandes cantidades, y el establecimiento de sistemas vegetales tolerantes no bastaba para evitar la erosión (Firth *et al.*, 1981). En consecuencia se estableció el compromiso de adicionar 75-100 milímetros de material inerte residual de la mina (pizarra) para cubrir y posteriormente, sembrar con una mezcla conteniendo principalmente *Festuca rubra* con trébol blanco. Posteriormente, se fertilizó logrando una óptima cobertura que ha persistido 11 años después del establecimiento (Bradshaw y Johnson, 1992). Las raíces de *Festuca rubra* (especie tolerante), penetraron los relaves subyacentes y fijaron de manera eficaz la cobertura inerte. De este modo generó una cubierta de vegetación visualmente aceptable permitiendo mitigar procesos de contaminación con Pb y Zn. Por otra parte, experimentos realizados por Bergholm y Steen (1989), en la mina de Zn de Ammeberg, Suecia central, indican que *Festuca rubra* desarrolla una cobertura persistente, al utilizarla en conjunto con enmiendas tales como tierra vegetal, lodo de aguas residuales y arena gruesa. Así, después de 10 años, todos los ensayos donde se adicionó regularmente fertilizante comercial (NPK) mostraron resultados exitosos. Los óptimos resultados se debieron en parte al adecuado pH que presentó el tranque durante todo el seguimiento (pH = 7,3).

### 3.3.4 Método ecológico

Este sistema corresponde a una prolongación de procedimientos discutidos previamente. Considera el uso de principios ecológicos con fines de obtener un establecimiento de vegetación exitosa. Este método enfatiza la

importancia de los procesos biológicos (N-fijación, ciclo de los nutrientes, descomposición y otros procesos microbianos) en el desarrollo de un ecosistema autosustentable en tranques de mina Jeffrey *et al.* (1975). Sin embargo, los métodos discutidos previamente también consideran aspectos ecológicos, por lo tanto, el enfoque ecológico no puede considerarse como una nueva filosofía de vegetación sobre tranques de relaves. Indubitablemente, el desarrollo de procesos biológicos, especialmente “el ciclo de nutriente completo”, es un componente de todos los esquemas relacionados con establecimiento de vegetación y esta es la clave para alcanzar una cobertura con bajo esfuerzo de mantenimiento. Esto reduce la necesidad de usos repetidos del fertilizante y de enmiendas con aporte de materia orgánica.

En los últimos años, se han desarrollado estudios que consideran conceptos de simbiosis mediante uso de Micorrizas (asociación de hongos con raicillas) para plantas que crecen en tranques metalíferos. Estos microorganismos pueden contribuir al establecimiento de vegetación en tranques potenciando la capacidad de absorber nutrientes por las raíces, y, de este modo, mejoran la estructura del sustrato. Por otra parte, las micorrizas y en general la microflora que existe de manera natural en suelos normales, está ausente en tranques de relaves por la carencia de vegetación (Shetty *et al.*, 1994). En consecuencia, al establecer plantas en estos sustratos con adición de estos microorganismos, se favorece la proliferación de ellos y, consecuentemente, el establecimiento de la vegetación. Experimentos de Shetty *et al.* (1994), en Kansas demostraron, para dos especies de pastos, *Andropogon gerardii* y *Festuca arundinacea*, la imposibilidad de un establecimiento en tranques de Zn sin presencia de micorrizas. Investigaciones de Hetrick *et al.* (1994), en la misma zona, indicaron que ambas especies habían aumentado su potencial de sobrevivencia y de crecimiento frente a la aplicación de materia orgánica más micorrizas. Los efectos sinérgicos de este tratamiento combinado permiten obtener resultados altamente exitosos. Aunque los trabajos en este tema aún están poco desarrollados, los efectos benéficos de las micorrizas pueden hacer de la inoculación un componente importante para los futuros métodos de estabilización mediante vegetación (G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000).

Dentro de los estudios asociados a la importancia de los procesos biológicos con fines de lograr un sistema autosustentable, destacan antecedentes reportados por Y. Ma, N.M. Dickinson, M.H. Wong, 2003, respecto a los efectos positivos del uso de gusanos en el crecimiento de árboles en tranques en proceso de rehabilitación. El estudio, realizado en ensayos de maceta, cita el aporte de la especie *Pheretima guillelmi* en el crecimiento de un árbol de la familia *Fabaceae*: *Leucaena leucocephala* en relaves de mina de Pb/Zn de Guangdong, China. *L. leucocephala* creció con éxito en relaves con enmienda de suelo de 25% (w/w), pero *P. guillelmi* sobrevivió so-

lamente con una enmienda del suelo de 50%. La presencia de este gusano mejoró la producción de las plantas de 10 a 30%. Estos organismos, incidieron en aumentar el N y P disponibles en el suelo, y en incrementar en un 10% la absorción del fósforo y calcio. Estos resultados demuestran que es necesario considerar el contexto ecológico de la fitorehabilitación considerando las interacciones planta-suelo-animales que influyen en la movilidad del metal.

También se han reportado estudios en plantación de árboles, para estabilizar los tranques de minas, donde se ha utilizado, previo a la plantación, enmiendas combinadas de gusanos (*Pheretima guillelmi*) más micorrizas. De este modo, se mejora el estado físico-químico de los relaves y disminuye la toxicidad de estos sustratos. Se estima que las interacciones ecológicas tienen el potencial de reducir costos en rehabilitación con vegetación y mejorar la eficiencia en el establecimiento de cobertura vegetal en zonas contaminadas por metales pesados (Y. Ma, N.M. Dickinson, M.H. Wong, 2006).

### 3.3.5. Conclusiones

Existe en el mundo una necesidad creciente de rehabilitar tranques en cierre y/o abandono debido a los problemas de contaminación que ellos representan, en el largo plazo, para el medio ambiente. EL establecimiento de vegetación sobre estos tranques es el mejor método para estabilizar los relaves y es el único medio capaz de remediar las cicatrices visuales que éstos causan sobre el paisaje. Desarrollar una adecuada estrategia de acción es esencial para el éxito del establecimiento de vegetación, incluyendo análisis físicos y químicos, pruebas biológicas y ensayos de campo a mediano y largo plazo.

Los principales métodos de vegetación, mencionados en esta revisión bibliográfica, se resumen en el Tabla N° 1.

Para evaluar la mejor estrategia a desarrollar, es fundamental conocer las características que presenta el sitio metalífero a rehabilitar. Los procesos técnicos son cada vez más eficientes, en relación a los relaves de baja toxicidad, sin embargo, sigue la necesidad de realizar investigaciones adicionales en relación a la ciencia sobre vegetación en estos medios. Aunque existe información sobre cultivares tolerantes, su desarrollo comercial se ha orientado hacia países de climas templados y no hacia regiones áridas y tropicales que se asocian a países en vías de desarrollo. Por lo tanto, es fundamental estudiar técnicas alternativas de vegetación que permitan el desarrollo de esta tecnología aplicada a la realidad ecosistémica de estas zonas metalíferas.

**Tabla 1.**

Métodos de Rehabilitación mediante Vegetación (Adaptado de Williamson y Johnson, 1981).

Características de los relaves	Técnica de rehabilitación	Problemas potenciales
<b>Baja toxicidad.</b> Contenido total de metales tóxicos < 0,1%. Sin problemas de alcalinidad o acidez.	<b>Siembra directa con pastos más leguminosas.</b> Aplicación de cal si pH < 6. Adición de materia orgánica en caso de requerir mejoras física o química. Aplicación de fertilizante natural a liberación lenta.	Probable compromiso con un programa de mantenimiento de mediano a largo plazo.
<b>Baja toxicidad y limitaciones climáticas.</b> Contenido total de metales tóxicos < 0,1%. Sin problemas de alcalinidad o acidez. Temperaturas muy extremas, sequías, etc.	<b>Siembras directas con especies nativas.</b> Semillas o transplantes ecológicamente adaptados. Utilización de tratamientos para proporcionar una mejoría al sustrato.	Riego durante el establecimiento. Investigación complementaria sobre las características de la flora nativa.
<b>Alta toxicidad.</b> Contenido de metales tóxicos > 0,1%. En algunos casos, alta salinidad.	<b>(1) Siembras directa con ecotipos tolerantes.</b> Siembras de ecotipos tolerantes a la sal y/o a los metales. Aplicación de cal, fertilizante y materia orgánica.	Compromiso de aplicación regular de fertilizante. Pocas especies tienen una población tolerante y muy pocas de ellas están disponibles en el comercio.
	<b>(2) Tratamiento de la superficie y siembras con pastos/leguminosas.</b> Enmiendas con 10-50 cm de desechos de minas sano o materia orgánica. Aplicación de cal o fertilizante complementario.	Riesgos de regresión de cobertura en el caso de que el espesor del material sea insuficiente o si se produce un ascenso de metales por capilaridad. Limitante: Alto costo y riesgo de disponibilidad de material de cobertura.
<b>Toxicidad extrema.</b> Contenido de metales tóxicos muy alto. Fuerte salinidad o acidez.	<b>Aislamiento.</b> Tratamiento de la superficie con 30-100 cm de materia inerte más 10-30 cm de sustrato favorable a las raíces. Aplicación complementaria de cal y fertilizante.	Posibilidades de deshidratación de las plantas. Limitante: Alto costo y riesgo de disponibilidad de material de cobertura.

## 4. Metodología

Se resume a continuación, el procedimiento de trabajo propuesto para el estudio de investigación en técnicas de vegetación de tranques de relaves en etapa de cierre.

### 4.1 Establecimiento de ensayos de terreno y posterior monitoreo

#### 4.1.1 Análisis de antecedentes

Para el establecimiento de los ensayos, se han recopilado y analizado los siguientes antecedentes:

- Información que posee el consultor: Base de datos e información de ATM Ingeniería proveniente de la experiencia desarrollada en relación a esta materia (Análisis de sustratos de Relaves, monitoreo de Vegetación y Fauna sobre tranques de relaves de mineras de cobre).
- Antecedentes sobre revegetación de tranques de relaves a nivel nacional. Para ello se consideró preferentemente información práctica que posee ATM Ingeniería con respecto al tema (Base de Datos del Consultor: Compañía Minera CDE Petorca “Depósitos de Relaves COEUR”; CODELCO División Andina “Embalse de Relaves Piuquenes”, Forestación en sustratos salinos, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi).
- Información sobre técnicas de establecimiento de vegetación en tranques de relaves en etapa de cierre y/o abandono a nivel internacional (Revisión bibliográfica, capítulo 3).
- Antecedentes climatológicos para la zona de estudio (información proporcionada por MLP).

#### 4.1.2 Ubicación de los ensayos

Para seleccionar la zona de establecimiento de los ensayos, se efectuaron visitas a terreno con fines de definir el mejor sector que permitiera cumplir con los objetivos propuestos. Para ello se consideraron aspectos de interés tales como:

- Zona con baja población de especies vegetales, con fines de causar el menor impacto sobre las formaciones que han colonizado de manera natural el tranque de relaves (cobertura vegetal igual o inferior al 10%).
- Estabilidad del sustrato (zona no afecta a humedal).



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

- Distancia a lugares de acceso (fácil acceso).
- Superficie sin pendiente.
- Zona de adecuada visibilidad en relación a caminos de uso frecuente.

Seleccionado el sitio del ensayo se procedió a su demarcación y georeferenciación. Las coordenadas UTM son las siguientes (Tabla N° 2):

**Tabla 2.**

Coordenadas de los Vértices del Ensayo.

Vértice	Norte	Este
V1	6475948	349445
V2	6476013	349401
V3	6476045	349446
V4	<b>6475981</b>	<b>349493</b>

Seleccionado el sector del ensayo, se procedió a la limpieza de vegetación existente, según los siguientes criterios:

- Especies arbustivas de altura superior en 1,0 m y de diámetro superior a 1,5 m, se podaron a ras de superficie.
- Especies de inferior tamaño pero superior a 25 cm de altura y con más de un eje principal fueron extraídas del terreno.
- Especies con un sólo eje principal y de altura inferior a 25 cm se dejaron en terreno y no fueron intervenidas.

#### 4.1.3 Caracterización del sustrato destinado al estudio

Con fines de conocer las condiciones iniciales del sustrato de relaves, se obtuvieron muestras compuestas basales representativas de la zona del ensayo. Para ello se recorrió el terreno en zig-zag, extrayendo un total de ocho submuestras, a intervalos regulares, las que se mezclaron y homogenizaron para envío a laboratorio.

Se consideró, para este monitoreo, un sólo estrato de espesor equivalente a 50 cm.

Las muestras se trasladaron al laboratorio de fertilidad de suelo "AGROLAB", donde se determinaron parámetros de fertilidad, salinidad, acidez y toxicidad según se indica:

#### *Fertilidad*

- Macronutrientes (N, P, K y S)
- Materia orgánica (M.O.)
- Micronutrientes (disponibles): cobre, hierro, manganeso y zinc

#### *Salinidad y acidez*

- Conductividad eléctrica (CE)
- Sales solubles (Ca, Mg, Na y SO<sub>4</sub>)
- RAS (Relación de Adsorción de Sodio)
- pH

#### *Toxicidad (fracción total y soluble)*

- Cobre
- Manganeso
- Zinc
- Molibdeno
- Arsénico
- Mercurio

### **4.1.4 Caracterización del espejo de agua**

De manera complementaria a la caracterización anterior, se realizaron mediciones sobre la calidad química de las aguas que se presentan en el tranque, con fines de evaluar su eventual uso en riego, solo para el período inicial de establecimiento.

Para esta caracterización, se consideró a modo de referencia todos los parámetros de la Norma de Riego (NCh 1.333/78 Rev. 87 Requisitos de Calidad de Agua Para Diferentes Usos).

El laboratorio utilizado para esta descripción, fue SGS EcoCare.

#### 4.1.5 Selección de especies

Las plantas seleccionadas para el presente ensayo, corresponden a especies que se reproducen bajo las condiciones climáticas de la zona y que resisten a condiciones adversas de suelo en relación con escasez de nutrientes. Por lo tanto, presentan potencial fisiológico para adaptarse al ecosistema imperante en el tranque utilizado como experiencia piloto en forestación de relaves.

Especial atención se ha puesto al considerar en esta experiencia de forestación en relave el uso de especies nativas con fines de dar un valor ecosistémico adicional a este ensayo. En este contexto, la selección de especies vegetales nativas se orientó hacia las cultivadas en los viveros de MLP donde se hace un esfuerzo particular por recolectar, germinar y plantar especies nativas que se desarrollan en el entorno.

La metodología de selección de especies se orientó hacia la evaluación de tres estratos vegetacionales: arbóreo, arbustivo y herbáceo. Para la selección de las especies a investigar, se consideraron los siguientes criterios:

- Base de datos del consultor (experiencia de terreno y antecedentes bibliográficos, capítulo 3).
- Dinámicas sucesionales naturales de colonización en sustrato arenoso asociado a lechos y/o cajas de río.
- Hábitos de crecimiento.
- Rusticidad frente a déficit hídrico.
- Disponibilidad en el mercado.

Sobre la base de estos criterios generales, se seleccionaron las especies que se detallan a continuación:

##### 4.1.5.1 Estrato arbóreo

- ***Acacia saligna* (Aromo azul)**

Familia: Fabaceae

Especie nativa de Australia suroccidental, entre los 28° y 33° S. Se desarrolla como parte del sotobosque asociado a *Eucalyptus gomphocephala* sobre formaciones calcáreas de la zona costera del sudoeste australiano.

*Acacia saligna* es cultivada ampliamente en diversos países de zonas áridas o semiáridas, en regiones tropicales y subtropicales. Introducida en Sudáfrica a mediados del siglo pasado como estabilizador de dunas y en prácticas de control de erosión. Actualmente es utilizada en forestaciones de diversos propósitos en el norte de Chile, Uruguay, México, Israel, Irán, Irak, Siria, Jordania, Grecia, Chipre, Sudáfrica y otras naciones del Norte de África.

En Australia crece en ambientes de lomajes suaves con temperaturas máximas de verano de 23 a 36°C y mínimas invernales de 4 - 9° C en un clima de carácter mediterráneo con precipitaciones que oscilan entre 250 y 1.015 mm anuales y con temperaturas medias anuales entre 16-18°C.

Especie resistente a la sequía, puede desarrollarse con precipitaciones menores a 250 mm hasta 1.015 mm anuales. No tolera heladas severas de -3°C. La Acacia Azul es muy adecuada para desarrollarse en condiciones de semiaridez con rangos de 300 - 600 mm anuales y crece mejor en los sitios con temperaturas medias de invierno y verano entre 13 y 30°C. Sin embargo, en experiencias en Chile, crece en zonas de precipitaciones irregulares y limitadas que oscilan entre 10 y 100 a 250 mm anuales.

En el norte y centro de Chile ha mostrado preferencia por las áreas con influencia de neblinas costeras, siendo plantada en la zona de clima mediterráneo cálido, caracterizado por la concentración de precipitaciones en invierno, sequía estival y temperaturas extremas moderadas, con escasa ocurrencia de heladas (temperatura mínima promedio de 10 a 15°C de costa a interior). Actualmente, se están evaluando plantaciones demostrativas establecidas en 1991 en zonas de secano interior en las que se han obtenido sobrevivencias superiores al 90% y alturas de alrededor de 2 m a edades de 4 años. (Alcaíno *et al.*, 1995)

Crece en gran variedad de suelos, especialmente en suelos arenosos bien drenados en terrazas costeras, pero puede desarrollarse bien en sitios pantanosos y bordes de ríos, en suelos graníticos y en medias laderas. Soporta anegamientos ocasionales. Presenta una buena adaptación a suelos salinos, escasamente ácidos, de texturas arenosas a franco arenosas, poco profundos (< 50 cm), pobres en nitrógeno y fósforo. En Australia, habita en suelos calcáreos. En Chile se cultiva en suelos de escaso desarrollo, con erosión superficial, con bajos contenidos de nitrógeno y fósforo y abundante potasio. Esta condición la hace una especie usada en rehabilitación de tranques de relaves en minería asociada a cobre y oro.

### • ***Maytenus boaria* (Maitén)**

Familia: Celastraceae

Árbol endémico de los bosques subantárticos que alcanza a los 20 m de altura. Copa redondeada y frondosa, ramas delgadas y colgantes. Tronco de hasta 1 m de diámetro, de corteza relativamente lisa y grisácea. En Chile crece desde la provincia de Huasco (III Región) hasta la de Chiloé (X Región), en ambas cordilleras y en el Llano Central, desde el nivel del mar hasta los 1.800 m.s.n.m. No forma bosques puros, sino que aparece relativamente disperso a lo largo de toda su distribución. En la zona central crece asociado al Quillay, Espino, Litre y Bollén, entre las especies más importantes.

Su amplia distribución indica que es una especie con una gran tolerancia a una diversidad de climas. Las temperaturas a lo largo de su distribución fluctúan entre los -3,2°C y los 9,9 °C para temperaturas mínimas y entre los 6°C y los 31,3°C para los registros de máximas temperaturas. El rango de precipitación se encuentra entre los 26,9 y 2.657 mm anuales (Del Fierro, 1998).

En cuanto a su hábitat el maitén se desarrolla preferentemente en lugares secos, como faldeos de cerros o bien próximo a esteros y ríos, en lugares no excesivamente húmedos.

El maitén se disemina fácilmente. La dispersión de sus semillas se ve favorecida por la acción de varios pájaros que la consumen; también se reproduce mediante estacas.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

#### 4.1.5.2 Estrato arbustivo

##### · *Schinus polygamus* (Huingán)

Familia: Anacardiaceae

Arbolito o arbusto nativo perenne, dioico, de hasta 3 m. de altura por 2,5 m. de diámetro, ramificado casi desde la base. El tronco es de color ceniciento y aspecto tortuoso, las ramas terminales se transforman en espinas. Las hojas son alternas, muy polimorfas y subcoriáceas. Las flores son axilares, naciendo varias de un mismo punto o en racimos. El fruto es una drupa redondeada violáceo-negruzca que madura durante el verano.

Crece entre Copiapó (III Región) y Valdivia (X Región), frecuentemente en forma arbustiva, formando parte del matorral esclerófilo del valle central. Prefiere los suelos pobres de exposición norte y se desarrolla tanto en planicies como en laderas. Hacia su dispersión norte se describe la variedad parviflorus, de hojas más anchas, más arbustivas y más floríferas.

Es de crecimiento relativamente rápido. A partir de semilla alcanza aproximadamente 1 m. de altura en tres años. Es una especie que soporta bien suelos disturbados de alta permeabilidad y de textura gruesa. Presenta una rusticidad alta a condiciones de sequía y fertilidad.

##### · *Cassia closiana* (Quebracho)<sup>1</sup>

Familia: Fabaceae

Arbusto o arbolito nativo de hasta 6 m de alto, de hojas compuestas con estipulas lineares y flores amarillas grandes. El fruto es una legumbre larga, angosta y arqueada. Crece entre Aconcagua y Colchagua desarrollándose en laderas y planicies; en especial en las exposiciones occidentales de la Cordillera de la Costa.

.....  
<sup>1</sup> Nombre científico sinónimo: *Senna candolleana*

#### • ***Muehlenbeckia hastulata* (Quilo)**

Familia: Polygonaceae

Arbusto nativo, con ramas, a veces, volubles (liana), crece como especie pionera en áreas quemadas o taladas como también se presenta en terrenos con remoción de los primeros estratos de suelo o en derrames de material grueso y permeable. Se desarrolla entre Coquimbo (IV Región) y Valdivia (X Región), desde el nivel del mar hasta los 3.000 m.s.n.m.

#### **4.1.5.3 Estrato herbáceo**

Para el estrato herbáceo se conformaron dos mezclas de semillas privilegiando en un caso especies anuales y en el otro, especies perennes. Esta diferenciación permite evaluar qué ciclo de desarrollo se establece con éxito en las condiciones de un tranque de relave.

a) Mezcla 1

##### ***i. Trifolium subterraneum* (Trébol subterráneo)**

Familia: Fabaceae

Planta anual de la familia de las Leguminosas originaria de países del mediterráneo. En Chile se cultiva en secano desde la parte costera sur de la zona mediterránea semiárida. En la zona mediterránea húmeda se cultiva además en el sector de valles interiores, secano interior y precordillerano.

En cuanto a requerimientos edáficos, esta especie se desarrolla mejor en suelos francos, donde sus semillas pueden encontrar mejores condiciones de cubrimiento y posterior germinación. Esta condición también se da en suelos franco arenosos (Genneville, 1983).

Esta especie necesita un crecimiento y desarrollo vigoroso para asegurar una producción de semillas que permitan su resiembra natural.

## ii. *Avena sativa* (Avena)

Familia: Poaceae

Especie anual originaria del Suroeste de Asia, la especie hoy cultivada se obtuvo en condiciones controladas en el norte de Europa (Genneville, 1983). En Chile, *Avena sativa* se cultiva prácticamente en todas las regiones del país. Se adapta por su distribución a una gran variedad de suelos.

## iii. *Lolium multiflorum* (Ballica italiana)

Familia: Poaceae

Especie anual, aunque en buenas condiciones suele durar hasta dos o tres años. Posee la capacidad de formar prados y se adapta en nuestro país en la zona mediterránea central. Esta especie presenta un crecimiento inicial rápido en la etapa primaveral y un descenso brusco en el período estival, esta condición la hace adecuada a ser seleccionada en ensayos de recuperación de sitios bajo condiciones de sequía con mejores aportes hídricos en el suelo a la salida del invierno.

b) Mezcla 2

## i. *Trifolium subterraneum* (Trébol subterráneo)

## ii. *Festuca arundinacea* (Festuca)

Familia: Poaceae

Especie perenne de raíz profunda pudiendo conformar prados. En Chile, se cultiva desde la zona mediterránea central hasta la zona austral oriental. Es una especie tolerante al mal drenaje y soporta un amplio rango de pH del suelo. En cuanto a su crecimiento presenta dos períodos de crecimiento, uno en la época primaveral y otro en la época de otoño, con un receso relativo durante el verano. Durante su establecimiento posee un crecimiento más bien lento, situación que cambia una vez establecida, donde puede ser especie dominante en el estrato herbáceo.

### iii. *Phalaris tuberosa* (Falaris)

Familia: Poaceae

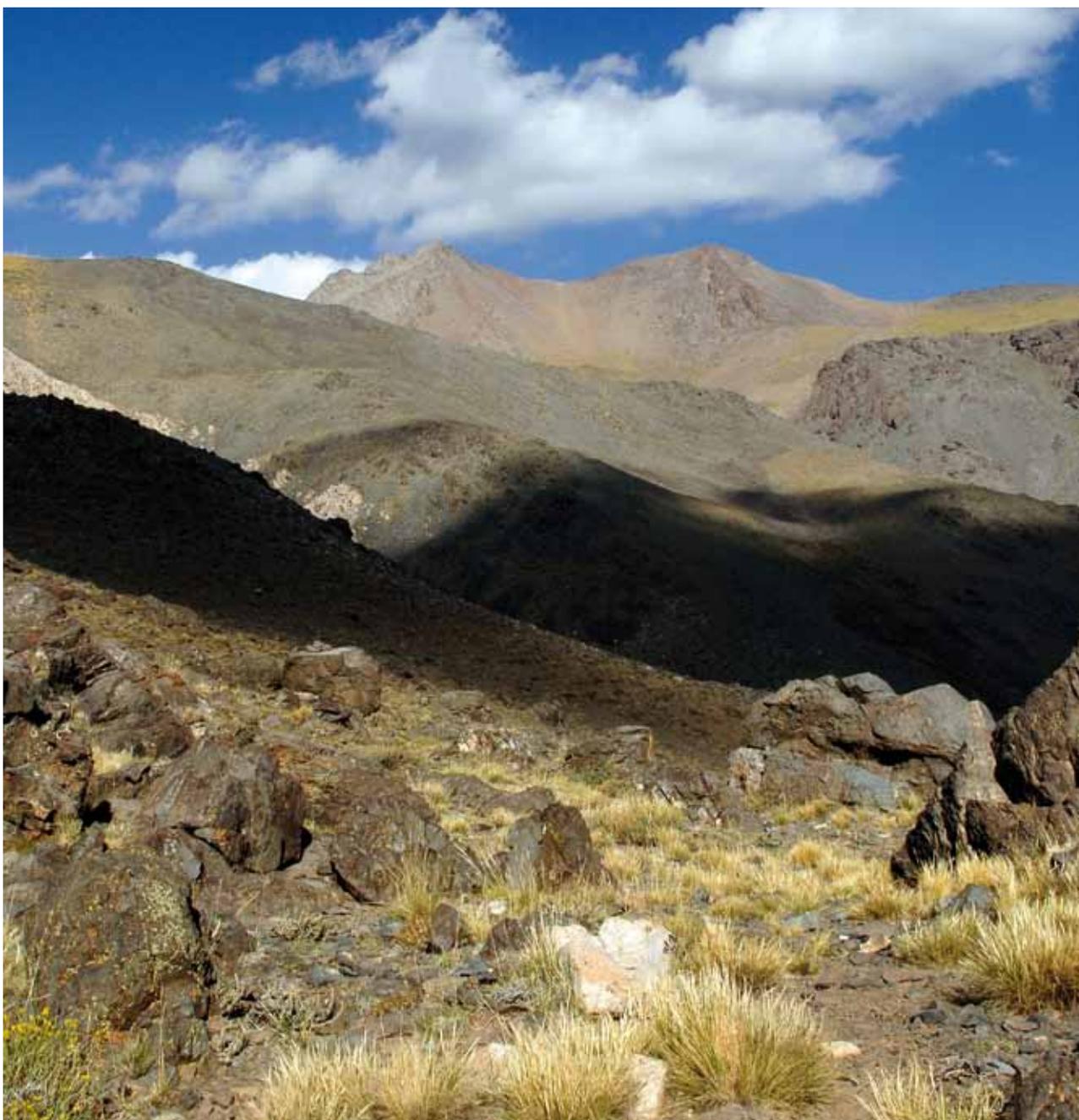
Especie perenne con hábito de crecimiento con rizomas cortos que se desarrollan desde la base. El origen de esta especie es mediterráneo con una selección controlada en Australia. En Chile se desarrolla en seco desde la zona mediterránea semiárida hasta la zona mediterránea subhúmeda (Genneville, 1983). Esta especie se desarrolla en suelos de textura media a pesada. Durante su establecimiento posee un crecimiento más bien lento, situación que cambia una vez establecida, donde puede ser especie dominante en el estrato herbáceo, posee un crecimiento temprano en otoño, presentando también un importante desarrollo en la temporada invernal. La fase de rápido crecimiento se inicia temprano en primavera.

#### 4.1.5.4 Consideraciones en la selección de especies para los ensayos sobre sustratos de relave

Especial atención se ha puesto en considerar para el estudio especies de la familia Fabaceae (leguminosas). La bibliografía internacional cita la importancia que tiene en el éxito del establecimiento vegetal el incluir especies de esta familia (Johnson *et al.*, 1976; Hetrick *et al.*, 1994; G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, 2000, entre otros).

Por lo anterior, en todos los estratos vegetacionales se ha seleccionado una especie de la familia Fabaceae ya que éstas poseen la capacidad de desarrollar rizobios nitrificadores y consecuentemente cumplen la función de fijar el nitrógeno atmosférico en el suelo. Esta característica permite mejorar las condiciones de sustrato para otras especies y mejora las condiciones para el establecimiento y desarrollo de la flora y fauna microbiana (hongos, nemátodos, bacterias). Lo anterior se considera relevante en el éxito del establecimiento de cobertura vegetal en sustratos de relaves. De hecho, la carencia de vegetación en estos tranques incide en la ausencia de actividad microbiológica (Hetrick *et al.*, 1994; Shetty *et al.*, 1994).

Estudios realizados para determinar la tasa de descomposición de hojarasca en tranques rehabilitados (Grigg, 2002), muestran que las pérdidas de peso en sistemas reconstituidos se relaciona con la baja producción de biomasa microbiana, en la superficie de suelo, la cual se estima que demora como mínimo 10 años para alcanzar niveles similares a sectores sin intervención. En estos sitios, las pérdidas de peso se relacionan más con la abundancia de fauna invertebrada que con el contenido microbiano.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

En resumen, la inclusión de especies de leguminosa, así como los tipos de hábitos propuestos, tiene una orientación ecológica, al permitir evaluar si las diferentes combinaciones de vegetales y estratos generan un cambio significativo en las condiciones edáficas del sustrato.

#### **4.1.6 Tratamientos**

Los tratamientos utilizados han considerado aspectos relacionados con enmiendas orgánicas a modo de favorecer condiciones estructurales y nutritivas del sustrato. Sobre la base de este criterio, se establecieron en terreno los siguientes tratamientos:

- T<sub>0</sub>: Testigo o control (relave o sustrato sin ningún tratamiento).
- T<sub>1</sub>: Adición de tierra vegetal (extraída por MLP de las zonas afectas a inundación por el actual tranque en operación).
- T<sub>2</sub>: Adición de compost (residuos orgánicos parcialmente descompuestos).

Los tratamientos indicados, para el caso de las especies arbóreas y arbustivas, se aplicaron directamente en la casilla de plantación, en mezcla con el sustrato de relaves. En el caso de especies herbáceas, los tratamientos fueron incorporados al sustrato de relaves directamente en la platabanda de siembra.

Las dosis utilizadas, según el tratamiento fueron las siguientes:

##### **4.1.6.1 Tratamiento con adición de Tierra Vegetal (T<sub>1</sub>)**

###### **Especies arbóreas y arbustivas:**

*Dosis en volumen:* 50% relave (13,5 L) + 50% Tierra vegetal (13,5 L) / casilla de plantación

*Dosis en peso:* 11,7 kg de relave + 11 kg de tierra vegetal / casilla de plantación

### **Especies herbáceas:**

Se incorporan a la platabanda de siembra, una dosis de 58,7 Kg/ m<sup>2</sup>.

#### **4.1.6.2 Tratamiento con adición de Compost (T<sub>2</sub>)**

### **Especies arbóreas y arbustivas:**

*Dosis en volumen:* 50% relave (13,5 L) + 50% compost (13, 5 L) / casilla de plantación

*Dosis en peso:* 11,7 kg de relave + 6 kg de compost / casilla de plantación

### **Especies herbáceas:**

Se incorporan a la platabanda de siembra, una dosis de 32,0 Kg/m<sup>2</sup>.

Adicionalmente y según las recomendaciones citadas en bibliografía (capítulo 3), todos los tratamientos recibieron una dosis inicial de fertilizante con fines de ayudar al establecimiento de la vegetación. Posteriormente, el ensayo no considera mantener un programa de fertilización y se espera que las especies se autosustenten, alcanzando un nivel de equilibrio natural en este ecosistema. Sin embargo, las observaciones visuales de la vegetación indicarán si existe la necesidad de aplicar dosis adicionales de fertilizantes para ayudar al definitivo establecimiento de las especies que presentan resultados positivos.

Para esta fertilización de establecimiento, se utilizó una mezcla comercial Soquimich para plantación forestal de macro y micronutrientes en dosis equivalente a 180 gr/casilla de plantación para especies arbóreas y arbustivas y en el caso de herbáceas, 75 gr/m<sup>2</sup>.

#### 4.1.7 Riego

La metodología propuesta no considera la aplicación de un programa de riego para el período estival (primavera – verano). De hecho, las especies seleccionadas en este ensayo se adaptan a las condiciones de precipitación observadas en el área de estudio. Sin embargo, por los antecedentes recopilados en la revisión bibliográfica donde se destaca la importancia del riego para el éxito del establecimiento (Bach, 1973; Peterson, 1978; Tordoff, 2000; entre otros), se ha reconsiderado la cero aplicación de riego, adicionando las mínimas dosis para evitar estrés hídrico en la temporada estival solo para el primer año de ensayo. Bajo este escenario, se ha aplicado las dosis que se resumen en el Tabla N° 3:

**Tabla N° 3.**  
Dosis de Agua de Riego

Mes	Tipo de Hábito	Dosis
		Arb./arbust. (L/planta) Herbáceo (L/m2)
Julio de 2005	Arbóreo/arbustivo	6
	Herbáceo	15
Diciembre de 2005	Arbóreo/arbustivo	47
	Herbáceo	15
Enero de 2006	Arbóreo/arbustivo	47
	Herbáceo	15
Febrero de 2006	Arbóreo/arbustivo	47
	Herbáceo	-

#### 4.1.8 Diseño experimental

Se ha utilizado un diseño de bloque al azar compuesto de tres repeticiones por bloque y consecuentemente por tratamiento.

En cada bloque se ha dispuesto aleatoriamente y a lo largo de éste, los tres tratamientos. Éstos últimos, son equivalentes a parcelas o unidades de tratamiento y presentan las siguientes dimensiones:

$$24 \text{ m} \times 18 \text{ m} = 432 \text{ m}^2$$

En consecuencia, el tamaño de cada bloque es de:

$$24 \text{ m} \times 54 \text{ m} = 1.296 \text{ m}^2$$

De los 432 m<sup>2</sup>, ocupados por cada tratamiento, 336 m<sup>2</sup> se han destinado a replicar especies arbóreas y arbustivas a modo de obtener formaciones vegetales de ambos tipos de hábitos (superficie que incluye caminos de contorno).

Los 96 m<sup>2</sup> restantes (incluyendo caminos de contorno y entre platabandas), se han utilizado para las especies herbáceas ocupando por cada subbloque y mezcla de especies una superficie equivalente a:

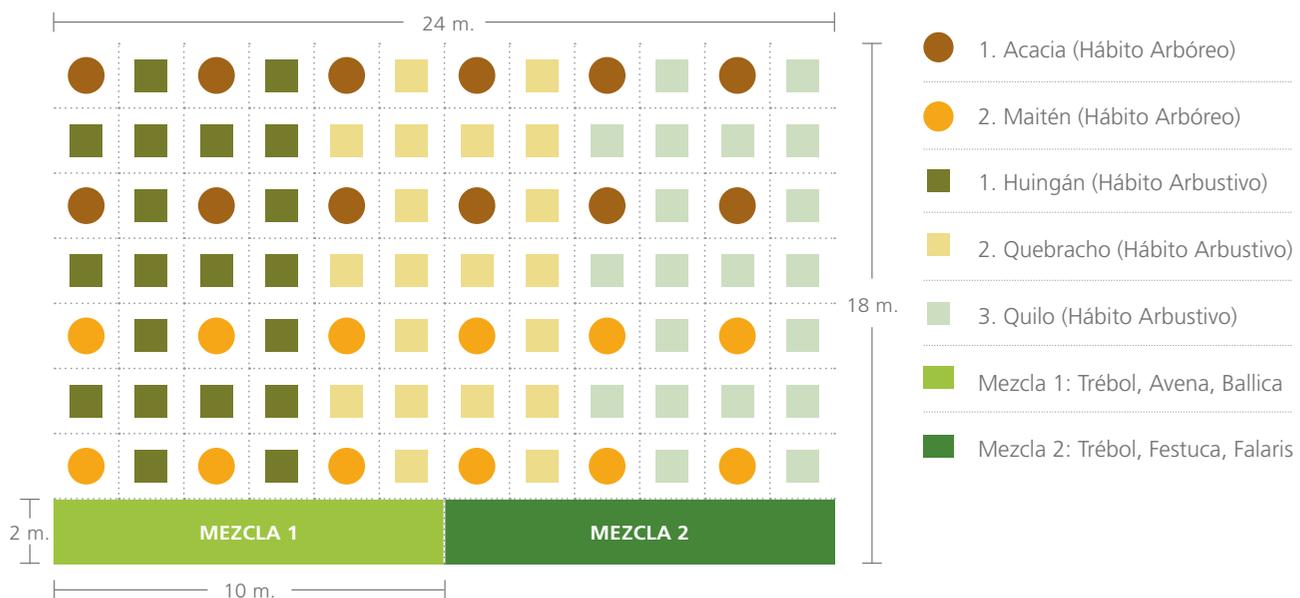
$$2 \text{ m} \times 10,5 \text{ m} = 21 \text{ m}^2 \text{ /platabanda/mezcla}$$

El ensayo consideró una dosis de siembra, para cada una de las especies de hábito herbáceo, equivalente a 8 gr/m<sup>2</sup>.

En la Figura N° 1 se ilustra de manera gráfica el diseño de trabajo que se ha establecido en terreno, para cada parcela y/o subbloque de tratamiento. Adicionalmente, la Figura N° 2 muestra un esquema general de la disposición de los tratamientos y repeticiones en cada uno de los bloques.

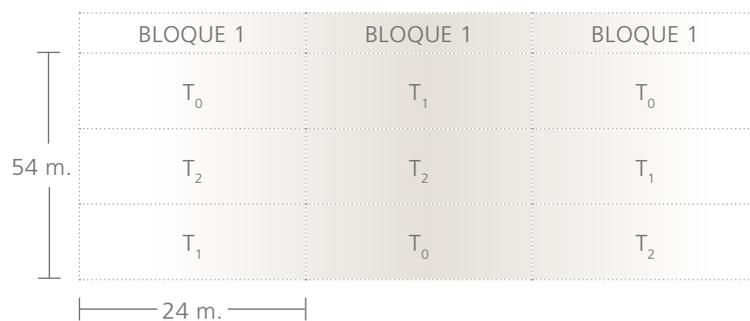
**Figura 1.**

Diseño de Trabajo por Parcela Experimental



**Figura 2.**

Diseño de Bloques Aleatorios





Por lo tanto, el número de individuos arbóreos y arbustivos a medir en este ensayo ha sido el siguiente:

24 individuos de hábito arbóreo/ repetición  
Total = 108 individuos /especie; 216 árboles.

60 individuos de hábito arbustivo/repetición  
Total = 180 individuos/especie, 540 arbustos

En el caso de especies herbáceas, las mediciones se realizaron sobre la base de unidades de área (cuadrantes de 25 \* 25 cm) orientados a medir densidad (cobertura) y producción de materia seca. Para determinar composición de especies y/o familias, se ha considerado realizar una evaluación visual y descripción detallada de los sistemas vegetales presentes en cada uno de los tratamientos y mezclas del ensayo.

#### **4.1.8.1 Pruebas estadísticas para sistemas vegetales**

En el caso de comparar variables cuantitativas continuas (concentraciones, variables dasométricas, biomasa) entre dos grupos, se ha utilizado el test paramétrico t-test y, para más de dos grupos, el test paramétrico de análisis de varianza (ANOVA). Para resultados donde no ha sido posible aplicar estas pruebas, debido principalmente a que la distribución de los datos no es normal, se han utilizado los test no paramétricos de Mann-Whitney en reemplazo del t-test y Kruskal-Wallis en reemplazo del ANOVA.

Con relación a variables cuantitativas discretas (sobrevivencia), el análisis comparativo se ha realizado mediante el z-test.

Todos los análisis estadísticos indicados, han considerado trabajar con un nivel de confianza equivalente a 95%.

#### **4.1.9 Mediciones**

Durante el período de desarrollo del ensayo, se han realizado campañas de mediciones sobre los sistemas vegetales y el sustrato con una frecuencia variable según el componente. La Tabla N° 4 presenta el detalle de las mediciones realizadas:

**Tabla 4.**

Mediciones realizadas en el ensayo de investigación

Detalles	Variables	Otoño 2005	Otoño 2006	Otoño 2007	Otoño 2008
Sustrato	Macronutrientes y MO	X	X	X	X
	Metales	X	X		X
	Salinidad	X	X	X	X
	Alcalinidad	X	X	X	X
Especies Arbóreas y Arbustivas	Metales pesados		X		X
	Sobrevivencia	X	X	X	X
	Altura	X	X	X	X
	Diámetro copa	X	X	X	X
	Diámetro fuste	X	X	X	X
Herbáceas	Metales pesados		X		
	Reconocimiento de especie		X		
	Producción de materia seca		X		

Se detalla a continuación, la metodología de trabajo para las mediciones realizadas:

#### 4.1.9.1 Sistemas vegetales

La metodología considera realizar evaluaciones sobre variables químicas y biológicas en las especies seleccionadas para el estudio, según se detalla a continuación:

##### a) Parámetros químicos

Mediciones:

Mediante obtención de muestras compuestas, por cada tratamiento y representativas de las especies en estudio, se ha propuesto medir los niveles de los siguientes parámetros químicos en tejido vegetal:

Cobre, Molibdeno, Manganeso, Zinc, Arsénico y Mercurio

Después de la primera campaña de medición (mayo de 2006), en vegetales, se realizó un ajuste de esta metodología en función de los resultados obtenidos. En particular, se discontinuó el seguimiento en los elementos que no presentaban niveles significativos (contenidos dentro de límites normales y/o bajos con valores que incluso son inferiores a límites de detección) orientando el análisis sólo hacia los parámetros que mostraban comportamientos y niveles de interés. De este modo, se modificó el monitoreo de parámetros químicos según se detalla a continuación:

Cobre, Molibdeno, Manganeso, Zinc, Arsénico

Periodicidad de muestreo:

Bianual, al finalizar la temporada de crecimiento o actividad biológica.

### **b) Parámetros biológicos**

Mediciones:

#### **Especies arbóreas:**

- Supervivencia
- Altura de árbol
- Diámetro de fuste
- Diámetro de copa

#### **Especies arbustivas:**

- Supervivencia
- Diámetro de copa
- Altura

Periodicidad de muestreo:

Medición basal: efectuada en julio de 2005 (al mes de plantación).

Seguimiento: anual, a final de temporadas (otoño).

## Especies Herbáceas:

### Mediciones:

Se ha propuesto medir la adaptabilidad del estrato herbáceo mediante análisis de área.

Para la determinación de la cobertura vegetal, se ha utilizado el método de estimación directa con un cuadrante. Este análisis de unidad de área corresponde a distribuir aleatoriamente un marco de 25 \* 25 cm (0,0625 m<sup>2</sup>), considerando un número de repeticiones equivalente a 8 lecturas. En cada cuadrante se ha estimado ocularmente la cobertura vegetal correspondiente y los resultados de este análisis se han expresado en porcentaje.

Con fines de medir materia seca, se ha utilizado el mismo método del cuadrante, considerando nueve mediciones por tratamiento y mezcla. De este modo se ha cosechado y pesado la materia seca, seleccionada dentro de este cuadrante, identificando especies sembradas y colonizadoras para cada una de las mezclas y tratamientos. La superficie total cubierta para evaluar rendimientos, ha sido equivalente a 0,5625 m<sup>2</sup> (0,00006 ha). Bajo este método, se ha considerado una total de tres repeticiones por tratamiento y por mezcla.

Finalmente, mediante recorrido en terreno y análisis visual de cada parcela por tratamiento y mezcla, se han identificado en detalle todas las especies y familias presentes en este ensayo. En el caso de especies de difícil identificación en terreno, el procedimiento metodológico consideró el traslado de ellas a laboratorio para su posterior reconocimiento.

### Frecuencia:

Medición basal: no corresponde

Seguimiento: anual, a final de la primera temporada (mes de mayo 2006)

### **4.1.9.2 Sustrato de relaves**

Para evaluar la posible modificación del sustrato de relaves en respuesta a la aplicación de los tratamientos, se ha propuesto realizar muestreos compuestos, por cada parcela de tratamiento, en el entorno más cercano a la casilla de plantación (árboles y arbustos) y en el caso de herbáceas, al área o platabanda donde se aplicó el tratamiento.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

Para ello, se han tomado muestras representativas, por cada parcela, evaluando las mismas variables consideradas para la caracterización del sitio destinado al ensayo. En consecuencia los componentes monitoreados son los siguientes:

*Fertilidad del sustrato:*

- Macronutrientes (N, P, K y S)
- Materia orgánica (M.O.)
- Micronutrientes (disponibles): cobre, hierro, manganeso y zinc

*Salinidad y acidez:*

- Conductividad eléctrica (CE)
- Sales solubles (Ca, Mg, Na y SO<sub>4</sub>)
- RAS (Relación de Adsorción de Sodio)
- pH

*Toxicidad (fracción total y soluble):*

- Cobre
- Manganeso
- Zinc
- Molibdeno
- Arsénico
- Mercurio

Se ha realizado mediciones bianuales (mayo de 2006 y 2008), a una sola profundidad (hasta los 50 primeros cm).

En función de los primeros resultados obtenidos para la química del relave, se modificó el programa originalmente propuesto. De este modo se eliminaron mediciones en parámetros químicos no relevantes (valores bajos, estables y/o inferiores a límites de detección) y se orientó el estudio hacia el seguimiento de componentes químicos que sin han mostrado comportamientos y niveles de interés. De este modo, los análisis que se han mantenido bajo seguimiento son los siguientes:

Macronutrientes y materia orgánica:	N, P, K, S y MO
Metales (totales, solubles y disponibles):	Cu, Mn, Mo, Zn y Fe
Salinidad:	CE
Alcalinidad:	pH

El número de muestras obtenidas durante cada campaña de medición ha sido el siguiente:

***1 muestra x 3 tratamientos x 3 repeticiones = 9 muestras.***

## 5. Resultados

Se presentan a continuación los resultados del estudio con relación a los siguientes temas:

- Antecedentes Climáticos,
- Calidad Química de Agua de Riego de Emergencia,
- Resultados en Sustrato de relaves,
- Resultados en Sistemas vegetales.

### 5.1 Antecedentes climáticos

Para caracterizar el clima, se han considerado variables pluviométricas y de temperatura para la zona donde se localiza el ensayo de forestación en relave (Zona de Chacay), antecedentes obtenidos de la Gerencia CASS de Minera Los Pelambres (Estación Meteorológica, Operación Invierno desde el año 2000).

#### 5.1.1 Pluviometría

La Tabla N° 5 y Gráfico N° 1, entregan los antecedentes de pluviometría para el área de estudio entre los años 2000 hasta mayo de 2008 indicando las precipitaciones mensuales, mensuales acumuladas y el déficit-superávit hídrico asociado.

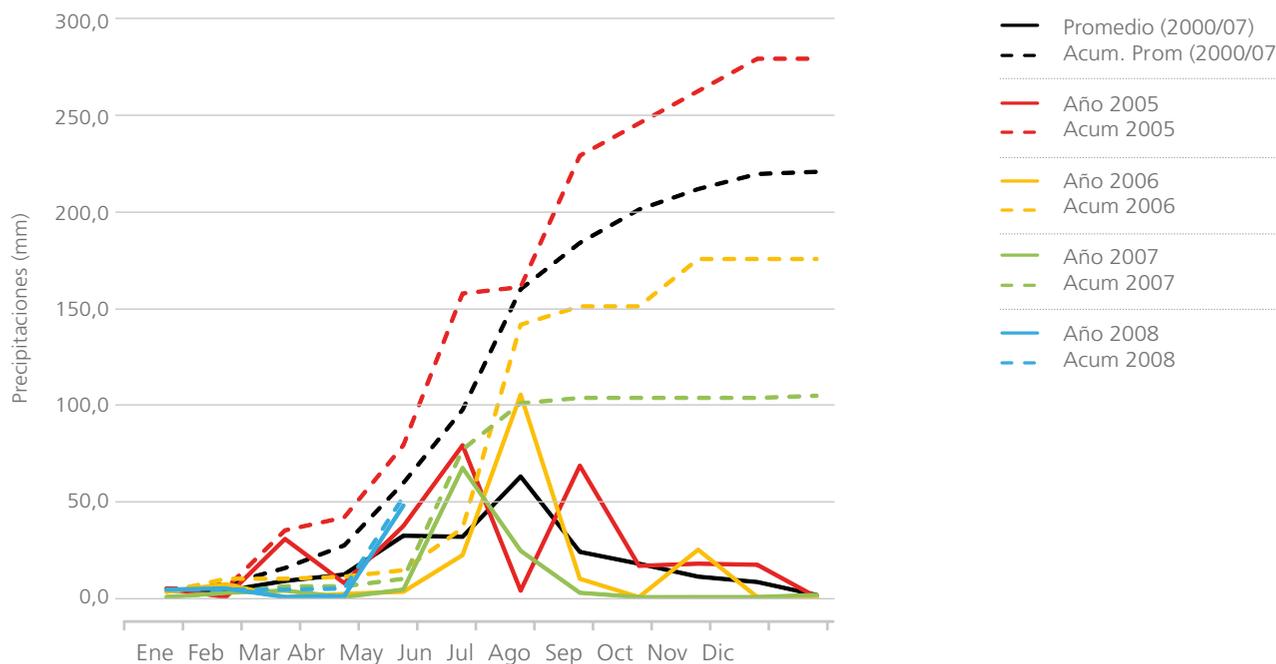
**Tabla 5.**

Datos de Pluviometría Zona Chacay (Enero 2000 – Mayo 2008)

Detalle	Datos Comparativos para precipitaciones (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Prom. (2000/04)	3,8	3,5	6,7	17,4	42,3	23,7	65,7	17,6	21,2	6,2	7,8	1,5
Prom. Acum. (2000/04)	3,8	7,3	14	31,4	73,7	97,4	163,1	180,7	201,9	208,1	215,9	217,4
Año 2005	4,6	0	30	7	37	78,5	3,5	68	16,4	17	16,5	0
Acum. 2005	4,6	4,6	34,6	41,6	78,6	157,1	160,6	228,6	245	262	278,5	278,5
Déf./Superávit 2005	0,8	-3,5	23,3	-10,4	-5,3	54,8	-62,2	50,4	-4,8	10,8	8,7	-1,5
Déf./Superávit Acum. 2005	0,8	-2,7	20,6	10,2	4,9	59,7	-2,5	47,9	43,1	53,9	62,6	61,1
Prom. (2000/05)	3,9	2,9	10,6	15,7	41,4	32,8	55,3	26,0	20,4	8,0	9,3	1,3
Acum. Prom. (2000/05)	3,9	6,9	17,4	33,1	74,5	107,4	162,7	188,7	209,1	217,1	226,3	227,6
Año 2006	3	6,5	0	1,5	3	22	105	9,5	0	24,5	0	0
Acum. 2006	3,0	9,5	9,5	11,0	14,0	36,0	141,0	150,5	150,5	175,0	175,0	175,0
Déf./Superávit 2006	-0,9	3,6	-10,6	-14,2	-38,4	-10,8	49,7	-16,5	-20,4	16,5	-9,3	-1,3
Déf./Superávit Acum. 2006	-0,9	2,7	-7,9	-22,1	-60,5	-71,4	-21,7	-38,2	-58,6	-42,1	-51,3	-52,6
Prom. (2000/06)	3,8	3,4	9,1	13,6	35,9	31,3	62,4	23,6	17,5	10,4	7,9	1,1
Acum. Prom. (2000/06)	3,8	7,2	16,3	29,9	65,9	97,2	159,6	183,2	200,7	211,1	219,0	220,1
Año 2007	0	2	3,5	0	4	67	24	2,5	0	0	0	1,3
Acum. 2007	0,0	2,0	5,5	5,5	9,5	76,5	100,5	103,0	103,0	103,0	103,0	104,3
Déf./Superávit 2007	-3,8	-1,4	-5,6	-13,6	-31,9	35,7	-38,4	-21,1	-17,5	-10,4	-7,9	0,2
Déf./Superávit Acum. 2007	-3,8	-5,2	-10,8	-24,4	-56,4	-20,7	-59,1	-80,2	-97,7	-108,1	-116,0	-115,8
Prom. (2000/07)	3,3	3,3	8,4	11,9	31,9							
Acum. Prom. (2000/07)	3,3	6,6	15,0	26,9	58,8							
Año 2008	3,9	4,2	0	0,7	47,5							
Acum. 2008	3,9	8,1	8,1	8,8	56,3							
Déf./Superávit 2008	0,6	1,0	-8,4	-11,2	15,6							
Déf./Superávit Acum. 2008	0,6	1,5	-6,9	-18,1	-2,5							

### Gráfico N° 1.

Datos Pluviométricos Zona Chacay (2000 a 2008)



Los datos presentados en el Tabla N° 5 y Gráfico N° 1 indican que el año 2005 presentó precipitaciones mayores al promedio 2000-2007 con una buena distribución a lo largo del año. Al contrario los años 2006 y 2007 presentaron precipitaciones menores al promedio 2000-2007 con una concentración de éstas durante los meses de invierno. Esta tendencia fue más marcada en el año 2007 con un déficit hídrico anual de -115,8 mm. En 2008, se constata la misma tendencia al déficit hídrico con una mitigación de éste, para el mes de mayo, donde se observaron precipitaciones superiores al promedio 2000-2007.

#### 5.1.2 Temperaturas

Se detallan a continuación en la Tabla N° 6 y Gráfico N° 2 las temperaturas máximas, mínimas y medias, registradas entre enero de 2005 y mayo de 2008.



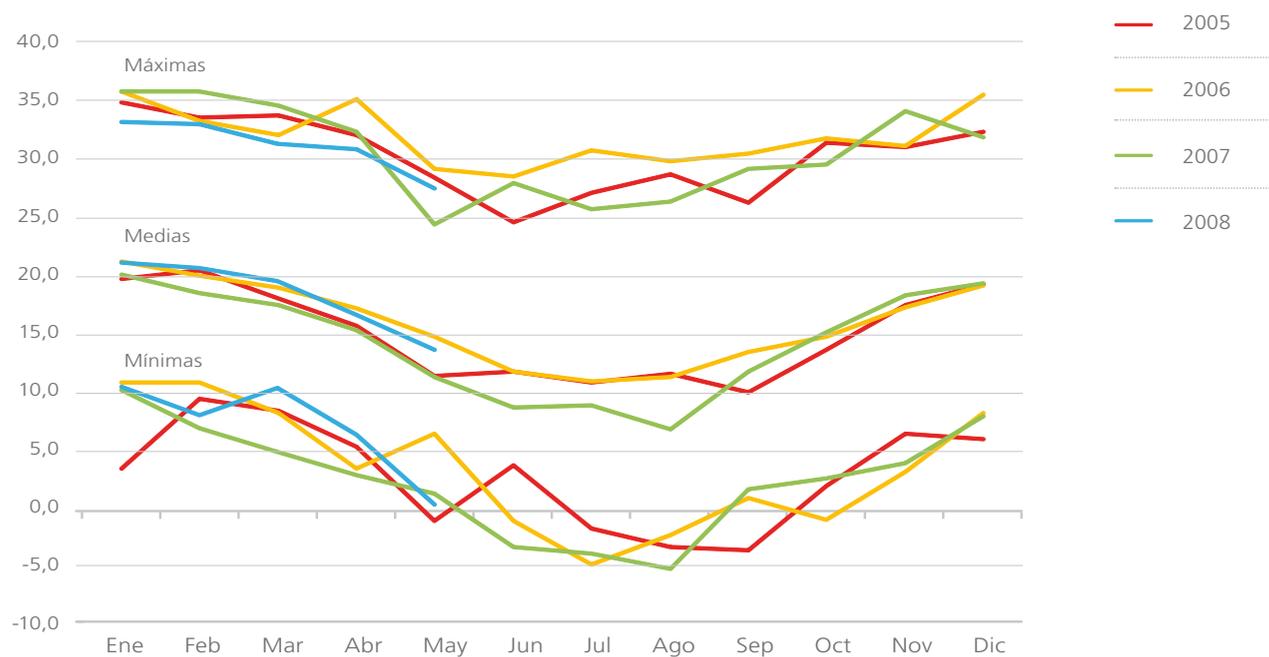
**Tabla 6.**

Registro de temperaturas (Enero 2005 a Mayo 2008)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Máx 2005</b>	34,8	33,5	33,7	32,0	28,4	24,6	27,1	28,7	26,3	31,4	31,0	32,3
<b>Med 2005</b>	19,8	20,5	18,1	15,8	11,5	11,9	10,9	11,7	10,1	13,7	17,5	19,3
<b>Mín 2005</b>	3,7	9,6	8,6	5,5	-0,8	3,9	-1,4	-3,0	-3,3	2,2	6,6	6,2
<b>Máx 2006</b>	35,7	33,2	32,0	35,1	29,1	28,5	30,7	29,8	30,4	31,7	31,1	35,4
<b>Med 2006</b>	21,3	20,1	19,1	17,3	14,9	11,9	11,1	11,5	13,6	14,9	17,4	19,3
<b>Mín 2006</b>	11,0	11,0	8,4	3,7	6,6	-0,8	-4,5	-2,0	1,2	-0,7	3,4	8,4
<b>Máx 2007</b>	35,7	35,7	34,5	32,3	24,4	27,9	25,7	26,3	29,1	29,5	34	31,8
<b>Med 2007</b>	20,2	18,6	17,6	15,5	11,5	8,9	9,0	7,0	11,9	15,3	18,4	19,5
<b>Mín 2007</b>	10,3	7,1	5,0	3,1	1,5	-3,0	-3,6	-4,9	1,9	2,8	4,1	8,1
<b>Máx 2008</b>	33,1	32,9	31,3	30,8	27,5							
<b>Med 2008</b>	21,2	20,7	19,6	16,8	13,8							
<b>Mín 2008</b>	10,6	8,2	10,5	6,5	0,6							

**Gráfico N° 2.**

Temperaturas máximas, medias y mínimas, Zona Chacay. (Enero 2005 a Mayo 2008)



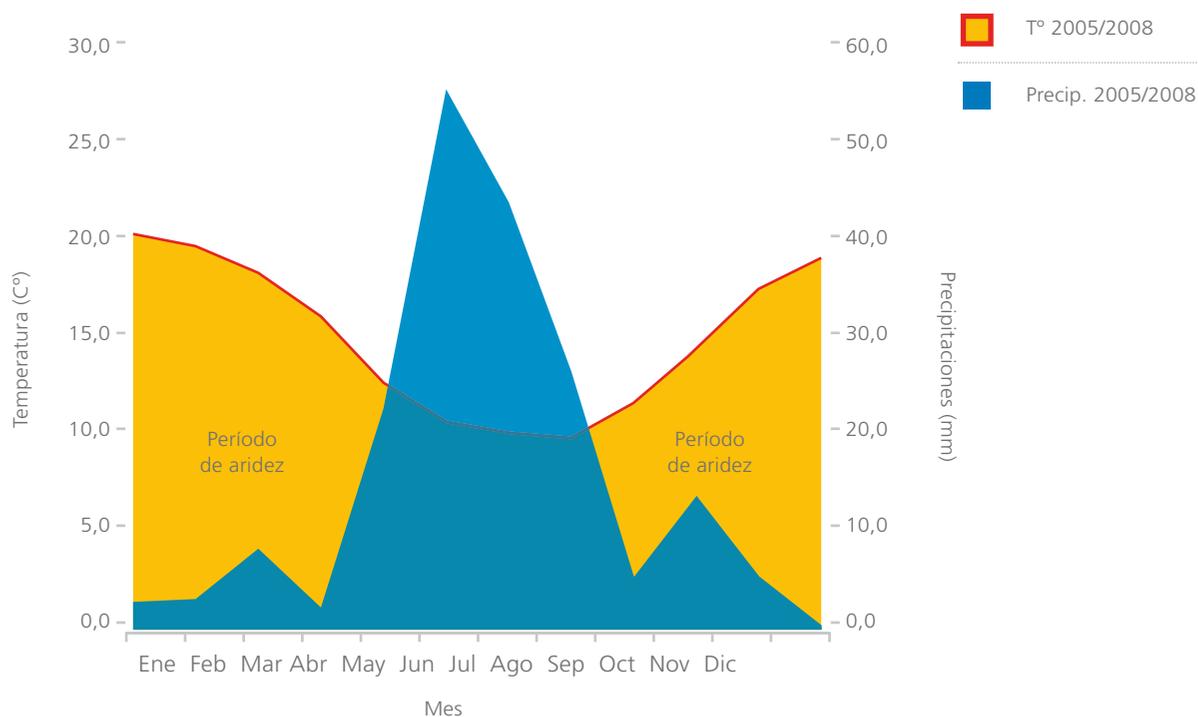
En relación con las temperaturas, al contrario de las precipitaciones, no se evidencia diferencias importantes entre los años registrados. Se detecta máximas levemente más altas para el invierno 2006 y medias y mínimas levemente más bajas en invierno de 2007.

### 5.1.3 Climograma

Para relacionar las temperaturas y precipitaciones y, de este modo evidenciar periodos de sequías, el Gráfico N° 3 ilustra las precipitaciones mensuales y las temperaturas medias promedio mensuales del periodo 2005-2008 en una misma área gráfica donde la escala de precipitaciones corresponde al doble de la de temperaturas (climograma).

**Gráfico N° 3**

Climograma, Zona Chacay (enero 2005 a mayo 2008)



El climograma indica que el sector donde se ubica el ensayo se encuentra en estación seca (precipitaciones inferiores al doble de las temperaturas) durante aproximadamente 8 meses y medio. Lo anterior indica que las plantas establecidas en el ensayo, se someten, durante un largo período del año, a estrés hídrico.

#### **5.1.4 Características agroclimáticas de la zona de estudio**

Según CIREN CORFO, a través del estudio de “Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile”, la zona donde se localiza el estudio piloto de forestación sobre relaves, corresponde a un área donde la mayor Evapotranspiración Potencial (ETp) se registra en los meses de Diciembre y Enero con 5,27 y 5,21 mm/día promedio respectivamente, siendo los menores valores en los meses de Junio y Julio con 1,31 y 1,44 mm/día promedio, respectivamente.

Según la Dirección Meteorológica de Chile (Dirección General de Aeronáutica Civil), el área en donde se encuentra localizado el ensayo, corresponde a un clima de estepa cálido con precipitaciones invernales.

#### **5.1.5 Conclusiones respecto a condiciones climatológicas**

El análisis efectuado, con relación a la variable precipitación, para el período de establecimiento del ensayo, ha evidenciado, para el año 2005, un superávit de aguas respecto a la media anual esperada para esta zona. Con respecto a los años posteriores (2006 a 2008), se evidencia un déficit de precipitaciones.

Las temperaturas indican que se han producido máximas y mínimas extremas moderadas con un leve riesgo de dañar, particularmente por presencia de heladas, tejidos en crecimiento en especies sensibles.

En consecuencia, para el primer año de establecimiento (año 2005) se evidenció una situación climática favorable que ayudó a obtener una respuesta positiva en relación con fines de establecer con éxito las especies bajo estudio.

Respecto a los años 2006 a 2008, preocupa el déficit hídrico observado. Esta situación podría explicar parte de la mortalidad que ha presentado las especies vegetales utilizadas en el ensayo de forestación sobre relaves. De mantenerse esta situación, deberá considerarse una aplicación de riego periódica al ensayo, con fines de suplir el agua que debiera ser aportada a través de las precipitaciones naturales en la zona de estudio.

## 5.2 Calidad química en agua de riego de establecimiento

Las aguas que se caracterizan en este capítulo, corresponden a las que se utilizaron para realizar aportes hídricos de emergencia sólo en el período de establecimiento del ensayo (primer año de seguimiento). De allí que la dosis aplicada se ha seleccionado sobre la base de los siguientes criterios:

- Suplir, durante el primer año, el déficit de la precipitación invernal,
- Aplicar la dosis mínima requerida para asegurar el establecimiento en período estival.

EL subcapítulo 4.1.6, entrega un detalle de los volúmenes hídricos que se aplicaron en el primer año de seguimiento.

Como el riego, para el caso del estudio, se ha considerado sólo de manera eventual (apoyo al primer año de establecimiento), posterior a esta fecha no se han realizado nuevas aplicaciones de agua, cumpliendo de este modo la metodología propuesta que considera evaluar el potencial de reforestación de tranques de relaves con bajos niveles de intervención.

### 5.2.1 Caracterización química

En el Tabla N° 7, se entregan los resultados analíticos para la fuente hídrica del ensayo, comparándose estos antecedentes con valores referenciales utilizados en nuestro país para aguas destinadas a riego agroproductivo (NCh 1333.Of78 Requisitos de calidad de agua para riego).

**Tabla 7.**  
Resultados analíticos. Laguna del tranque de relaves

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADOS	NCh 1333
Aluminio	mg/L	<0,5	5
Arsénico	mg/L	0,01	0,10
Bario	mg/L	0,14	4
Berilio	mg/L	<0,01	0,10
Boro	mg/L	<b>1,04</b>	0,75
Cadmio	mg/L	<0,01	0,01
Calcio	mg/L	156	-
Cianuro	mg/L	< 0,05	0,2
Cinc	mg/L	0,01	2
Cloruros	mg/L	38	200
Cobalto	mg/L	<0,05	0,05
Cobre	mg/L	0,08	0,2
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	13	1.000
Conductividad Específica	umho/cm	<b>1,011</b>	750
Cromo	mg/L	<0,05	0,1
Fluoruros	mg/L	0,75	1
Hierro	mg/L	0,09	5
Litio	mg/L	0,14	2,5
Magnesio	mg/L	10,6	-
Manganeso	mg/L	0,05	0,2
Mercurio	mg/L	< 0,001	0,001
Molibdeno	mg/L	<b>0,04</b>	0,01
Níquel	mg/L	< 0,05	0,2
pH	u pH	8,16	5.5 - 9.0
Plata	mg/L	<0,01	0,2
Plomo	mg/L	< 0,05	5
Potasio	mg/L	3,54	-
Salinidad	%	0,10	
Selenio	mg/L	< 0,001	0,02
Sodio Porcentual	%	12,5	35
Sodio Total	mg/L	28,7	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	<b>894</b>	500
Sólidos Suspendidos	mg/L	<5	-
Sulfatos	mg/L	<b>440</b>	250
Vanadio	mg/L	< 0,1	0,1

Como se observa en estos antecedentes, los parámetros que exceden la norma de referencia son boro, molibdeno y sales (sulfatos, sólidos disueltos y conductividad eléctrica "CE").

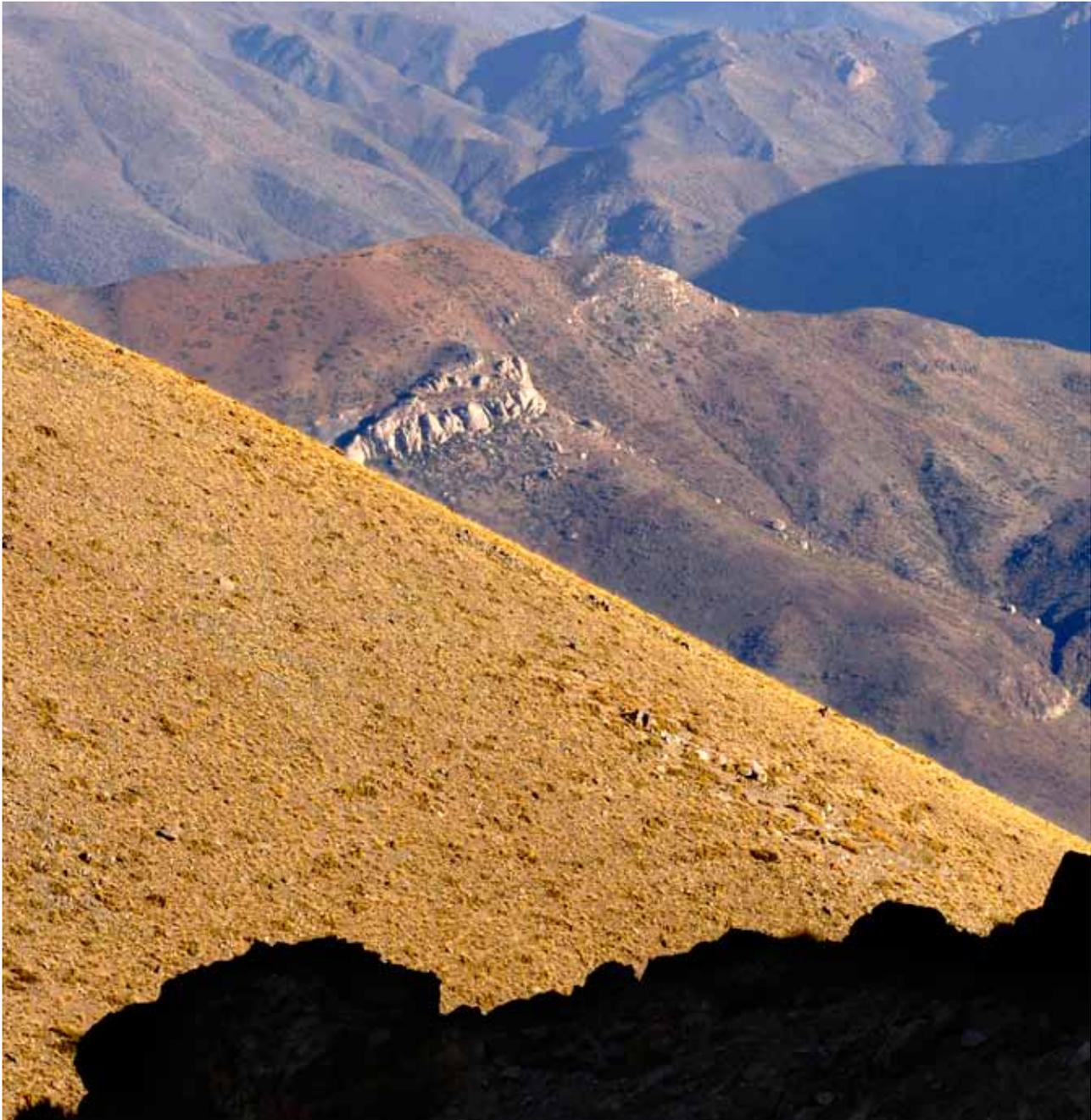
Sin embargo, en comparación a otras aguas generadas de actividad minera, los valores observados para los parámetros que sobrepasan norma son bastante conservadores (según base de datos del consultor: ATM Ingeniería 1990 – 2008). De hecho, aguas de uso minero industrial utilizadas en ensayos para uso agrícola en nuestro país como al nivel internacional, muestran valores significativamente más altos a los observados en esta analítica con resultados que demuestran su posible uso agrocomercial sin producir efectos adversos (según base de datos del consultor: ATM Ingeniería 1990 – 2008).

Por otra parte, los valores de CE indican que las condiciones de salinidad no son extremas. De hecho, en agricultura se consideran valores restrictivos para uso en cultivos sensibles cuando este parámetro excede los 1.500 umho/cm (NCh 1333.Of78, Estándares para la Conductividad Específica).

El pH de esta fuente hídrica es alcalino. Lo anterior es una condición favorable para el sistema donde se desarrolla el ensayo ya que este valor ayuda a que la mayor parte de los metales con potencial tóxico no se encuentren en la fracción soluble y/o disponible del sustrato (Johnson y Bradshaw, 1977). Lo anterior permite que el uso de esta agua no represente un riesgo con relación a incidir en reacciones que potencien la acidificación de este medio.

### **5.2.2 Conclusiones del análisis de agua**

El análisis del agua permite concluir que el recurso hídrico empleado para riegos de establecimiento no presentó restricciones para este uso. Se considera que su impacto es neutro no interfiriendo sobre los resultados químicos y biológicos del ensayo.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

## 5.3 Resultados en sustrato de relaves

### 5.3.1 Caracterización basal

Para evaluar de manera preliminar las características físico – químicas del sustrato de relaves, utilizado en la presente experiencia se utilizó información del consultor obtenidas en mediciones anteriores al establecimiento del ensayo de forestación, (Seguimiento de Recuperación del Tranque de Relaves El Chinche, ATM Ingeniería Ltda., 2001, 2002 y 2003). Según estos antecedentes, el sustrato del tranque presenta las siguientes características:

- Es de reacción ligera a moderadamente alcalina (pH = 8,0).
- Presenta muy bajo contenido de materia orgánica.
- Muestran disponibilidad baja de nitrógeno, media a baja de fósforo y contienen niveles medios a altos de potasio.
- Mantiene alta a muy alta disponibilidad de azufre.
- Tiende a ser no sódicos y no salinos.
- Respecto a los micronutrientes, presenta alta disponibilidad de hierro y muy alta disponibilidad de cobre.

En cuanto a características físicas generales, el relave corresponde a un sustrato de color gris, el cual presenta una textura de arena fina a muy fina, sin una aparente estructura, aunque en algunas zonas existe un ordenamiento laminar discontinuo.

Desde el punto de vista hidráulico, corresponde a un sustrato permeable, cuya retención de humedad es del orden de los 1,5 cm por cada 30 cm de espesor. Es decir, se trata de un medio de moderada a baja retención de humedad, según normas estándares para texturas edáficas (Alcayaga, 1986).

Existen antecedentes en el país que dan cuenta de características de relaves asociados a la minería de cobre, donde también se evidencia en ellos contenidos altos de niveles de metales pesados tales como: Al, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb, y Zn. Sin embargo, por presentar un pH alcalino, los niveles solubles de estos componentes son bajos e incluso, la fracción soluble de este sustrato, contiene niveles de metales bajo los estándares normados (base de datos del consultor, 1990 – 2005). Los antecedentes anteriores indican que este sustrato no es extremadamente limitante para el desarrollo de vegetación en comparación a otros residuos mineros, como es el caso de suelos

contaminados con desechos asociados a minas de oro, carbón, acero, etc., donde existen altos contenido de metales solubles (por ej.: Al, As B, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Se y Zn), generalmente asociados a condiciones importantes de acidez (pH < 5,0 hasta 1,8 en algunos casos) (Dollhopf D. and Mehlenbacher J. , 2002; Daniela L., Nagle S. 2002).

Utilizando como referencia comparativa antecedentes bibliográficos, el tranque de relaves, utilizado en este estudio como experiencia piloto, es de baja toxicidad (ver detalle en capítulo 3) y las principales limitantes que se evidencian dicen relación con:

- Baja fertilidad (reflejado principalmente en los niveles de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y algunos microelementos como zinc y manganeso).
- Alta presencia y disponibilidad importante de cobre y fierro (situación que podría limitar el desarrollo de especies vulnerables sin necesariamente ocasionar la muerte de ellas).
- Riesgo potencial de acidificarse (potencial presencia de piritita debido a importante presencia de azufre y hierro) con el consecuente efecto en solubilizar elementos que actualmente se encuentran precipitados.

Cabe destacar que, según la base de datos del consultor, las características químicas del relave del Tranque El Chinche es relativamente similar a otros relaves de las mineras de cobre del país. Por lo anterior, los resultados obtenidos en esta experiencia de forestación proporciona antecedentes aplicables a la mayoría de los tranques abandonados y/o en etapa presente o futura de cierre.

### **5.3.2 Resultados**

Se entrega a continuación los resultados y evaluación analítica realizada sobre los antecedentes de sustrato de relaves recopilados entre 2005 y 2008.

Adicionalmente y a modo referencial, se incorporan a este estudio antecedentes históricos obtenidos de monitoreos anteriores, efectuados, por ATM Ingeniería Ltda., para los años 2001 y 2002, con fines de incrementar la base de datos acumulada a la fecha y de este modo evaluar posibles tendencias de las variables químicas en seguimiento, a través del tiempo.

Sobre la base de lo expuesto, se entrega a continuación los resultados analíticos y la evaluación estadística para el sustrato de relaves con relación a las siguientes variables:

- Fertilidad,
- Salinidad y acidez,
- Toxicidad.

### 5.3.2.1 Fertilidad del sustrato

El concepto de fertilidad en suelo se asocia a presencia de macro y micronutrientes, y al aporte de materia orgánica. Esta última incide en la estructura y en la retención de los nutrientes, mejorando la capacidad de un medio respecto a sus características bioquímicas y físicas.

#### a) Macronutrientes

Las Tabla N° 8 y 9, entregan los antecedentes acumulados a la fecha (2001 a 2008) y los resultados del muestreo realizado a finales de las temporadas de seguimiento (mayo de 2006 y 2008), respectivamente, para los macronutrientes nitrógeno (N) fósforo (P), potasio (K) y azufre (S).

**Tabla 8.**

Macronutrientes en sustrato de relaves. Período 2001 a 2008

Año	Macronutrientes Disponibles (ppm)			
	N	P	K	S
2001	2,0	15,0	201,0	185,0
2002	4,0	11,0	114,0	167,5
2005	4,1	9,5	82,5	150,0
2006 (*)	4,1	8,0	51,0	82,0
2008 (*)	10,0	6,3	57,0	30,0

*Nota (\*): Para el muestreo del año 2006 y 2008 se ha tomado como valores de referencia los resultados promedio obtenidos para el tratamiento testigo.*

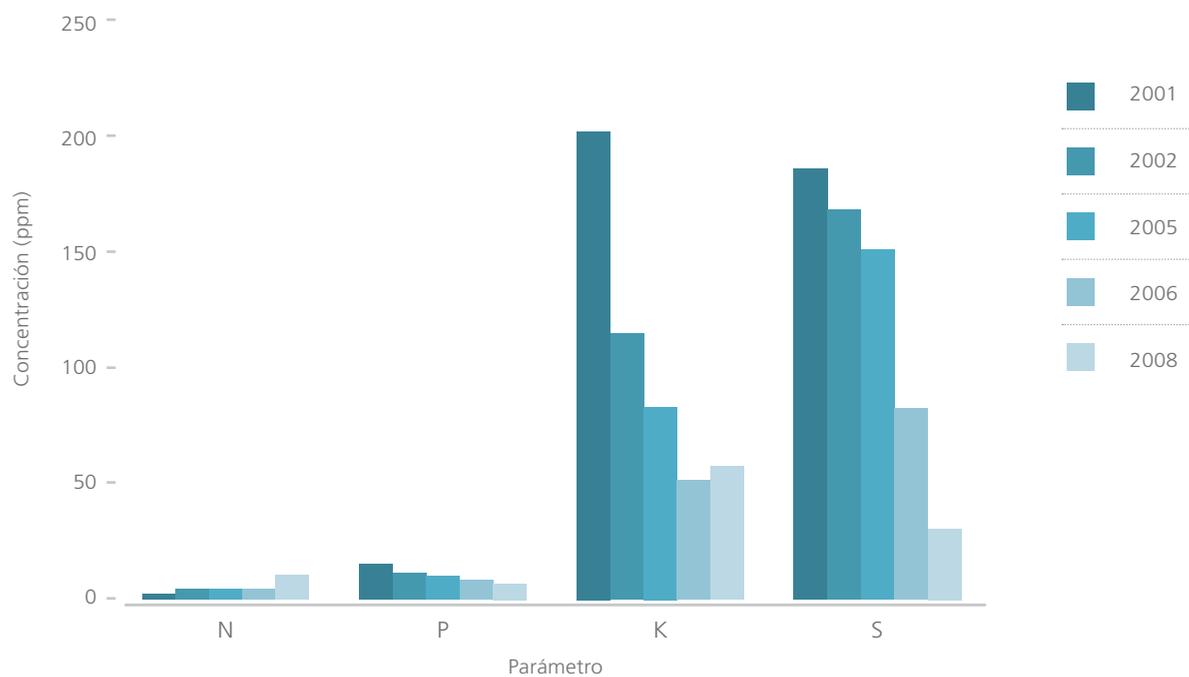
**Tabla 9.**

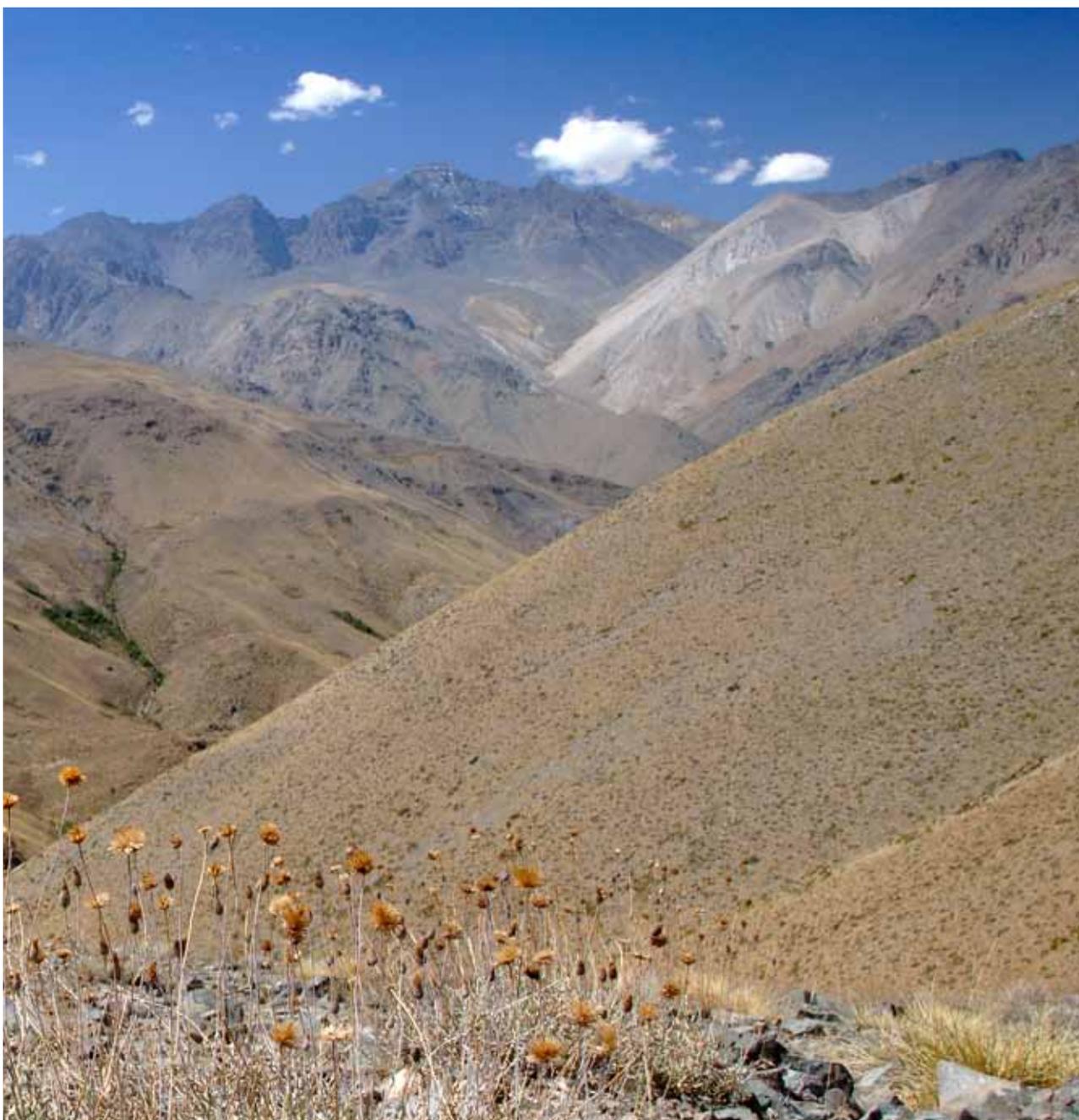
Macronutrientes. Efecto de los tratamientos sobre el sustrato de relaves

Año	Tratamiento	Macronutrientes Disponibles (ppm)			
		N	P	K	S
2006	Testigo	4,1	8,0	51,0	82,0
	T. Vegetal	6,0	8,0	45,0	25,1
	Compost	12,8	10,0	51,0	38,9
2008	Testigo	10,0	6,3	57,0	30,0
	T. Vegetal	7,9	5,0	56,0	69,0
	Compost	7,5	6,3	59,3	58,3

**Gráfico n° 4.**

Macronutrientes disponibles en sustrato de relaves. Período 2001 a 2008



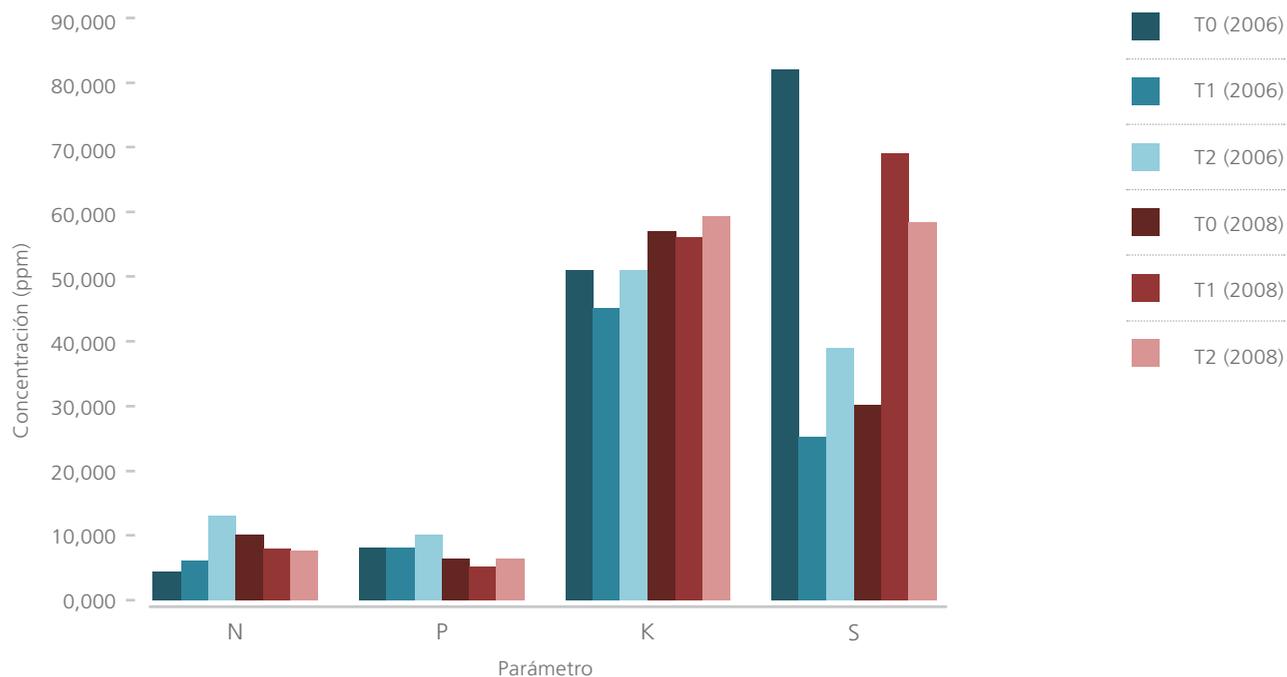


210

Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### Gráfico N° 5.

Macronutrientes disponibles en sustrato de relaves. Efecto de los tratamientos



Como se evidencia en la Tabla N° 8 y Gráfico N° 4, a excepción de nitrógeno, existe una tendencia significativa a que los niveles de macronutrientes disminuyan a través de los años de seguimiento. Esta situación podría relacionarse con los bajos niveles de materia orgánica que limita la fijación de los nutrientes en los estratos superiores del sustrato. Cabe mencionar que los niveles de potasio entre los años 2006 y 2008 muestran una tendencia a la estabilización en concentraciones cercanas a los 50 ppm.

En el caso del nitrógeno, los niveles se mantienen relativamente estables y bajos, según rango de valores establecidos para suelos agrícolas (Tabla N° 10).

**Tabla 10.**

Rango de valores para macronutrientes en suelos agrícolas.

Rangos	Disponibilidad de nutrientes (ppm)			
	N	P	K	S
Bajo	< 20	< 8	< 100	< 10
Medio	20 a 35	9 - 15	100 - 180	10 - 16
Alto	> 35	> 15	> 180	> 16

Fuente: Modificado de INIA (2008)

Con relación al resto de los parámetros en análisis y según antecedentes citados en Tabla N° 10, los niveles actuales de fósforo, y potasio son bajos. Sin embargo, al inicio de las mediciones, los niveles de ambos componentes se encontraban dentro de rangos medios a altos (Tabla N° 10, Gráfico N° 4). En contraste, los contenidos de azufre, pese a la significativa disminución que se observa a través del tiempo, continúan altos. La existencia de este último parámetro, podría asociarse a posible presencia de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que generalmente está presente en este tipo de medio (Willis, 2000). Sin embargo, la constante disminución de los niveles de azufre en el tiempo indica que este elemento podría estar presente bajo forma de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) que proviene del uso de compuestos azufrados utilizados para los procesos de extracción de cobre.

Los resultados del análisis confirman citas bibliográficas que indican que los sustratos de relaves son particularmente pobres en nitrógeno y fósforo; y ricos en azufre (Tordoff, 2000).

De manera general, no se observa efectos evidentes de los tratamientos en los contenidos de macronutrientes. Así, los sustratos asociados a tierra vegetal y compost presentan contenidos significativamente similares al testigo y en el caso del azufre, la respuesta es errática. Esta similitud entre tratamientos, puede relacionarse al hecho que las muestras del sustrato de relaves fueron sacadas a 50 cm de las casillas de plantación y no directamente en éstas, con el fin de identificar cambios naturales en la composición química del sustrato de relave. Lo anterior puede implicar que el tiempo requerido para evidenciar cambios es de mayor magnitud en comparación al período actualmente en evaluación. Lo anterior se fundamenta en que el desarrollo del sistema radical y fauna microbiana asociada, en este tipo de sustratos, es muy lento en comparación a un suelo agrícola normal.

## b) Materia orgánica (M.O.)

Las Tabla N° 11 y 12, entregan los antecedentes acumulados a la fecha (2001 a 2008) y los resultados del muestreo realizado a finales de las temporadas de seguimiento (mayo de 2006 y 2008), respectivamente, para los niveles de M.O.

**Tabla 11.**

Materia orgánica en sustrato de relaves. Período 2001 - 2008

Año	M.O. (%)
2001	0,06
2002	0,04
2005	1,00
2006 (*)	0,75
2008 (*)	0,19

*Nota (\*): Para el muestreo del año 2006y 2008 se ha tomado como valores de referencia los resultados promedio obtenidos para el tratamiento testigo.*

**Tabla 12.**

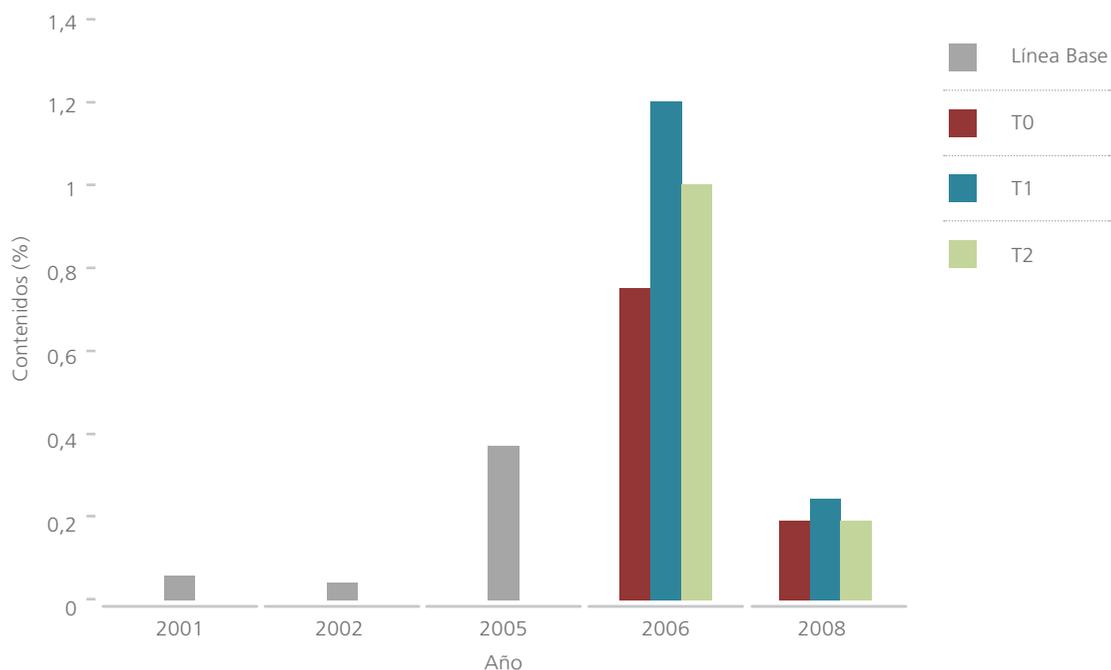
Materia orgánica en sustrato de relaves. Efecto de los tratamientos

Tratamiento	M.O. (%)	
	2006	2008
Testigo	0,75	0,19
T. Vegetal	1,2	0,24
Compost	1,0	0,19

Los resultados expuestos en ambas tablas, se ilustran en el Gráfico N° 6.

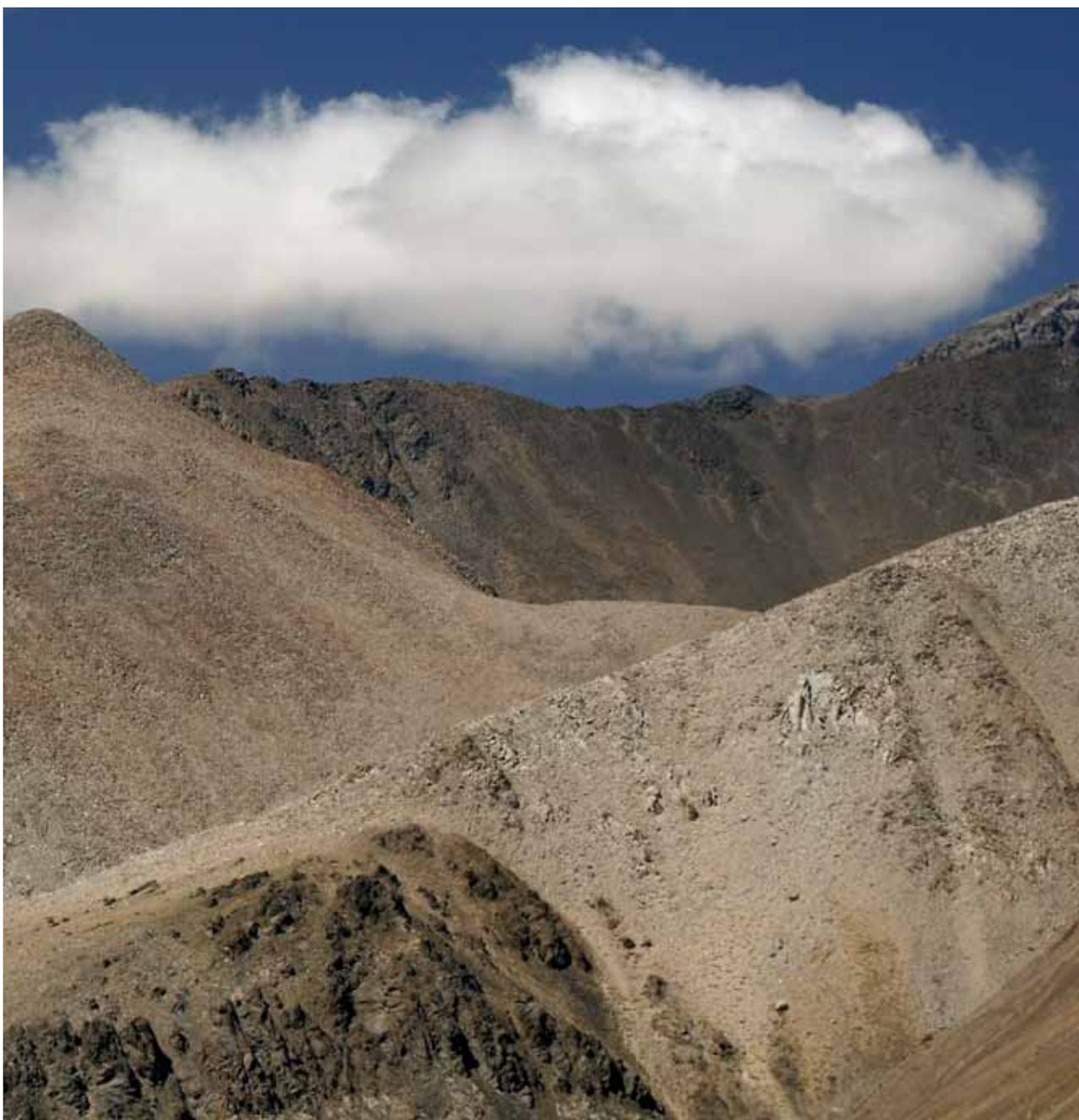
### Gráfico N° 6.

Materia orgánica en sustrato de relaves. Efecto de los tratamientos.



Los datos acumulados para M.O., evidencian una tendencia al incremento en el sustrato de relaves entre el año 2001 y 2006. Esta respuesta podría atribuirse a la creciente colonización natural de especies que ha caracterizado a este tranque, sumado al efecto de las especies incorporadas en este estudio. Sin embargo, en el muestreo del año 2008, se observa una disminución de los niveles de materia orgánica. Ésta podría originarse debido a múltiples factores difícilmente identificables en el contexto del presente estudio, tales como el aumento de la actividad bacteriana que mineraliza la materia orgánica o la disminución de la descomposición de los fragmentos vegetales, debido a factores climáticos limitantes.

En relación con el efecto de los tratamientos, se observa poca diferencia entre ellos. Aunque, para el año 2006 se evidenció niveles más altos de M.O. en los tratamientos con tierra vegetal (T1) y compost (T2) en comparación al testigo (T0), actualmente (muestreo 2008), esta diferencia reduce observando similares niveles similares entre tratamientos.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

Pese a las fluctuaciones observadas y a los resultados del último monitoreo efectuado a los tratamientos con tierra vegetal, compost y testigo, los valores de materia orgánica son bajos en comparación a suelos de uso agrícola de la zona central, cuyos contenidos promedio fluctúan entre 2 a 6% (Buckman y Brady, 1977).

### c) Micronutrientes

Las Tablas N° 13 y 14, entregan antecedentes acumulados y el detalle de los muestreos para el seguimiento realizado en Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeso (Mn) y Cobre (Cu).

**Tabla 13.**

Micronutrientes en sustrato de relaves Período 2001 - 2008

Año	Micronutrientes Disponibles (ppm)			
	Hierro	Zinc	Manganeso	Cobre
2001	10,4	0,65	0,66	41,1
2002	36,4	0,31	0,38	42,5
2005	20,4	0,75	0,90	43,9
2006 (*)	14,7	1,20	1,05	37,7
2008 (*)	17,1	1,00	1,40	39,0

Nota (\*): Para el muestreo del año 2006 se ha tomado como valores de referencia los resultados promedio obtenidos para el tratamiento testigo.

**Tabla 14.**

Micronutrientes. Efecto de los tratamientos sobre el sustrato de relaves

Año	Tratamiento	Micronutrientes Disponibles (ppm)			
		Hierro	Zinc	Manganeso	Cobre
2006	Testigo	14,7	1,20	1,05	37,7
	T. Vegetal	14,3	0,83	0,68	41,9
	Compost	17,0	1,28	0,75	37,7
2008	Testigo	17,1	1,00	1,40	39,0
	T. Vegetal	17,8	1,20	1,60	43,7
	Compost	18,8	1,05	1,80	46,0

Los antecedentes de ambas Tablas, se contrastan con rangos establecidos para micronutrientes en suelos agrícolas (Tabla N° 15) y los resultados se ilustran en los Gráficos N° 7 y 8.

**Tabla 15.**

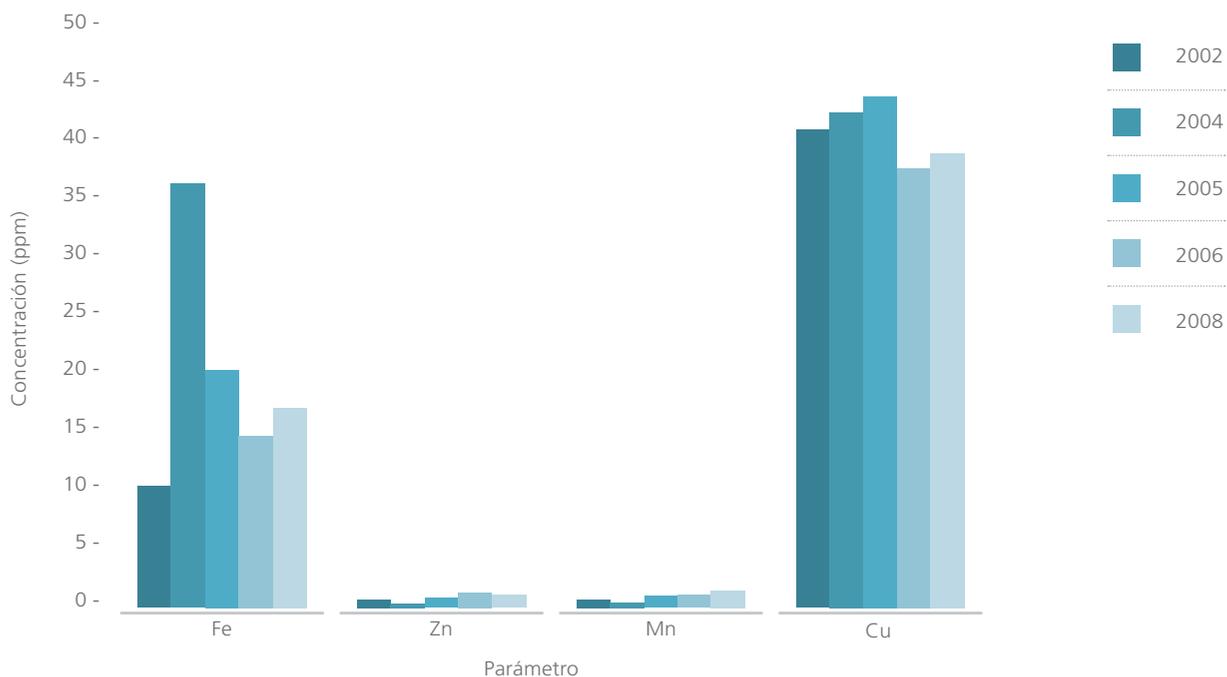
Rango de Valores para Micronutrientes. Suelos Agrícolas

Elemento	Disponibilidad de nutrientes (ppm)		
	Baja	Media	Alta
Hierro	< 2,5	2,5 – 4,5	> 4,5
Zinc	< 0,5	0,5 – 1,0	> 1,0
Manganeso	< 0,5	0,5 – 1,0	> 1,0
Cobre	< 0,3	0,3 – 0,5	> 0,5

Fuente: Modificado de INIA (2008)

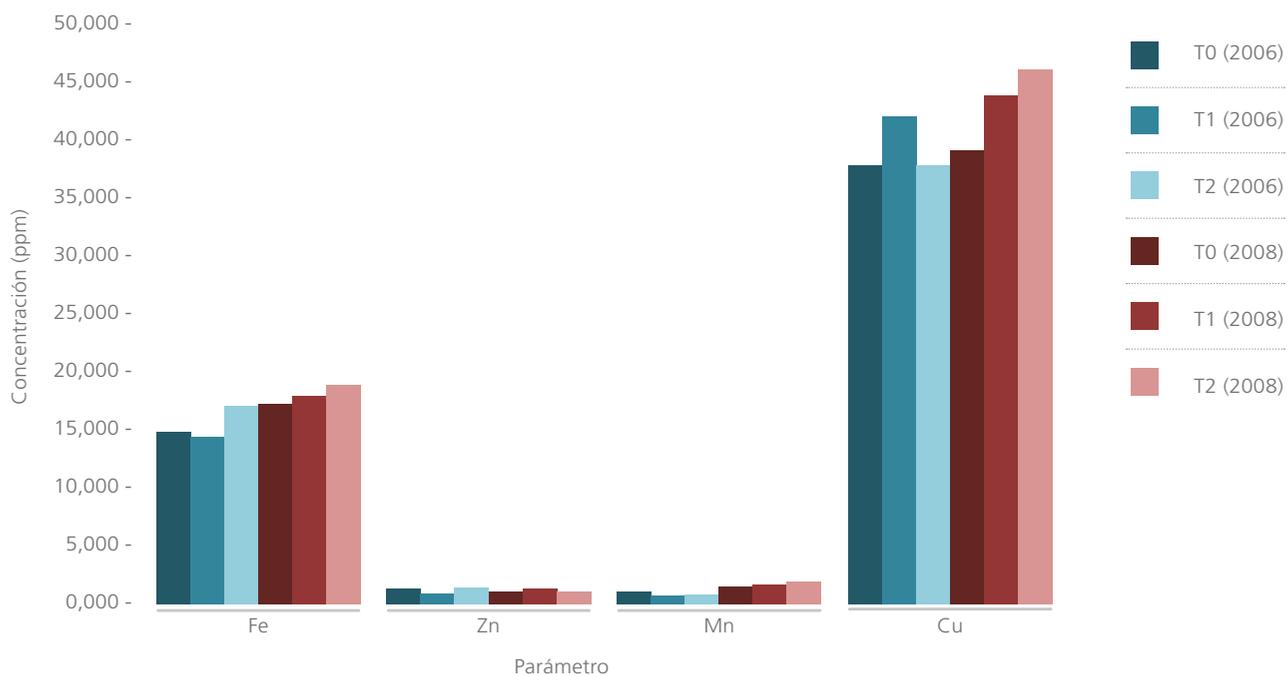
**Gráfico N° 7.**

Micronutrientes disponibles en sustrato de relaves. Período 2001 a 2008



### Gráfico N° 8.

Micronutrientes disponibles. Efecto de los tratamientos sobre el sustrato de relaves.



Los antecedentes acumulativos indican que, a excepción de hierro que presenta mayores fluctuaciones, el resto de los micronutrientes tienden a permanecer estables entre los años 2001 y 2008. En contraste, el hierro, a excepción del año 2001, muestra una tendencia significativa a disminuir sus niveles disponibles entre el año 2002 y 2006 y a estabilizarse en alrededor de 15 ppm (Gráfico N° 7).

Pese a esta tendencia, los actuales contenidos de hierro disponible en el sustrato de relaves son altos, según rango de valores establecido para suelos agrícolas (Tabla N° 15) y comparables entre tratamientos (Gráfico N° 8).

Estos resultados, sumado a los antecedentes observados para azufre, que también indican una alta presencia de este componente en el sustrato de relaves, sugerirían la posible existencia de pirita en el sustrato de relaves.

Con relación a los otros micronutrientes en análisis, al igual que para hierro, se evidencia, para el muestreo de mayo de 2006 y 2008, valores comparables entre tratamientos (Gráfico N° 8).

Según rangos establecidos para suelos agrícolas (Tabla N° 15), los contenidos de cobre, manganeso y zinc, se han mantenido dentro de rangos medios a altos destacando de manera permanente el cobre por presentar muy alta disponibilidad en este sustrato, independientemente de los tratamientos en análisis.

### **5.3.2.2 Sales solubles y acidez**

Para evaluar los niveles de salinidad y sodicidad del sustrato de relaves, se realizaron análisis históricos durante los años 2001, 2002, 2005 y 2006 que determinaron los niveles de sales solubles (Calcio, Magnesio, Sodio y Sulfatos), la relación de absorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE) del sustrato de relaves. El análisis global de estos antecedentes demostró bajos niveles de salinidad y sodicidad del sustrato de relaves sin limitación para el establecimiento de organismos vegetales.

Lo anterior permitió reducir los parámetros bajo seguimiento manteniendo sólo variables que fueran indicadoras del nivel de estabilidad química del sustrato en relación con niveles de sales solubles y acidez. De allí que para la campaña 2008, se mantuvo mediciones de conductividad eléctrica (CE) y de potencial hidrógeno (pH).

La CE ilustra de manera directa los niveles de sales solubles presentes en éste y permite evidenciar potenciales procesos de lixiviación. En el caso de la acidez, la evaluación se realiza a través de las mediciones de pH, indicador relevante de los niveles de fitotoxicidad del sustrato.



## a) Conductividad

Las Tablas N° 16 y 17, entregan los valores acumulados desde el año 2001 a la fecha, los muestreos específicos durante los años 2006 y 2008, y estos datos se ilustran en el Gráfico N° 9.

**Tabla 16.**

Conductividad eléctrica (CE) en sustrato de relaves. Período 2001 – 2008

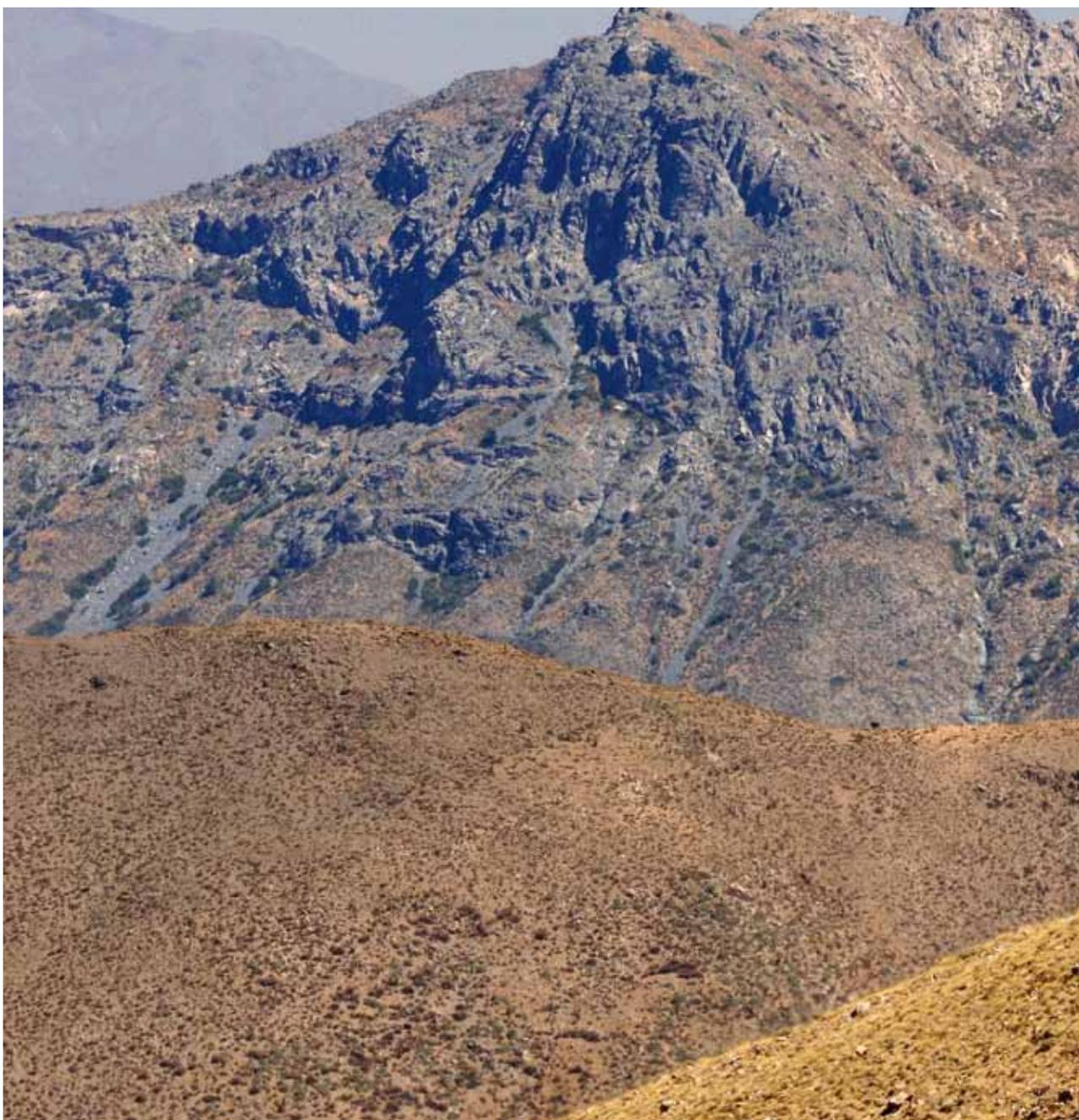
Año	CE (mhos/cm)
2001	2,1
2002	1,7
2005	0,1
2006 (*)	0,2
2008 (*)	0,07

Nota (\*): Para el muestreo del año 2006 y 2008 se ha tomado como valores de referencia los resultados promedio obtenidos para el tratamiento testigo.

**Tabla 17.**

CE en sustrato de relaves. Efecto de los tratamientos

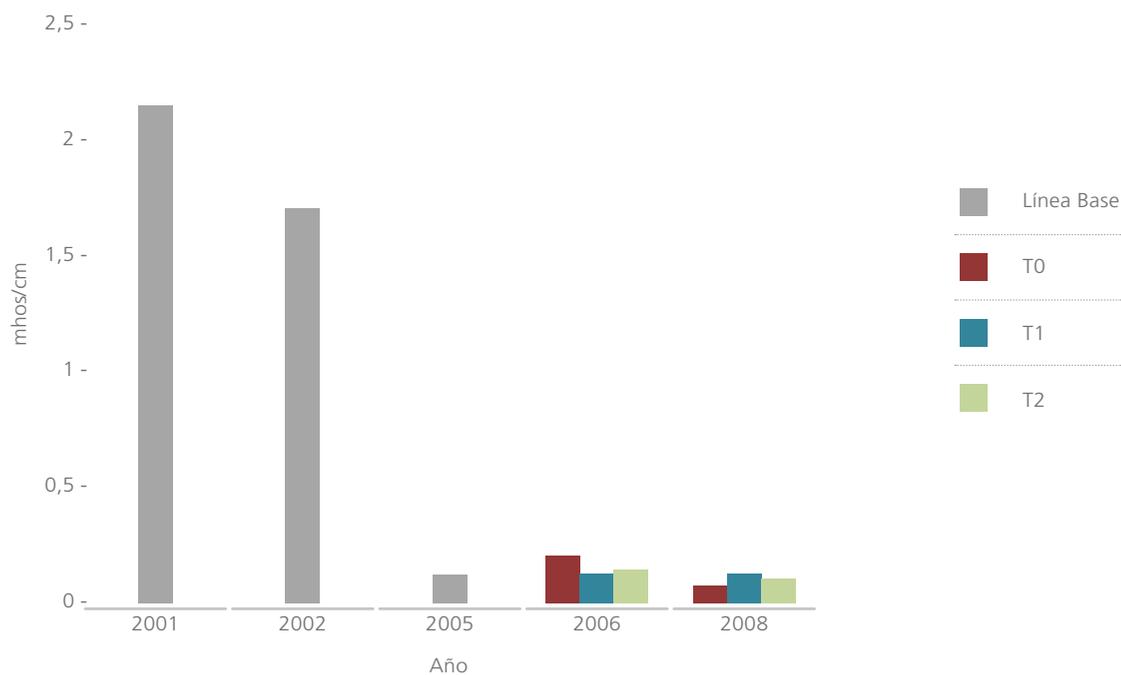
Tratamiento	CE (mhos/cm)	
	2006	2008
Testigo	0,20	0,07
T. Vegetal	0,12	0,12
Compost	0,14	0,10



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### Gráfico N° 9.

CE en sustrato de relaves. Período 2001 - 2008.



Se observa que la CE presentó una fuerte disminución entre los años 2001 a 2005, para estabilizarse en el año 2006 en valores cercanos a 0,1 mhos/cm.

Como se evidencia en los antecedentes expuestos, los tratamientos realizados no inciden en los valores de CE con resultados comparables para los sustratos asociados a testigo, tierra vegetal y composta (mediciones específicas en los años 2006 y 2008).

Existen estándares para clasificar suelos según salinidad, en función de los valores de CE. La Tabla N° 18, detalla estos antecedentes:

**Tabla 18.**

Clasificación de suelos según salinidad en función de la CE

Rango	Unidad	Clasificación
0 – 2,0	mS/cm a 25° C	No salino
2,0 – 4,0	mS/cm a 25° C	Ligeramente salino
4,0 – 8,0	mS/cm a 25° C	Moderadamente salino
8,0 – 16,0	mS/cm a 25° C	Fuertemente salino
> 16	mS/cm a 25° C	Extremadamente Salino

Al comparar estos datos con los valores de CE históricos del ensayo, se observa para el año 2001 que el sustrato de relaves se clasificaba como ligeramente salino. Para los años posteriores de seguimiento, incluyendo el muestreo de mayo de 2008, la CE tiende a disminuir clasificando al sustrato como no salino.

### b) Acidez

Para evaluar la acidez del sustrato de relaves, se han realizado históricamente mediciones de pH. La Tabla N° 19 entrega los antecedentes acumulados a la fecha y la Tabla N° 20, los resultados asociados a los tres tratamientos en análisis.

**Tabla 19.**

pH en sustrato de relaves. Período 2001 – 2008

Año	pH (unidades)
2001	8,30
2002	8,00
2005	7,90
2006 (*)	8,13
2008 (*)	8,86

Nota (\*): Para el muestreo del año 2006 y 2008 se ha tomado como valores de referencia los resultados promedio obtenidos para el tratamiento testigo.

**Tabla 20.**

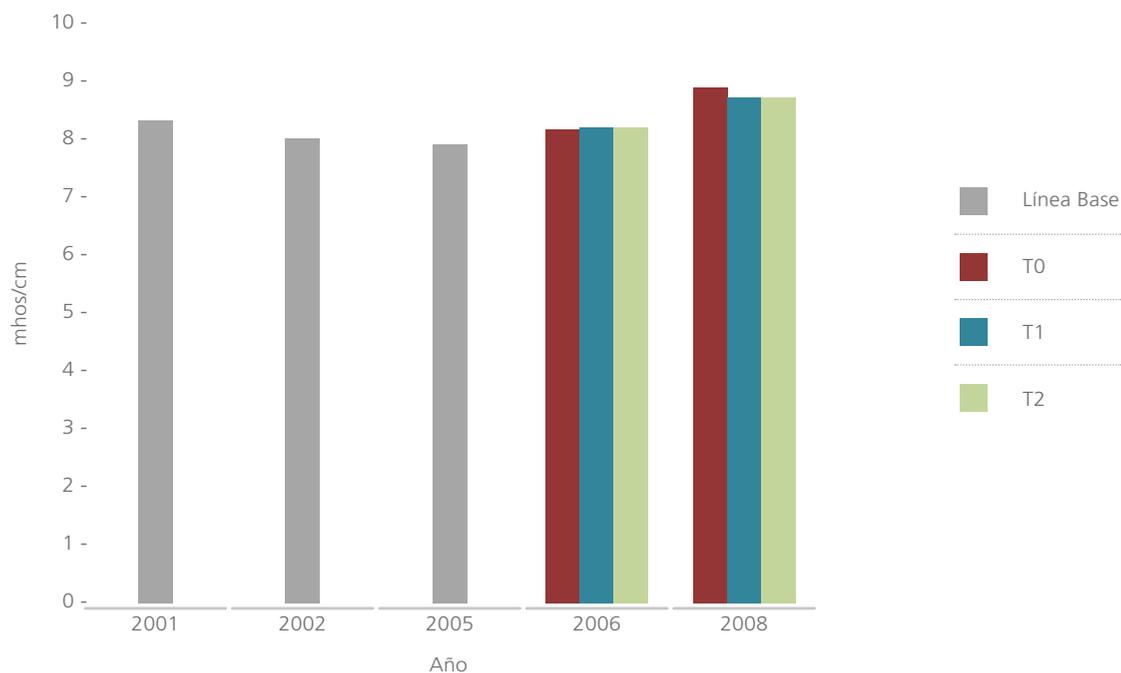
pH en sustrato de relaves. Efecto de los tratamientos

Tratamiento	pH (Unidades)	
	2006	2008
Testigo	8,13	8,86
T. Vegetal	8,17	8,70
Compost	8,18	8,70

Se evidencia que el pH se ha mantenido bastante estable desde el año 2001 a la fecha, con valores que fluctúan entre un máximo de 8,86 y un mínimo de 7,90. Esta tendencia, se confirma en los datos presentados en la Tabla N° 20 con una leve tendencia al aumento, para los tres tratamientos, entre el año 2006 y 2008. El Gráfico N° 10 ilustra esta tendencia.

**Gráfico N° 10.**

Tendencia del pH en el sustrato de relaves. Período 2001 – 2008



Al igual que para la conductividad eléctrica, no se evidencian efecto de los tratamientos sobre el pH del sustrato, con resultados significativamente comparables entre ellos.

Según clasificación de suelos para uso agrícola, debido a la acidez en función de mediciones de pH, el sustrato en estudio se clasifica históricamente y para los tres tratamientos como moderadamente a fuertemente alcalino (Tabla N° 21).

**Tabla 21.**

Clasificación de suelos según acidez asociado a mediciones de pH

Acidez	pH
Muy fuertemente ácido	< 5
Fuertemente ácido	5 a 5,5
Moderadamente ácido	5,5 a 6
Ligeramente ácido	6 a 6,5
Neutro	6,5 a 7,3
Ligeramente alcalino	7,3 – 7,8
Moderadamente alcalino	7,8 – 8,4
Fuertemente alcalino	8,4 - 9
Muy fuertemente alcalino	> 9

Fuente: Modificado de INIA (2008)

Los resultados de pH son relevantes en el análisis del sustrato de relaves ya que éste determina los niveles de metales que presentan mayor disponibilidad para ser absorbidos por los vegetales. Desde esta orientación, los relaves de pH alcalino, como el caso del estudio, son menos restrictivos en comparación a los de pH ácido, debido a que la asimilación de metales pesados por los vegetales se ve restringida gracias a la formación de hidróxidos y carbonatos o complejos “Calco – Metales Pesados” que al quedar de este modo inmovilizados, no interactúan con los sistemas vegetales mitigando el efecto fitotóxico de estas variables (Johnson y Bradshaw, 1977; Tordoff, 2000). Sin embargo, se debe mencionar que, para el caso del molibdeno, la tendencia es inversa, es decir, este elemento se encuentra más disponible a pH básico.



226

Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### 5.3.2.3 Toxicidad

Con fines de analizar el potencial fitotóxico del sustrato de relaves, se han evaluado históricamente los siguientes metales pesados de interés: Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Arsénico (As) y Mercurio (Hg) y Zinc (Zn) para la fracción total y soluble. En el caso de los ensayos iniciados el año 2005, adicionalmente se ha incluido el hierro debido a la importancia que tiene la presencia de este elemento en los relaves (forma parte de la piritita "FeS<sub>2</sub>", compuesto que presenta riesgo potencial de acidificar el sustrato, en el largo plazo). El análisis global de estos antecedentes demostró que el sustrato de relaves presentaba niveles bajos de mercurio y arsénico total y soluble con concentraciones generalmente menores al límite de detección. Lo anterior permitió enfocar los análisis de toxicidad a los parámetros más relevantes en relación con la fracción total, disponible y soluble (Cu, Mn, Mo, Zn y Fe). Los resultados, para estos parámetros, se presentan a continuación.

#### a) Metales Totales

Las Tablas N° 22 y 23, presentan los antecedentes acumulados de 2005 a 2008 y los resultados para las temporadas de seguimiento, respectivamente. Estos antecedentes, se comparan con valores citados por bibliografía, para diferentes lugares del mundo y con antecedentes propuestos en estudios efectuados por la Universidad de Chile "Criterios de Calidad de Suelo Agrícola".

**Tabla 22.**

Niveles de metales pesados totales en sustrato de relaves. Período 2005 – 2008

Año	Metales (ppm)				
	Cu	Mn	Zn	Fe	Mo
2005	235	48	9	898	32,7
2006 (*)	477	42	8	3474	24,5
2008 (*)	180	63	14	1420	37
Rango en el mundo (**)	4 -1.500	300 – 1.800	7 – 1.000	1.140 – 37.000	1,5 – 2,6
Chile (***)	200	1.000	60	s/r	2,5

Nota (\*): Para el muestreo del año 2006 y 2008 se ha tomado como valores de referencia los resultados promedio obtenidos para el tratamiento testigo.

(\*\*) Valores citados por bibliografía para diferentes lugares del mundo

(\*\*\*) Valores propuestos por estudio sobre "Criterios de Calidad de Suelo Agrícola (Acevedo E.; Carrasco A. Universidad de Chile, Marzo 2005).

**Tabla 23.**

Niveles de metales pesados totales, durante las temporadas de seguimiento (Mayo de 2006 y 2008)

Año	Tratamiento	Metales (ppm)				
		Cu	Mn	Zn	Fe	Mo
2006	Testigo	477	42	8	3.474	24,5
	T. Vegetal	487	40	8	3.219	25
	Compost	457	42	8	3.377	24,5
2008	Testigo	180	63	14	1420	37
	T. Vegetal	204	64	14	1602	40
	Compost	249	68	16	1988	39
<b>Rango en el mundo (*)</b>		4 - 1.500	300 - 1.800	7 - 1.000	1.140 - 37.000	1,5 - 2,6
<b>Chile (**)</b>		200	1.000	60	s/r	2,5

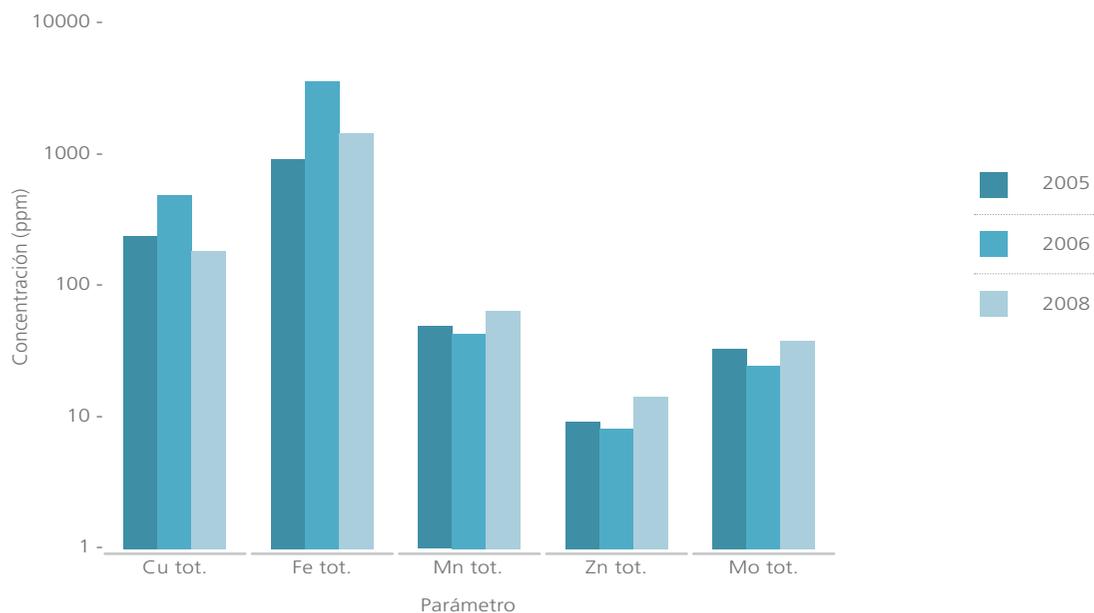
(\*) Valores citados por bibliografía para diferentes lugares del mundo

(\*\*) Valores propuestos por estudio sobre "Criterios de Calidad de Suelo Agrícola (Acevedo E.; Carrasco A. Universidad de Chile, Marzo 2005).

Los Gráficos N° 11 y 12, ilustran los datos presentados en ambos cuadros. Debido a la gran variación de escala entre parámetros, se utilizó una escala logarítmica base 10 que facilita la lectura de esta ilustración.

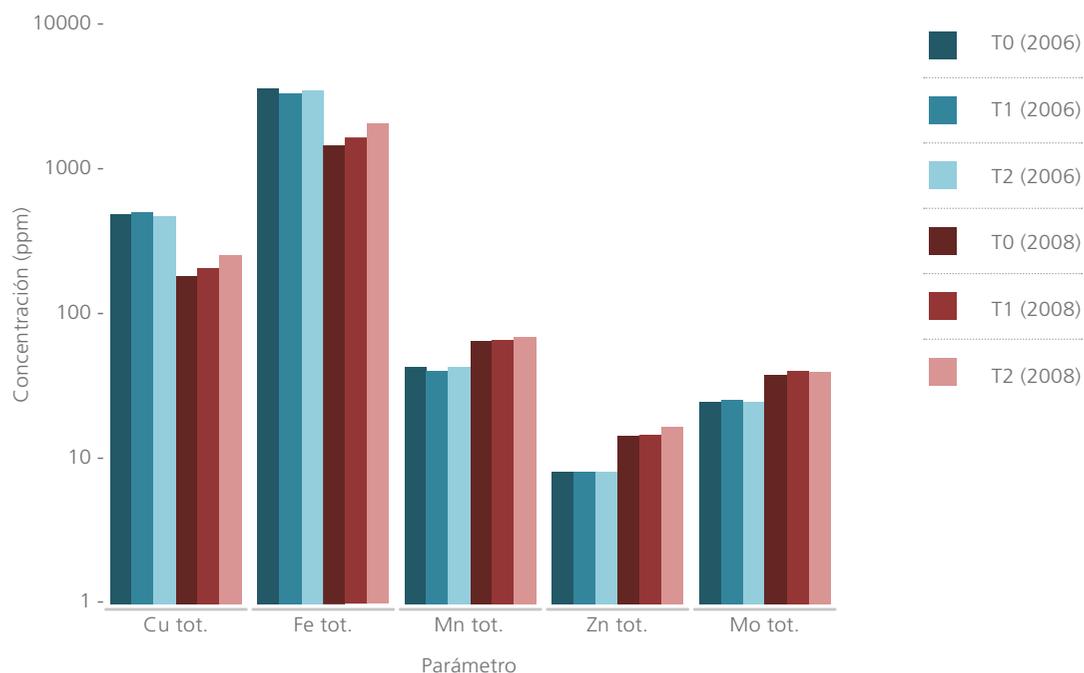
**Gráfico N° 11.**

Metales totales en sustrato de relaves. Período 2005 a 2008



### Gráfico N° 12.

Metales totales en sustrato de relaves. Efecto de los tratamientos.



Con relación a valores frecuentemente observados en diferentes suelos en el mundo, destaca para cobre, manganeso, zinc, mercurio y hierro que los datos acumulados hasta mayo de 2008, se encuentran dentro de los rangos informados. En contraste, el molibdeno muestra resultados por sobre estos valores referenciales. Respecto a rangos observados en suelos de Chile, el cobre total también presentaría valores altos en el sustrato de relaves (Tabla N° 23).

Respecto al efecto de los tratamientos sobre los niveles de metales totales, no se evidencian diferencias significativas.

Con relación a la evaluación de tendencias, entre los periodos de seguimiento de 2005, 2006 y 2008 se constata un aumento de los niveles de cobre y hierro y una leve disminución de los contenidos de zinc, molibdeno y manganeso entre 2005 y 2006. En contraste, la tendencia es inversa para todos los parámetros entre los años

2006 y 2008. Estas variaciones, pueden ser atribuibles a fenómenos naturales como movimientos de los metales en el perfil del sustrato bajo la influencia de las condiciones hidrológicas y/o aportes químicos externos a través materia vegetal o mineral.

A pesar de estas fluctuaciones, según referencias bibliográficas, el sustrato de relaves presenta contenidos totales de metales con potencial tóxico inferiores a 0,1% (1.000 ppm) y sin problemas de acidez (Gráfico N° 10). Por lo tanto, se considera de baja toxicidad (Tordoff, 2000).

### b) Comparación entre metales totales / disponibles / solubles

Altas concentraciones totales de metales no se relacionan necesariamente con los niveles que interactúan con los organismos vivos. Otros parámetros tales como, características físico – químicas, textura, % de materia orgánica y pH influyen sobre la disponibilidad de éstos. Por lo anterior, es de relevancia analizar las fracciones de metales solubles y disponibles con el fin de determinar el potencial tóxico real del sustrato de relaves.

En un análisis integral de los valores obtenidos, en el monitoreo del año 2008, para los metales pesados totales, disponibles y solubles, se observa que del total existente, solo una fracción mínima se encuentran en forma química disponible y/o soluble. La Tabla N° 24 confirma esta situación.

**Tabla 24.**

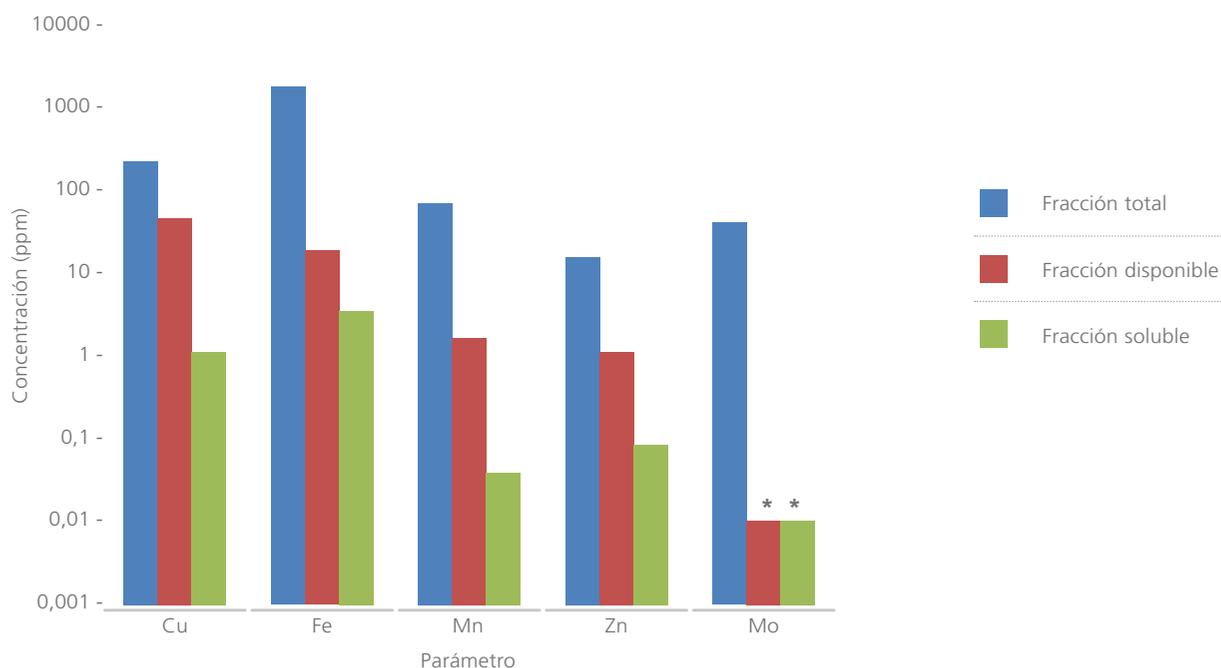
Promedio de Metales Pesados Totales / Disponibles / Solubles

Fracción	Metales Pesados (ppm)				
	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo
<b>Total</b>	210,8	1670,0	65,3	14,9	38,8
<b>Disponible</b>	42,9	17,9	1,60	1,08	0,01
<b>Soluble</b>	1,07	3,36	0,04	0,08	0,01
	Porcentaje respecto al total				
<b>% Disponible</b>	20,36	1,07	2,45	7,28	0,03
<b>% Soluble</b>	0,51	0,20	0,06	0,56	0,03

El Gráfico N° 13 ilustra los resultados presentados en la Tabla N° 24.

### Gráfico N° 13.

Comparación de metales totales, disponibles y solubles en sustrato de relaves. Período 2008.



\* Valores menores al límite de detección

Como se observa en el gráfico anterior, las concentraciones totales son muy superiores a las disponibles destacando el cobre, por mostrar el mayor porcentaje disponible en comparación a los otros metales en análisis. En el caso de las concentraciones solubles, éstas son muy inferiores a las totales e inferiores a las disponibles, destacando el molibdeno por presentar niveles disponibles y solubles inferiores al límite de detección.

Los datos presentados permiten deducir y confirmar que las concentraciones totales no necesariamente se relacionan con las concentraciones disponibles y solubles. De hecho, el cobre con 210,8 ppm totales presenta niveles disponibles de 39,1 ppm (20,36%). Sin embargo, el hierro total con valores muy superiores al cobre (1670 ppm totales), muestra concentraciones disponibles inferiores a éste último metal (17,9 ppm, equivalente a 1,07%). Por lo tanto, se verifica que las concentraciones totales no necesariamente son las determinantes para inducir problemas de fitotoxicidad. Adicionalmente a lo anterior se debe indicar que, el umbral de fitotoxicidad varía según la sensibilidad particular de cada especie (sensibilidad de las especies) (Ginocchio, R. y Rodríguez P., InduAmbiente, 1996).

#### 5.3.2.4 Conclusiones del análisis sobre el sustrato de relaves

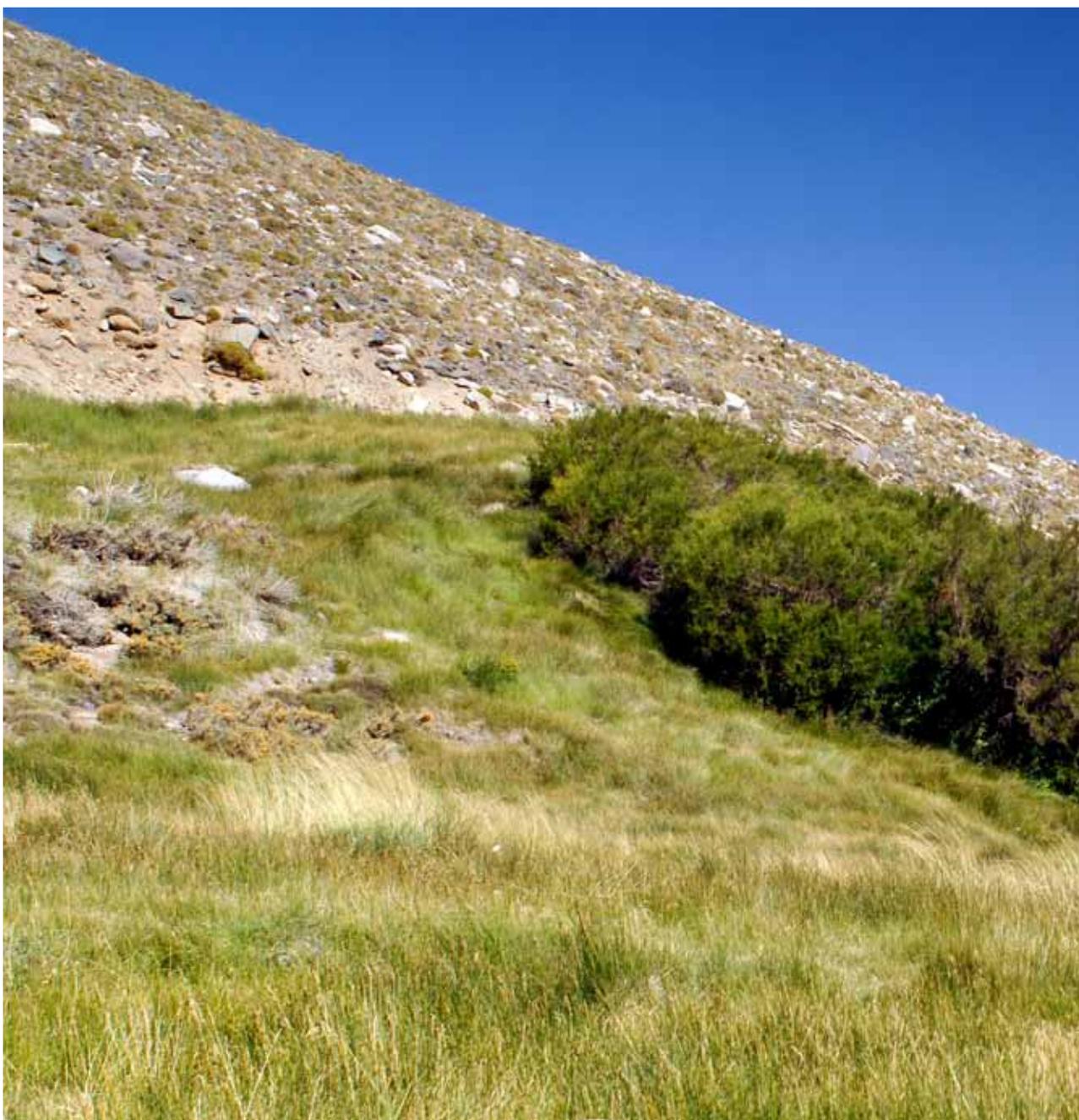
De la evaluación realizada sobre parámetros asociados a fertilidad, salinidad, acidez y toxicidad, para los años de seguimiento y con relación al presente ensayo sobre técnicas de forestación en tranques de relaves, es factible concluir lo siguiente:

##### **Fertilidad:**

- EL seguimiento realizados sobre el sustrato de relaves, desde el año 2001 a la fecha, indica que se ha producido un lavado natural de nutrientes, sales y metales. Lo anterior ha causado cambios favorables con relación a salinidad y toxicidad, sin embargo esta respuesta ha sido desfavorable respecto a la calidad nutricional de este sustrato.
- Pese a la lixiviación observada, las características nutricionales actuales indican que el sustrato presenta alta disponibilidad de azufre, hierro, cinc y cobre y mediana a alta disponibilidad de manganeso. Sin embargo con respecto a nitrógeno, fósforo y potasio, los niveles actuales son bajos en comparación a rangos estándares.
- La materia orgánica presenta niveles bajos para una adecuada condición agrícola. Sin embargo, se encuentra dentro de rangos frecuentes observados en suelos del norte de Chile.

##### **Toxicidad:**

- Respecto a los niveles de metales pesados, asociados a toxicidad, los actuales valores indican que el cobre y molibdeno continúan altos y existe una presencia importante de hierro. Sin embargo, se confirma que las fracciones disponibles y solubles de metales pesados no se relacionan directamente con los niveles totales de estos elementos, observándose que en general son bajas a muy bajas en comparación a los contenidos totales que presenta el sustrato. Lo anterior, sumado a la bibliografía consultada permite concluir que el sustrato de relaves asociado al ensayo de forestación presenta un bajo grado de toxicidad.



### **Alcalinidad y acidez:**

- La alta disponibilidad de hierro y azufre, permite deducir que probablemente existe presencia de pirita en el sustrato de relaves, lo que implica un potencial riesgo de acidificación de este medio. Sin embargo, la lixiviación importante de azufre durante el periodo 2001 – 2008 indicaría que este elemento provendría de trazas de compuestos azufrados utilizados en los procesos de extracción del cobre. Adicionalmente, cabe destacar que, través de los años de seguimiento, el pH se ha mantenido estable con valores que clasifican al sustrato como moderadamente a fuertemente alcalino.
- La RAS, evaluada en anteriores monitoreos y la CE (actualmente en medición), evidencian valores que permiten clasificar al sustrato en estudio como “no sódico” y “no salino”, respectivamente. Por lo tanto, el sustrato no representa restricciones para el establecimiento de vegetación por causa de estas variables.

### **Tratamientos:**

- No se observa efectos significativos de los tratamientos y de la forestación en el sustrato de relaves. Se estima que esta situación responde a la corta edad del ensayo (3 años) y no a la ausencia de efecto de este tipo de restitución. En general, para conocer si existen respuestas físico – químicas se requiere mediciones en el sustrato en el largo plazo (más de 8 a 10 años).

De manera general, y a modo de resumen de lo anteriormente expuesto, se concluye lo siguiente:

Los resultados del análisis integral realizado sumados a la bibliografía consultada permiten concluir que el sustrato de relaves utilizado en la experiencia presenta un bajo grado de toxicidad sin limitaciones mayores para el establecimiento de una vegetación adaptada a bajos niveles de fertilidad.

## 5.4 Resultados en sistema vegetal

Sobre la base de la metodología de trabajo propuesta, se presenta a continuación los resultados de las evaluaciones químicas y biológicas, según el siguiente detalle:

- Mediciones de parámetros químicos en tejidos vegetales,
- Mediciones de parámetros biológicos para especies arbóreas y arbustivas,
- Mediciones de parámetros biológicos para especies herbáceas.

### 5.4.1 Parámetros químicos en tejidos vegetales

Se entregan los antecedentes químicos obtenidos para especies arbóreas, arbustivas y herbáceas.

#### 5.4.1.1 Especies arbóreas

A continuación se entrega los resultados para arsénico, cobre, manganeso, molibdeno y zinc, en tejidos de acacia y maitén para las temporadas de medición de mayo de 2006 y 2008. No se presenta los resultados en maitén para 2008, debido a que la gran mayoría de los individuos de esta especie se encontraron muertos a esta fecha y los individuos vivos no presentaban la cantidad de follaje necesaria para la obtención de muestras.

**Tabla 25.**

Metales pesados en tejido vegetal de especies arbóreas. Efecto de los Tratamientos

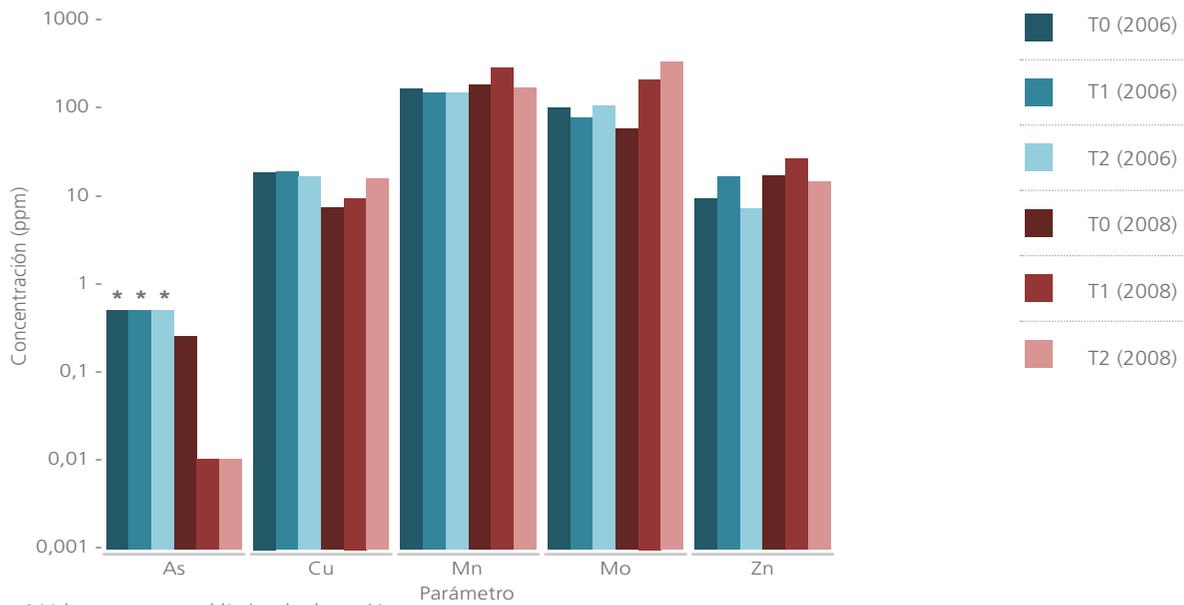
Especie	Año	Parámetro	Tratamiento (ppm)		
			Testigo	T. Vegetal	Compost
<i>Acacia saligna</i> (Acacia)	2006	Arsénico	< 0,5	< 0,5	< 0,5
		Cobre	18	18	16
		Manganeso	155	144	144
		Molibdeno	98	75	100
		Zinc	9	16	7
	2008	Arsénico	0,25	0,01	0,01
		Cobre	7	9	15
		Manganeso	177	276	163
		Molibdeno	56	203	316
		Zinc	17	26	14
<i>Maytenus boaria</i> (Maitén)	2006	Arsénico	< 0,5	< 0,5	< 0,5
		Cobre	36	99	39
		Manganeso	139	78	29
		Molibdeno	25	< 0,2	< 0,2
			14	45	15

Los Gráficos N° 14 y 15, ilustran los antecedentes químicos para todas las variables en análisis. Para el caso de cobre, manganeso, molibdeno y zinc, los resultados se comparan con antecedentes bibliográficos sobre rangos frecuentemente observados en tejidos vegetales (Loué, A. 1988, Microelementos en la Agricultura) y con datos promedio referencial recopilados para especies nativas<sup>2</sup>, en la zona donde se localiza la área de estudio (ATM Ingeniería Ltda., 2002).

<sup>2</sup> Los datos referenciales de contenidos de metales pesados para vegetales en la zona de influencia, fueron obtenidos de monitoreos en tejidos de plantas provenientes de la cuenca asociada al río Pelambres – Cuncumén. Este muestreo consideró las siguientes especies nativas locales: *Baccharis salicifolia*, *Stipa sp*, *Colliguaja odorifera*, *Senecio sp*, *Junco sp*, *Baccharis linearis*, *Salix humboldtiana*, *Carex sp*, *Pluchea absinthioides* y *Escallonia myrtoidea*.

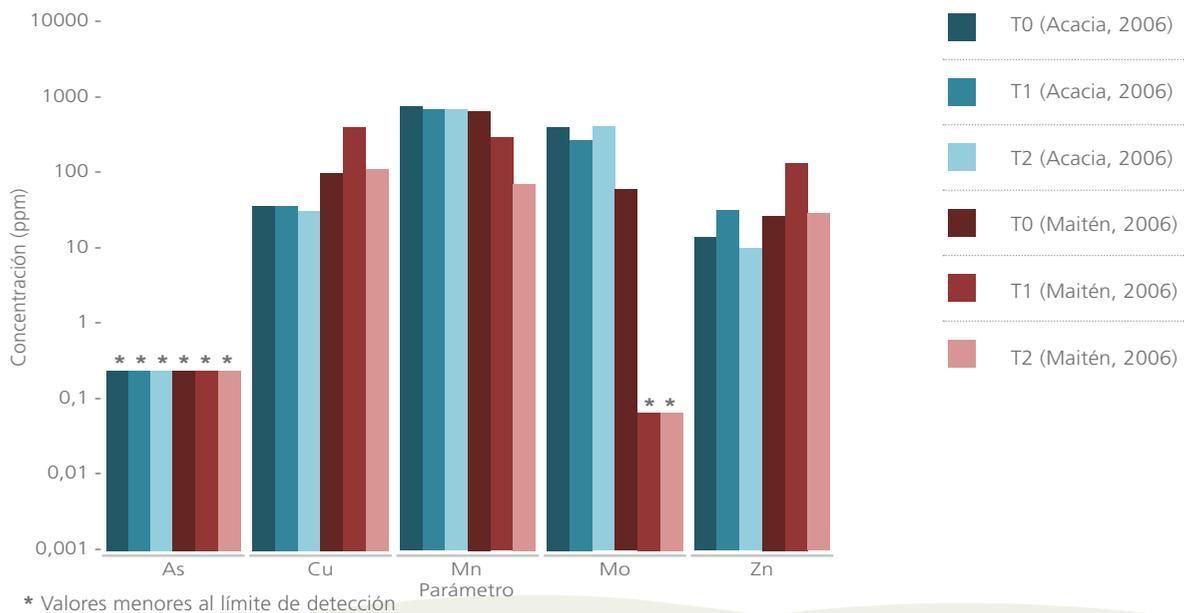
### Gráfico N° 14.

Elementos químicos en tejidos de acacia. Efecto de los tratamientos y tiempo de desarrollo.



### Gráfico N° 15.

Elementos químicos en tejidos de maitén y acacia. Efecto de los tratamientos.





238

Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

De los resultados detallados en la Tabla N° 25 y los Gráficos N° 14 y 15, es posible deducir lo siguiente:

- Los contenidos en arsénico, en ambas especies arbóreas, se mantienen bajos para los tres tratamientos aplicados en este ensayo (< 0,5 ppm).
- Los valores de cobre, para acacia, se encuentran dentro de rangos comparables entre tratamientos y adicionalmente se encuentran dentro de valores frecuentemente observados para tejidos vegetales y especies nativas de la zona en estudio. En contraste, el maitén evidencia concentraciones por sobre estos rangos y el tratamiento con tierra vegetal, es el que presenta mayores contenidos en los tejidos, con relación al tratamiento testigo y el compost.
- Con respecto al manganeso, ambas especies presentan contenidos que se encuentran dentro de rangos frecuentes. En el caso de la acacia, se evidencia que las concentraciones son similares entre tratamientos. Respecto al maitén, los mayores contenidos se presentan en el tratamiento testigo, con valores similares a los de acacia. Las concentraciones decrecen en el tratamiento con tierra vegetal y los menores niveles se presentan en el tratamiento con compost.
- Respecto al molibdeno, la acacia muestra concentraciones muy superiores al maitén y respecto a valores referenciales. Esta respuesta se debe a la probada afinidad que presentan las especies de la familia Fabacea al elemento. La acacia pertenece a este grupo de plantas que se caracteriza por acumular molibdeno debido al rol fundamental que cumple el elemento en la fijación del N<sub>2</sub> atmosférico, en asociación simbiótica, a nivel radical, con un género de bacterias denominadas *Rhizobium*. En el proceso intervienen las enzimas nitrogenasa y nitrato reductasa donde el molibdeno es parte estructural (Barcelo et al., 1984). En 2008, se observa que las concentraciones de molibdeno en acacia para el testigo son significativamente inferiores a las encontradas en los tratamientos con tierra vegetal y compost.
- Ambas especies presentan contenidos de zinc dentro de rangos frecuentes para tejidos vegetales. Sin embargo, destaca en este análisis que el tratamiento con tierra vegetal, muestra mayores niveles del elemento en comparación a los otros dos tratamientos. Con relación a especies nativas de la zona, sólo el tratamiento con tierra vegetal, para maitén, presenta valores superiores a dicha referencia y consecuentemente es el resultado más alto observado para estas mediciones.
- Respecto a la evolución de la química de los tejidos de acacia entre mayo de 2006 y mayo de 2008, se observa un aumento, del orden del 84%, en las concentraciones de zinc para los tres tratamientos, un incremento de los niveles de molibdeno en los tratamientos con tierra vegetal (+ 171%) y compost (+ 216%) y una disminución de este mismo elemento en el testigo (- 75%). El manganeso presenta mayores niveles en 2008 que en 2006 (+ 92%) para el tratamiento con tierra vegetal.

### 5.4.1.2 Especies arbustivas

La Tabla N° 26, entrega el detalle analítico para estas especies.

**Tabla 26.**

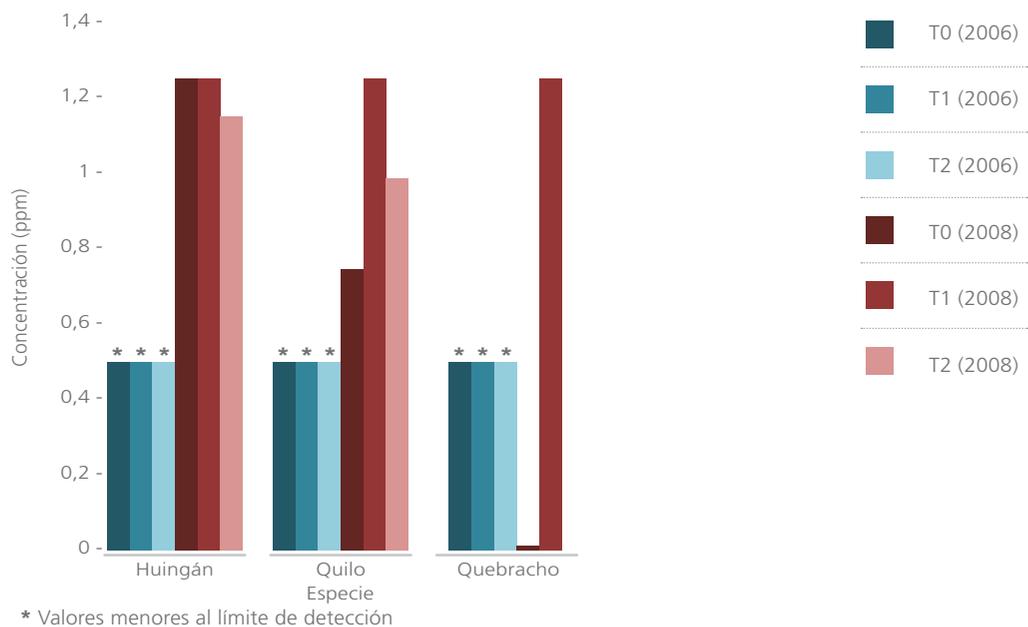
Metales pesados en tejido vegetal de especies arbustivas. Efecto de los Tratamientos

Especie	Parámetro	Concentración, mayo de 2006 (ppm)			Concentración, mayo de 2008 (ppm)		
		T0 (2006)	T1 (2006)	T2 (2006)	T0 (2008)	T1 (2008)	T2 (2008)
<i>Schinus polygamus</i> (Huingán)	Arsénico	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,25	1,25	1,15
	Cobre	21	21	23	23	29	23
	Manganeso	184	187	147	282	336	282
	Molibdeno	< 0,2	< 0,2	5	25	14	0,01
	Zinc	8	11	7	21	27	38
<i>Muehlenbeckia</i> <i>hastulata</i> (Quilo)	Arsénico	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,75	1,25	1
	Cobre	58	43	46	42	43	44
	Manganeso	185	168	190	300	277	449
	Molibdeno	22,5	7,5	7,5	21	30	11
	Zinc	43	42	37	82	71	77
<i>Cassia closiana</i> (Quebracho)	Arsénico	0,5	0,5	0,5	0,01	1,25	-
	Cobre	21	20	18	30	26	-
	Manganeso	46	52	40	84	82	-
	Molibdeno	12,5	12,5	10,2	92	7	-
	Zinc	8	11	8	10	7	-

Los Gráficos N° 16 a 20, ilustran los antecedentes para estos metales. Estos datos se analizan comparativamente entre tratamientos y respecto a rangos frecuentes, según citas bibliográficas; y respecto a promedios para especies nativas de la zona de estudio. Cabe destacar que no se analizó la química del quebracho en el tratamiento con compost, para la campaña de muestreo de 2008, debido a la ausencia de individuos vivos en esta fecha y condición.

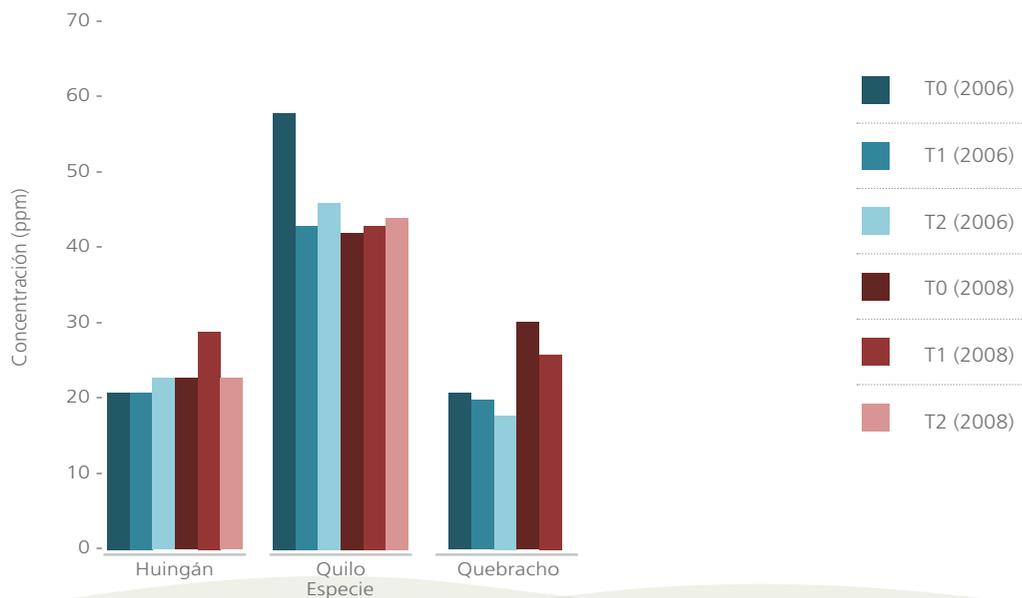
### Gráfico N° 16.

Arsénico en tejidos de especies arbustivas. Efecto de los tratamientos.



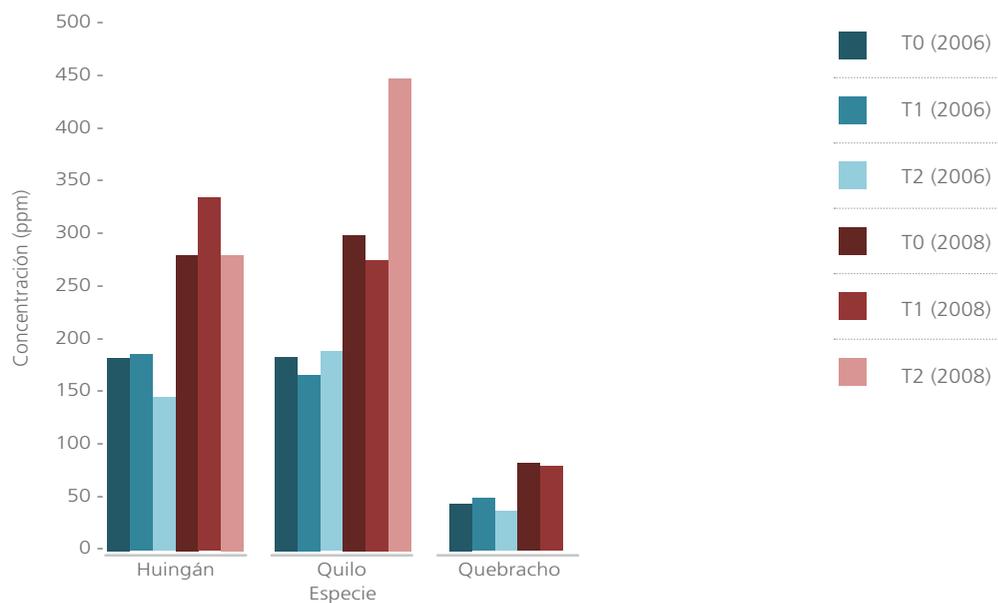
### Gráfico N° 17.

Cobre en tejidos de especies arbustivas. Efecto de los tratamientos.



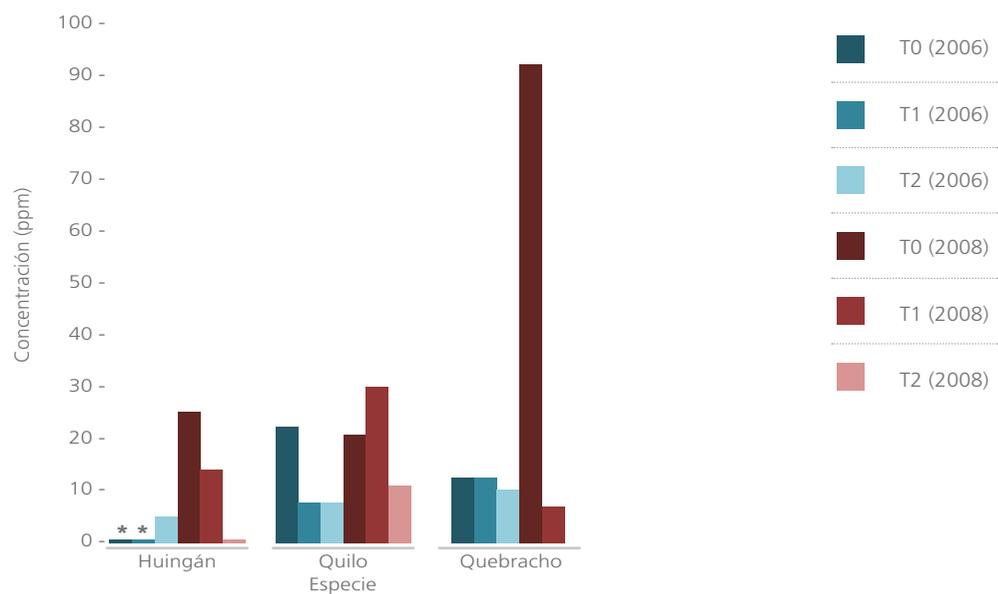
**Gráfico N° 18.**

Manganeso en tejidos de especies arbustivas. Efecto de los tratamientos.



**Gráfico N° 19.**

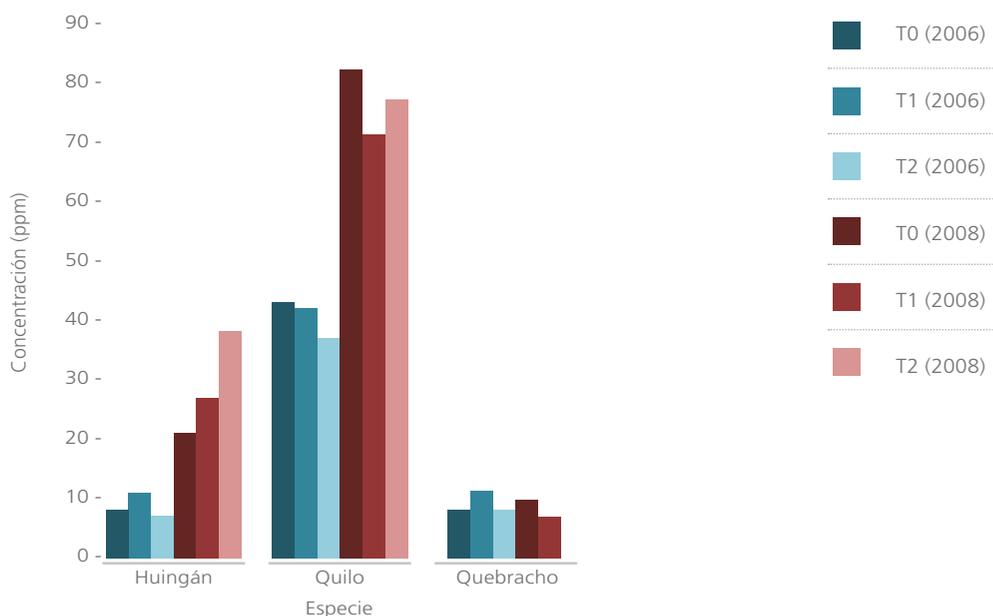
Molibdeno en tejidos de especies arbustivas. Efecto de los tratamientos.



\* Valores menores al límite de detección

### Gráfico N° 20.

Zinc en tejidos de especies arbustivas. Efecto de los tratamientos.



De los resultados detallados en la Tabla N° 26 y Gráficos 16 a 20 es posible indicar que:

- De manera general, se constata una acumulación de arsénico entre el periodo 2006 y 2008 para todas las especies y todos los tratamientos. Sin embargo, no se puede relacionar esta acumulación con un cambio químico en el sustrato debido a que éste muestra bajos contenidos del elemento.
- El análisis comparativo entre especies, para cobre, indica que el quilo muestra los mayores niveles, en comparación a las otras dos especies. Entre los dos periodos de muestreo de 2006 y 2008, no se evidencia evoluciones significativas de los contenidos de cobre para el huingán y el quilo en los tres tratamientos. En contraste, el quebracho parece incrementar sus niveles internos para el tratamiento con tierra vegetal y compost. Con respecto a valores referenciales, el quilo presenta altos niveles de cobre en sus tejidos y el huingán y el quebracho, niveles cercanos al límite máximo de 20 ppm, citado por la literatura y consecuentemente son superiores al promedio de 14 ppm detectado para especies nativas de la zona de estudio.
- Una respuesta similar a la observada para cobre, se aprecia en los contenidos de zinc. Así, la especie quilo, para ambos metales, presenta los mayores valores con relación a las otras dos especies. Adicionalmente

se constata un incremento de los niveles de zinc para las especies huingán y para quebracho, los niveles del elemento son estables. Sin embargo, pese a estas fluctuaciones, los valores se encuentran dentro de rangos frecuentes según cita bibliográfica. En comparación a especies nativas de la zona, los valores de zinc para quilo son altos. En contraste, el huingán y el quebracho, muestran niveles dentro de estos rangos referenciales.

- Con relación al manganeso, las tres especies presentan concentraciones dentro de rangos frecuentemente observados y con valores relativamente similares entre tratamientos, a excepción del quilo que muestra mayores niveles del elemento en el tratamiento con compost, para 2008. En comparación a especies nativas de la zona, el huingán y el quilo presentan altos niveles de manganeso. El quebracho muestra bajas concentraciones en relación con datos referenciales y respecto a las otras dos especies arbustivas.
- Respecto al molibdeno, las tres especies muestran valores que para los tres tratamientos, en el caso de quebracho y quilo o para alguno de los tratamientos, en el caso de huingán, superan valores referenciales. En particular, para el año 2008, se destacan las altas concentraciones en el huingán, para el tratamiento testigo y en el quilo para el tratamiento testigo y tierra vegetal. Para la misma fecha, el quebracho presenta niveles muy altos en el tratamiento testigo. Cabe hacer notar que de las tres especies en análisis sólo el quebracho pertenece a la familia de las Fabaceae y por lo tanto, muestra afinidad por el molibdeno.

#### **5.4.1.3 Especies herbáceas**

Las mediciones para estas especies, se realizaron después de una temporada de iniciado el ensayo. Posteriormente, estas especies no se han vuelto a medir en espera de una mayor estabilización del sistema vegetal sobre el sustrato, en relación con presencia y abundancia. Se estima que, de continuar con la investigación en curso, se podrán realizar las mediciones necesarias para evaluar la dinámica que han presentado estas especies sobre el tranque de relaves.

#### **5.4.1.4 Conclusiones del análisis químico en tejidos vegetales**

De la evaluación de resultados analíticos, en especies de hábito arbóreo y arbustivo, es posible concluir lo siguiente:

- El estudio comparativo con relación a concentraciones medias de metales pesados en especies nativas de la zona, destaca los altos niveles de:

- Cobre en maitén y quilo (para los tres tratamientos);
  - Molibdeno en especies de la familia de las Fabaceae (acacia en los tres tratamientos y Quebracho en el testigo);
  - Zinc en maitén, sobre tierra vegetal y quilo, para los tres tratamientos.
- 
- Al evaluar el posible efecto de los tratamientos sobre las concentraciones de metales en tejido, se observa, para las especies arbóreas en estudio, que el tratamiento con tierra vegetal muestra tejidos con mayores contenidos de zinc. El resto de los metales, no evidencia que exista un efecto de los tratamientos sobre los niveles observados en los tejidos.
  
  - En relación con la evolución de las concentraciones de metales en el tiempo (mayo 2006 a mayo 2008), destacan las siguientes tendencias:
    - Disminución de las concentraciones de cobre en acacia;
    - Aumento de los contenidos de zinc en acacia, huingán y quilo
    - Aumento del arsénico en especies de hábito arbustivo

Estas fluctuaciones evidencian que, después de tres años de establecimiento, las plantas todavía no estabilizan sus niveles internos de metales en relación con la química del sustrato. Por lo anterior, no se puede aún obtener resultados concluyentes en relación con ausencia de síntomas de toxicidad a en respuesta a bioacumulación de elementos químicos en los tejidos vegetales.

#### **5.4.2 Resultados de parámetros biológicos para árboles y arbustos**

Como se indicara en la metodología de trabajo, para las especies arbóreas y arbustivas, se realizaron las siguientes mediciones:

- sobrevivencia (N° de individuos vivos y muertos; % de sobrevivencia)
- variables dasométricas (altura y diámetro).



### 5.4.2.1 Supervivencia

La Tabla N° 27, entrega los resultados del análisis estadístico para supervivencia en árboles (acacia, maitén) y arbustos (huingán, quebracho y quilo). Al final de los tres años de desarrollo de las plantas (2008), se realizó un análisis estadístico para evaluar en cada especie si se evidencian diferencias significativas de supervivencia entre tratamiento.

**Tabla 27.**

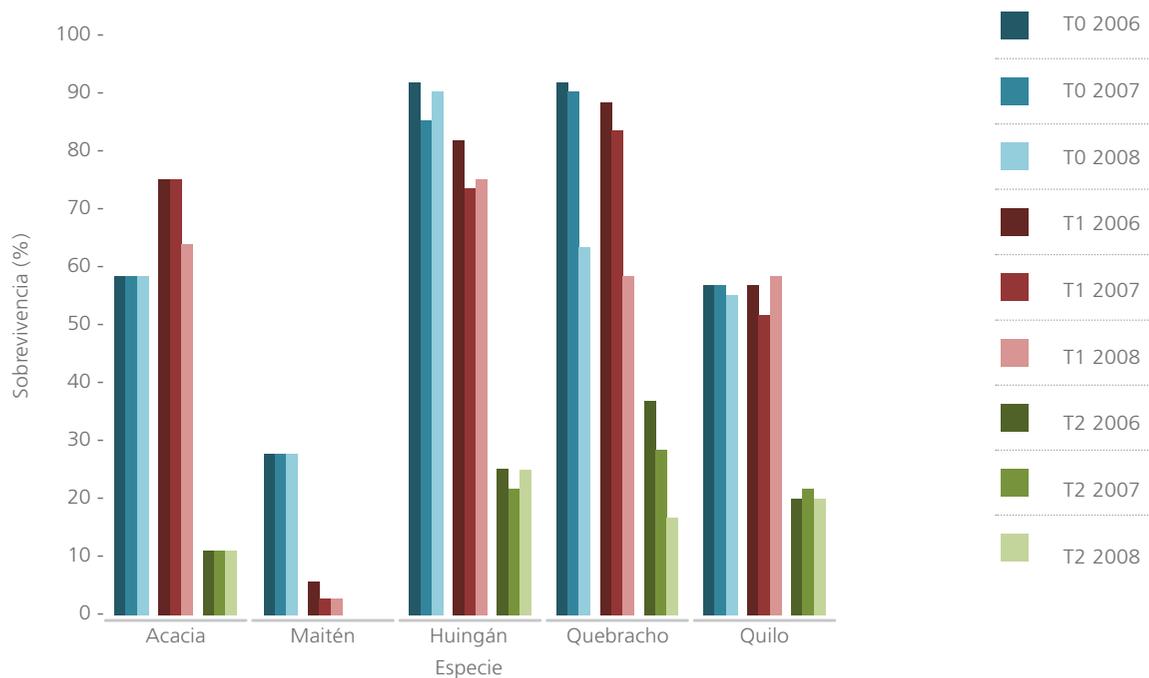
Servivencia en especies arbóreas y arbustivas. Efecto de los tratamientos

	2006			2007			2008		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2
Acacia	58,3	75	11,1	58,3	75,0	11,1	58,3 (a)	63,9 (a)	11,1 (b)
Maitén	27,8	5,7	0	27,8	2,8	0,0	27,8 (a)	2,8 (b)	0,0 (b)
Huingán	91,7	81,7	25	85,0	73,3	21,7	90,0 (a)	75,0 (a)	25,0 (c)
Quebracho	91,7	88,3	36,7	90,0	83,3	28,3	63,3 (a)	58,3 (a)	16,7 (b)
Quilo	56,7	56,7	20	56,7	51,7	21,7	55,0 (a)	58,3 (a)	20,0 (b)

*Letras distintas indica que existen diferencias significativas entre tratamientos a un nivel de confianza del 95%*

Gráfico N° 21.

Sobrevivencia en especies arbóreas y arbustivas. Efecto de los Tratamientos



### a) Sobrevivencia en árboles

Como se aprecia en estos resultados, existe un efecto de los tratamientos sobre la sobrevivencia de las especies arbóreas y arbustivas donde el tratamiento con compost es el que presenta los más bajos resultados, para las cinco especies evaluadas. El tratamiento con tierra vegetal y el testigo presentan resultados similares (ausencia de diferencia significativa) para todas las especies en estudio.

En el caso del acacia, los tratamientos testigo y con tierra vegetal presentan mayor sobrevivencia en comparación al tratamiento con compost y, sin diferencias significativas para estos dos primeros tratamientos, en relación con los resultados de la temporada de medición de 2008.

El maitén muestra en general una baja sobrevivencia, con un mejor resultado para el tratamiento testigo en comparación a los otros dos tratamientos. Estas especies presentan los más bajos resultados entre las cinco especies arbóreas y arbustivas utilizadas en este estudio. Destaca en este análisis que, para el tratamiento con compost, el maitén presenta un cero % de sobrevivencia y sin diferencias significativas con respecto al tratamiento con tierra vegetal.

Se observa una estabilidad del porcentaje de sobrevivencia durante los tres años de desarrollo en los individuos de acacia y maitén en el testigo. En el tratamiento con tierra vegetal, se observa una leve disminución del porcentaje de sobrevivencia en 2007 para el maitén y en 2008 para acacia.

### **b) Sobrevivencia en arbustos**

Al igual que en las especies arbóreas, se evidencia que existe un efecto de los tratamientos sobre la sobrevivencia de los arbustos, donde el tratamiento con compost es el que presenta los más bajos resultados, para las tres especies evaluadas.

Con relación a los tratamientos testigo y con tierra vegetal, las tres especies muestran resultados similares entre tratamientos, destacando el huingán con porcentajes de sobrevivencia superior al 75%. En 2008, el quilo y el quebracho, presentan un menor resultado, en relación con el huingán.

Se observa una estabilidad del porcentaje de sobrevivencia, durante los tres años de desarrollo, en los individuos de huingán y quilo para los tres tratamientos. En 2008, se evidencia un leve aumento de sobrevivencia en relación a 2007 para los tres tratamientos, en la especie huingán y en el tratamiento con tierra vegetal para la especie quilo. Este fenómeno indica que algunos individuos considerados muertos en 2007 alcanzaron a rebrotar desde la base del tronco en 2008.

Al contrario de las especies huingán y quilo, el quebracho presenta una importante disminución de su sobrevivencia en el ensayo entre el año 2007 y 2008 para los tres tratamientos.



### c) Resumen del análisis de sobrevivencia

Al final del tercer año de desarrollo de las especies vegetales en el ensayo de forestación sobre relaves, los resultados de sobrevivencia indican que, independientemente de los tratamientos, las especies que presentan los más bajos resultados del estudio son: el maitén, para el grupo de hábito arbóreo y el quilo y el quebracho, para el caso de hábito arbustivo. Entre estas dos especies, el maitén muestra los más bajos porcentajes de sobrevivencia, alcanzado valores máximos y mínimos de 27,8 y 0% para el testigo y el compost, respectivamente. En contraste, los más altos valores, se presentan en acacia, para las especies arbóreas y en huingán, para las arbustivas.

Con respecto a la evaluación comparativa entre tratamientos, se concluye que tanto las especies arbóreas como arbustivas muestran similar tendencia con relación a que el tratamiento con compost es el que resulta con menor porcentaje de sobrevivencia. Por otra parte, los tratamientos testigo y con tierra vegetal, muestran los mayores resultados, sin diferencias significativas entre ellos.

Estos antecedentes verifican la baja toxicidad que presenta el sustrato de relaves utilizado en esta experiencia (análisis del sustrato, subcapítulo 5.3.). Los óptimos resultados para el tratamiento testigo, demuestran esta conclusión.

Con relación al tratamiento con compost, los datos de este ensayo contradicen antecedentes reportados por la información bibliográfica donde se indica que el uso de este tipo de enmienda orgánica, mejora las condiciones del sustrato (Palmer, 1990; Tordoff, 2000; entre otros) gracias a los siguientes efectos:

- Se entrega una mejor condición física a las raíces al incrementar la capacidad de retención de agua y consecuentemente de nutrientes, es decir, mitiga efectos de lixiviación y el empobrecimiento de este medio (ver subcapítulo 5.3.1).
- Permite la liberación lenta y dosificada de nutrientes, favoreciendo el establecimiento de la vegetación y,
- Favorece la formación de complejos con los metales pesados, inmovilizándolos. De este modo reduce efectos fitotóxicos.

En consecuencia, se estima que los antecedentes de la investigación no necesariamente descartan el uso de este componente, ya que está ampliamente reconocido el éxito del compost en el establecimiento de vegetación so-

bre tranques de relaves. En consecuencia, se estima que han incidido otras causas, ajenas a la probada eficiencia del uso de este producto, en los resultados de sobrevivencia. Entre ellas, cabe destacar las siguientes:

- Calidad del compost utilizado para el ensayo: La idea original del estudio fue utilizar un producto mejorador obtenido de una planta de compostaje destinada a procesar residuos domésticos generados de los casinos de MLP. Al momento de iniciar las experiencias, esta planta se encontraba en proyecto y por lo tanto, no estaba operativa. Por lo anterior, se utilizó un compost comercial, de orujo de uva, de disponibilidad inmediata en el mercado. Existe la probabilidad que la calidad de este producto (madurez y pH) no haya sido la óptima para cumplir con los requerimientos del estudio.
- Aplicación de agua de riego: EL compost es un producto que se caracteriza por retener agua. Lo anterior, si bien favorece la entrega dosificada del recurso hídrico y de nutrientes, puede ser un factor negativo en el caso de no contar con un programa de riego. Uno de los objetivos del estudio fue establecer vegetación bajo el escenario de una mínima intervención y, consecuentemente, un régimen hídrico similar a las condiciones pluviométricas de la zona. En consecuencia, el riego se utilizó sólo en casos de emergencia durante el primer año del ensayo (para suplir déficit de precipitaciones y/o con fines de mitigar efectos de falta de agua en período estival). Este criterio, pudo haber afectado negativamente al tratamiento con compost ya que, al tratarse de un producto higroscópico, compitió con las raíces de los vegetales por el agua disponible. Esta situación puede haber originado un estrés hídrico adicional a los ensayos provenientes del tratamiento, con el consecuente efecto en la escasa a nula sobrevivencia para las especies provenientes del sustrato con compost.

De lo anterior se concluye que es recomendable corregir las probables causas que han originado el fracaso del ensayo con compost en especies arbustivas y arbóreas. Para ello, se propone realizar nuevos estudios con compost, proveniente de la planta de MLP, actualmente operativa, asegurando los siguientes aspectos:

- Calidad del compost; Con este propósito de deberán efectuar los análisis y mediciones de calidad de rutina, entre los que destaca la relación Carbono/Nitrógeno y el pH, a modo de contar con un producto adecuado para los fines del ensayo.

- Riego programado; Para ello, se recomienda establecer ensayos donde se mantenga un programa de riego controlado con fines de aportar el agua suficiente para producir la hidratación de este material y satisfacer los requerimientos hídricos mínimos demandados por las especies vegetales.

#### 5.4.2.2 Mediciones de parámetros dasométricos

##### a) Especies arbóreas

El análisis anterior indicó que el maitén presentó escasa sobrevivencia (subcapítulo 5.4.2.1). Es decir, los individuos que superaron la barrera del establecimiento debieron utilizar todas sus reservas para mantenerse con vida y, de este modo, no lograron un desarrollo fisiológico cuantificable que se expresara en crecimiento. Debido a ello, se descarta esta especie de las evaluaciones dasométricas.

Sobre la base de lo expuesto, se entregan los resultados del análisis estadístico para acacia con relación a:

- Altura de árbol
- Diámetro de copa
- Diámetro de fuste

La Tabla N° 28 entrega estos resultados

#### Tabla 28.

Mediciones dasométricas en *Acacia saligna* (acacia). Efecto de los tratamientos

Periodo de medición	Altura			Diámetro de copa			Diámetro de fuste		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2
Línea base	22,5	22,5	22,5	20,0	20,0	20,0	0,3	0,3	0,3
2006	86,0	67,0	32,5	93,0	50,0	35,0	1,4	0,7	0,6
2007	183,3	157,5	140,0	198,1	152,4	132,5	4,1	3,7	3,5
2008	148,1 (a)	133,9 (a)	130,8 (a)	198,1(a)	134,8 (b)	141,5 (b)	1,6 (a)	1,6 (a)	1,5 (a)

Letras distintas indica que existen diferencias significativas entre tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

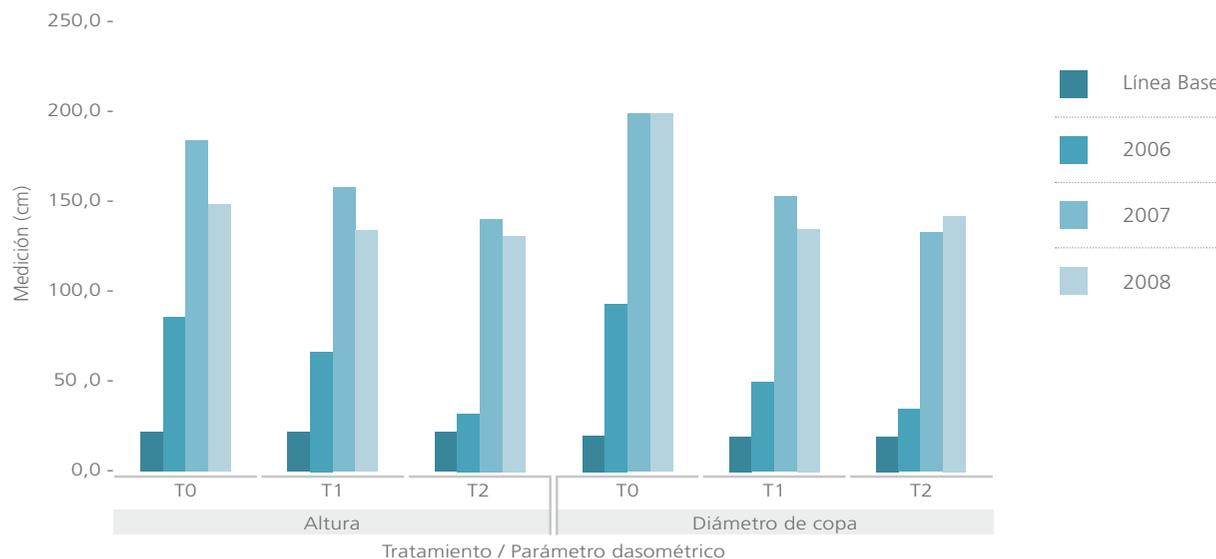


Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

Los Gráficos N° 22 y 23, ilustran los antecedentes de la evaluación realizada entre tratamientos y con relación a la línea base, para altura, diámetro de copa y diámetro de fuste, respectivamente

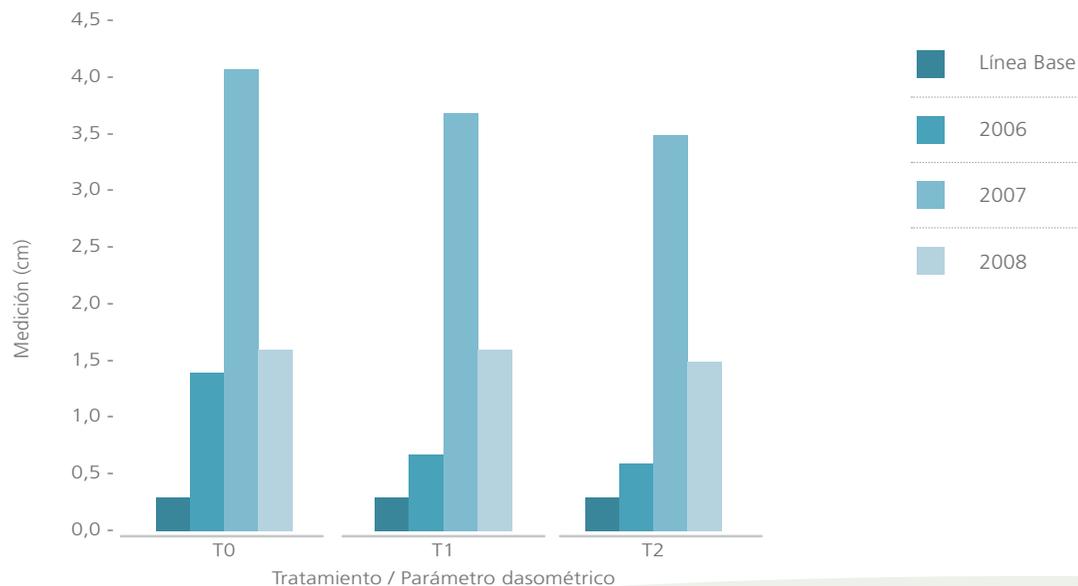
**Gráfico N° 22.**

Altura de árbol y diámetro de copa en acacia. Efecto de los tratamientos.



**Gráfico N° 23.**

Diámetro de fuste en acacia. Efecto de los tratamientos



Los resultados para variables dasométricas indican, al igual que para sobrevivencia, que existe un efecto de los tratamientos sobre estos antecedentes para el periodo de medición de mayo de 2008. Así, el tratamiento testigo, para diámetro de copa, es el que presenta mayores valores en comparación a los otros dos tratamientos, sin evidenciar, para esta variable, diferencias significativas entre compost y tierra vegetal. En el caso de la altura, el testigo también, resulta con el mayor crecimiento; sin embargo, no presenta diferencias significativas con los dos otros tratamientos debido a que el contraste es menos acentuado que para el diámetro de copa. El diámetro de fuste no presenta diferencias entre tratamiento en mayo de 2008.

Respecto al crecimiento, los resultados muestran que los tratamientos con mayor crecimiento y desarrollo son el testigo y la tierra vegetal. Entre el inicio del ensayo (línea base, 2005) y el año 2007 se constata un crecimiento importante de la especie acacia en los tres tratamientos. Al contrario, entre las campañas de medición del año 2007 y 2008 se constata un comportamiento distinto de la especie con una estabilización del diámetro de copa y una disminución de la altura y diámetro de fuste. La disminución de las mediciones en estos parámetros, se puede explicar a través de las observaciones de terreno donde se constató que, entre 2007 y 2008, la mayoría de los individuos de la especie acacia presentaron una muerte del eje principal del árbol con una brotación secundaria desde la base del tronco. Este fenómeno podría relacionarse al importante déficit hídrico observado en la zona del estudio, durante el año 2007 y principio del año 2008 (ver capítulo 5.1.1).

Del análisis realizado se concluye que las plantas provenientes de los tratamientos testigo y tierra vegetal, presentan mayor crecimiento y desarrollo en comparación al tratamiento con compost. En este análisis destacan los valores obtenidos para el testigo, que independientemente del test estadístico, muestra los mejores resultados del ensayo.

### **b) Especies arbustivas**

En el caso de especies arbustivas, las variables dasométricas a medir fueron:

- Altura de arbusto
- Diámetro de copa

Los resultados del análisis estadístico para huingán, quilo y quebracho, se presentan en la Tabla N° 29.

**Tabla 29.**

Mediciones Dasométricas en Especies Arbustivas. Efecto de los Tratamientos

Especie arbustiva	Temporada de medición	Altura			Diámetro de copa		
		T0	T1	T2	T0	T1	T2
<i>Schinus polygamus</i> (Huingán)	Línea base	14,0	14,0	14,0	4,0	4,0	4,0
	2006	33,0	17,0	20,0	33,0	19,0	9,0
	2007	45,5	27,8	31,7	45,6	27,5	28,2
	2008	45,4 (a)	21,9 (b)	27,6 (b)	58,5 (a)	31,5 (b)	33,9 (b)
<i>Cassia closiana</i> (Quebracho)	Línea base	61,0	61,0	61,0	15,0	15,0	15,0
	2006	49,0	59,0	45,5	25,0	21,0	7,5
	2007	50,3	59,4	51,4	29,5	23,4	17,9
	2008	11,1 (a)	15,6 (a)	6,0 (b)	11,5 (a)	13,8 (a)	5,6 (b)
<i>Muehlenbeckia hastulata</i> (Quilo)	Línea base	50,0	50,0	50,0	20,0	20,0	20,0
	2006	52,5	50,0	55,0	90,0	88,5	89,5
	2007	74,7	83,7	75,8	115,5	133,2	102,4
	2008	81,1 (a)	67,8 (a)	78,3 (a)	81,4 (a)	96,4 (a)	96,9 (a)

Letras distintas indica que existen diferencias significativas entre tratamientos a un nivel de confianza del 95%.

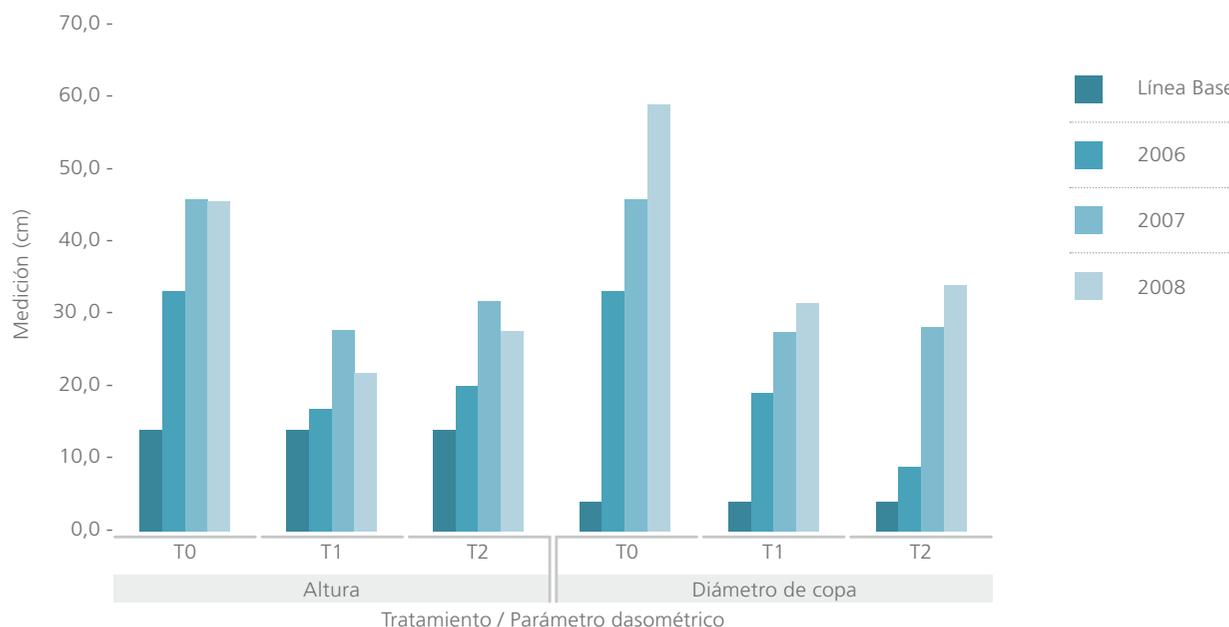
Sobre la base de los antecedentes expuestos, se entrega un análisis de cada una de estas variables para las tres especies en estudio.

### i. Huingán

Los resultados para altura y diámetro de copa, se ilustran en el Gráfico N° 24.

### Gráfico N° 24.

Altura de árbol y diámetro de copa en huingán. Efecto de los tratamientos



De estos antecedentes, se deduce que existen diferencias significativas entre tratamientos. El huingán muestra mayor crecimiento y desarrollo, en el tratamiento testigo. La tierra vegetal y el compost, presenta valores inferiores al testigo y sin diferencias significativas entre ellos.

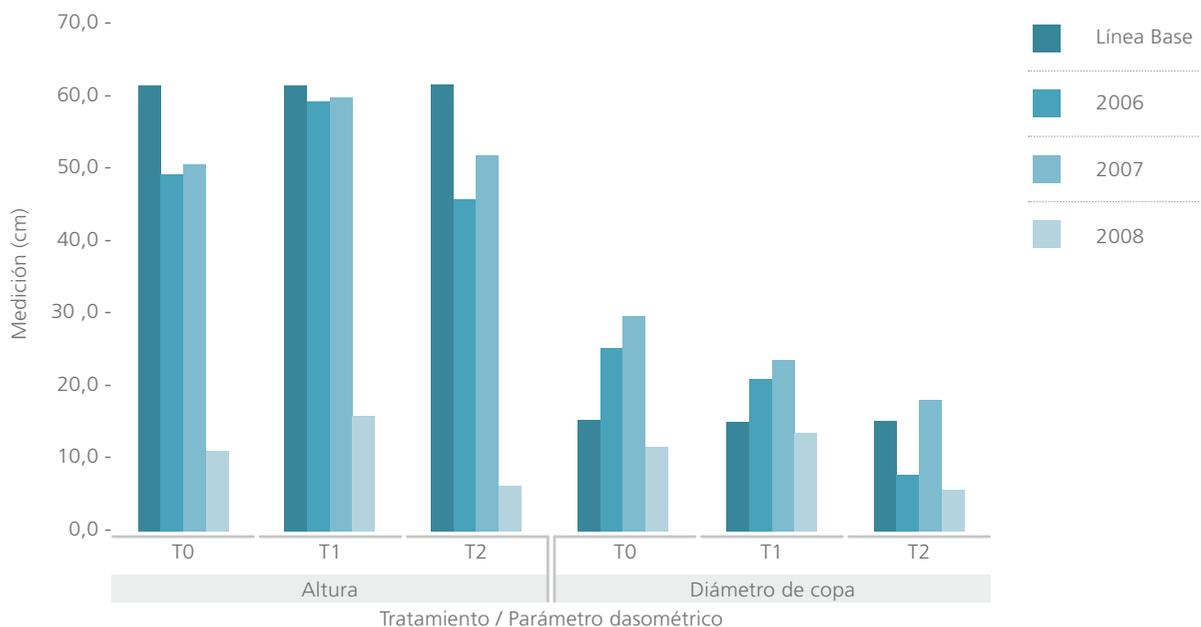
Respecto al crecimiento, los resultados indican que el tratamiento con mayor crecimiento y desarrollo es el testigo. El diámetro de copa presenta un incremento continuo entre el inicio del ensayo (línea base, 2005) y la última campaña de medición (mayo 2008). En relación con la altura, se constata un buen aumento de tamaño hasta el año 2007. En 2008, se observa una disminución en la altura para los tratamientos con tierra vegetal y compost y una estabilización para el testigo. Como para la acacia, este fenómeno podría relacionarse al importante déficit hídrico observado durante el año 2007 y los 4 primeros meses del año 2008.

### ii. Quebracho

Los resultados para altura y diámetro de copa, se ilustran en el siguiente gráfico.

### Gráfico N° 25.

Altura y diámetro de copa en quebracho. Efecto de los tratamientos.



El análisis estadístico realizado sobre los resultados del año 2008 indican que el desarrollo del quebracho, en altura como en diámetro de copa, es significativamente más bajo en el tratamiento con compost en relación con los dos otros tratamientos.

Adicionalmente, los resultados dasométricos del quebracho muestran que esta especie no ha experimentado incremento en altura, con resultados que incluso indican una tendencia hacia la disminución de esta variable en 2008. Lo anterior responde a que el crecimiento apical en el quebracho, durante el establecimiento, se vio severamente dañado por las condiciones climáticas, situación que influyó negativamente en las mediciones de altura, para los tres tratamientos.

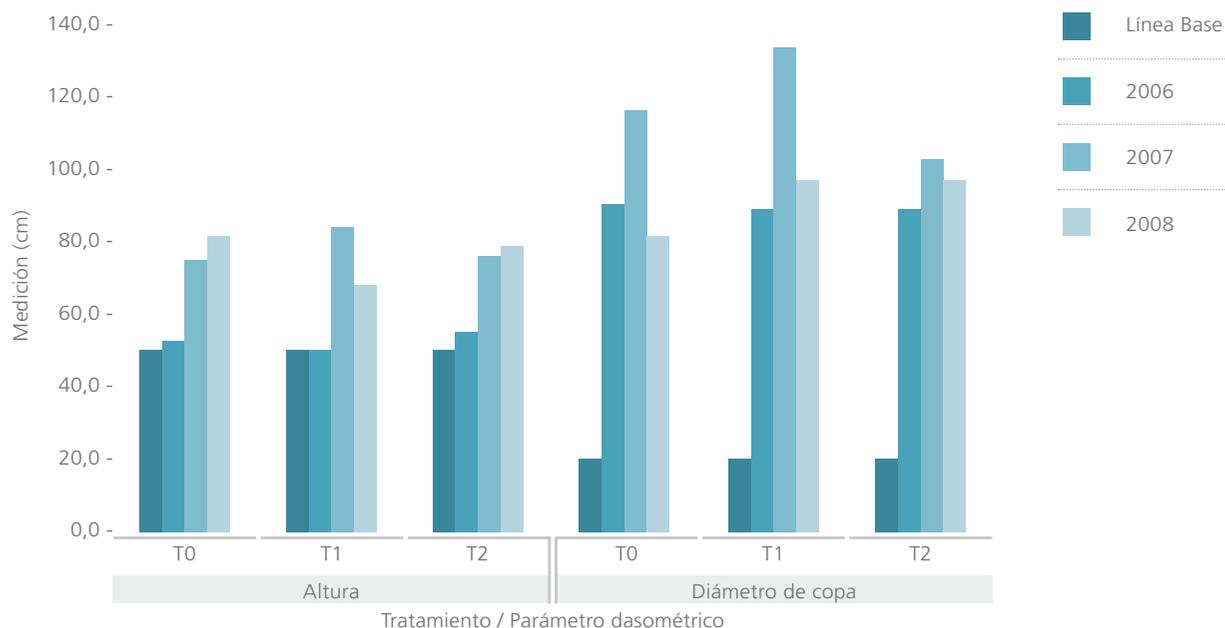
En compensación al daño apical, el quebracho mostró una brotación lateral que, particularmente para el testigo y la tierra vegetal, influyó favorablemente, permitiendo el incremento significativo del diámetro de copa en 2007, en comparación a los resultados basales. Sin embargo, de manera general se observa una disminución importante de altura y diámetro de copa para los tres tratamientos en 2008. Como para el caso de la acacia y del huingán, este fenómeno podría relacionarse al importante déficit hídrico observado durante el año 2007 y los 4 primeros meses del año 2008.

### iii. Quilo

Los resultados para altura y diámetro, se ilustran en el Gráfico N° 26.

#### Gráfico N° 26.

Altura y diámetro de copa en quilo. Efecto de los tratamientos.



En el caso de esta especie, no se observan efectos de los tratamientos sobre la altura y el diámetro de copa en 2008, según el análisis estadístico presentado en la Tabla N° 31.

Respecto a línea base, se detecta que no se producen incrementos importantes de de altura. Lo anterior responde al tipo de hábito del quilo. Se trata de una especie arbustiva trepadora y, por lo tanto, su crecimiento está representado en el diámetro de copa, situación que se verifica en los resultados comparativos de los tratamientos con relación a línea base.

Destaca en este análisis que los tratamientos no influyen en el desarrollo de copa, con valores comparables entre ellos.

Como para la especie arbórea acacia y las especies arbustivas huingán y quebracho, se observa un buen crecimiento de los individuos entre el principio del ensayo y el año 2007 y una disminución o estabilización de altura y diámetro de copa en 2008.



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

### 5.4.2.3 Conclusiones para mediciones biológicas en especies arbóreas y arbustivas

Del análisis efectuado para sobrevivencia y variables dasométricas, se concluye lo siguiente:

- Con relación al efecto de los tratamientos y respecto a la comparación entre ellos y línea base, se observa una respuesta positiva para el testigo y la tierra vegetal, sobre las variables biológicas. En particular, destacan los óptimos resultados para el tratamiento sobre sustrato de relaves (testigo) confirmando el bajo potencial tóxico de este medio. En contraste al efecto anterior, el tratamiento con compost se presenta como no favorable para la sobrevivencia de las especies y, consecuentemente, para las variables dasométricas, mostrando resultados significativamente más bajos en comparación a los otros dos tratamientos.
- Existe una relación directa entre sobrevivencia y parámetros dasométricos. Es decir, los grupos que muestran un mayor porcentaje de individuos vivos, también presentan los mejores resultados de crecimiento y desarrollo (altura y diámetro de copa).
- El análisis comparativo entre especies, independiente de los tratamientos, indica que el maitén, no se adapta a las condiciones del sustrato de relaves utilizado en esta experiencia de forestación. En contraste, destacan las especies acacia para el estrato arbóreo y huingán para el estrato arbustivo, por presentar los mejores resultados en este experimento.
- La respuesta desfavorable del compost no responde a la ineficacia de esta enmienda orgánica. De hecho, está probado su efecto mejorador sobre el sustrato de relaves. En consecuencia, se estima que los resultados del estudio están influenciados por otras causas tales como la baja calidad del compost comercial, disponible en el mercado, al momento de establecer los ensayos y; el estrés que sufrieron los vegetales bajo el régimen hídrico propuesto (riego sólo de emergencia). En consecuencia, la competencia por absorción de agua, producida a nivel radical entre vegetales y este producto higroscópico, influyó negativamente en los resultados de esta investigación.
- Entre las temporadas de medición del año 2007 y 2008 se registró una disminución del crecimiento (altura y diámetro de copa) para las especies en seguimiento. Este fenómeno podría relacionarse al importante déficit hídrico observado durante el año 2007 y los cuatro primeros meses de 2008 que podría haber oca-

sionado un estrés hídrico sustancial generando recesión y muerte de una parte de los tejidos vegetales con el consecuente efecto negativo en estas variables.

- Para compensar los efectos anteriores, se recomienda realizar ensayos complementarios con compost, proveniente de la planta de tratamiento de MLP, verificando, en estas nuevas pruebas, la adecuada calidad del producto en términos de fertilidad, madurez y acidez. Paralelamente, como se menciona en los antecedentes bibliográficos, se recomienda establecer un programa de riego durante los primeros años de establecimiento, en futuras plantaciones sobre relaves bajo clima árido o semiárido para evitar el estrés hídrico en las plantas y obtener una cobertura permanente sobre el sustrato de relaves.

#### **5.4.2.4 Resultados de parámetros biológicos para especies herbáceas**

Al igual que lo indicado en el subcapítulo 5.4.1.3, para las mediciones químicas, se excluyeron del seguimiento las especies herbáceas para la campaña de 2008.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Sobre la base de todos los antecedentes expuestos en el trabajo de investigación sobre técnicas de forestación en relaves, después de tres años de seguimiento y; del análisis acumulativo de antecedentes recopilados desde el año 2001 a la fecha, es factible concluir lo siguiente:

#### Química del sustrato de relaves

- Los análisis químicos del sustrato de relave utilizado en este trabajo de investigación presenta, de manera general:
  - Bajos niveles de fertilidad (déficit de nitrógeno, fósforo y potasio);
  - Características “no salinas” (baja conductividad eléctrica) y “no sódicas” (baja concentración de sodio);
  - Baja toxicidad (pH básico y estable, niveles de metales pesados no críticos).

Estas características permiten concluir que el sustrato de relaves utilizado en la experiencia no presenta limitaciones mayores para el establecimiento de una vegetación adaptada a bajos niveles de fertilidad y a las condiciones climáticas de la zona.

- No se observa efectos significativos de los tratamientos y de la forestación en el sustrato de relaves. Se estima que esta situación responde a la corta edad del ensayo (3 años) y no a la ausencia de efecto de este tipo de restitución. En general, para conocer si existen respuestas físico – químicas se requiere mediciones en el sustrato en el largo plazo (más de 8 a 10 años).

#### Química de los tejidos vegetales

- En los sistemas vegetales en análisis, se observa que existe selectividad entre especies. En particular destaca la afinidad por el molibdeno de la familia Fabaceae. La acacia y el trébol, representantes de este grupo, con los más altos contenidos del elemento, en comparación al resto de las especies del ensayos, verifican esta conclusión.

- 264
- También se detectan comportamientos diferenciados en función de los estratos bajo seguimiento. Como tendencia general se evidencia que las herbáceas muestran mayores contenidos de metales en comparación a los estratos arbóreos y arbustivos, destacando particularmente el caso de arsénico y cobre, por mostrar marcadamente esta tendencia.
  - Con relación al cobre en herbáceas, destacan los altos niveles observados en especies sembradas (avena, ballica, trébol y festuca) respecto al grupo de las colonizadoras y con relación al resto de los vegetales del ensayo.
  - De manera general, no se evidencia a la fecha efecto de los tratamientos sobre la absorción de algunos metales. Sin embargo, destaca los mayores contenidos de zinc, en los vegetales provenientes del tratamiento con tierra vegetal, respecto a los niveles detectados en plantas provenientes de los otros dos tratamientos. Esta tendencia también se verifica para cobre y manganeso, al año de medición en especies de hábito herbáceo.

La bibliografía consultada indica que las concentraciones de metales encontrados en los tejidos los organismos vegetales bajo seguimiento no deberían presentar niveles tóxicos y, por lo tanto, no deberían incidir sobre la sobrevivencia y el crecimiento de las plantas. Este contexto corrobora los análisis químicos en sustrato de relaves que revelan la baja toxicidad de éste. Sin embargo, a la fecha, se observa tendencias al aumento de los contenidos internos de algunos metales en varias especies en seguimiento lo que evidencia que, después de tres años de establecimiento, las plantas todavía no estabilizan sus niveles internos de metales en relación con la química del sustrato. Por lo anterior, los resultados aún no son concluyentes en relación a descartar síntomas futuros de toxicidad en respuesta a bioacumulación de elementos químicos en los tejidos vegetales, a través del tiempo.

### **Parámetros biológicos en árboles y arbustos**

- Las mediciones biológicas para especies de hábito arbóreo y arbustivo, muestran que la sobrevivencia incide directamente sobre las variables dasométricas. Es decir, los mejores valores de sobrevivencia se asocian a un mayor crecimiento y desarrollo de individuos. En contraste, donde se observa escasez de especies vivas, el crecimiento y desarrollo también se ve reducido.

- Se observa un efecto de los tratamientos sobre los parámetros de sobrevivencia y sobre las variables dasométricas. Las mejores respuestas se obtienen para los tratamientos testigo y tierra vegetal. En contraste, el tratamiento con compost, muestra los más bajos resultados, para ambas mediciones.
- Dentro de las especies evaluadas, en el estrato arbustivo, destaca por obtener las mejores respuestas biológicas el huingán, con un 90% de sobrevivencia para el tratamiento testigo. Sin embargo, el crecimiento de esta especie es inferior a lo esperado, según experiencia del consultor en esta materia. En el estrato arbóreo, la acacia con un 63,9% de sobrevivencia en tierra vegetal, también logra un nivel de establecimiento de interés. Sin embargo, al igual que para huingán, su crecimiento es inferior a lo observado en condiciones naturales, evidenciando además un importante recesión invernal con deterioro de sus tejidos apicales.
- Por otra parte, el maitén muestra baja adaptación al ensayo con valores que fluctúan entre 0% y 28% de sobrevivencia, para compost y testigo, respectivamente. Adicionalmente, se evidencia deterioro en sus tejidos, que se refleja en el escaso a nulo crecimiento y desarrollo observado en esta especie.
- El quebracho y el quilo, comparativamente presentan valores medios de sobrevivencia. Sin embargo, en el caso del quebracho se observa una disminución constante de esta variable a través del tiempo lo que indicaría que esta especie muestra baja adaptación a las condiciones del ensayo.
- Entre la temporada de medición de 2007 y 2008 se observa que el crecimiento y desarrollo de las especies arbóreas y arbustivas tienden a estabilizarse y, en algunos caso, se evidencia disminución en las mediciones asociadas a los parámetros dasométricos (altura y diámetro de copa). Este fenómeno se podría atribuir al importante déficit hídrico observado durante el año 2007 y los cuatro primeros meses de 2008 que habría provocado un estrés hídrico significativo en las plantas, produciendo necrosis en los tejidos aéreos.

#### **Parámetros biológicos en herbáceas, para una temporada de medición**

- Con respecto a las herbáceas, los resultados muestran que de todas las especies sembradas, sólo el *falaris* no se adapta a las condiciones del ensayo, observándose ausencia de este pasto perenne en todos los tratamientos, al finalizar la temporada de seguimiento. En reemplazo, aparecen especies colonizadoras, provenientes de semillas probablemente aportadas por las enmiendas orgánicas y/o por el ecosistema donde se

inserta el tranque. En particular destacan, por su dominancia, cuatro especies: senecio, lechuguilla, yuyo y sanguinaria. Adicionalmente, y en escasa cantidad, se observa presencia de otras herbáceas acompañantes, donde predomina la presencia de la familia Poaceae. Todas las especies colonizadoras, se han descrito con anterioridad a este ensayo y por lo tanto, forman parte de la flora que naturalmente ha poblado el sustrato de relaves.

- Con relación a las mediciones asociadas a producción de materia seca en herbáceas sembradas, se evidencia, que los mejores resultados se presentan en poaceas anuales (ballica y avena), provenientes de la mezcla 1, para los tratamientos con tierra vegetal y testigo. Al contrario, los pastos colonizadores, destacan las mayores producciones de sanguinaria y yuyo con relación al resto de las especies de este grupo, para el tratamiento con compost.
- En relación a rendimientos esperados, para pastos cultivados en la zona, los resultados de ambas mezclas, para el tratamiento con compost son altos. En contraste, los tratamientos testigo y con tierra vegetal, presentan bajos niveles productivos. La respuesta observada está favorablemente influenciada por la presencia de especies colonizadoras, que también presentan, en el tratamiento con compost para ambas mezclas, rendimientos superiores a pastos cultivados en la zona del estudio.

Del análisis integral realizado para el sustrato y los sistemas vegetales, se concluye que los tranques de relaves contemporáneos de las mineras de cobre, muestran un bajo grado de toxicidad. Por lo anterior, la mayoría de las especies analizadas presentan potencial para adaptarse a estos medios sin necesidad de aplicar enmiendas orgánicas. Sin embargo, según experiencia y criterio del consultor, el crecimiento y la sobrevivencia de las especies vegetales en estudio son inferiores a los estándares observados en condiciones naturales. Este fenómeno indica que existen limitantes climáticas y/o químicas que están afectando el desarrollo de las especies vegetales sobre el tranque en estudio. La conclusión anterior, corrobora los antecedentes de investigación, a nivel mundial, que indican la necesidad de acelerar los procesos de estabilización de la vegetación, utilizando para ello, entre otros componentes, enmiendas orgánicas y riego en zona de sequía. Lo anterior se fundamenta en la dificultad de lograr que estos sistemas sean autosustentables en el largo plazo (más de 10 a 12 años con vegetación).

Aunque en los ensayos que se están realizando, a excepción de los pastos colonizadores, las pruebas con compost muestran resultados desfavorables para los vegetales analizados. Se estima que esta respuesta obedece a



Zona cordillerana área Minera Los Pelambres,  
comuna de Los Vilos y Salamanca, provincia del Choapa, región de Coquimbo, Chile.

causas ajenas a la probada eficacia de la enmienda, tales como escasez hídrica, en respuesta al criterio general aplicado en esta investigación en relación con “riego sólo de emergencia” y la probable baja calidad del producto comercial disponible en el mercado al momento del ensayo.

De manera general, y a modo de resumen de lo anteriormente expuesto, se concluye lo siguiente:

El presente estudio valida las experiencias internacionales para el caso de las mineras de cobre en Chile. Así, los tranques de relaves contemporáneos, a través técnicas y manejos adecuados, se muestran propicios al desarrollo de plantaciones arbóreas, arbustivas y herbáceas.

## 6.2 Recomendaciones

Las últimas investigaciones desarrolladas a nivel mundial, indican que la aplicación de técnicas de forestación en relaves, mediante uso de vegetación, es la mejor vía para estabilizar y revertir efectos ambientales no deseados causados por los tranques de relaves después de su abandono y/o cierre. Sin embargo, las limitaciones en el crecimiento y el establecimiento de la mayoría de las especies vegetales estudiadas en el presente estudio sugieren las siguientes recomendaciones:

- Implementar un sistema de riego: En clima árido o semiárido se recomienda el uso de un sistema de riego para limitar el estrés hídrico de las plantas y compensar el bajo poder de retención de humedad del sustrato de relaves. Este manejo permite mejorar de manera significativa el establecimiento y el crecimiento de las plantas en la forestación.
- Mejorar las condiciones físico-químicas del sustrato y acelerar los procesos biológicos: Aunque el presente estudio indica que el desarrollo de plantas directamente sobre sustrato de relave es factible, se recomienda utilizar el apoyo adicional de otros componentes que activan y aceleran procesos relacionados con la fijación del nitrógeno, con el desarrollo adecuado del ciclo de los nutrientes, con la descomposición orgánica y, en general, estimulan procesos microbiológicos. Dentro de esta línea de trabajo antecedentes internacionales destacan el uso de las enmiendas orgánicas como el compost y el empleo de otros microorganismos que actúan mediante simbiosis con las plantas, como las micorrizas (asociación de hongo con raicillas que

mejora el poder absorbente de aguas y nutrientes). Adicionalmente, al probado efecto benéfico que producen estos componentes bióticos sobre los sustratos de relaves, presentan otras ventajas comparativas con relación a mostrar un fácil manejo técnico y bajo costo de implementación. Es sabido que Minera Los Pelambres cuenta con una planta de compostaje destinada a procesar los desechos domésticos, generados de dos casinos internos de la empresa. En consecuencia, se recomienda realizar nuevos ensayos donde se pruebe éste compost más otras especies nativas, provenientes del vivero de MLP.

- Considerar especies vegetales que colonizan de manera natural los tranques de relaves: Se recomienda considerar el uso de especies nativas de la zona donde se ubican los relaves a forestar y, de manera particular, especies que han colonizado naturalmente, después del cierre, los tranques. El uso de estas especies permitiría disminuir o no considerar el manejo y costo asociado a la forestación (riego y fertilización). Estudios previos del consultor, sumado a observaciones visuales realizadas durante el desarrollo del presente ensayo, permiten destacar dos especies arbustivas que presentan, para las condiciones naturales del tranque, un crecimiento óptimo y una importante propagación desde el inicio de la etapa de cierre. Estas dos especies pertenecen al género *Baccharis* (*Baccharis linearis* y *Baccharis salicifolia*). Ambas, evidencian una buena alternativa de forestación.

Respecto a la observación anterior, se destaca la importancia de desarrollar investigaciones que permitirían precisar técnicas que aceleran la recuperación natural de la vegetación en tranque de relaves. Para ello, se recomienda:

- Identificar las especies que colonizan naturalmente los tranques de relaves,
- Estudiar cuáles son los mecanismos fisiológicos que permiten a estas especies adaptarse a las condiciones físico-químicas restrictivas de los sustratos de relaves y,
- Desarrollar técnicas que mejoren la propagación y el establecimiento de estas especies sobre este tipo de sustratos.

Dirigir los actuales estudios hacia este tipo de análisis, permitiría adquirir antecedentes novedosos y ambientalmente óptimos para mejorar las técnicas de forestación sobre los tranques de relaves y disminuir de manera significativa los costos asociados a la mitigación de los impactos ambientales durante la etapa de cierre.

## 7. Bibliografía

**Acevedo E.; Carrasco A. 2005.** Criterios de Calidad de Suelo Agrícola, Universidad de Chile, (Estudio encargado para el Servicio Agrícola y Ganadero "SAG", en etapa de revisión).

**Aery, N.C., Tiagi, Y.D., Khanderwal, R.K., 1987.** Studies on the efficacy of certain plants for the stabilization of tailings dam at Zawar Mines, India. In: Lindberg, S.E., Hutchinson, T.C. (Eds.), Heavy Metals in the Environment, Proceedings of the International Conference, New Orleans, vol. 1. CEP Consultants, Edinburgh, pp. 445-447.

**Alcaíno, E., Benedetti, S., Perret, S. y Valdebenito, G. 1995.** Acacia saligna una especie multipropósito: Su potencial forrajero en la provincia del Choapa. IV Región. Chile. Avances en Silvicultura. Programas y Resúmenes.

**Alcayaga S. 1986.** Reconocimiento de Suelos.

**Alloway A. 1995.** Estudio de Lixiviación de Cadmio, Mercurio y Plomo en suelos derivados de cenizas volcánicas. (Facultad de Ciencias Agrarias y Facultades de Ciencias Químicas de la Universidad Austral de Chile).

**ATM Ingeniería Ltda. 2001.** Instalación de Parcelas de Seguimiento de la Recuperación del Tranque de Relaves El Chinche y Monitoreo de Referencia en Huerto Frutal. Minera Los Pelambres.

**ATM Ingeniería Ltda. 2002.** Revisión del Plan de Revegetación sobre el Tranque de Relaves Durazno I. COEUR, Cía. Minera CDE Petorca.

**ATM Ingeniería Ltda. 2002.** Seguimiento de Recuperación del Tranque de Relaves El Chinche Temporada 2002. Minera Los Pelambres.

**ATM Ingeniería Ltda. 2003.** Caracterización de la Fauna Asociada al Tranque de Relaves El Chinche. Minera Los Pelambres.

**ATM Ingeniería Ltda. 2005.** Caracterización de Área Afectada por Incidente de Derrame de Relaves en Sistema de Transporte de Relave. CODELCO Chile.

**ATM Ingeniería Ltda. 2005.** Evaluación Ambiental del Impacto No Previsto en Avifauna Asociada al Tranque de Relaves Ovejería y Pautas de Rehabilitación de Ambientes Asociados. CODELCO Chile.

**Bach, D.A., 1973.** The use of drip irrigation for vegetating mine waste areas. In: Myin, C.L., Argall, G.O. (Eds.), *Tailing Disposal Today*, Proceedings of the First International Tailing Symposium, AZ. Miller Freeman, San Francisco, USA, pp. 563-570.

**Baker, A.J.M., 1987.** Metal tolerance. *New Phytol.* 106, 93-111.

**Barton, C.D., Marx, D., Adriano, D.C. and Bartley, H. Establishment of a Vegetative Cover to Control Acid Drainage From Coal Combustion Waste.** Paper was presented at the 2002 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, Lexington, KY.

**Bech J., Poschenrieder C., Llugany M., Bracelo J., Tume P., Tobias F.J., Baranzuela J.L., Vásquez E.R., 1997.** Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru. *The Science of the Total Environment* 1997, 83-91.

**Bergholm, J., Steen, E., 1989.** Vegetation establishment on a deposit of zinc mine waste. *Environ. Pollut.* 56, 127-144.

**Bradshaw A. D., 1984.** Ecological principles and land reclamation practice. *Landscape Planning*, 11, 35-48.

**Bradshaw, A.D., Chadwick, M.J., 1980.** *The Restoration of Land.* Blackwell Scientific Publications, Oxford.

**Bradshaw, A.D., Humphreys, M.O., Johnson, M.S., 1978.** The value of heavy metal tolerance in the revegetation of metalliferous mine wastes. In: Goodman, G.T., Chadwick, M.J. (Eds.), *Environmental Management of Mineral Wastes.* Sijthoff & Noordhoff, The Netherlands, pp. 311-334.

**Bradshaw, A.D., Johnson, M.S., 1992.** Revegetation of metalliferous mine waste: the range of practical techniques used in Western Europe. In: *Minerals, Metals and the environment.* Institute of Mining and Metallurgy, London, 481 pp.

**Bradshaw, A.D., Snaydon, R.W., 1959.** Population differentiation within plant species in response to soil factors. *Nature* 183, 129-130.

**Buckman y Brady, 1977.** *Naturaleza y Propiedades de los Suelos.*

**Chaulya S.K., R.S. Singh, Chakraborty M.K., Dhar B.B., 1999.** Numerical modelling of biostabilisation for a coal mine overburden dump slope. *Ecological Modelling* 114, 275-286.

**Chiu K.K., Ye Z.H., Wong M.H., 2006.** Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study. *Bioresource Technology* 97, 158–170.

**Craze, B., 1979.** Rehabilitation of tailings dumps at Captains Flat, New South Wales. In: Hore-Lacy, L. (Ed.), *Mining Rehabilitation*. Australian Mining Industry Council, WA, pp. 91-94.

**Crompton H. 1992.** *Acacia saligna* For Dryland Fodder and Soil Stabilization. NFT Highligts. Canberra Australia.

**Daniels W. and Nagle S. 2002.** Effect of Biosolids Application on Ground Water Nitrate-N Levels in Sand and Gravel Mine Reclamation in Virginia. Paper was presented at the 2002. National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Lexington, KY.

**Del Fierro, P., 1998.** Experiencia Silvicultural del Bosque Nativo de Chile. Recopilación de Antecedentes Para 57 Especies Arbóreas y Evaluación de Practicas Silviculturales. CONAF - GTZ.

**Dollhopf D., Mehlenbacher J., 2002.** Alkaline Industrial By-Product Effects on Plant Growth in Acidic-Contaminated Soil Systems. Paper was presented at the 2002 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, Lexington, KY.

**Donoso, C. y Ramírez., 1994.** *Arbustos nativos de Chile Guía de reconocimiento*. Ed. Marisa Cúneo, Valdivia.

**Down, C.G., 1975.** Problems in vegetating metal-toxic mine wastes. In: Jones, M.J. (Ed.), *Minerals and the Environment, Proceedings of an International Symposium*, London. Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 395-408.

**Dutta R. K., Agrawal M., 2003.** Restoration of opencast coal mine spoil by planting exotic tree species: a case study in dry tropical region. *Ecological Engineering* 21, 143–151.

**Espinoza, N. (1988).** *Malezas del Sur de Chile*. Ed. INIA - BASF. Temuco.

**Firth, J.N.M., Johnson, M.S., Richards, I.G., 1981.** The reclamation of lead mine tailings at Parc Mine, North Wales. In: *Trace Substances in Environmental Health*. XV. Columbia, MO, USA, pp. 333-338.

**Gadgil, R.L., 1969.** Tolerance of heavy metals and the reclamation of industrial waste. *J. Appl. Ecol.* 6, 247-259.

**Gartside, D.W., McNeilly, T., 1974.** Genetic studies in heavy metal tolerant plants. II. Zinc tolerance in *Agrostis tenuis*. *Heredity* 33, 303-308.

**Gemmell, R.P., Goodman, G.T., 1978.** Problems of grassland maintenance on metalliferous smelter wastes. In: Goodman, G.T., Chadwick, M.J. (Eds.), *Environmental Management of Mineral Wastes*. Sijthff & Noordhff, The Netherlands, pp. 335-336.

**Goodman, G.T., Pitcairn, C.E.R., Gemmell, R.P., 1973.** Ecological factors affecting growth on sites contaminated with heavy metals. In: Hutnik, R.J., Davis, G. (Eds.), *Ecology and Reclamation of Devastated Land*, vol. 2. Gordon & Breach, London, pp. 149-173.

**Ginocchio, R.; Rodriguez, P.; 2006,** El cobre en el suelo, *InduAmbiente*, pp. 28 -30.

**GRANT C. D., CAMPBELL C. J., CHARNOCK N. R., 2002.** Selection of species suitable for derelict mine site rehabilitation in new southwales, Australia. *Water, Air, and Soil Pollution* 139, 215–235.

**Grigg, A. H. 2002.** Litter Descomposition on Directly Revegetated Tailings at the Didston Gold Mine, North Queensland, Australia. Paper was presented at the 2002 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, Lexington, KY.

**Halofsky J. E., McCormick L. H., 2005.** Effects of unseeded areas on species richness of coal mines reclaimed with municipal biosolids. *Restoration Ecology* Vol. 13, No. 4, pp. 630–638.

**Halofsky J.E., McCormick L. H., 2005.** Establishment and growth of experimental grass species mixtures on coal mine sites reclaimed with municipal biosolids. *Environmental Management* Vol. 35, No. 5, pp. 569–578.

**Héry M., Philippot L., Mériaux E., Poly F., Le Roux X., Navarro E., 2005.** Nickel mine spoils revegetation attempts: effect of pioneer plants on two functional bacterial communities involved in the N-cycle. *Environmental Microbiology* 7(4), 486–498.

**Hetrick B.A.D., Wilson G.W.T., Figge D.A.H., 1994.** The influence of mycorrhizal symbiosis and fertilizer amendments on establishment of vegetation in heavy metal mine spoil. *Environmental Pollution* 86 , 171-179.

**Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., Figge, D.A.H., 1994.** The influence of mycorrhizal symbiosis and fertiliser amendments on establishment of vegetation in heavy metal mine spoil. *Environ. Pollut.* 86, 171-179.

**Hoffmann, A. et al, 1998.** Plantas Alto Andinas en la Flora Silvestre de Chile. Ed. Fundación Claudio Gay, Santiago.

**Hoffmann, A., 1979.** Flora Silvestre de Chile Zona Central. Ed. Fundación Claudio Gay, Santiago.

**Instituto Nacional de Normalización (INN),** Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos. Norma Chilena Oficial N°1333. Aprobada por el Decreto Supremo N° 87 del año 1978.

**Jefferson L. V.,** Implications of Plant Density on the resulting community structure of mine site land. *Restoration Ecology* Vol. 12 No. 3, pp. 429-438.

**Jefrey, D.W., Maybury, M., Levinge, D., 1975.** Ecological approach to mining waste revegetation. In: Jones, M.J. (Ed.), *Minerals and the Environment, Proceedings of an International Symposium, London, 1975.* Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 371-385.

**Jochimsen M. E., 2001.** Vegetation development and species assemblages in a long-term reclamation project on mine spoil. *Ecological Engineering* 17, 187-198.

**Johnson, M.S., Bradshaw, A.D., 1977.** Prevention of heavy metal pollution from mine wastes by vegetative stabilisation. *Trans. Inst. Min. Metall. A* 86, 47-55.

**Johnson, M.S., Bradshaw, A.D., Handley, J.F., 1976.** Revegetation of metalliferous fluorspar tailings. *Trans. Inst. Min. Metall. A* 85, 32-37.

**Johnson, M.S., McNeilly, T., Putwain, P.D., 1977.** Revegetation of metalliferous mine spoil contaminated by lead and zinc. *Environ. Pollut.* 12, 261-277.

**Jowett, D., 1959.** Adaptation of a lead tolerant population of *Agrostis tenuis* to low soil fertility. *Nature* 184, 43.

**Keeling S.M., Werren G., spring 2005.** Phytoremediation: the uptake of metals and metalloids by rhodes grass grown on metal-contaminated soil. *Remediation*, 53-61.

**Loué, A. 1988.** Los Microelementos en la Agricultura. Ediciones Mundi Prensa. Madrid.

**Lubke R. A., Avis A. M., 1998.** A review of the concepts and application of rehabilitation following heavy mineral dune mining. *Marine Pollution Bulletin* Vol. 37, Nos. 8-12, pp. 546-557.

**Ma Y., Dickinson N.M., Wong M.H., 2003.** Interactions between earthworms, trees, soil nutrition and metal mobility in amended Pb/Zn mine tailings from Guangdong, China. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 1369–1379.

**Ma Y., Dickinson N.M., Wong M.H., 2006.** Beneficial effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on establishment of leguminous trees on Pb/Zn mine tailings. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 1403–1412.

**Marticorena, C. y M. Quezada.1985.** Catálogo de la flora vascular de Chile. *Gayana Botánica* 42(1-2).

**Martínez-Ruiz C., Fernández-Santos B., 2005.** Natural revegetation on topsoiled mining-spoils according to the exposure. *Acta Oecologica* 28, 231–238.

**Mench M., Bussière S., Boisson J., Castaing E., Vangronsveld J., Ruttens A., De Koe T., Bleeker P., Assunção A., Manceau A., 2003.** Progress in remediation and revegetation of the barren Jales gold mine spoil after in situ treatments. *Plant and Soil* 249: 187–202.

**Merlet B. y Correa F. 1997.** Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile, CIREN CORFO.

**Norland M.R., Veith D.L., 1995.** Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal solid waste compost. *Journal of Hazardous Materials* 41, 123-134.

**Palmer, J.P., 1990a.** Reclamation and decontamination of metalliferous mining tailings. In: Norton, P. (Ed.), *Acid Mine Waste in Pyritic Environments*, Proceedings of the Conference, Lisbon, 1990. International Mine Waste Association, pp. 223-235.

**Palmer, J.P., 1990b.** Reclaiming metalliferous tailings in Wales. *Mining Magazine* (February), pp. 112-115.

**Peterson, H.B., Nielson, R.F., 1978.** Heavy metals in relation to plant growth on mine and mill wastes. In: Goodman, G.T., Chadwick, M.J. (Eds.), *Environmental Management of Mineral Wastes*. Sijthoff & Noordhoff, The Netherlands, pp. 297-309.

**Raghu V., 2001.** Accumulation of elements in plants and soils in and around Mangampeta and Vemula barite mining areas, Cuddapah District, Andhra Pradesh, India. *Environment Geology* 40, 1265-1277.

**Sharma K. D., Kumar S., Gough L. P., 2000.** Rehabilitation of lands mined for limestone in the Indian desert. *Land Degrad. Develop.* 11, 563-574.

**Shetty, K.G., Hetrick, B.A.D., Figge, D.A.H., Schwab, A.P., 1994.** Effects of mycorrhizae and other soil microbes on revegetation of heavy metal contaminated mine spoil. *Environ. Pollut.* 86, 181-188.

**Shettyfl K.G., Hetrickfl B.A. D., Figge D.A. H., Schwab A.P., 1994.** Effects of mycorrhizae and other soil microbes on revegetation of heavy metal contaminated mine spoil. *Environmental Pollution* 86, 181-188.

**Smith, R.A.H., Bradshaw, A.D., 1972.** Stabilization of toxic mine wastes by the use of tolerant plant populations. *Trans. Inst. Min. Metall. A* 81, 230-237.

**Smith, R.A.H., Bradshaw, A.D., 1979.** The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes. *J. Appl. Ecol.* 16, 595-612.

**Thorne, G., Hore-Lacy, I., 1979.** Revegetation of tailing dumps at Broken Hill, NSW. In: Hore-Lacy, I. (Ed.), *Mining Rehabilitation*. Australian Mining Industry Council, WA, pp. 87-90.

**Tordoff G.M., Baker A.J.M., Willis A.J., 2000.** Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere* 41, 219-228.

UK Department of the Environment, Minerals Division, 1994. *The Reclamation and Management of Metalliferous Mining Sites*. HMSO, London.

**Urquhart, C., 1971.** Genetics of lead tolerance in *Festuca ovina*. *Heredity* 26, 19-33.

**Van Rensburg L., Maboeta M. S., Morgenthal T. L., 2004.** Rehabilitation of co-disposed diamond tailings: Growth medium rectification procedures and indigenous grass establishment. *Water, Air, and Soil Pollution* 154, 101-113.

**Vangronsveld J., Van Assche F., Clijsters H., 1995.** Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: in situ metal immobilization and revegetation. *Environmental pollution* 87, 51-59.

**Vita, A. 1989.** Ecosistemas de Bosques y Matorrales Mediterráneos y sus Tratamientos Silviculturales en Chile. FO: DP/CHI/017 Documento de Trabajo N°21.

**Watkin, E.M., Watkin, J., 1982.** Tailings reclamation in eastern Canada. *World Mining* (December), pp. 61-65.

**Weston, R.L., Gadgil, P.D., Salter, B.R., Goodman, G.T., 1965.** Problems of revegetation in the lower Swansea Valley, an area of extensive industrial dereliction. In: Goodman, G.T., Edwards, R.W., Lambert, J.M. (Eds.), *Ecology and the Industrial Society* (a Symposium of The British Ecological Society). Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 297-327.

**Wilfried H.O. Ernst, 2005.** Phytoextraction of mine wastes - Options and impossibilities. *Chemie der Erde* 65 S1, 29-42.

**Williamson, A., Johnson, M.S., 1981.** Reclamation of metalliferous mine wastes. In: Lepp, N.W. (Ed.), *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants*, vol. 2. Applied Science Publishers, Barking, Essex, UK, pp. 185-212.

**Ye Z.E., Wong J.W.C., Wong M.H., Baker A.J.M., Shu W.S., Lan C.Y., 2000.** Revegetation of Pb/Zn Mine tailings, Guangdong Province, China. *Restoration Ecology* Vol.8 No. 1, pp. 87-92.

**Ye Z.E., Wong J.W.C., Wong M.H., Lan C.Y., Baker A.J.M., 1999.** Lime and pig manure as ameliorants for revegetating lead/zinc mine tailings: a greenhouse study. *Bioresource Technology* 69, 35-43.

**Zhang Z. Q., Shu W. S., Lan C. Y., Wong M. H., 2001.** Soil seed bank as an input of seed source in revegetation of lead/zinc mine tailings. *Restoration Ecology* Vol. 9 No. 4, pp. 378-385.

**Zienkiewicz P. and Simmons J. 2002.** A Method for Evaluating the Risk of Backfilling coal Mines With coal Combustion By Products and Steel Slag. Paper was presented at the 2002 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Lexington, KY.

Mayo 2005



278

.











Julio 2005





Agosto 2005

286





Noviembre 2005

288









Febrero 2006







