



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

BIOACUMULACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN ESPECIES ESTABILIZADORAS (*Acacia saligna* (Labill.) H. Wendl y *Eucalyptus camaldulensis* (Dehnh)) EN TRANQUES DE RELAVES

Memoria para optar al Título

Profesional de Ingeniero Forestal

TOMÁS MEDINA QUINTANILLA

Prof. Guías: Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz Ing. Forestal M.Sc., Ph.D.

Sra. María Adriana Carrasco Rimassa Química M. Sc.

Santiago, Chile

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN
DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

BIOACUMULACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN ESPECIES
ESTABILIZADORAS (*Acacia saligna* (Labill.) H. Wendl y *Eucalyptus*
camaldulensis (Dehnh)) EN TRANQUES DE RELAVES

Memoria para optar al Título

Profesional de Ingeniero Forestal

TOMÁS MEDINA QUINTANILLA

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz
Prof. Guía Sra. María Adriana Carrasco Rimassa
Prof. Consejero Sr. Manuel Ibarra
Prof. Consejero Sr. Gabriel Mancilla E.

**Dedicada a mis padres y hermanos
por todo el amor y apoyo incondicional
que me han entregado durante toda mi vida
a mi pareja por todo el cariño, amor y confianza**

Índice de contenido

1. RESUMEN	9
2. ABSTRACT	10
3. INTRODUCCIÓN	11
4. OBJETIVOS	15
4.1 Objetivo general.....	15
4.2 Objetivos específicos	15
5. MATERIALES Y MÉTODOS	16
5.1 Materiales.....	16
5.1.1 Área de estudio	16
5.1.2 Descripción general del sustrato de relave	17
5.2 Métodos	17
5.2.1 Muestreo y almacenamiento de tejidos vegetales y sustratos de relave	17
5.2.1.1 Selección espacial de los puntos de muestreo	17
5.2.1.2 Muestreo tejidos vegetales	19
5.2.1.3 Muestreo suelo (sustrato).....	19
5.2.2 Análisis de laboratorio.....	19
5.2.3 Análisis estadístico	20
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
6.1 Propiedades químicas básicas, elementos traza disponibles y totales en los sustratos y suelos analizados.	21
6.1.1 Fe (disponible y total)	22
6.1.2 Cu (disponible y total).....	23
6.1.3 Mn (disponible y total).....	23
6.1.4 Zn (disponible y total).....	26

6.2 Elementos traza acumulados en los diferentes tejidos vegetales según tipo de sustrato.	26
6.2.1 Análisis para <i>Acacia saligna</i>	26
6.2.1.1 Hierro (Fe)	26
6.2.1.2 Cobre (Cu)	27
6.2.1.3 Manganeso (Mn)	27
6.2.1.4 Cinc (Zn)	28
6.2.2 Análisis <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	29
6.2.2.2 Hierro (Fe)	30
6.2.2.3 Cobre (Cu)	30
6.2.2.4 Manganeso (Mn)	30
6.2.2.5 Cinc (Zn)	31
6.3 Pruebas de hipótesis	32
6.3.1 Comparación de medias de la concentración de elementos trazas entre grupos, para cada tejido vegetal y cada especie.	32
6.3.2 Comparación de medias de la concentración de elementos para cada tejido vegetal entre especies, para el grupo relave.	33
6.3.3 Comparación de medias de la concentración de elementos entre tejidos vegetales, para el grupo relave y para cada especie.	33
6.3.4 Comparación de medias de otras propiedades químicas del suelo entre los grupos control y relave, para cada profundidad.	33
6.3.5 Comparación de medias de otras propiedades químicas del suelo entre distintas profundidades de suelo, para cada grupo.	33
6.4 Análisis de correlación	33
6.4.1 Análisis de correlación entre las propiedades del suelo, para el grupo relave y para el grupo control.	33
6.4.2 Correlación de Spearman y valor p entre las propiedades del suelo para el grupo control	34

6.4.3	Correlación de Spearman y valor p entre las propiedades del suelo para el grupo relave.....	35
6.4.4	Análisis de correlación de los elementos disponibles y totales del suelo a distintas profundidades con la concentración de elementos en cada uno de los tejidos vegetales, para cada grupo.	36
7.	CONCLUSIONES	40
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	41
	Apéndice I: Media entre diferentes sustratos para los elementos trazas acumulados en tejidos	45
	Apéndice II: Medias para propiedades químicas, elementos trazas disponibles y totales para diferentes profundidades y sustratos.	48
	Apéndice III: Valores de probabilidad de diferentes test que contrarresta la concentración de elementos traza.....	50
	Apéndice IV: Resultados brutos para contenido de elementos traza estudiados en diferentes tejidos y sustratos.....	53
	Anexo I: Antecedentes generales de suelos en las III, IV y V regiones	65
	Anexo II: Concentraciones de elementos trazas para varias especies en tejidos de hojas maduras (Kabata-Pendias (2000)).....	66

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Algunas propiedades químicas de sustratos de los tranques de relave.....	17
Cuadro 2. Coordenadas sitios control.....	18
Cuadro 3. Valores P para la Correlación de Spearman entre las propiedades del suelo para el grupo control.....	35
Cuadro 4. Valores P para la Correlación de Spearman entre las propiedades del suelo para el grupo relave.....	36
Cuadro 5. Valores P para la Correlación de Spearman de los elementos traza disponibles y totales del suelo a distintas profundidades (0-20 y 20-40) con la concentración de elementos de cada uno de los tejidos vegetales, para el grupo control.....	38
Cuadro 6. Valores P para la Correlación de Spearman de los elementos traza disponibles y totales del suelo a distintas profundidades (0-20 y 20-40) con la concentración de elementos de cada uno de los tejidos vegetales, para el grupo relave.....	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestreo compuesto utilizado para cada uno de los sitios seleccionados.....	18
Figura 2. Medias de pH, y CE del suelo en el grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm).....	22
Figura 3. Medias de elementos traza disponibles en el suelo para grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm).....	24
Figura 4. Medias de Fe totales del suelo en el grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm).....	25
Figura 5. Medias de Cu, Mn y Zn totales del suelo en el grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm).....	25
Figura 6. Medias de las concentraciones de elementos traza para <i>Acacia saligna</i> en el grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.....	27
Figura 7. Medias de las concentraciones de algunos elementos para <i>Acacia saligna</i> en el grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.....	28
Figura 8. Medias de las concentraciones de macronutrientes para <i>Acacia saligna</i> en el grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.....	29

Figura 9. Medias de las concentraciones de elementos traza para <i>Eucalyptus camaldulensis</i> en grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.....	30
Figura 10. Medias de las concentraciones de N, P y K para <i>Eucalyptus camaldulensis</i> en grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.....	31
Figura 11. Medias de las concentraciones de N, P y K para <i>Eucalyptus camaldulensis</i> en grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.....	32

1. RESUMEN

Un estudio comparativo de concentraciones de algunos elementos traza fue llevado a cabo para dos especies forestales estabilizadoras, *Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis*, ubicadas sobre un complejo de tranques de relaves. Los tejidos vegetales y los sustratos fueron muestreados tanto en sitios cubiertos por los relaves como sitios aledaños (grupo control) de manera de evaluar las concentraciones y distribución de elementos traza en los tejidos de las plantas (hojas, ramas, frutos, tallos y raíces). Los sustratos de relave fueron muestreados a dos profundidades, determinándose, en cada uno de ellos, las fracciones biodisponibles y totales de los elementos Cu, Mn, Fe y Zn. En términos generales, se presentaron diferencias significativas entre los sitios muestreados, acumulándose una mayor cantidad de elementos traza en los individuos ubicados en el grupo relave tanto para tejidos vegetales como para los sustratos. En el caso de *Acacia saligna* el elemento que presentó la mayor acumulación fue el Fe, principalmente ubicado en las raíces con un comportamiento similar tanto en el grupo control como en el relave. Las concentraciones de Cu fueron más altas en las raíces de los individuos ubicados en el grupo relave. El Zn presentó mayores concentraciones en el grupo relave pero se distribuyó homogéneamente entre los tejidos. En general, el comportamiento de los elementos trazas en *Eucalyptus camaldulensis* fue similar al presentado en *Acacia saligna* salvo las concentraciones de Mo las cuales fueron menores.

En términos de sustratos no hubo diferencias significativas entre profundidades para ningún elemento traza estudiado. Las mayores concentraciones biodisponibles en orden decreciente fueron, Cu, Fe, Zn y Mn. Los elementos que presentaron los niveles más altos en el sector relave, fueron Cu, Fe y Zn. Con respecto de las concentraciones totales el orden decreciente fue Mn, Cu, Zn y Fe.

Además fue posible establecer relaciones entre las propiedades químicas del suelo y la biodisponibilidad de los elementos trazas, pero sus comportamientos difieren de acuerdo al grupo que se estaba analizando. Por ejemplo en el grupo control la acumulación de Mn en hojas, frutos, ramas y raíces se relacionan linealmente y de forma positiva con la concentración de Mn disponible en el suelo a una profundidad de 0 – 20 cm.

En el caso del grupo relave el Cu acumulado en las raíces se relacionó positivamente con el Cu disponible y total que se encontraba concentrado a una profundidad de 20 – 40 cm en el sustrato de relave. Además el tejido radicular presentó las concentraciones más altas de Cu, situación que confirma lo descrito en literatura de que la concentración de Cu en los tejidos de las plantas está en función de los niveles de Cu presentes en el suelo.

Palabras claves: biodisponibilidad, elementos trazas, bioacumulación, *Acacia saligna*, *Eucalyptus camaldulensis*, relave minero.

2. ABSTRACT

A comparative study of the concentration of some trace elements for two forest species, *Acacia saligna* and *Eucalyptus camaldulensis*, growing in a mine tailing complex and in control sites as well, was made. Plant tissues and soil samples were collected in both areas. Soil samples were collected at two depths and the total and available concentrations of Cu, Fe, Mn, and Zn were determined. Total concentrations of the same elements and additionally Mo were determined for plant tissues (roots, branches, leaves, and reproductive organs). There was a significant difference between sites, with greater accumulation of trace elements in plant tissues and soils of the tailings complex. The concentration of Fe in *A. saligna*, was greater than in *E. camaldulensis*, and was mainly concentrated in the roots. The concentration of Cu was significantly greater in plant roots developed in the tailing complex. Similarly, the concentration of Zn in *A. saligna* tissues was greater in the tailing complex as compared to the control sites and no significant differences between plant tissues were found for this metal. In general, trace elements concentrations in *E. camaldulensis* were similar to the ones of *A. saligna*.

No significant differences in the concentration of Cu, Fe, Mn, and Zn were found between sampling depths. Cu, Fe and Zn presented the highest levels under the tailings complex. We were able to establish some correlations between chemical soil properties and the availability of some trace elements. For instance, in the control group the accumulation of Mn (DTPA) in leaves, fruits and roots had a positive linear relation with the levels of Mn (DTPA) in the top 20 cm depth. In the case of the tailing complex the Cu concentrations in roots were positively correlated with Total and (DTPA) Cu, at 20 – 40 cm depth, and above ground plant tissues.

Key words: trace elements, bioaccumulati3n, *Acacia saligna*, *Eucalyptus camaldulensis*, mine tailings.

3. INTRODUCCIÓN

Los relaves como pasivos ambientales

La denominación de pasivos ambientales mineros hace referencia a aquellos impactos que pueden causar los residuos (sólidos, líquidos y gaseosos) generados en el curso de las diferentes fases de un proceso minero, y que han sido depositados en tranques u otra forma de almacenamiento. El inadecuado manejo y abandono de estos residuos han provocado impactos ambientales en todo el mundo, debido a la dispersión en el suelo, aire y en el agua, de residuos y metales asociados (McCall et al., 1995). Uno de estos pasivos son los relaves, los cuales son acumulaciones de roca molida abandonadas por las mineras una vez que los metales de interés como plomo, cobre, plata u oro han sido extraídos de las rocas minerales que los contuvieron. (Santibáñez et al., 2008). En general, los relaves son almacenados en tranques ya que la mayoría no pueden ser reutilizados en los procesos productivos. En faenas mineras ubicadas en zonas cordilleranas, estas estructuras se construyen en quebradas de ríos donde normalmente se realizan obras de desvíos de los cauces de agua, mediante la construcción de túneles “by-pass”. Luego se cierra la cuenca a través de un muro contenedor que define de esta manera la cubeta sobre la cual se almacenarán los residuos (López P., et al 2003).

La depositación de relaves, conformando sustratos artificiales, impacta directamente en la pérdida de hábitat de la vida silvestre y en la reducción de tierras para cultivos. Indirectamente los tranques o embalses de relave abandonados al no presentar una cobertura vegetal que los proteja de la acción de los agentes naturales, facilitan tanto el desplazamiento de partículas ricas en metales hacia áreas circundantes por efecto del viento, cómo la lixiviación y el consiguiente desplazamiento de estas partículas hacia estratos más profundos, pudiendo eventualmente contaminar ambientes circundantes (Dold y Fontboté, 2001).

Fitoestabilización de relaves mineros

La fitoestabilización es una tecnología comúnmente utilizada para proveer de una cobertura vegetal a sectores altamente contaminados, con la finalidad de reducir la movilidad de los metales. Ésta tecnología incluye en algunos casos la utilización de biosólidos para mejorar el establecimiento de especies de plantas tolerantes a ciertas concentraciones de metales, denominadas como especies metalófitas. La aplicación de este tipo de tecnologías es preferida porque es una estrategia alternativa de remediación comparativamente más económica que otras tecnologías, y consigue el mismo fin; esto es, estabilizar los metales contaminantes e impedir la exposición tanto humana como animal a partículas suspendidas en la atmósfera, además evita la contaminación del suelo y del agua (Santibáñez et al., 2008). Por otra parte, la fitoestabilización es una técnica estética y amigable con el medio ambiente, por lo que se presenta como una forma de descontaminación socialmente aceptable para las comunidades circundantes (Blaylock et al., 2000).

Bioacumulación y fitotoxicidad de metales pesados

La bioacumulación es un aumento de la concentración de un elemento químico en un organismo biológico en un cierto plazo, de forma que llega a ser superior a la del elemento químico en el ambiente. La toxicidad está causada frecuentemente por la imposibilidad del organismo afectado para mantener los niveles necesarios de excreción de estos productos químicos (Navarro-Aviñó et al., 2007).

Se ha demostrado que los efectos primarios de toxicidad por elementos trazas en vegetales se producen en las raíces, las que muestran una menor elongación después de ser expuestas a estos elementos (Marschner 1986; Lambers et al., 1998). Los principales efectos descritos en la literatura acerca de la toxicidad en esta estructura vegetal es la muerte del meristema apical de la raíz principal, estimulación de la formación de raíces secundarias y posterior inhibición del meristema apical de estas raíces secundarias cuando el nivel de concentración supera el límite de tolerancia (Marschner 1986, Baker, 1987). Por ejemplo, una vez sobrepasados los mecanismos de tolerancia al exceso de cobre acumulado en las raíces, la fisiología general de la planta sería afectada, produciéndose translocación excesiva de este elemento al vástago, donde afectaría negativamente la fotosíntesis y otras funciones celulares que resultan en síntomas visibles de toxicidad tales como menor desarrollo del vástago, clorosis y enrojecimiento de las hojas (Baker 1987; Ernst et al., 1992).

Estudios de fitotoxicidad realizados en Chile por Ginocchio (Ginocchio, 2002) revelaron que síntomas de toxicidad a nivel del vástago sólo se cuantificaron en el número de hojas nuevas producidas al exponer plántulas de *Noticastrum sericeum* (Less.) Less. Ex Phil, a sulfato de cobre, en solución líquida. Estas plántulas también mostraron síntomas visibles de intoxicación por cobre, con vástagos rojizos y cloróticos. El proceso de intoxicación se agrava durante el paso por distintas cadenas tróficas, debido a que los niveles de incorporación superiores sufren un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones, siendo en éstos donde se hallan los mayores niveles de contaminantes (Navarro-Aviñó et al., 2007). Estudios descritos en la literatura establecen relaciones entre diferentes compartimientos de la cadena trófica basándose en la acumulación de metales pesados. Notten (2005), estableció una relación positiva entre la bioacumulación de metales (Cu, Zn, Cd y Pb) en tejidos foliares de *Urtica dioica* y un invertebrado (*Cepaea nemoralis*) que se alimentaba de ésta, sugiriendo que la transferencia de metales es más importante desde la hoja al caracol que del suelo al invertebrado.

Es importante destacar que la absorción, acumulación y posterior translocación de metales pesados desde la raíz hasta los órganos comestibles deben seguir una secuencia de cambios físicos y químicos para que finalmente se encuentren disponibles para el consumo de herbívoros y humanos, ya sea de forma directa o a través de la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen de los siguientes factores:

- 1) el movimiento de los metales desde la solución suelo a la raíz de la planta, 2) el paso de los metales por las membranas de las células corticales de la raíz, 3) el transporte de los metales desde la células corticales al xilema desde donde la solución con metales se

transporta de la raíz a los tallos, y 4) la posible movilización de los metales desde la hoja hacia tejidos de almacenamiento usados como alimento (semillas, tubérculos y frutos) por el floema (Acevedo et al., 2005). Para que todo este movimiento sea posible es necesaria la acción de dos fuerzas, estas son 1) la osmosis que induce un potencial hídrico favorable al impulso ascendente y 2) la fuerza de succión que a través de la transpiración atrae agua desde las raíces hacia las hojas (Navarro-Aviñó et al., 2007).

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Estas diferencias en la absorción de metales pueden ser atribuidas a la capacidad de retención del metal por el suelo y a la interacción planta-raíz-metal. El comportamiento de la planta frente a los metales pesados depende de cada metal (Acevedo et al., 2005).

Otro aspecto importante a considerar es la presencia simultánea de los metales pesados, ya que sus efectos pueden ser tóxicamente sinérgicos como antagonísticos (la toxicidad se reduce al mezclarse), por tanto existe cierta dificultad para predecir los efectos reales de los contaminantes en el medio. Los efectos de un compuesto o de la mezcla de ellos pueden ser inocuos, letales o sub-letales (no matan al individuo pero producen daños a nivel genético o fisiológico). Con frecuencia, los daños sub-letales suelen ser más perjudiciales para la población en general, ya que afectan al desarrollo o a la reproducción (Navarro-Aviñó et al., 2007).

Biodisponibilidad de metales

Para que se produzcan efectos de toxicidad por elementos traza en plantas de cultivo y acumulación elevada de estos elementos en las estructuras comestibles, éstos deben encontrarse en el suelo en altas concentraciones, pero en una forma biodisponible. Se denomina concentración biodisponible a aquella fracción del total de metales acumulados en el suelo que se encuentra disponible para los seres vivos (Ginocchio et al., 2002). La biodisponibilidad de un metal en el suelo depende de diversos factores, siendo los más importantes la intensidad de la exposición (concentración y duración) del metal involucrado, de la forma química del metal, de las características físicas y químicas del suelo impactado y del grado de sensibilidad del receptor vegetal (Ginocchio et al., 2005). Los factores físicos y químicos del suelo que afectan la biodisponibilidad del metal son textura, contenido y tipo de arcillas, pH, potencial redox, materia orgánica, óxidos de Fe, Mn, y Al, y la presencia de cationes y aniones en solución. Para que el metal pueda ser absorbido por el vegetal, éste debe encontrarse asociado a dos tipos de fracciones: 1) soluble, donde los metales están como iones de metal libre y complejos metálicos solubles, y/o 2) absorbida en los sitios de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo (Acevedo et al., 2005). Además, la biodisponibilidad depende de los procesos que ocurren en el suelo como intercambio catiónico, adsorción/desorción, precipitación/disolución y formación de complejos (Acevedo et al., 2005). Por ejemplo, se ha determinado que en suelos altamente contaminados con cobre (sobre 1.000 mg kg^{-1} peso seco) de la zona central de Chile, sólo un 0,002 % del cobre total se encuentra como forma iónica en la solución suelo y un 0,04% se encuentra como formas lábiles, potencialmente utilizables por las plantas (Ginocchio et al., 2002).

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes puede variar en función de la especie vegetal, del tipo de suelo y la naturaleza de los contaminantes. Diferencias en la absorción de metales pueden ser atribuidas a la capacidad de retención del metal por el suelo y la interacción planta-raíz-metal (Acevedo et al, 2005). Sin embargo, una vez que estos metales se acumulan en los tejidos de las plantas pueden provocar desbalances nutricionales e incluso la muerte parcial (muerte de tejidos) o total de las especies vegetales.

En el caso de los tranques de relave de desechos mineros, la bioacumulación de elementos traza, particularmente metales pesados, cobra especial relevancia, por cuanto este tipo de relaves tiende a presentar altas concentraciones totales de algunos elementos. Por lo tanto, las plantas utilizadas en programas de fitoestabilización pudieran tener una mayor probabilidad de absorción de estos elementos y por ende afectar su desarrollo o el de algún organismo dentro de la cadena trófica.

Este estudio busca evaluar la posible bioacumulación, de elementos traza en dos especies arbóreas (*Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis*) establecidas en un complejo de tranques de relaves en la V Región (Valparaíso, Chile).

Como objetivos específicos se plantea: 1) Determinar la concentración de elementos traza en los tejidos aéreos y subterráneos de las especies *Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis*, en áreas de relave y circundantes, 2) Determinar las concentraciones de elementos traza totales en los sustratos de relave y la biodisponibilidad de algunos de ellos (Mn, Fe, Cu, Zn) y 3) Evaluar la relación entre algunas propiedades químicas del suelo que pudiesen relacionarse con la biodisponibilidad de algunos elementos traza estudiados.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la bioacumulación, de elementos traza en dos especies arbóreas (*Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis*) establecidas en tranques de relaves.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar algunas propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica) en los sustratos de relave y áreas control.
- Determinar las concentraciones de elementos traza totales en los sustratos de relave y áreas de control y la biodisponibilidad de algunos de ellos (Mn, Fe, Cu, Zn).
- Determinar la concentración de algunos elementos traza (Cu, Fe, Mn, Zn) en los tejidos aéreos (hojas, ramas, tallos, frutos) y subterráneos (raíces) de las especies *Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis*, en áreas de relave y circundantes.
- Evaluar la relación entre la biodisponibilidad de los elementos traza estudiados con algunas propiedades químicas analizadas en los sustratos de relave.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

5.1.1 Área de estudio

El área del estudio correspondió a los tranques de relave abandonados y forestados ubicados en la Región de Valparaíso. La precipitación media anual es de 447 mm con un periodo seco de ocho meses lo cual, evidencia una baja influencia oceánica con inviernos benignos y veranos moderados (IGM, 1984).

Estos tranques fueron forestados entre 1986 y 1990 con cortinas cortavientos (*Eucalyptus globulus*), estableciéndose además ensayos con diversas especies vegetales posibles de desarrollarse sobre este sustrato. Luego, se dio inicio a la plantación en forma masiva de aquellas especies más promisorias. Actualmente en el relave se pueden observar principalmente dos especies (*Acacia Saligna* y *Eucalyptus Camaldulensis*), además de especies nativas en menor cantidad. Ambas especies fueron seleccionadas por su rápido crecimiento y/o gran capacidad de rebrote. La superficie que abarcan los relaves es de 21 hectáreas con cerca de 20.000 árboles plantados y una cobertura vegetal que ha impedido la dispersión de las partículas por acción del viento hacia zonas aledañas. Las labores de riego y fertilización solo fueron efectuadas durante el establecimiento de las plántulas, aproximadamente los dos primeros años.

5.1.2 Descripción general del sustrato de relave

En el Cuadro 1 se puede observar algunos análisis de sustrato realizados durante el invierno del año 2006 al complejo de tranques de relave, considerando tres profundidades de muestreo. Las muestras fueron obtenidas a partir de dos calicatas dispuestas sobre la cubeta del complejo de tranques de relave y fueron analizadas en forma separada.

Cuadro 1: Algunas propiedades químicas de sustratos de los Tranques de relave.

Calicata	Profundidad cm	pH	CE dSm ⁻¹	N inorgánico	P disp.	K disp	Metales totales			
							Mn	Fe	Cu	Zn
N°1	0 – 30	7,2	2,26	4	1	10	15,30	65,2	40,0	1,52
	30 – 60	7,8	2,21	2	1	8	6,6	50,5	99,6	7,30
	60 – 90	7,7	2,29	1	1	18	4,3	31,0	125,6	11,60
N°2	0 – 30	7,5	2,38	2	1	23	4,8	27,4	136,8	16,00
	30 – 60	7,6	2,27	3	1	29	1,7	16,7	104,4	50,60
	60 – 90	7,8	2,45	1	1	24	2,0	16,9	104,2	15,40

5.2 Métodos

5.2.1 Muestreo y almacenamiento de tejidos vegetales y sustratos de relave

5.2.1.1 Selección espacial de los puntos de muestreo

Los lugares de muestreo se seleccionaron en función de realizar una comparación entre las plantas localizadas en el sustrato de los relaves con aquellas plantas de la misma especie que se encuentran alejadas de estos depósitos mineros (aguas arriba), y por ende con menores probabilidades de bioacumulación de metales pesados a partir de compuestos provenientes del complejo de relaves (sitios control).

Se utilizaron para este estudio plantas de *Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis*, por ser éstas las más frecuentes y representativas de la vegetación utilizada en la fitoestabilización del complejo de tranques de relave.

Muestreo sitios relave

La forestación del complejo de tranques de relave consideró inicialmente una plantación mixta de especies, por lo tanto, en las áreas seleccionadas, las plantas de *Acacia saligna* y *Eucalyptus camaldulensis* se distribuyen sin un patrón definido. Por tal motivo, el muestreo de suelos y plantas en los sitios seleccionados, dentro del complejo de tranques, fué de tipo compuesto, discriminando por especie y tejido vegetal (raíz, tallo, ramas, hojas y frutos). En cada uno de los cuatro sitios seleccionados dentro del complejo, se tomó un punto de referencia desde el cual se muestreó la vegetación y el suelo en un radio de 20 a 30 m, considerando el muestreo de 10 árboles de cada especie (Fig. 2).

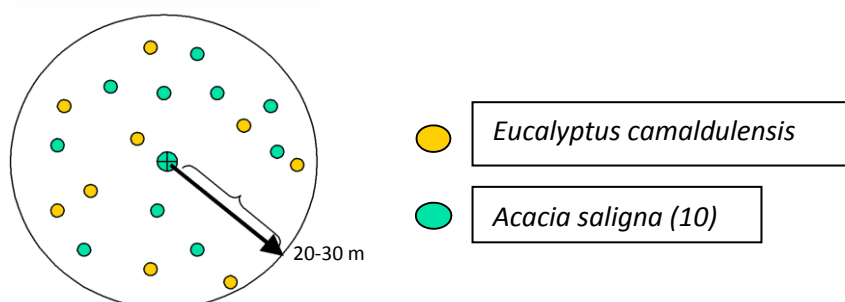


Figura 1: Muestreo compuesto utilizado dentro del complejo de relaves.

Muestreo sitios control

La vegetación en los sitios control se encuentra distribuida en parches, por lo que el muestreo de suelos y vegetación consideró cuatro sitios cubiertos por *Eucalyptus camaldulensis* y cuatro sitios cubiertos por *Acacia saligna*. En cada sitio se realizó un muestreo compuesto como el anteriormente descrito para los sitios de relave. Los sitios control se encuentran aproximadamente 30 km aguas arriba del complejo de tranques de relave.

Cuadro 2: Coordenadas de muestreo de los sitios control

<i>Acacia saligna</i>	Latitud	Longitud
SITIO 1	70°56'26.04"	32°29'00.91"
SITIO 2	70°59'05.85"	32°28'44.63"
SITIO 3	70°58'57.84"	32°28'36.59"
SITIO 4	70°59'19.87"	32°28'27.21"
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		
SITIO 1	70°56'48.48"	32°28'42.76"
SITIO 2	70°56'59.97"	32°28'42.76"
SITIO 3	70°56'55.81"	32°27'57.77"
SITIO 4	70°57'24.22"	32°28'51.64"

5.2.1.2 Muestreo tejidos vegetales

Las muestras de tejido vegetal fueron obtenidas de secciones de los individuos que no estaban inhibidas por la sombra o espaciamiento de algún individuo circundante y considerando la extracción de muestras desde los cuatro puntos cardinales. Además se seleccionaron árboles dominantes y codominantes. Para el caso de las muestras foliares, frutos y ramas, éstas fueron obtenidas a partir del tercio superior de la copa, seleccionando hojas provenientes de ramas de segundo orden. Para el caso de las muestras de tejidos subterráneos (raíces), éstas fueron extraídas a partir del tamizado de una parte de las muestras de sustrato obtenidas bajo el dosel de cada individuo seleccionado, diferenciando por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm). Las muestras de raíces fueron recolectadas hasta los 40 cm ya que no se observó presencia de éstas a mayores profundidades. El muestreo de raíces se realizó de manera compuesta de manera similar al descrito para los otros tejidos vegetales. En total, considerando las dos especies, en cada punto de muestreo se obtuvieron 14 muestras compuestas, de ellas 4 correspondieron a las de sustrato a distintas profundidades, y las 10 restantes correspondieron a los tejidos vegetales anteriormente descritos. Una vez obtenidas las muestras, éstas fueron lavadas con agua desionizada, secadas y almacenadas en un lugar fresco. Las muestras fueron trasladadas a laboratorio en donde se determinó su peso seco para posteriormente ser molidas y enviadas a análisis químico. Esta metodología fue repetida para cada tejido a analizar en cada punto de muestreo.

5.2.1.3 Muestreo suelo (sustrato)

Se consideró un total de 32 muestras compuestas de suelo y sustrato de relave. De éstas, 16 correspondieron a muestras de suelo de las áreas control, y 16 a muestras de sustrato de relave. En ambas áreas, de las 16 muestras 8 fueron recolectadas bajo el dosel de *Eucalyptus camaldulensis* y 8 de *Acacia saligna*, de éstas 8 muestras 4 fueron colectadas a una profundidad de 0 a 20 y 4 en el rango de 20 a 40 cm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno para su inmediato envío al laboratorio.

5.2.2 Análisis de laboratorio

Las muestras de tejidos vegetales (hojas, tallos, ramas, frutos y raíces) fueron secadas, molidas y analizadas por espectrometría ICP-masa. Para los análisis de Cu, Fe, Mn y Zn totales se utilizó el método de calcinación, disolución ácida de las cenizas y determinación por espectrofotometría de absorción atómica.

Las muestras de sustrato de relaves y de suelos fueron analizadas en términos de pH, CO₃, CE, Al intercambiable (si el pH era menor de 5,6) por medio de la metodología descrita por Sadzawka (2006). Además, se determinaron las concentraciones de Mn, Fe, Cu y Zn biodisponibles por medio de extracción con DTPA y posterior análisis por espectrofotometría de absorción atómica (EAA). Las concentraciones de Mo disponible no fueron incluidas en el presente estudio debido a la dificultad técnica que significa

analizar concentraciones a tan baja escala, sólo fue posible obtener Mo total. Se consideró además la determinación de metales totales mediante ICP- MS, dónde cada muestra de suelo de 0,25 g es digerida con una mezcla de ácidos perclórico, nítrico, fluorhídrico y clorhídrico. El residual es luego tratado con ácido clorhídrico diluido y analizado por espectrometría de emisión atómica de plasma inductivo.

5.2.3 Análisis estadístico

Las distintas propiedades químicas determinadas tanto para las especies vegetales, tejidos vegetales, suelos y sustratos, fueron analizadas mediante pruebas de comparación de medias (test no paramétrico de Mann-Whitney cuando las muestras son independientes y Kruskal Wallis cuando no los son). En forma adicional se realizó un análisis de correlación no paramétrico (correlación de Spearman) para determinar la posible correlación entre variables de suelo y concentración de metales en los tejidos aéreos. Los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico Minitab 13.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Propiedades químicas básicas, elementos traza disponibles y totales en los sustratos y suelos analizados.

Los valores promedios representados gráficamente para cada uno de los elementos y propiedades químicas se presentan en las figuras 2, 3, 4, y 5.

Los valores P del test de Mann Whitney que contrarresta las propiedades químicas del suelo, elementos traza disponibles y totales, para el grupo control y relave, entre distintas profundidades puede ser observado en el Cuadro III-5 del Apéndice III.

Los valores P del test de Mann Whitney que contrarresta las propiedades químicas del suelo, elementos traza disponibles y totales, para cada profundidad de medición, entre grupo control y el grupo relave puede ser observado en el Cuadro III-4 del Apéndice III.

El promedio y error de las propiedades químicas, elementos traza totales y disponibles del suelo en distintas profundidades de medición en el grupo control y relave pueden ser observadas en el Cuadro II-1 del Apéndice II.

Las propiedades químicas (pH, CE y MO) presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre el grupo control y relave. Si bien en términos estadísticos no hubo diferencias significativas de pH entre grupos, se puede observar que los valores para relave son más altos. En términos de profundidad el pH no presentó diferencias significativas ($P < 0,05$) en ninguno de los tratamientos. Los análisis para MO entregaron resultados de acuerdo a lo que se esperaba, una menor concentración promedio en los sustratos del grupo relave ($0,85 \pm 0,05$ %) debido a la baja tasa de acumulación y descomposición de los materiales orgánicos aportados por las coberturas vegetales en este tipo de sustratos; y una mayor concentración en los suelos del grupo control ($4,22 \pm 1,17$). Por otro lado, en cuanto al comportamiento de acuerdo a la profundidad medida, la MO presentó diferencias significativas ($P < 0,05$) sólo en el grupo control, siendo mayor a una profundidad de 0-20 cm. La CE fue notoriamente mayor en el grupo relave ($2,52 \pm 0,04$ dS/m) que en el control ($0,94 \pm 0,10$ dS/m), para cada profundidad analizada. Los valores de conductividad encontrados sugieren que no existirían problemas de salinidad.

Con respecto a los metales biodisponibles (DTPA), todos evidenciaron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre sustratos (control y relave) y profundidades. El comportamiento de cada metal analizado se detalla a continuación.

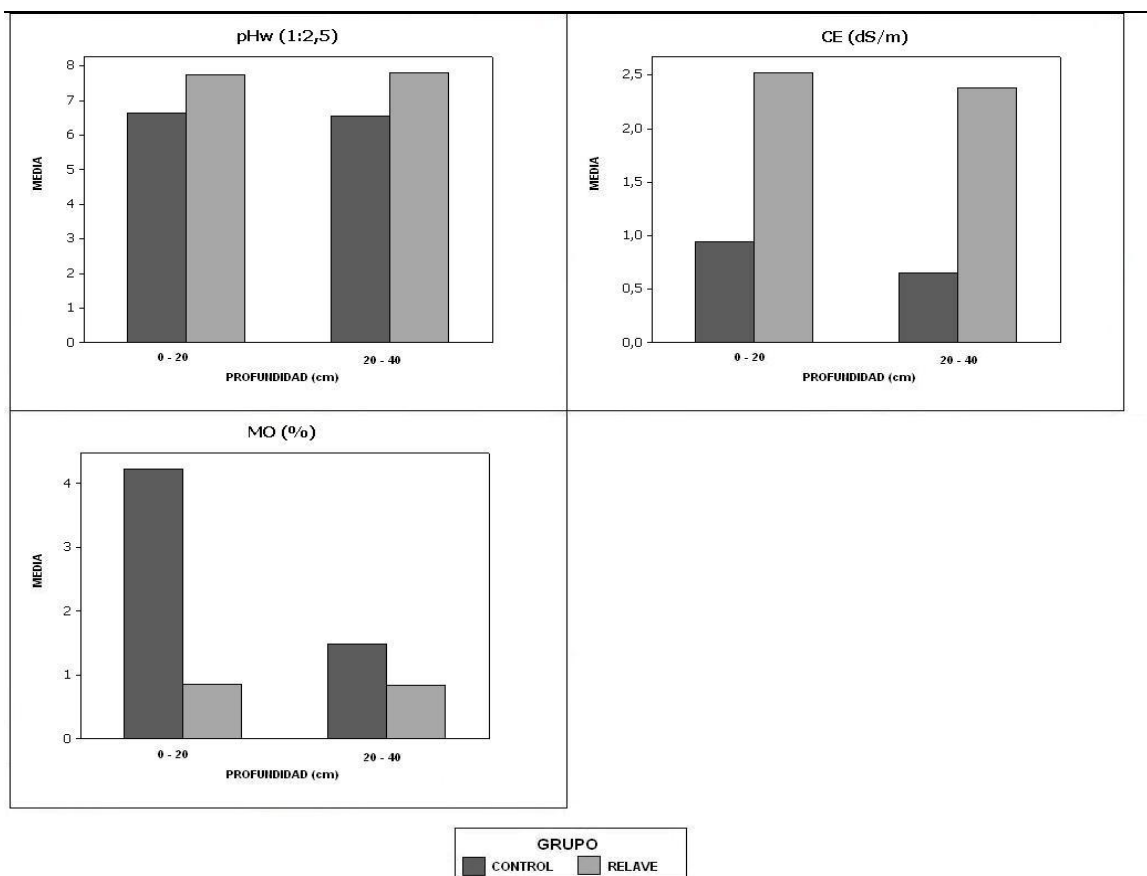


Figura 2: Medias de pH, MO y CE del suelo en el grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm).

6.1.1 Fe (disponible y total)

Entre los grupos relave y control, las diferencias de concentración promedio de Fe disponible fueron significativas ($P < 0,05$), situación que no se repitió en términos de profundidad. Los valores más altos fueron encontrados en el grupo relave coincidiendo con los resultados descritos por Villalón (2003), quien publicó que las mayores concentraciones de Fe disponible las encontró en muestras provenientes de relave, en desmedro del sitio testigo, alcanzando los máximos valores (90 mg kg^{-1}) durante el verano, periodo durante el cual se obtuvieron las muestras para el presente estudio.

La situación del Fe total fue similar presentando diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos, con mayores concentraciones promedio en el grupo relave. Probablemente relacionado al proceso productivo y tipo de material de relave generado. En términos de profundidad no hubo diferencias significativas.

6.1.2 Cu (disponible y total)

Para Cu disponible y total existieron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los grupos control y relave, no así entre profundidades por grupo. Para el Cu disponible los mayores valores promedio se presentaron en el grupo relave con $67,25 \pm 9,12 \text{ mg kg}^{-1}$ versus los $14,61 \pm 2,55 \text{ mg kg}^{-1}$ del grupo control. En el caso del Cu total se repite el máximo valor en el grupo relave con $1646,25 \pm 367,61 \text{ mg kg}^{-1}$ contra los $160,06 \pm 15,57 \text{ mg kg}^{-1}$ del grupo control. Como ejemplo los contenidos de Cu total para la zona, que se encuentra aproximadamente a 20 km aguas abajo del área de estudio, promedian los 270 mg kg^{-1} , levemente superior a lo encontrado en el grupo control (ver anexo N° 1).

6.1.3 Mn (disponible y total)

Las concentraciones promedio de Mn biodisponible presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos y entre profundidades en cada grupo analizado. En el grupo control se presentaron las mayores concentraciones principalmente en la capa superficial del sustrato (0 – 20 cm), por otro lado, en el grupo relave hubo menores concentraciones promedio, pero se repite la respuesta en términos de profundidad.

Con respecto al Mn total hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos no así entre profundidades. Las máximas concentraciones promedios las presentó el grupo relave con valores por sobre los $2571,25 \pm 30,73 \text{ mg kg}^{-1}$ contra $1393,75 \pm 34,53 \text{ mg kg}^{-1}$ del grupo control. Concentraciones de Mn total para zonas como Limarí (Región de Coquimbo), presentan concentraciones cercanas a los 800 mg kg^{-1} (Acevedo et al., 2005).

Loue (1988) sostiene que las deficiencias de Mn disponible se observan generalmente en suelos con pH básico, situación que se da en el grupo relave al presentar valores de pH cercanos a 7,9, superiores a los 6,63 del grupo control (cuadro II-1). El suelo control tiene un menor pH por lo que hay más posibilidades de tener Mn en formas disponibles. El relave aún cuando tiene concentraciones de metales totales mayores tiene niveles de biodisponibilidad menores que el control.

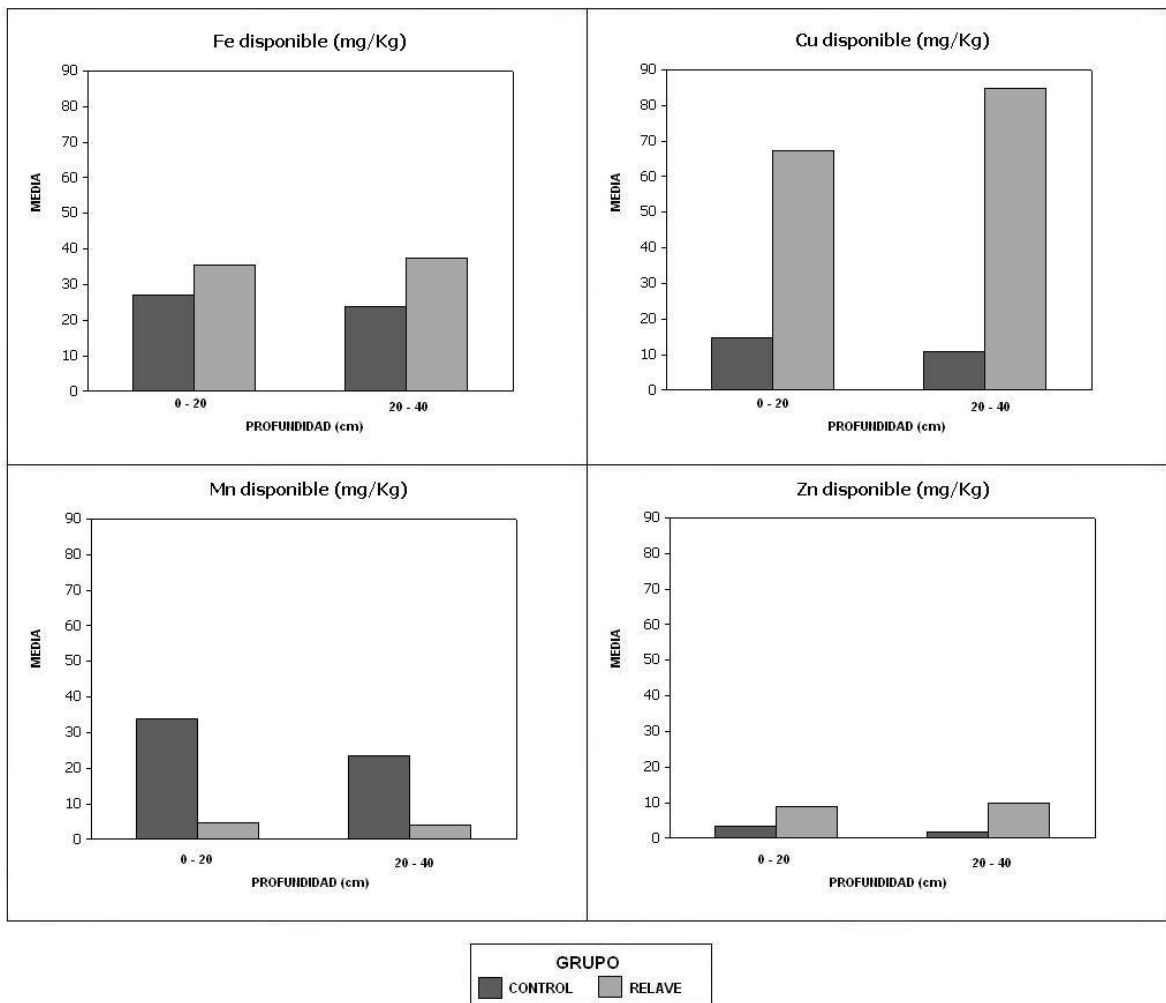


Figura 3: Medias de elementos traza disponibles en el suelo para grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm)

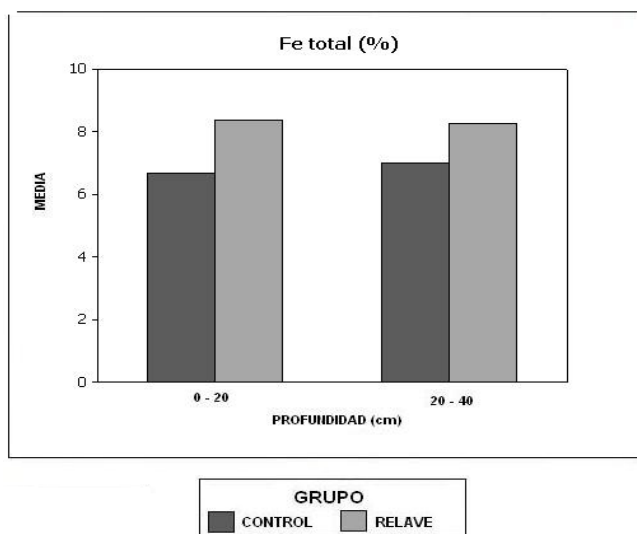


Figura 4: Medias de Fe totales del suelo en el grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm)

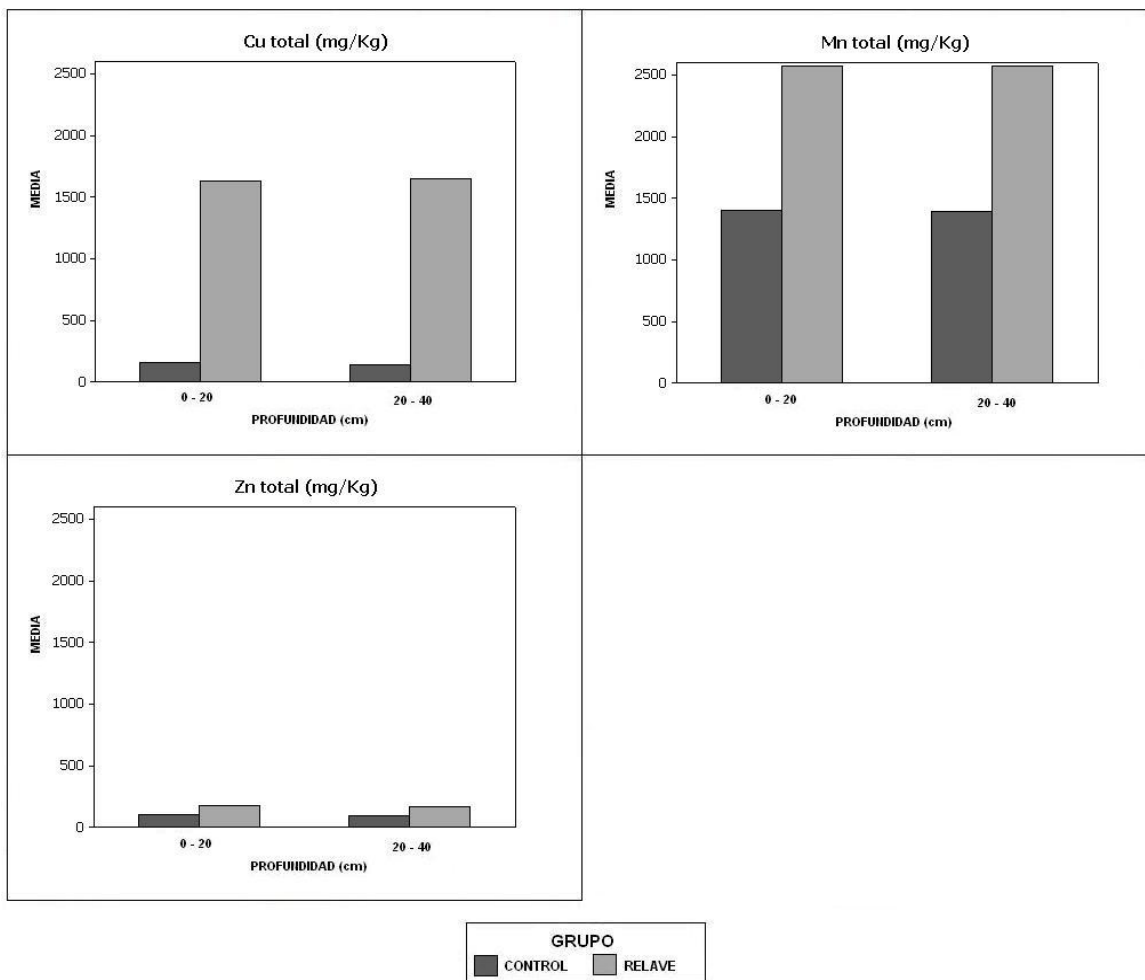


Figura 5: Medias de Cu, Mn y Zn totales del suelo en el grupo control y grupo relave a distintas profundidades (0-20 y 20-40 cm)

6.1.4 Zn (disponible y total)

Para las concentraciones de Zn disponible se presentaron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$). El grupo relave fue el que presentó las mayores concentraciones promedio específicamente las muestras obtenidas a una profundidad de 20 – 40 cm ($9,71 \pm 2,04$ mg kg⁻¹). Esto puede deberse a que los relaves se caracterizan por recibir materiales que se depositan de manera estratificada y cada estrato corresponde a diferentes momentos de procesamientos que influyen en las concentraciones de determinados elementos. Entre profundidades hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) sólo para el grupo control.

Las concentraciones promedio de Zn total presentaron diferencias significativas ($P < 0,05$) y un comportamiento similar a las concentraciones de Zn disponible, con las máximas concentraciones en el grupo relave y la mínimas en el grupo control.

6.2 Elementos traza acumulados en los diferentes tejidos vegetales según tipo de sustrato.

Los valores P del test de Mann Whitney que confronta la concentración de elementos traza en los tejidos vegetales para el grupo relave, entre especies se encuentra en el cuadro III-2 del apéndice III.

6.2.1 Análisis para *Acacia saligna*

La representación gráfica de las concentraciones promedios de elementos traza en los distintos tejidos vegetales se muestran en las figuras 6, 7 y 8.

Los promedios y errores de las concentraciones de elementos traza en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para *Acacia saligna* se encuentran en los cuadros I-1, I-2 y I-3 ubicados en el apéndice I.

Los valores P del test de Mann Whitney que contrarresta las concentraciones de elementos traza en los tejidos vegetales para cada especie, entre el grupo control y el grupo relave se encuentra en el cuadro III-1 del apéndice III.

6.2.1.1 Hierro (Fe)

Para *Acacia saligna*, en promedio, el Fe fue el elemento que presentó una mayor acumulación ($P < 0,05$), concentrado principalmente en las raíces, tanto para grupo control como para el grupo relave, lo que indica que la elevada acumulación de este elemento no es necesariamente efecto de la exposición al sustrato de relave. Según Menguel y Kirkby (1978) la movilización de Fe acumulado en las raíces hacia otros tejidos de la planta depende principalmente del nivel de pH que presente el suelo y la presencia de bicarbonato, mantenida por la caliza del suelo. A mayor pH menor es la movilidad del Fe, situación que se cumple al presentar los suelos de relave valores de pH en el rango de 7,9 (cuadro II-1), por lo que la movilidad puede considerarse baja y por extensión, también en los tejidos vegetales.

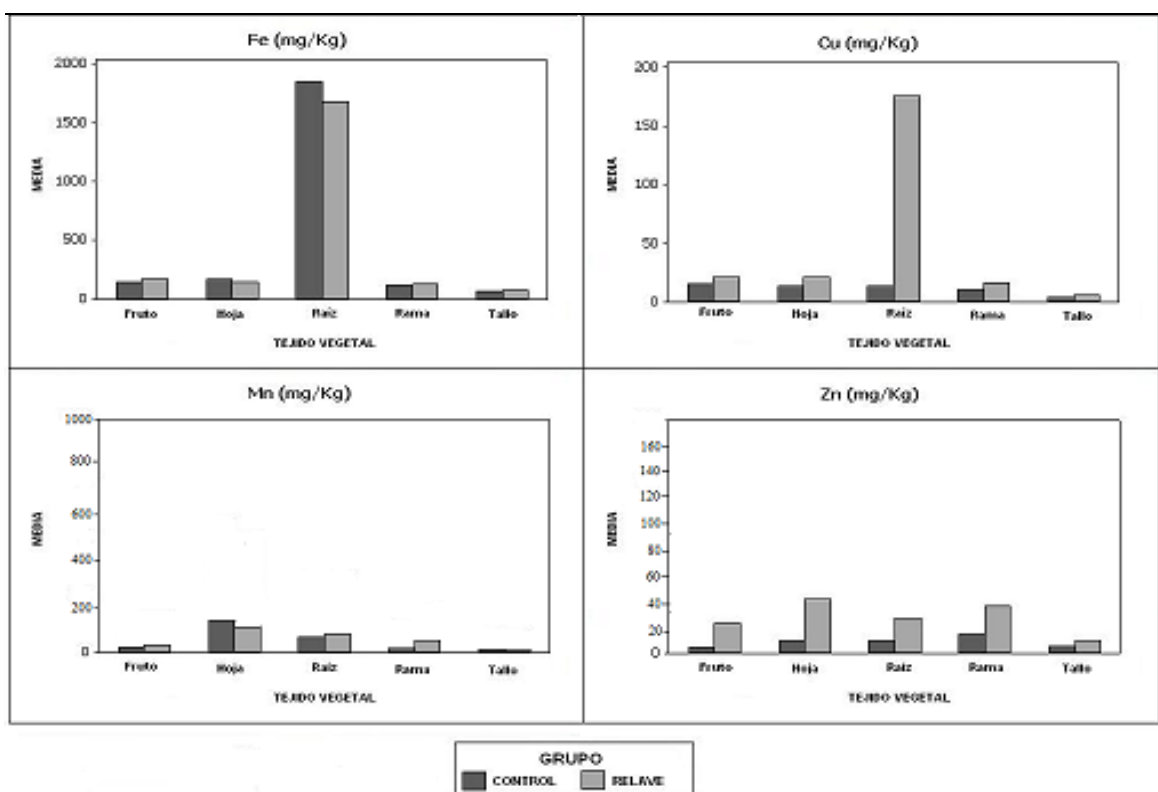


Figura 6: Medias de las concentraciones de elementos traza para *Acacia saligna* en el grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.

6.2.1.2 Cobre (Cu)

Del análisis de concentraciones promedio de Cu para cada tejido, se determinó con un error de un ($P < 0,05$) que existen diferencias significativas en cada uno de los tejidos analizados entre los tratamientos. La mayor acumulación se evidenció principalmente en la raíces de los individuos ubicados dentro del grupo relave alcanzando valores de $175,5 \pm 48,34 \text{ mg kg}^{-1}$, muy superiores a los encontrados en el mismo tipo de tejido en el sector control ($13,25 \pm 2,78 \text{ mg kg}^{-1}$). De acuerdo a lo descrito por Kabata – Pendias (2000) en general existe una alta capacidad de las raíces por almacenar Cu en condiciones de deficiencia o excesos de Cu en el medio, y su movilidad es baja principalmente en suelos neutros y alcalinos, manteniéndose en los tejidos de raíces y hojas hasta su senescencia. Además sugiere que la concentración de Cu en tejidos vegetales pudiera ser función de sus niveles presentes en el suelo. Sin embargo los patrones de esta relación difieren entre especies y órganos de las plantas. Por ejemplo la corteza y las raíces del Cafeto arábigo (*Coffea arabica*) arbusto de la familia de las rubiáceas presentaron altos niveles de Cu, superando los 4186 ppm (peso seco).

6.2.1.3 Manganeso (Mn)

Del análisis de concentraciones promedio de Mn para cada tejido, se determinó con un error de un ($P < 0,05$), que el único tejido que presenta diferencias significativas entre los grupos control y relave es la rama, acumulándose una mayor cantidad en el grupo relave. Para los otros tejidos el comportamiento en la acumulación de Mn fue similar en ambos

grupos, concentrándose la mayor cantidad en el tejido foliar ($114 \pm 8,19 \text{ mg kg}^{-1}$ grupo control, y $101,25 \pm 9,5 \text{ mg kg}^{-1}$ en el grupo relave). De acuerdo a lo descrito por Kabata – Pendias, las concentraciones tóxicas para las plantas son variables ya que dependen tanto de la planta como de los factores del suelo que la rodean, sin embargo generalmente las plantas comienzan a ser afectadas por concentraciones de Mn por sobre los 500 ppm, situación que no se da para *Acacia saligna*.

6.2.1.4 Cinc (Zn)

Los análisis que se hicieron para Zn mostraron que hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los grupos control y relave para todos los tejidos analizados, siendo mayor en el grupo relave principalmente en el tejido foliar ($46,25 \pm 6,45 \text{ mg kg}^{-1}$) y en las ramas ($40 \pm 4,88 \text{ mg kg}^{-1}$), valores que se encuentran dentro del rango normal descrito por Kabata – Pendias (2000) para vegetales de consumo.

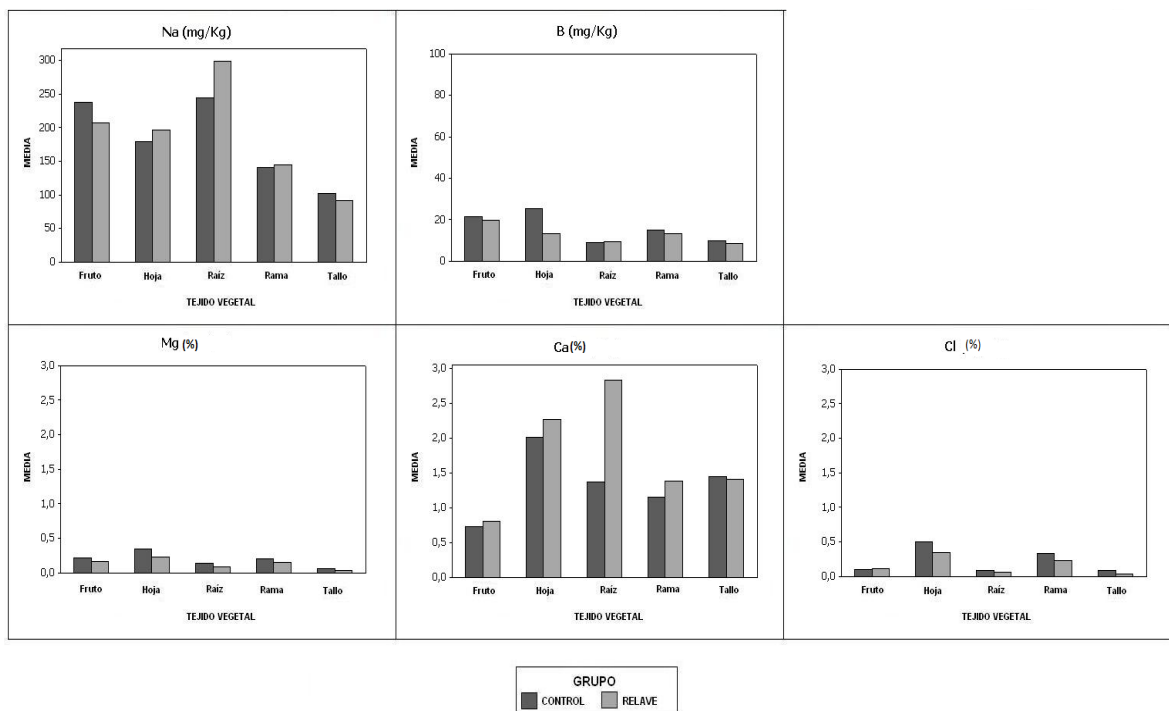


Figura 7: Medias de las concentraciones de algunos elementos para *Acacia saligna* en el grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.

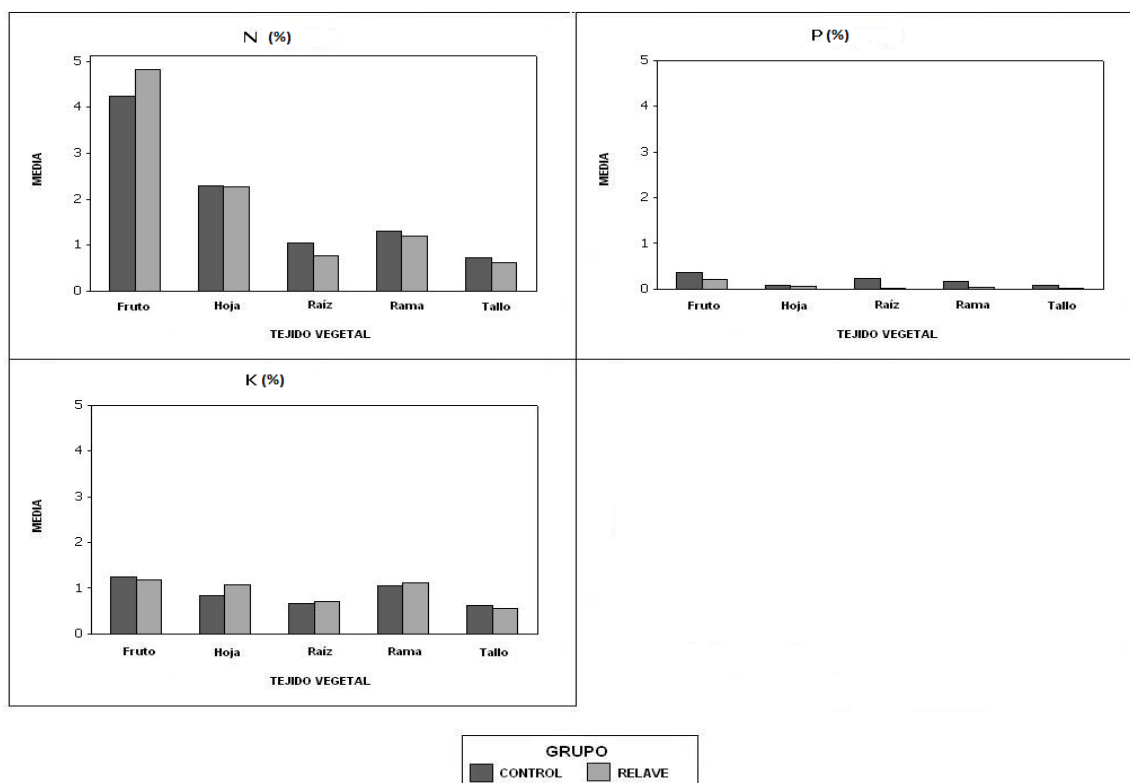


Figura 8: Medias de las concentraciones de N, P y K para *Acacia saligna* en el grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.

Además de los elementos descritos anteriormente se analizaron los siguientes elementos, N, P, K, Ca, Mg, B, Na y Cl, los cuales en general no presentaron grandes variaciones al compararlos entre el grupo control y el grupo relave

6.2.2 Análisis *Eucalyptus camaldulensis*

Las concentraciones promedios de elementos traza representados gráficamente para los distintos tejidos vegetales se muestran en las figuras 9, 10 y 11.

Los promedios y errores de las concentraciones de elementos traza en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para *Acacia saligna* se encuentran en los cuadros I-6, I-7 y I-8 ubicados en el apéndice I.

Los valores P del test de Mann Whitney que contrarresta las concentraciones de elementos traza en los tejidos vegetales para cada especie, entre el grupo control y el grupo relave se encuentra en el cuadro III-1 del apéndice III.

Las concentraciones de los elementos se encuentran distribuidas de forma similar a las encontradas en *Acacia saligna*, a excepción del Mn el cual presenta una mayor acumulación en los tejidos de *Eucalyptus camaldulensis*, especialmente en aquellos individuos establecidos en los sitios control.

6.2.2.2 Hierro (Fe)

Al igual que en *A. saligna*, se detectaron las mayores concentraciones de Fe en las raíces, con valores por sobre los 1000 mg kg⁻¹ en ambos sectores. La distribución en los otros tejidos fue similar a los encontrados para *A. saligna*. No se encontraron diferencias significativas entre el grupo control y el grupo de relaves para ninguno de los tejidos analizados.

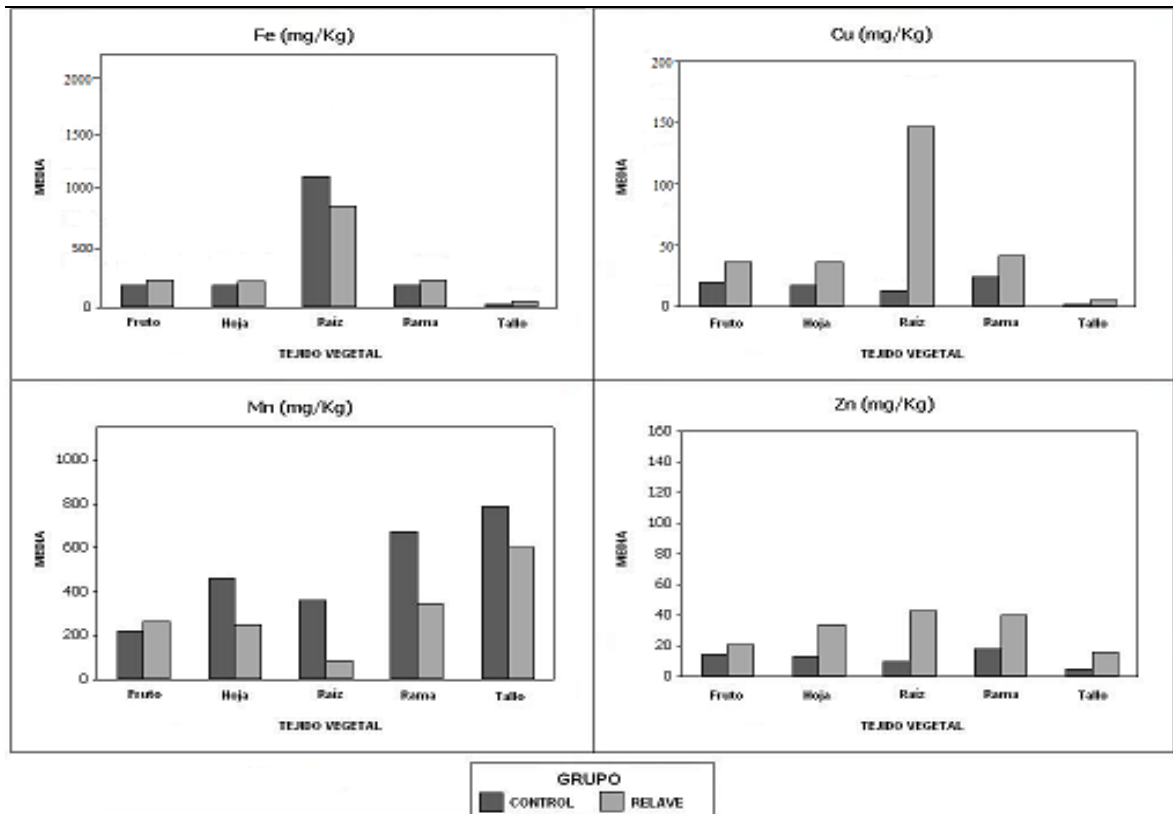


Figura 9: Medias de las concentraciones de elementos traza para *Eucalyptus camaldulensis* en grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.

6.2.2.3 Cobre (Cu)

En todos los tejidos hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los grupos control y relaves. Las raíces de los individuos ubicados en el grupo relave presentaron las mayores concentraciones promedio de Cu ($146,75 \pm 44,74$ mg kg⁻¹) superiores a los encontrados en el grupo control para el mismo tipo de tejido ($15,25 \pm 1,44$ mg kg⁻¹).

6.2.2.4 Manganeso (Mn)

Con respecto a las concentraciones promedio de Mn en términos generales las mayores acumulaciones se observaron en el grupo control, sin embargo sólo se encontraron diferencias significativas ($P < 0,05$) en las raíces, presentando una mayor acumulación en el grupo control ($355,25 \pm 53,74$ mg kg⁻¹).

6.2.2.5 Cinc (Zn)

Las concentraciones promedio (mg kg^{-1}) de Zn en cada uno de los tejidos de los individuos ubicados en el sector de relave, tuvieron diferencias significativas ($P < 0,05$), con respecto a los del grupo control, siendo los promedios del grupo control menores que los encontrados en el grupo relave. Los tejidos que presentaron una mayor concentración en el grupo relave fueron las raíces ($42 \pm 14,97 \text{ mg kg}^{-1}$), las ramas ($39,25 \pm 5,28 \text{ mg kg}^{-1}$) y las hojas ($33,25 \pm 2,95 \text{ mg kg}^{-1}$), valores que se encuentran dentro del rango normal descrito por Kabata – Pendias (2000) para vegetales de consumo.

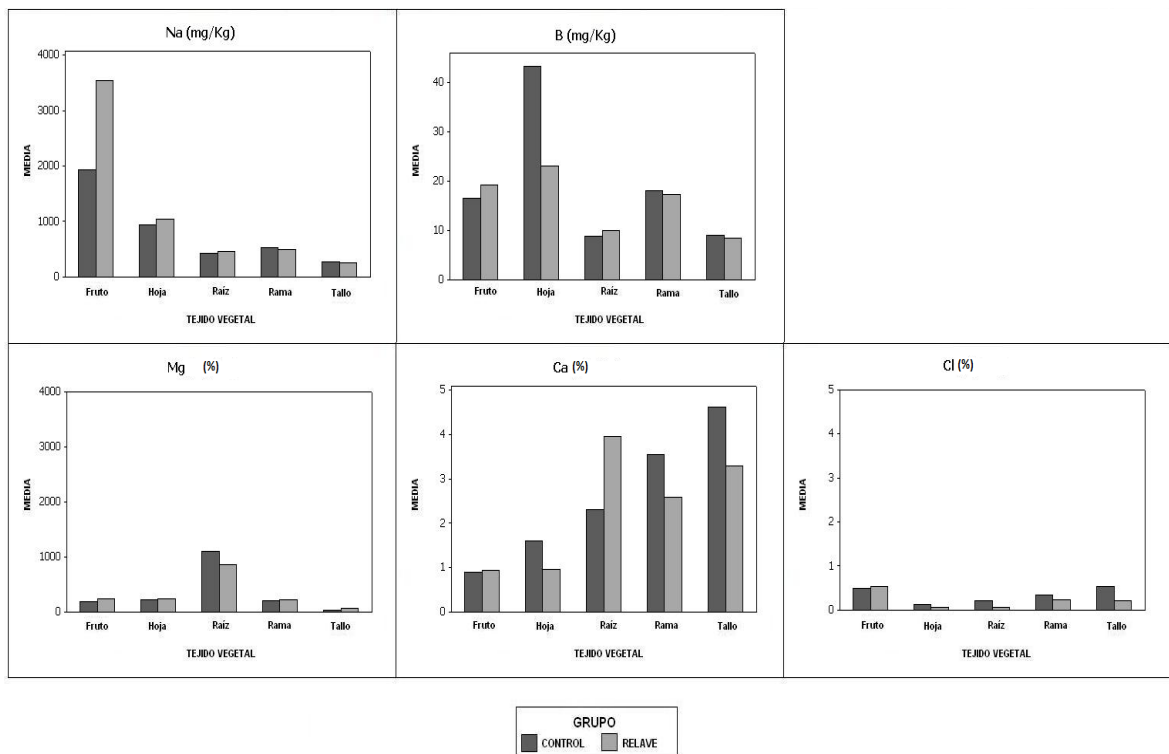


Figura 10: Medias de las concentraciones de algunos elementos para *Eucalyptus camaldulensis* en grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.

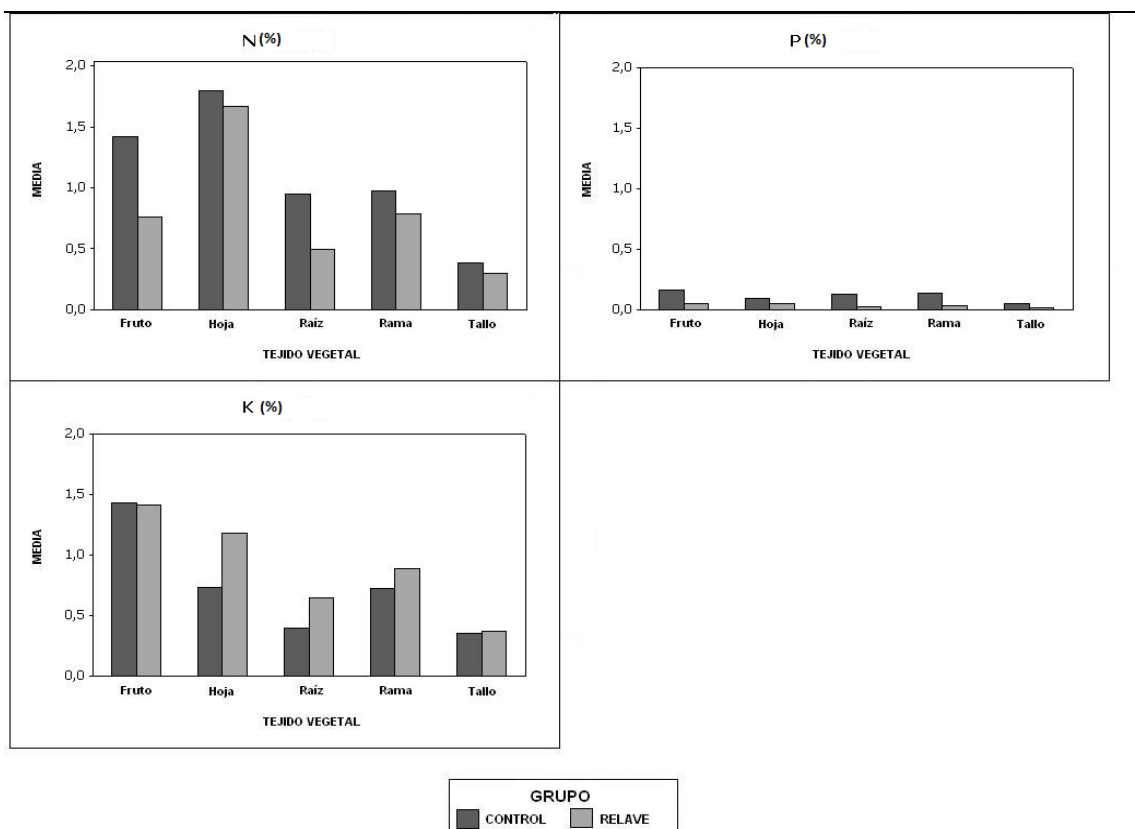


Figura 11: Medias de las concentraciones de N, P y K para *Eucalyptus camaldulensis* en grupo control y grupo relave, según tejido vegetal.

Con respecto a los otros elementos medidos (N, P, K, Ca, Mg, B, Na y Cl), en general presentan comportamientos similares tanto para el grupo control como el relave, para cada uno de los tejidos, sin embargo el P presenta cierta deficiencia en el grupo relave debido probablemente a las características propias del ciclo de este elemento y al tipo de sustrato presente en los relaves.

6.3 Pruebas de hipótesis

6.3.1 Comparación de medias de la concentración de elementos trazas entre grupos, para cada tejido vegetal y cada especie.

Para poder determinar estadísticamente si existen diferencias de concentración de elementos trazas en los tejidos vegetales entre el grupo control y relave, se aplicó el test no paramétrico de Mann-Whitney. Es necesario señalar, que se escogió este test porque las muestras a contrarrestar son independientes.

En el Apéndice III, Cuadro III-1, se presentan los valores p de este test estadístico, en el cual aparecen marcados con asterisco aquellas pruebas en que existen diferencias significativas entre el grupo control y relave, para cada especie. En cada uno de los tejidos vegetales medidos, existen diferencias estadísticas en la concentración de Cu y de Zn entre el grupo control y relave, para ambas especies, con un nivel de confianza del 95%.

6.3.2 Comparación de medias de la concentración de elementos para cada tejido vegetal entre especies, para el grupo relave.

El objetivo de este punto, fue determinar si las especies absorben en cantidades distintas los elementos contenidos en un suelo con mayor concentración de metales. Para esto, se aplicó el test de Mann-Whitney para contrarrestar la concentración de metales en cada tejido vegetal entre las especies.

En el Cuadro III-2 Apéndice III, se presentan los valores p de la prueba aplicada, la diferencia estadística es clara con respecto al Cu, los tejidos que presentan diferencias significativas entre especies son; Fruto, Hoja y Rama.

6.3.3 Comparación de medias de la concentración de elementos entre tejidos vegetales, para el grupo relave y para cada especie.

La aplicación del test Kruskal Wallis (Apéndice III, Cuadro III-3), indicó que existen diferencias significativas ($P < 0,05$) en la concentración de elementos entre los tejidos vegetales en las dos especies analizadas

6.3.4 Comparación de medias de otras propiedades químicas del suelo entre los grupos control y relave, para cada profundidad.

En el Cuadro III-4 Apéndices, se presentan los valores p de la prueba de Mann-Whitney, el cual indica que no existen diferencias estadísticas en el porcentaje de aluminio disponible entre el grupo control y relave, para cada una de las profundidades medidas ($P < 0,05$). Para las demás propiedades, se detectó que existen diferencias significativas entre el grupo control y relave.

6.3.5 Comparación de medias de otras propiedades químicas del suelo entre distintas profundidades de suelo, para cada grupo.

La aplicación del test Mann-Whitney (Apéndice III, Cuadro III-5), se puede observar que en el grupo relave sólo existen diferencias estadísticas en la conductividad eléctrica a distintas profundidades; en cambio, para el grupo control sólo existen diferencias estadísticas en la materia orgánica, Mn disponible y Zn disponible, entre las dos profundidades medidas ($P < 0,05$).

6.4 Análisis de correlación

6.4.1 Análisis de correlación entre las propiedades del suelo, para el grupo relave y para el grupo control.

Para poder determinar qué propiedades del suelo están relacionadas de forma lineal se aplicó la correlación de Spearman. Adicionalmente, se presentan los valores p del test de correlación, el cual determinará si existe alguna relación lineal significativa, con un nivel de confianza del 95%.

6.4.2 Correlación de Spearman y valor p entre las propiedades del suelo para el grupo control

De acuerdo al análisis de correlación (Cuadro 3) se pudo observar que el pH del suelo del grupo control tiene una relación lineal positiva ($P < 0,05$) con la cantidad de: Fe disponible, Mn disponible, Cu total, Mn total y Zn total, con un nivel de confianza del 95%. Por otro lado, el pH se relaciona de manera inversamente proporcional con la cantidad total de Al, ($P < 0,05$). Con respecto a la relación entre pH y Cu disponible de acuerdo a Ginocchio y Rodriguez (2005) la disponibilidad de Cu disminuye a medida que el pH del suelo aumenta, sin embargo en el presente estudio no se encontraron relaciones de correlación entre estos dos parámetros en ningún sitio, debido a que el rango de pH es neutro a alcalino. Para la relación pH-Mn disponible, de acuerdo a Kabatta – Pendias existe una alta relación entre estos dos parámetros, indicando que a medida que el pH aumenta, la concentración soluble de Mn debería disminuir, situación contraria a los resultados del presente estudio. Esto podría ser efecto de la distribución natural del Mn, el cual según Kabata – Pendias, no es uniforme en los substratos del suelo, sino que se concentra en ciertos puntos usualmente enriquecidos por otros elementos trazas.

La CE se relaciona significativamente y de forma positiva con; Fe disponible, Mn disponible, y Zn disponible, con el único elemento que se relaciona negativamente es con el Fe total. Con respecto a la MO las relaciones son positivas con; Cu disponible, Zn disponible, y Zn total, de forma negativa solamente con Al total.

Cuadro 3: Valores P para la Correlación de Spearman entre las propiedades del suelo para el grupo control.

	pHw	CE	MO	Fe-disp	Cu-disp	Mn-disp	Zn-disp	Al-disp	Fe-tot	Cu-tot	Mn-tot	Zn-tot
CE	-0,471 0,065											
MO	0,322 0,223	0,363 0,166										
Fe-disp	-0,619 0,01*	0,698 0,002*	0,173 0,52									
Cu-disp	0,225 0,401	0,288 0,278	0,588 0,016*	0,369 0,158								
Mn-disp	-0,634 0,008*	0,781 0*	0,117 0,664	0,708 0,002*	0,129 0,633							
Zn-disp	0,099 0,712	0,594 0,015*	0,792 0*	0,568 0,021*	0,689 0,003*	0,405 0,119						
Al-disp	0,469 0,066	0,02 0,939	0,135 0,617	-0,267 0,316	0,144 0,592	-0,27 0,311	0,075 0,781					
Fe-tot	0,439 0,088	-0,65 0,006*	-0,075 0,782	-0,637 0,007*	-0,251 0,348	-0,738 0,001*	-0,536 0,032*	0,254 0,342				
Cu-tot	0,724 0,001*	-0,172 0,523	0,639 0,007*	-0,297 0,263	0,582 0,018*	-0,513 0,041*	0,372 0,154	0,569 0,021*	0,363 0,166			
Mn-tot	0,642 0,007*	-0,23 0,39	0,45 0,079	-0,374 0,152	0,345 0,19	-0,568 0,021*	0,184 0,494	0,585 0,017*	0,462 0,071	0,898 0*		
Zn-tot	0,767 0*	-0,304 0,252	0,538 0,031*	-0,286 0,282	0,429 0,096	-0,599 0,014*	0,315 0,233	0,544 0,029*	0,52 0,038*	0,902 0*	0,824 0*	
Al-tot	-0,659 0,005*	0,427 0,098	-0,535 0,032*	0,367 0,162	-0,295 0,266	0,514 0,041*	-0,168 0,531	-0,346 0,188	-0,449 0,08	-0,783 0*	-0,623 0,009*	-0,808 0*

* Existe una relación lineal significativa respecto a las propiedades químicas del suelo, con una significancia del 5%

6.4.3 Correlación de Spearman y valor p entre las propiedades del suelo para el grupo relave

De acuerdo al análisis de correlación (Cuadro 4) en el grupo relave, el pH y la conductividad eléctrica del suelo no se relacionan significativamente ($P < 0,05$) con ninguna otra propiedad del suelo medida. Por otro lado, la cantidad de materia orgánica se relaciona de manera inversamente proporcional con la cantidad de Cu disponible, y se relaciona de manera directamente proporcional con la cantidad de Zn total ($P < 0,05$).

Cuadro 4: Valores p para la correlación de Spearman entre las propiedades del suelo para el grupo relave.

	pHw	CE	MO	Fe-disp	Cu-disp	Mn-disp	Zn-disp	Al-disp	Fe-tot	Cu-tot	Mn-tot	Zn-tot
CE	-0,216											
	0,42											
MO	0,183	0,064										
	0,496	0,811										
Fe-disp	-0,284	-0,032	0,186									
	0,285	0,904	0,488									
Cu-disp	-0,329	-0,241	-0,64	0,209								
	0,212	0,366	0,007*	0,437								
Mn-disp	-0,368	0,062	-0,118	0,041	0,189							
	0,16	0,818	0,661	0,879	0,481							
Zn-disp	-0,479	-0,07	-0,455	-0,026	0,341	0,294						
	0,059	0,794	0,075	0,921	0,195	0,268						
Al-disp	-0,424	-0,144	-0,253	-0,152	0,416	0,278	0,016					
	0,1	0,594	0,344	0,573	0,108	0,296	0,951					
Fe-tot	-0,417	0,01	-0,023	-0,142	-0,172	0,199	0,7	-0,173				
	0,107	0,969	0,931	0,599	0,523	0,459	0,002*	0,52				
Cu-tot	0,122	0,157	-0,255	-0,143	0,49	0,37	-0,3	0,441	-0,561			
	0,652	0,559	0,338	0,595	0,054	0,158	0,258	0,086	0,023*			
Mn-tot	-0,42	0,002	0,069	-0,097	-0,016	0,062	0,649	-0,052	0,883	-0,43		
	0,104	0,993	0,798	0,718	0,952	0,818	0,006*	0,846	0*	0,096		
Zn-tot	-0,377	0,169	-0,647	-0,243	0,628	0,539	0,45	0,512	0,082	0,65	0,134	
	0,149	0,53	0,006*	0,364	0,009*	0,031*	0,08	0,042*	0,761	0,006*	0,62	
Al-tot	0,174	0,182	-0,058	-0,214	-0,045	0,269	-0,338	0,38	-0,379	0,685	-0,287	0,45
	0,518	0,498	0,828	0,424	0,866	0,313	0,2	0,146	0,147	0,003*	0,28	0,08

* Existe una relación lineal significativa respecto a las propiedades químicas del suelo, con una significancia del 5%

6.4.4 Análisis de correlación de los elementos disponibles y totales del suelo a distintas profundidades con la concentración de elementos en cada uno de los tejidos vegetales, para cada grupo.

Al igual que en los otros análisis de correlación, se utilizó la correlación de Spearman acompañada del test de correlación. En los cuadros 5 y 6, se muestran estos resultados incluyendo el valor p del test mencionado, para el grupo control y relave, respectivamente.

En el grupo control, la acumulación de Mn en hojas, frutos, ramas y raíces, menos para el tejido del tallo se relacionan linealmente y de forma positiva con la concentración de Mn disponible en el suelo a una profundidad de 0 – 20 cm. En los análisis a una profundidad entre 20 – 40 cm ocurre la misma situación pero para todos los tejidos. Los elementos acumulados en los tejidos de los individuos no se relacionan linealmente ni con el Fe disponible, ni tampoco con el Cu disponible en el estrato más superficial del suelo (0 – 20 cm). Por otro lado la acumulación de Fe en hojas, tallo y frutos se relaciona de manera significativa ($P < 0,05$) y positiva con el Fe disponible a una profundidad de 20 – 40 cm. El

Zn acumulado en las ramas tiene una relación lineal significativa ($P < 0,05$) y del tipo negativa con el Zn disponible en el suelo, a una profundidad de 0 – 20 cm.

En el grupo relave, el Fe acumulado en las ramas presentó una relación lineal significativa y negativa ($P < 0,05$) con la concentración de Fe disponible en el sustrato a una profundidad de 0 – 20 cm. El Mn disponible no presentó relaciones lineales significativas para ninguna profundidad. Para el caso del Cu acumulado en los frutos de los individuos analizados hubo una relación significativa (positiva) a una profundidad de 0 – 20 cm con el Cu disponible. El Cu acumulado en las raíces se relacionó positivamente con el Cu disponible y total a una profundidad de 20 – 40 cm, tejido que presentó los valores más altos de concentración de Cu, situación que confirma lo descrito por Kabata – Pendias (2000) acerca de que la concentración de Cu en los tejidos de las plantas, está en función de los niveles de Cu presentes en el suelo. Sin embargo, afirma que los patrones de esta relación difieren entre especies y los órganos vegetales que están siendo analizados. La acumulación de Zn en todos los tejidos, a excepción del tallo, presentó una relación lineal significativa ($P < 0,05$) (positiva) con el Zn disponible en el sustrato sólo a profundidades de 20 – 40 cm. Esto concuerda con la afirmación hecha por Kabata – Pendias (2000), de que la absorción de Zn es del tipo lineal con la concentración en la solución mineral y el suelo. Además detalla que la tasa de absorción de Zn difiere dependiendo del tipo de especie y el crecimiento medio que experimenta el individuo.

Cuadro 5: Valores p para la correlación de Spearman de los elementos disponibles y totales del suelo a distintas profundidades (0-20 y 20-40) con la concentración de elementos de cada uno de los tejidos vegetales, para el grupo control.

Profundidad		Tejido vegetal																			
		Rama				Hoja				Tallo				Raíz				Fruto			
		Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn
0-20	Fe-disp	-0,1	0,1	-0,04	-0,35	-0,19	-0,39	0,21	0,22	0,15	0,32	0,14	-0,36	0,04	-0,29	0,28	0,19	0,05	-0,01	0,33	0,25
		0,79	0,79	0,91	0,38	0,65	0,33	0,61	0,59	0,71	0,42	0,73	0,37	0,91	0,48	0,49	0,65	0,88	0,97	0,41	0,54
	Cu-disp	0,28	-0,26	-0,25	-0,23	-0,3	-0,18	-0,12	-0,15	0,28	0,05	-0,55	-0,15	0,47	-0,17	-0,23	0,47	0,03	-0,09	-0,2	-0,04
		0,49	0,51	0,54	0,57	0,46	0,65	0,77	0,71	0,5	0,89	0,15	0,7	0,23	0,68	0,58	0,23	0,94	0,82	0,62	0,91
	Mn-disp	0,21	0,8	0,71	0,15	0,59	0,14	0,78	0,65	-0,59	0,32	0,66	-0,69	0,09	0,36	0,9	0,16	0,46	0,73	0,85	0,9
		0,6	0,01*	0,04*	0,71	0,11	0,72	0,02*	0,08	0,11	0,42	0,07	0,05	0,82	0,37	0*	0,69	0,24	0,03*	0*	0*
	Zn-disp	0,12	-0,35	-0,47	-0,81	-0,61	-0,72	-0,2	-0,28	0,53	0	-0,21	-0,42	0,22	-0,57	-0,21	0,32	-0,14	-0,3	-0,01	-0,09
		0,77	0,38	0,22	0,01*	0,1	0,04*	0,62	0,49	0,17	1	0,6	0,29	0,58	0,13	0,6	0,43	0,73	0,45	0,97	0,81
	Fe-tot (%)	0,56	-0,59	-0,52	0,13	-0,42	0,4	-0,69	-0,06	0,46	-0,1	-0,45	0,84	0,45	-0,17	-0,52	0,42	-0,64	-0,67	-0,66	-0,6
		0,14	0,12	0,18	0,75	0,28	0,31	0,05	0,88	0,24	0,79	0,26	0*	0,26	0,68	0,18	0,28	0,08	0,06	0,07	0,11
	Cu-tot	0,24	-0,81	-0,77	-0,45	-0,74	-0,51	-0,65	-0,71	0,7	0,27	-0,85	0,28	0,2	-0,51	-0,87	0,28	-0,27	-0,64	-0,74	-0,75
		0,55	0,01*	0,02*	0,25	0,03*	0,19	0,07	0,04*	0,05	0,51	0*	0,48	0,62	0,19	0*	0,49	0,5	0,08	0,03*	0,02*
	Mn-tot	0,23	-0,78	-0,66	-0,35	-0,61	-0,41	-0,54	-0,63	0,56	0,1	-0,78	0,46	0,11	-0,36	-0,78	0,4	-0,15	-0,68	-0,61	-0,84
		0,56	0,02*	0,07	0,38	0,1	0,3	0,16	0,08	0,14	0,79	0,02*	0,24	0,77	0,37	0,02*	0,31	0,71	0,05	0,1	0*
Zn-tot	0,52	-0,95	-0,91	-0,52	-0,87	-0,41	-0,79	-0,54	0,79	0	-0,89	0,49	0,19	-0,48	-0,86	0,15	-0,43	-0,89	-0,72	-0,87	
	0,17	0*	0*	0,17	0*	0,31	0,01*	0,16	0,01*	1	0*	0,21	0,64	0,22	0*	0,71	0,27	0*	0,04*	0*	
20-40	Fe-disp	0,27	0,73	0,83	0,33	0,79	0,32	0,81	0,52	-0,84	0,33	0,49	-0,42	0,25	0,74	0,79	0,25	0,71	0,72	0,84	0,65
		0,51	0,03*	0,01*	0,41	0,01*	0,43	0,01*	0,17	0*	0,42	0,21	0,28	0,54	0,03*	0,01*	0,54	0,04*	0,04*	0*	0,07
	Cu-disp	0,17	-0,21	-0,08	0	-0,04	-0,07	-0,01	-0,19	-0,03	0,05	-0,62	0,02	0,3	0,22	-0,24	0,3	0,32	-0,01	-0,14	-0,18
		0,68	0,6	0,83	0,98	0,9	0,85	0,97	0,64	0,94	0,89	0,09	0,96	0,45	0,58	0,55	0,45	0,42	0,97	0,72	0,65
	Mn-disp	0,29	0,83	0,78	0,21	0,69	0,11	0,88	0,66	-0,73	0,43	0,76	-0,5	-0,3	0,48	0,95	0,19	0,61	0,66	0,97	0,75
		0,47	0,01*	0,02*	0,6	0,05	0,79	0*	0,07	0,03*	0,27	0,02*	0,19	0,45	0,21	0*	0,65	0,1	0,07	0*	0,03*
	Zn-disp	0,27	0,45	0,49	-0,02	0,43	-0,32	0,73	0,2	-0,56	0,32	0,16	-0,46	0,29	0,45	0,51	0,09	0,85	0,44	0,73	0,32
		0,51	0,25	0,21	0,95	0,28	0,43	0,03*	0,61	0,14	0,42	0,69	0,24	0,47	0,25	0,19	0,82	0*	0,26	0,03*	0,42
	Fe-tot (%)	0,44	-0,72	-0,71	-0,03	-0,61	0,07	-0,8	-0,33	0,65	0,1	-0,54	0,78	0,38	-0,41	-0,73	0,4	-0,68	-0,77	-0,83	-0,75
		0,27	0,04*	0,04*	0,93	0,1	0,86	0,01*	0,42	0,07	0,79	0,16	0,02*	0,35	0,3	0,03*	0,31	0,06	0,02*	0,01*	0,03*
	Cu-tot	0,13	-0,72	-0,64	-0,26	-0,57	-0,47	-0,52	-0,68	0,52	0,21	-0,76	0,46	0,14	-0,36	-0,8	0,45	-0,1	-0,62	-0,66	-0,84
		0,75	0,04*	0,08	0,52	0,13	0,23	0,18	0,05	0,17	0,6	0,02*	0,24	0,73	0,37	0,01*	0,26	0,79	0,09	0,07	0*
	Mn-tot	0,01	-0,67	-0,59	-0,37	-0,54	-0,62	-0,42	-0,72	0,49	0,21	-0,59	0,4	0,11	-0,41	-0,73	0,3	-0,03	-0,62	-0,52	-0,86
		0,97	0,06	0,11	0,36	0,16	0,09	0,28	0,04*	0,21	0,6	0,11	0,32	0,77	0,3	0,03*	0,45	0,93	0,09	0,18	0*
Zn-tot	-0,5	-0,86	-0,8	-0,33	-0,71	-0,35	-0,68	-0,45	0,59	-0,1	-0,88	0,64	0,15	-0,23	-0,8	0,16	-0,24	-0,86	-0,63	-0,93	
	0,2	0*	0,01*	0,41	0,04*	0,38	0,06	0,25	0,12	0,79	0*	0,08	0,71	0,57	0,01*	0,69	0,56	0*	0,09	0*	

* Existe una relación lineal significativa respecto a las propiedades químicas del suelo, con una significancia del 5%

Cuadro 6: Valores P para la correlación de Spearman de los elementos disponibles y totales del suelo a distintas profundidades (0-20 y 20-40) con la concentración de elementos de cada uno de los tejidos vegetales, para el grupo relave.

Profundidad	Propiedades químicas del suelo	Tejido vegetal																				
		Rama				Hoja				Tallo				Raiz				Fruto				
		Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn	
0-20	Fe-disp	0.49	0.7	0.48	-0.18	0.26	0.12	0.51	-0.57	-0.73	-0.32	0.36	0.17	-	0.43	-0.01	0.32	-0.31	0.55	0.57	0.33	-0.27
		0.21	0.04*	0.22	0.66	0.52	0.76	0.18	0.13	0.03*	0.43	0.37	0.67	0.28	0.97	0.42	0.44	0.15	0.13	0.41	0.5	
	Cu-disp	0.2	0.48	0.03	0.33	0.46	0.35	0.13	-0.02	-0.11	-0.28	0.32	0.2	0.33	0.47	0.24	0.27	0.64	0.77	0.21	0.26	
		0.62	0.22	0.93	0.41	0.24	0.39	0.75	0.95	0.77	0.48	0.43	0.63	0.41	0.22	0.55	0.5	0.08	0.02*	0.6	0.52	
	Mn-disp	0.42	0.32	0.26	-0.06	0.06	0.09	0.4	-0.01	-0.29	-0.16	0.19	0.16	0.03	0.48	0.32	0.26	0.39	0.36	0.12	-0.03	
		0.29	0.43	0.52	0.88	0.88	0.83	0.31	0.97	0.48	0.69	0.64	0.7	0.92	0.22	0.43	0.52	0.33	0.37	0.76	0.92	
	Zn-disp	-0.09	-0.08	0.33	0.8	0.09	-0.02	0.02	0.62	0.3	0.37	0.02	0.55	0.28	0.35	0.47	0.8	0	0.21	0.11	0.83	
		0.82	0.84	0.41	0.01*	0.82	0.95	0.95	0.09	0.45	0.36	0.95	0.15	0.49	0.38	0.22	0.01*	1	0.6	0.77	0.01*	
	Fe-tot (%)	0.21	0.03	0.09	0.45	0.42	0.25	0.21	0.58	0.52	0.79	0.19	0.66	0.19	-0.09	0.53	0.69	0.14	0.16	0.43	0.71	
		0.61	0.93	0.82	0.26	0.28	0.54	0.61	0.12	0.18	0.01*	0.65	0.07	0.65	0.82	0.16	0.05	0.73	0.69	0.28	0.04*	
	Cu-tot	0	0.32	0	-0.38	0.04	0.14	0.11	-0.16	-0.14	-0.62	0.21	-0.5	0.04	0.71	0.25	-0.3	0.33	0.27	-0.37	-0.42	
		1	0.43	1	0.35	0.91	0.73	0.77	0.69	0.73	0.09	0.61	0.2	0.91	0.04*	0.54	0.45	0.41	0.5	0.36	0.28	
	Mn-tot	0.21	0.03	0.09	0.45	0.42	0.25	0.21	0.58	0.52	0.79	0.19	0.66	0.19	-0.09	0.53	0.69	0.14	0.16	0.43	0.71	
		0.61	0.93	0.82	0.26	0.28	0.54	0.61	0.12	0.18	0.01*	0.65	0.07	0.65	0.82	0.16	0.05	0.73	0.69	0.28	0.04*	
Zn-tot	0.19	0.43	0.11	0.33	0.45	0.42	0.09	0.39	0.28	0.03	0.09	0.26	0.02	0.73	0.39	0.52	0.4	0.65	0.11	0.42		
	0.65	0.28	0.77	0.41	0.26	0.29	0.82	0.33	0.49	0.92	0.82	0.52	0.95	0.03*	0.33	0.18	0.31	0.07	0.77	0.28		
20-40	Fe-disp	-0.23	-0.42	0.33	0.46	0.25	-0.6	0.17	0.09	-0.33	0.03	0.02	0.2	0.09	-0.45	0.11	0.06	0.27	-0.22	0.01	0.62	
		0.57	0.29	0.42	0.24	0.53	0.11	0.68	0.81	0.42	0.92	0.95	0.62	0.81	0.25	0.78	0.88	0.51	0.59	0.97	0.09	
	Cu-disp	-0.04	0.19	0.07	0.23	0.11	0.25	0.09	0.08	0.07	-0.42	0.04	-0.09	0.11	0.76	0.16	0.3	0.5	0.45	-0.13	0.02	
		0.91	0.64	0.86	0.57	0.77	0.54	0.82	0.84	0.86	0.29	0.91	0.82	0.77	0.02*	0.69	0.45	0.2	0.25	0.75	0.95	
	Mn-disp	-0.21	0.08	0.42	0.19	0.28	-0.2	0.19	0.53	0.19	0.08	0.57	0.01	0.64	0.73	0.05	0.19	0.26	-0.02	-0.41	0.33	
		0.61	0.84	0.28	0.65	0.49	0.62	0.65	0.16	0.65	0.83	0.13	0.97	0.08	0.03*	0.88	0.65	0.53	0.95	0.3	0.41	
	Zn-disp	0.02	0.04	0.26	0.76	0.3	0.21	0.07	0.71	0.54	0.6	0.07	0.66	0.28	0.35	0.67	0.9	0	0.29	0.25	0.83	
		0.95	0.91	0.53	0.02*	0.45	0.6	0.86	0.04*	0.16	0.11	0.86	0.07	0.49	0.38	0.06	0*	1	0.47	0.54	0.01*	
	Fe-tot (%)	0.14	0	0.16	0.5	0.21	0.06	0.21	0.68	0.47	0.89	0	0.72	0.42	-0.04	0.46	0.69	0.33	0.01	0.32	0.76	
		0.73	1	0.69	0.2	0.61	0.88	0.61	0.06	0.23	0*	1	0.04*	0.28	0.91	0.24	0.05	0.41	0.97	0.43	0.02*	
	Cu-tot	0	0.32	0	-0.38	0.04	0.14	0.11	-0.16	-0.14	-0.62	0.21	-0.5	0.04	0.71	0.25	-0.3	0.33	0.27	-0.37	-0.42	
		1	0.43	1	0.35	0.91	0.73	0.77	0.69	0.73	0.09	0.61	0.2	0.91	0.04*	0.54	0.45	0.41	0.5	0.36	0.28	
	Mn-tot	0.19	-0.01	0.23	0.35	0.19	-0.03	0.11	0.56	0.16	0.34	0.07	0.4	0.26	0.23	0.1	0.57	0.04	0.21	0.16	0.76	
		0.65	0.97	0.57	0.38	0.65	0.93	0.77	0.14	0.69	0.4	0.86	0.31	0.53	0.57	0.79	0.13	0.91	0.6	0.69	0.02*	
Zn-tot	-0.07	0.31	0.26	0.14	0.21	0.38	0.16	0.45	0.5	-0.03	0.26	-0.06	0.23	0.92	0.4	0.33	0.19	0.39	-0.22	0.16		
	0.86	0.45	0.53	0.73	0.61	0.34	0.69	0.25	0.2	0.92	0.53	0.88	0.57	0*	0.31	0.41	0.65	0.33	0.58	0.69		

* Existe una relación lineal significativa respecto a las propiedades químicas del suelo, con una significancia del 5%.

7. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio permiten concluir lo siguiente:

- Las principales concentraciones de Cu en tejidos, se encuentran en las raíces de los individuos, tanto para *Acacia saligna* como *Eucalyptus camadulensis*, con una mayor acumulación en los individuos establecidos en el grupo relave. *E. camaldulensis* tiende a repartir de forma pareja las concentraciones de Cu entre los tejidos restantes a excepción del tallo el cual prácticamente no presenta acumulación. El hecho de que la mayor acumulación de Cu se produzca en los tejidos subterráneos, disminuye las posibilidades de contaminación directa hacia otros estratos de la cadena trófica, sin embargo, es importante destacar que el presente estudio corresponde a un análisis en un determinado tiempo y no refleja las variaciones que se producen en diferentes épocas del año, para lo cual se deberá realizar análisis al menos cuatro veces de manera tal de establecer un comportamiento del elemento traza en diferentes condiciones ambientales y estados de la planta.
- Para el caso del Fe el comportamiento es similar en ambas especies concentrándose en las raíces sin presentar diferencias significativas entre tratamientos.
- Los valores más altos de Zn se encuentran en aquellos individuos ubicados en sector de relave (diferencias significativas para todos los tejidos), principalmente en los tejidos superiores (hojas, rama, fruto), situación que se repite en ambas especies. Con respecto al Mn, la especie que presenta las mayores concentraciones es *Eucalyptus camaldulensis* prácticamente cuadruplicando los valores que presenta *Acacia saligna*, en ambos sectores.
- De los metales disponibles se puede decir que en todos los casos (Fe, Cu y Zn) a excepción del Mn, presentan concentraciones más altas en los sustratos del grupo relave con el siguiente orden decreciente Cu>Fe>Zn>Mn.
- Los análisis de correlación indican una mayor relación entre las propiedades químicas y los elementos en el sustrato del grupo control que en el del relave, con una influencia del pH sobre la disponibilidad de algunos elementos. Para el grupo control prácticamente no se encontraron relaciones causado posiblemente por la variabilidad de los datos.
- La correlación entre elementos disponibles en el suelo y aquellos acumulados en los tejidos tienen diferentes comportamientos, dependiendo del sustrato analizado, por lo que no se puede establecer una tendencia.
- Si bien el presente estudio sirve para establecer un tipo de diagnóstico acerca de la situación en la que se encuentran ambas especies en el relave, habría que evaluar el comportamiento y distribución de los elementos trazas en diferentes situaciones como por ejemplo en distintos estados de desarrollo, para diferentes épocas del año, e inclusive abarcar algún segmento de la cadena trófica que se alimenta directamente de los individuos del relave y así determinar el potencial daño.

8. BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO E., CARRASCO M. A., LEÓN O., MARTINEZ E., SILVA P., CATILLO G., AHUMADA I., BORIE G., GONZÁLEZ S. (2005). Criterios de Calidad de Suelo Agrícola. [En línea] Servicio agrícola y ganadero (SAG). Santiago (CHILE). Disponible en http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/criterios_calidad_suelos_agricolas/ [Consulta: 26 Enero 2009].

ADRIANO D., (1986). Trace elements in terrestrial environments. Springer-Verlag, New York, New York, USA. 533 pp.

BARSCHAD, I., 1948. Molybdenum content of pasture plants in relation to toxicity of cattle. Soil Sci. 66: 187-195.

BAKER AJM (1987). Metal tolerance. New Phytologist 106: 93-11.

BLAYLOCK, M. (2000). En: Terry, N., Bañuelos, G. Field demonstration of Phytoremediation of lead - contaminated soil. En: Terry, N., Bañuelos, G. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Library of Congress Cataloging-in-Data Publication. Boca Ratón, Florida. Lewis Publishers.

CIMM (Centro de investigación minera y metalúrgica). 2005. Contenidos de cobre en suelos de Chile y los riesgos fitotóxicos asociados. En: Congreso internacional COBRE 2003. Consultado 28 de agosto 2009. Chile. Disponible en <http://www.innovacionminera.cl/noticias>.

DOLD B., and FONTBOTE L., (2001). Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailing as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. J Geochem Explor 74, 3-55.

ERNST WH, J VERKLEIJ and W SCHAT (1992) Metal tolerance in plants. Acta Botanica Netherland 41: 229-248.

GARCÍA, I. (2001). Contaminación por fertilizantes. Avances en rehabilitación de áreas degradadas con énfasis en recuperación ecológica N°18:7-16.

GINOCCHIO R., NARVAEZ J. (2002). Importancia de la forma química y de la matriz del sustrato en la toxicidad por cobre en *Nostricastrum sereceum* (Less.) Less. ex Phil. Revista chilena de historia natural 75: 603-612.

GINOCCHIO R. (2004). Solución vegetal. Induambiente, Marzo 2004, no. 67, p. 30-32.

GINOCCHIO R., TORRES J., RODRIGUEZ P. (2005). Biodisponibilidad de metales y efectos ambientales del cobre en suelos agrícolas. Cobre, Medio Ambiente y Salud Aportes de la Ciencia. Chile, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia. pp. 204-215.

GINOCCHIO R, PH RODRÍGUEZ, R BADILLA- OHLBAUM, HE ALLEN and G LAGOS (2002). Effect of soil copper content and Ph on copper uptake of selected vegetables grown under controlled conditions. Environmental Toxicology and Chemistry

21: 117-125.

GINOCCHIO R. y RODRIGUEZ P. (2005). Incorporación de desechos y productos de la minería del cobre a suelos: Biodisponibilidad y efectos sobre cultivos. Cobre, Medio Ambiente y Salud Aportes de la Ciencia. Chile, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia. pp. 204-215.

IGM, (1984). Geografía de Chile. Geografía de los suelos. Santiago, Chile. Tomo V. 180 p.

KABATA – PENDIAS, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third edition. CRC Press. Boca raton, USA. 413 p.

LAMBERS H., FS CHAPIN III and TL PONS (1998) Plant physiological ecology. Springer-Verlag, New York, New York. 540 pp.

LOPEZ P., AINZÚA S., ZOLEZZI C., VASCONI P (2003). La minería y su pasivo ambiental. Análisis de políticas públicas. Fundación Terram. Nº 24. 16 pp.

LOUE, A. (1988). Los Microelementos en la agricultura. Madrid, Mundi prensa. 354p.

MARSCHNER H. (1986). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, United Kingdom. 674 pp.

MC CALL J., JUN J., and STRUIK H. (1995). Photo interpretative study of recovery of damaged lands near the metal smelters of Sudbury, Canada. Water Air Soil Pollut 85, 847–852.

MENGEL, K. and KIRKBY, E. A. (1978). Principles of plant nutrition, International Potash Institute, Worblaufen-Bern, 593.

MILTIMORE, J.E. y MASON, J.L. 1971. Copper to molybdenum ratio and molybdenum and copper concentrations in ruminants feeds. Can. J. Anim. Sci. 51: 193-200.

NAVARRO-AGUIÑO J. P., AGUILAR-ALONSO I., y LOPEZ-MOYA J.R., (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas 16 (2): 10-15

NOTTEN M.J.M., A.J.P. OOSTHOEK A.J.P., ROZEMA J., and AERTS R. (2005) Heavy metal concentrations in a soil-plant-snail food chain along a terrestrial soil pollution gradient. Environmental pollution 138: 178-190.

SADZAWKA A., CARRASCO M., GREZ R., MORA M., FLORES H., y NEAMAN A. (2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Chile, Instituto de investigaciones agropecuarias. Nº 34.

SANTIBAÑEZ C., VERDUGO C., and GINOCCHIO, R. (2008). Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. Science of the total environment; 395:1-10.

SILVEIRA M.L.A., L.R.F. ALLEONL, and L.R.G. GUILHERME, (2003). Biosolids

and heavy metals in soils. *Scientia agrícola* 60 (4): 793 – 806.

VILLALÓN, C. (2003). Evaluación del comportamiento en el crecimiento de cuatro especies, albizia (*albizia lophanta*), aromo australiano (*Acacia melanoxylon*), aromo azul (*Acacia saligna*) y granado (*Punica granatus*) establecidas sobre material de relave minero. Tesis. Ing. Agronomo. Valparaíso. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

APÉNDICES

Apéndice I: Media entre diferentes sustratos para los elementos trazas acumulados en tejidos

Comparación de medias *Acacia saligna*

Cuadro I-1: Promedio y error de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para la especie *Acacia saligna*.

Tejido	Grupo Control				Grupo Relave			
	Concentración de metales (mg/Kg)				Concentración de metales (mg/Kg)			
	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn
Fruto	139,75±14,81	14,25±0,48	34,25±3,38	4,5±0,96	161±8,92	20,25±1,55	32,5±3,77	24,75±4,4
Hoja	163,25±14,79	12,5±1,19	114±8,19	10,75±1,25	133,5±4,56	21±0,71	101,25±9,5	46,25±6,45
Raíz	1851,25±632,25	13,25±2,78	66,75±15,74	10,25±1,55	1676±223,98	175,5±48,34	70±5,34	29,25±7,97
Rama	115±4,10	10±0,41	26,25±1,55	15,25±2,53	120,25±8,62	15,75±1,6	41,75±4,59	40±4,88
Tallo	57±10,53	3,5±0,29	17±2,74	5,25±0,25	65,75±10,94	5,25±0,25	16,25±1,7	10±1,08

Cuadro I-2: Promedio y error de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control, para la especie *Acacia saligna*.

Acacia Saligna - Grupo Control								
Tejido	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	B (mg/kg)	Na (mg/kg)	Cl (%)
Fruto	4,23±0,29	0,36±0	1,25±0,21	0,73±0,15	0,22±0,02	21,75±4,99	238,3±96,5	0,1±0,04
Hoja	2,29±0,05	0,09±0,01	0,85±0,13	2,02±0,16	0,35±0,07	25,5±2,38	178,75±15,33	0,51±0,08
Raíz	1,05±0,25	0,24±0,1	0,68±0,18	1,37±0,07	0,14±0,04	9±0,82	243,8±78	0,09±0,02
Rama	1,3±0,03	0,18±0,05	1,06±0,1	1,16±0,2	0,21±0,03	15±0,82	141±43,6	0,33±0,08
Tallo	0,73±0,05	0,09±0,01	0,62±0,02	1,45±0,04	0,07±0,02	9,75±0,96	102,25±6,85	0,09±0,04

Cuadro I-3: Promedio y error de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo relave, para la especie *Acacia saligna*.

Acacia Saligna - Grupo Relave								
Tejido	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	B (mg/kg)	Na (mg/kg)	Cl (%)
Fruto	4,83±0,43	0,21±0,03	1,19±0,06	0,81±0,05	0,17±0,01	20±1,83	207,75±8,3	0,12±0,05
Hoja	2,27±0,27	0,06±0,01	1,07±0,25	2,27±0,39	0,24±0,04	13,25±4,99	196,3±38,1	0,36±0,05
Raíz	0,77±0,05	0,02±0,01	0,71±0,05	2,84±0,47	0,1±0,01	9,5±1	299,5±75,1	0,07±0,01
Rama	1,21±0,08	0,04±0,01	1,11±0,15	1,39±0,31	0,16±0,05	13,25±2,87	144,3±50,4	0,23±0,07
Tallo	0,62±0,11	0,02±0,01	0,56±0,04	1,41±0,31	0,04±0,01	8,75±0,5	92,3±28,3	0,04±0,02

Cuadro I-4: Coeficiente de variación de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para la especie *Acacia saligna*.

Tejido	Grupo Control				Grupo Relave			
	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn
Fruto	21,19	6,72	19,71	42,55	11,08	15,29	23,23	35,59
Hoja	18,12	19,04	14,36	23,26	6,82	6,73	18,76	27,88
Raíz	68,3	41,96	47,16	30,2	26,73	55,09	15,25	54,51
Rama	7,14	8,16	11,79	33,17	14,33	20,33	21,99	24,41
Tallo	36,94	16,5	32,22	9,52	33,28	9,52	20,94	21,6

Cuadro I-5: Coeficiente de variación de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para la especie *Acacia saligna*.

Tejido	Grupo Control								Grupo Relave							
	N	P	K	Ca	Mg	B	Na	Cl	N	P	K	Ca	Mg	B	Na	Cl
Fruto	0,29	0	0,21	0,15	0,02	4,99	96,5	0,04	8,87	12,67	5,27	6,14	5,55	9,13	4	44,15
Hoja	0,05	0,01	0,13	0,16	0,07	2,38	15,33	0,08	11,79	23,47	23,25	17,32	17,66	37,67	19,39	15,34
Raíz	0,25	0,1	0,18	0,07	0,04	0,82	78	0,02	6,42	28,57	7,06	16,57	6,08	10,53	25,08	7,41
Rama	0,03	0,05	0,1	0,2	0,03	0,82	43,6	0,08	6,69	16,5	13,14	22,23	33,46	21,68	34,96	32,15
Tallo	0,05	0,01	0,02	0,04	0,02	0,96	6,85	0,04	18,39	38,49	6,39	22,15	20,41	5,71	30,72	48,51

Medias *Eucalyptus camaldulensis*

Cuadro I-6: Promedio y error de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Tejido	Grupo Control				Grupo Relave			
	Concentración de metales (mg/Kg)				Concentración de metales (mg/Kg)			
	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn
Fruto	195±25,22	17,75±0,75	218,75±31,22	14±0,58	242±28,11	32,25±1,65	262±74,04	20±1,96
Hoja	221,75±19,87	13,5±0,29	461±135,29	12,5±0,96	236,25±34,34	31,25±3,47	244,5±38,96	33,25±2,95
Raíz	1099,25±84,87	15,25±1,44	355,25±53,74	8,75±0,85	865,75±103,49	146,75±44,74	81,25±14,29	42±14,97
Rama	199,25±29,71	18,75±0,75	673,25±216,12	17±1,47	219,5±21,94	32,25±2,06	341,25±45,22	39,25±5,28
Tallo	39,25±1,38	3,5±0,29	786,75±65,44	4,25±0,25	61±15,11	6±1,08	599±150,78	15,25±2,95

Cuadro I-7: Promedio y error de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control, para la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Eucalyptus camaldulensis - Grupo Control								
Tejido	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	B (mg/kg)	Na (mg/kg)	Cl (%)
Fruto	1,42±0,27	0,16±0,02	1,43±0,12	0,91±0,12	195±50,4	16,5±2,08	1934±485	0,49±0,02
Hoja	1,79±0,17	0,1±0,02	0,73±0,09	1,61±0,24	221,8±39,7	43,25±6,13	934±236	0,12±0,03
Raíz	0,95±0,11	0,13±0,04	0,4±0,08	2,31±0,45	1099,3±169,7	8,75±2,87	433,8±97,4	0,22±0,04
Rama	0,98±0,12	0,14±0,02	0,73±0,05	3,55±0,79	199,3±59,4	18±2,71	535,5±52,2	0,35±0,04
Tallo	0,39±0,05	0,05±0,01	0,36±0,1	4,62±0,54	39,25±2,75	9±0,82	266,5±32,3	0,53±0,07

Cuadro I-8: Promedio y error de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo relave, para la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Eucalyptus camaldulensis - Grupo Relave								
Tejido	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	B (mg/kg)	Na (mg/kg)	Cl (%)
Fruto	0,76±0,17	0,05±0,02	1,41±0,11	0,94±0,19	242±56,2	19,25±2,75	3548±839	0,54±0,09
Hoja	1,67±0,1	0,05±0,01	1,18±0,07	0,96±0,26	236,3±68,7	23±1,83	1035±478	0,06±0,04
Raíz	0,5±0,21	0,02±0,01	0,64±0,14	3,95±1,03	866±207	10±1,83	464±113,1	0,08±0,01
Rama	0,79±0,1	0,04±0,01	0,89±0,14	2,6±1,4	219,5±43,9	17,25±1,5	500,5±95,6	0,25±0,04
Tallo	0,3±0,02	0,02±0,01	0,37±0,06	3,3±0,7	61±30,2	8,5±1,29	249±10,42	0,23±0,12

Cuadro I-9: Coeficiente de variación de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Tejido	Grupo Control				Grupo Relave			
	Fe	Cu	Mn	Zn	Fe	Cu	Mn	Zn
Fruto	25,86	8,45	28,54	8,25	23,23	10,25	56,52	19,58
Hoja	17,92	4,28	58,69	15,32	29,07	22,23	31,87	17,77
Raíz	15,44	18,83	30,26	19,52	23,91	60,97	35,18	71,3
Rama	29,82	8	64,2	17,32	19,99	12,75	26,5	26,91
Tallo	7,02	16,5	16,64	11,76	49,53	36	50,34	38,75

Cuadro I-10: Coeficiente de variación de la concentración de elementos trazas en los distintos tejidos vegetales, en el grupo control y relave, para la especie *Eucalyptus camaldulensis*.

Tejido	Grupo Control								Grupo Relave							
	N	P	K	Ca	Mg	B	Na	Cl	N	P	K	Ca	Mg	B	Na	Cl
Fruto	18,79	13,5	8,14	13,46	25,86	12,62	25,09	5	22,14	46,68	8,13	20,18	23,23	14,31	23,65	16,8
Hoja	9,5	20,16	11,68	14,71	17,92	14,17	25,27	24,38	6	20,16	5,5	27,26	29,07	7,94	46,19	68,04
Raíz	11,53	32,26	19,26	19,39	15,44	32,83	22,45	19,28	42,55	22,22	21,01	25,96	23,91	18,26	24,37	17,21
Rama	11,88	14,99	7,48	22,31	29,82	15,04	9,75	12,55	12,72	28,57	16,26	54,07	19,99	8,7	19,11	17,79
Tallo	11,71	23,97	28,59	11,77	7,02	9,07	12,13	13,16	7,94	28,57	16,66	21,19	49,53	15,19	4,19	51,38

Apéndice II: Medias para propiedades químicas, elementos trazas disponibles y totales para diferentes profundidades y sustratos.

Cuadro II-1: Promedio y error de las propiedades químicas, elementos trazas totales y disponibles del suelo en las distintas profundidades de medición, en el grupo control y relave.

Propiedades	Grupo Control		Grupo Relave	
	Profundidad		Profundidad	
	0-20 (cm)	20-40 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)
<i>pH (agua)</i>	6,63±0,09	6,54±0,12	7,75±0,06	7,79±0,05
<i>CE</i>	0,94±0,10	0,65±0,08	2,52±0,04	2,38±0,02
<i>MO</i>	4,22±1,17	1,48±0,14	0,85±0,05	0,83±0,07
<i>Fe-disp(mg/kg)</i>	26,88±2,01	23,63±1,98	35,5±1,95	37,25±1,37
<i>Cu-disp(mg/kg)</i>	14,61±2,55	10,51±0,66	67,25±9,12	84,75±6,11
<i>Mn-disp(mg/kg)</i>	33,83±5,43	24±5,41	4,7±0,36	4,01±0,13
<i>Zn-disp(mg/kg)</i>	3,25±0,87	1,46±0,33	8,8±1,5	9,71±2,04
<i>Fe-tot (%)</i>	6,67±0,18	7,00±0,27	8,38±0,36	8,26±0,33
<i>Cu-tot(mg/kg)</i>	160,06±15,57	132,88±6,98	1628,13±316,74	1646,25±367,61
<i>Mn-tot(mg/kg)</i>	1396,25±33,93	1393,75±34,53	2571,25±51,60	2571,25±30,73
<i>Zn-tot(mg/kg)</i>	97,38±9,42	89,13±5,68	172,88±17,79	162,13±23,06

Cuadro II-2: Coeficiente de variación de las propiedades químicas, elementos traza disponibles y totales del suelo en las distintas profundidades de medición, en el grupo control y relave.

Propiedades	Grupo Control		Grupo Relave	
	Profundidad		Profundidad	
	0-20	20-40	0-20	20-40
<i>pHw</i>	3,80	5,32	2,29	1,89
<i>CE</i>	30,60	34,17	4,83	2,69
<i>MO</i>	78,24	26,14	17,63	22,29
<i>Fe-disp</i>	21,18	23,72	15,58	10,42
<i>Cu-disp</i>	49,40	17,80	38,35	20,38
<i>Mn-disp</i>	45,41	59,62	21,52	9,46
<i>Zn-disp</i>	75,48	64,03	48,19	59,51
<i>Al-disp</i>	60,69	83,27	98,34	102,70
<i>Fe-tot</i>	7,52	11,02	12,12	11,41
<i>Cu-tot</i>	27,51	14,86	55,02	63,16
<i>Mn-tot</i>	6,87	7,01	5,68	3,38
<i>Zn-tot</i>	27,35	18,02	29,11	40,22
<i>Al-tot</i>	4,37	2,83	4,32	4,92

Apéndice III: Valores de probabilidad de diferentes test que contrarresta la concentración de elementos traza.

Cuadro III-1: Valores p del test de Mann Whitney que contrarresta la concentración de elementos traza en los tejidos vegetales para cada especie, entre el grupo control y el grupo relave.

Tejido	<i>Acacia saligna</i>				<i>Eucalyptus camaldulensis</i>			
	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>
<i>Fruto</i>	0,312	0,030*	0,665	0,030*	0,312	0,030*	1,000	0,030*
<i>Hoja</i>	0,112	0,030*	0,387	0,030*	1,000	0,030*	0,194	0,030*
<i>Raíz</i>	0,665	0,030*	0,312	0,030*	0,194	0,030*	0,030*	0,030*
<i>Rama</i>	0,665	0,030*	0,030*	0,030*	0,885	0,030*	0,194	0,030*
<i>Tallo</i>	0,471	0,030*	1,000	0,030*	1,000	0,030*	0,665	0,030*

Tejido	<i>Acacia Saligna</i>								<i>Eucalyptus Camaldulensis</i>							
	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>B</i>	<i>Na</i>	<i>Cl</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>B</i>	<i>Na</i>	<i>Cl</i>
<i>Fruto</i>	0,06	-	1	0,31	0,03*	1	1	0,66	0,03*	0,03*	0,88	1	0,31	0,24	0,03*	0,31
<i>Hoja</i>	0,47	0,03*	0,19	0,47	0,06	0,03*	0,56	0,06	0,66	0,03*	0,03*	0,06	1	0,03	0,88	0,08
<i>Raíz</i>	0,11	0,03*	1	0,03*	0,06	0,66	0,88	0,08	0,03*	0,03*	0,03*	0,03*	0,19	0,38	0,88	0,03*
<i>Rama</i>	0,19	0,03*	0,88	0,38	0,19	0,31	1	0,19	0,06	0,03*	0,11	0,19	0,88	0,31	0,66	0,03*
<i>Tallo</i>	0,04	0,03*	0,06	0,31	0,11	0,19	0,31	0,14	0,06	0,03*	0,47	0,11	1	0,66	0,47	0,03*

* Existen diferencias significativas en la concentración de elementos ($P < 0.05$)

Cuadro III-2: Valores p del test de Mann Whitney que confronta la concentración de elementos traza en los tejidos vegetales para el grupo relave, entre especies

Tejido	Grupo Relave			
	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>
<i>Fruto</i>	0,030*	0,030*	0,030*	0,471
<i>Hoja</i>	0,030*	0,043*	0,030*	0,248
<i>Raíz</i>	0,061	0,885	0,773	0,665
<i>Rama</i>	0,030*	0,030*	0,030*	0,885
<i>Tallo</i>	0,665	0,885	0,030*	0,194

* Existen diferencias significativas en la concentración de elementos, con una significancia del 5%

Cuadro III-3: Valores p del test de Kruskal-Wallis que contrarresta la concentración de elementos traza para el grupo relave y para cada especie, entre tejidos vegetales.

	Especie	
	<i>Acacia saligna</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
	Valor p	Valor p
<i>Fe</i>	0,002*	0,005*
<i>Cu</i>	0,002*	0,006
<i>Mn</i>	0,001*	0,016*
<i>Zn</i>	0,011*	0,027*

* Existen diferencias significativas en la concentración de elementos, con una significancia del 5%

Cuadro III-4: Valores p del test de Mann Whitney que contrarresta las propiedades químicas del suelo, elementos traza disponibles y totales, para cada profundidad de medición, entre el grupo control y el grupo relave.

Propiedades	Profundidad	
	0-20	20-40
<i>pHw</i>	0,001*	0,001*
<i>CE</i>	0,001*	0,001*
<i>MO</i>	0,001*	0,002*
<i>Fe-disp</i>	0,012*	0,001*
<i>Cu-disp</i>	0,001*	0,001*
<i>Mn-disp</i>	0,001*	0,002*
<i>Zn-disp</i>	0,012*	0,001*
<i>Al-disp</i>	0,059	0,372
<i>Fe-tot</i>	0,005*	0,014*
<i>Cu-tot</i>	0,001*	0,001*
<i>Mn-tot</i>	0,001*	0,001*
<i>Zn-tot</i>	0,005*	0,003*
<i>Al-tot</i>	0,001*	0,001*

* Indica diferencias significativas respecto a las propiedades químicas del suelo descritas, con una significancia del 5%.

Cuadro III-5: Valores p del test de Mann Whitney que contrarresta las propiedades químicas, elementos traza disponibles y totales del suelo para el grupo control y grupo relave, entre distintas profundidades de medición

Propiedades	Grupo	
	<i>Control</i>	<i>Relave</i>
<i>pHw</i>	0,637	0,713
<i>CE</i>	0,066	0,014*
<i>MO</i>	0,004*	0,793
<i>Fe-disp</i>	0,318	0,793
<i>Cu-disp</i>	0,052	0,128
<i>Mn-disp</i>	0,224*	0,189
<i>Zn-disp</i>	0,031*	0,875
<i>Al-disp</i>	0,793	0,600
<i>Fe-tot</i>	0,564	0,637
<i>Cu-tot</i>	0,227	0,564
<i>Mn-tot</i>	1,000	1,000
<i>Zn-tot</i>	0,431	0,431
<i>Al-tot</i>	0,172	0,052

* Existen diferencias significativas respecto a las propiedades químicas del suelo, con una significancia del 5%

Apéndice IV: Resultados brutos para contenido de elementos traza estudiados en diferentes tejidos y sustratos

Cuadro IV-1: Contenido de elementos traza en hojas de *Acacia saligna*.

ANÁLISIS TEJIDOS		HOJAS							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD	RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
N	%	2,13	2,33	2,64	2,3	2,26	2,22	2,03	2,31
P	%	0,05	0,08	0,07	0,09	0,06	0,09	0,04	0,09
K	%	1,19	0,91	1,27	0,66	1,11	0,87	0,71	0,96
Ca	%	2,13	1,92	2,37	1,97	1,82	1,93	2,75	2,26
Mg	%	0,24	0,33	0,28	0,44	0,25	0,35	0,18	0,27
Cu	mg/Kg	20	15	20	14	23	11	21	10
Zn	mg/Kg	34	14	53	10	61	8	37	11
Mn	mg/Kg	90	121	129	115	88	91	98	129
Fe	mg/Kg	129	203	134	168	146	137	125	145
B	mg/Kg	10	24	14	23	9	27	20	28
Na	mg/Kg	154	182	205	169	244	199	182	165
Cl	%	0,43	0,58	0,31	0,56	0,32	0,46	0,36	0,42

Cuadro IV-2: Contenido de elementos traza en tallo de *Acacia saligna*.

ANÁLISIS TEJIDOS		TALLO							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD	RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
N	%	0,68	0,73	0,66	0,71	0,45	0,8	0,69	0,69
P	%	0,02	0,08	0,02	0,08	0,01	0,09	0,01	0,09
K	%	0,57	0,65	0,53	0,61	0,54	0,61	0,61	0,62
Ca	%	1,18	1,45	1,35	1,4	1,25	1,5	1,87	1,44
Mg	%	0,04	0,07	0,04	0,08	0,05	0,07	0,03	0,04
Cu	mg/Kg	5	3	6	4	5	4	5	3
Zn	mg/Kg	10	6	13	5	9	5	8	5
Mn	mg/Kg	21	15	15	18	16	24	13	11
Fe	mg/Kg	44	41	59	50	96	88	64	49
B	mg/Kg	9	10	9	11	8	9	9	9
Na	mg/Kg	72	100	78	101	134	96	85	112
Cl	%	0,02	0,12	0,07	0,07	0,04	0,04	0,04	0,13

Cuadro IV-3: Contenido de elementos traza en ramas de *Acacia saligna*.

ANÁLISIS TEJIDOS		RAMAS							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
	UNIDAD								
N	%	1,32	1,3	1,2	1,34	1,16	1,27	1,14	1,29
P	%	0,04	0,2	0,03	0,15	0,04	0,13	0,03	0,25
K	%	1,32	1,18	1,04	0,94	1,09	1,05	0,99	1,07
Ca	%	1,36	1	1,46	1,12	1	1,05	1,75	1,45
Mg	%	0,18	0,22	0,19	0,24	0,19	0,16	0,08	0,21
Cu	mg/Kg	13	11	19	10	13	9	18	10
Zn	mg/Kg	50	21	39	17	44	9	27	14
Mn	mg/Kg	40	29	38	28	34	22	55	26
Fe	mg/Kg	99	105	139	116	115	125	128	114
B	mg/Kg	13	15	13	16	10	15	17	14
Na	mg/Kg	100	195	147	154	116	121	214	94
Cl	%	0,22	0,4	0,14	0,31	0,24	0,39	0,32	0,23

Cuadro IV-4: Contenido de elementos traza en semillas de *Acacia saligna*.

ANÁLISIS TEJIDOS		SEMILLA							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	4,42	4,02	4,62	4,55	5,41	3,96	4,87	4,4
P	%	0,19	0,36	0,23	0,36	0,23	0,36	0,18	0,36
K	%	1,26	1,19	1,21	1,13	1,12	1,12	1,15	1,56
Ca	%	0,88	0,61	0,82	0,63	0,77	0,75	0,78	0,93
Mg	%	0,16	0,2	0,18	0,21	0,18	0,25	0,17	0,2
Cu	mg/Kg	10	10	12	10	11	10	10	8
Zn	mg/Kg	43	41	49	40	49	29	42	30
Mn	mg/Kg	50	62	54	51	48	53	45	62
Fe	mg/Kg	81	90	74	89	104	77	69	92
B	mg/Kg	18	18	19	25	22	17	21	27
Na	mg/Kg	207	149	217	175	210	361	197	268
Cl	%	0,18	0,16	0,08	0,1	0,14	0,07	0,07	0,07

Cuadro IV-5: Contenido de elementos traza en raíces de *Acacia saligna*.

ANÁLISIS TEJIDOS		RAICES							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	0,72	0,77	0,81	1,29	0,81	0,92	0,73	1,22
P	%	0,02	0,14	0,02	0,18	0,02	0,27	0,01	0,36
K	%	0,76	0,49	0,66	0,55	0,74	0,84	0,67	0,83
Ca	%	3,01	1,4	2,15	1,43	2,99	1,27	3,21	1,38
Mg	%	0,09	0,2	0,1	0,15	0,09	0,1	0,1	0,12
Cu	mg/Kg	58	21	135	11	262	8	247	13
Zn	mg/Kg	21	10	28	13	52	6	16	12
Mn	mg/Kg	70	112	64	57	85	39	61	59
Fe	mg/Kg	1101	3676	2123	1550	1562	761	1918	1418
B	mg/Kg	9	8	9	9	9	9	11	10
Na	mg/Kg	407	291	290	256	266	298	235	130
Cl	%	0,07	0,09	0,06	0,09	0,07	0,07	0,07	0,11

Cuadro IV-6: Contenido de elementos traza en hojas de *Eucalyptus camaldulensis*

ANÁLISIS TEJIDOS		HOJAS							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	1,73	1,68	1,73	1,77	1,69	2,04	1,52	1,68
P	%	0,04	0,08	0,06	0,12	0,05	0,1	0,04	0,08
K	%	1,27	0,63	1,15	0,83	1,19	0,76	1,12	0,7
Ca	%	0,94	1,55	0,8	1,86	0,77	1,31	1,34	1,72
Mg	%	0,14	0,24	0,14	0,24	0,12	0,2	0,08	0,24
Cu	mg/Kg	23	13	40	14	31	13	31	14
Zn	mg/Kg	33	10	37	14	38	12	25	14
Mn	mg/Kg	337	512	281	821	181	294	179	217
Fe	mg/Kg	189	241	335	266	190	204	231	176
B	mg/Kg	22	43	24	51	21	36	25	43
Na	mg/Kg	607	641	1715	1036	974	868	844	1192
Cl	%	0,02	0,13	0,03	0,11	0,09	0,09	0,1	0,16

Cuadro IV-7: Contenido de elementos traza en tallo de *Eucalyptus camaldulensis*

ANÁLISIS TEJIDOS		TALLO							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	0,28	0,41	0,33	0,42	0,28	0,32	0,3	0,39
P	%	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	0,07	0,01	0,04
K	%	0,36	0,28	0,3	0,35	0,37	0,29	0,45	0,5
Ca	%	2,72	4,8	3,2	5,31	2,98	4,19	4,31	4,18
Mg	%	0,18	0,26	0,18	0,29	0,19	0,36	0,1	0,24
Cu	mg/Kg	5	4	9	3	6	4	4	3
Zn	mg/Kg	13	4	16	5	23	4	9	4
Mn	mg/Kg	938	634	754	926	275	859	429	728
Fe	mg/Kg	34	38	91	36	83	41	36	42
B	mg/Kg	10	8	8	10	7	9	9	9
Na	mg/Kg	264	253	245	232	247	308	240	273
Cl	%	0,06	0,44	0,23	0,54	0,31	0,61	0,3	0,53

Cuadro IV-8: Contenido de elementos traza en ramas de *Eucalyptus camaldulensis*

ANÁLISIS TEJIDOS		RAMAS							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	0,68	0,95	0,78	0,84	0,92	1,12	0,76	1
P	%	0,03	0,14	0,05	0,11	0,03	0,14	0,03	0,16
K	%	0,83	0,77	1,08	0,65	0,89	0,76	0,74	0,73
Ca	%	0,81	3,29	2,46	4,73	2,9	3,17	4,21	3,02
Mg	%	0,12	0,32	0,18	0,45	0,14	0,26	0,08	0,16
Cu	mg/Kg	27	18	31	20	35	20	36	17
Zn	mg/Kg	36	17	38	20	54	18	29	13
Mn	mg/Kg	428	599	407	1305	242	410	288	379
Fe	mg/Kg	272	252	237	213	173	218	196	114
B	mg/Kg	18	20	18	19	18	19	15	14
Na	mg/Kg	362	530	576	580	515	568	549	464
Cl	%	0,18	0,4	0,27	0,31	0,27	0,38	0,26	0,32

Cuadro IV-9: Contenido de elementos traza en semillas de *Eucalyptus camaldulensis*

ANÁLISIS TEJIDOS		FRUTO							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	0,61	1,57	0,81	1,15	0,98	1,25	0,65	1,72
P	%	0,04	0,17	0,06	0,13	0,07	0,16	0,02	0,18
K	%	1,27	1,53	1,4	1,42	1,42	1,27	1,55	1,5
Ca	%	0,96	1,02	0,82	0,81	0,78	0,79	1,2	1
Mg	%	0,13	0,19	0,2	0,18	0,14	0,19	0,1	0,17
Cu	mg/Kg	30	19	30	17	32	19	37	16
Zn	mg/Kg	18	13	21	13	25	15	16	15
Mn	mg/Kg	298	198	455	302	170	153	125	222
Fe	mg/Kg	220	256	208	212	214	173	326	139
B	mg/Kg	16	19	21	16	22	14	18	17
Na	mg/Kg	2985	2052	3201	2563	3209	1649	4797	1470
Cl	%	0,54	0,5	0,55	0,47	0,64	0,47	0,42	0,52

Cuadro IV-10: Contenido de elementos traza en raíces de *Eucalyptus camaldulensis*

ANÁLISIS TEJIDOS		RAICES							
		RELAVE 1	SITIO 1	RELAVE 2	SITIO 2	RELAVE 3	SITIO 3	RELAVE 4	SITIO 4
Elemento	UNIDAD								
N	%	0,41	0,87	0,28	0,93	0,78	0,89	0,53	1,11
P	%	0,02	0,08	0,02	0,18	0,03	0,12	0,02	0,13
K	%	0,53	0,35	0,56	0,5	0,83	0,33	0,65	0,42
Ca	%	2,99	1,72	4,44	2,66	3,22	2,66	5,16	2,21
Mg	%	0,09	0,1	0,1	0,21	0,13	0,19	0,1	0,16
Cu	mg/Kg	85	16	66	19	260	13	176	13
Zn	mg/Kg	35	8	36	11	84	9	13	7
Mn	mg/Kg	50	206	105	460	106	363	64	392
Fe	mg/Kg	806	921	808	1069	1164	1330	685	1077
B	mg/Kg	8	8	9	13	12	7	11	7
Na	mg/Kg	315	328	568	557	533	394	440	456
Cl	%	0,09	0,17	0,07	0,2	0,06	0,25	0,08	0,26

Cuadro IV-11: Algunas propiedades químicas y contenido de elementos traza disponibles en los diferentes suelos y sustratos analizados para Acacia saligna.

	UNIDAD	PROF.	REL 1	SITIO 1	REL 2	SITIO 2	REL 3	SITIO 3	REL 4	SITIO 4
pH (agua) 1:2,5		0-20	7,90	7,00	7,60	6,40	7,90	6,90	8,00	6,70
		20-40	7,70	6,60	7,80	6,80	7,80	6,90	8,00	6,90
CE	dS/m	0-20	2,54	0,49	2,75	0,63	2,49	0,80	2,49	1,11
		20-40	2,46	0,57	2,37	0,37	2,34	0,42	2,33	0,56
MO	%	0-20	0,82	1,96	0,99	5,61	0,61	10,50	1,08	7,46
		20-40	0,79	1,10	1,04	1,55	0,62	1,19	0,80	2,27
Fe ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	35	20	37,00	25,00	25,00	23,00	35,00	35,00
		20-40	42,00	25,00	42,00	17,00	39,00	17,00	33,00	18,00
Cu ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	56	12	57,00	15,00	87,00	10,00	24,00	32,00
		20-40	74,00	11,00	64,00	11,00	100,00	9,00	88,00	12,00
Mn ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	4,1	20,4	4,20	17,70	4,20	12,50	4,20	33,40
		20-40	3,70	13,40	4,40	7,81	4,10	8,49	4,30	19,60
Zn ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	9,2	1,8	9,60	2,10	13,00	2,80	2,30	9,20
		20-40	6,70	0,80	12,00	0,50	17,00	0,60	2,80	2,70
Al ⁽²⁾	mg/kg	0-20	0	0	0,00	0,40	0,00	0,70	0,40	1,30
		20-40	0,30	0,70	0,10	1,20	0,90	2,00	0,40	1,20

Cuadro IV-12: Contenido de elementos traza totales en los diferentes suelos y sustratos analizados para Acacia saligna.

Elemento	unidad	PROF.	REL 1	SITIO 1	REL 2	SITIO 2	REL 3	SITIO 3	REL 4	SITIO 4
Ag	ppm	0-20	0,62	0,04	0,95	0,05	1,66	0,05	1,89	0,11
		20-40	0,74	0,04	0,61	0,03	1,41	0,05	2,08	0,05
Al	%	0-20	5,94	8,9	5,96	8,9	6,19	8,6	6,64	8,39
		20-40	6,27	9,27	5,67	9,11	6,09	8,99	6,01	8,91
As	ppm	0-20	87	7,2	105	8	202	7,4	49,6	6,8
		20-40	104	7,4	81	7	170	7,4	66	7,9
Ba	ppm	0-20	470	300	400	280	490	300	1450	430
		20-40	480	290	370	240	490	280	2530	390
Be	ppm	0-20	0,43	0,88	0,55	0,83	0,51	0,82	0,63	0,83
		20-40	0,57	0,89	0,47	0,81	0,47	0,99	0,46	0,96
Bi	ppm	0-20	0,56	0,06	0,58	0,1	0,56	0,09	0,91	0,1
		20-40	0,54	0,06	0,7	0,05	0,44	0,05	2,46	0,05
Ca	%	0-20	13,6	2,94	14,85	3,25	13,95	3,18	9,45	2,5
		20-40	14	2,96	14,8	3,43	14,3	3,17	10,4	2,7
Cd	ppm	0-20	0,33	0,12	0,4	0,09	0,9	0,09	0,55	<0,02

		20-40	0,34	0,09	0,36	0,07	0,76	0,08	0,48	0,1
Ce	ppm	0-20	26,4	35,2	28,1	32,8	28,8	32,1	34,9	32,1
		20-40	25,4	33,2	25,5	33,1	25,6	33,3	30,7	34,3
Co	ppm	0-20	86,5	23	107,5	26	138,5	24,7	73,4	22,9
		20-40	90,3	24,7	117	27,3	116,5	27,9	54,6	27,3
Cr	ppm	0-20	26	52	24	57	23	55	33	50
		20-40	26	58	24	62	23	67	29	58
Cs	ppm	0-20	1	1,99	0,63	1,77	0,82	1,82	2,02	1,95
		20-40	1,01	2,04	0,61	1,79	0,74	1,91	2,23	2,08
Cu	ppm	0-20	758	133	774	176	2290	164,5	2480	258
		20-40	958	131,5	694	150,5	2040	143,5	2700	166
Fe	%	0-20	7,9	7,36	9,11	7,39	9,06	6,99	6,91	6,36
		20-40	8,37	7,75	9,63	7,91	8,53	7,84	7,08	7,26
Ga	ppm	0-20	12,7	19,15	13,45	19,25	13,8	18,5	15,35	17,5
		20-40	13,45	20,2	12,55	20,7	12,55	21	14,45	20,3
Ge	ppm	0-20	0,13	0,12	0,16	0,14	0,16	0,15	0,14	0,13
		20-40	0,13	0,15	0,14	0,16	0,12	0,17	0,1	0,18
Hf	ppm	0-20	2,4	2,2	2,1	2,2	2	2,1	2,2	2,3
		20-40	2,3	2,3	2,1	2	1,9	2	1,9	2,3
In	ppm	0-20	0,196	0,061	0,301	0,061	0,276	0,052	0,22	0,047
		20-40	0,199	0,065	0,261	0,065	0,232	0,067	0,449	0,065
K	%	0-20	1,18	1,13	0,91	1,07	1,06	1,12	1,4	1,5
		20-40	1,28	1,11	0,86	0,98	1,01	1,09	1,2	1,41
La	ppm	0-20	12,5	15,6	13,7	14,8	13,9	14,1	17	13,7
		20-40	11,7	15,3	12,4	15,1	12,4	14,5	14,6	15,6
Li	ppm	0-20	5,5	13,6	4,8	14,5	7,4	14,1	15,9	16,1
		20-40	5,4	14,1	4,2	14,3	6,9	14,9	16,1	16,5
Mg	%	0-20	1,5	1,05	1,47	1,4	1,38	1,33	1,89	1,05
		20-40	1,39	1,15	1,37	1,39	1,42	1,37	1,87	1,2
Mn	ppm	0-20	2500	1345	2680	1480	2650	1445	2350	1575
		20-40	2550	1340	2720	1450	2640	1475	2440	1575
Na	%	0-20	0,41	2,35	0,24	2,34	0,47	2,25	1,71	2,05
		20-40	0,41	2,3	0,19	2,32	0,54	2,31	1,6	2,19
Nb	ppm	0-20	12,5	3	7,3	2,5	6,3	2,4	4,3	2,7
		20-40	2,5	2,9	2,3	2,5	2,3	2,6	2,1	2,8
Ni	ppm	0-20	65	16,7	75,7	19	63,7	18,6	29,3	17,3
		20-40	71,8	17,7	83,3	19,9	58,9	21,2	20,9	20,5
P	ppm	0-20	1220	880	1270	1190	1110	1450	970	1640
		20-40	1210	870	1130	1030	1120	1060	870	1360
Pb	ppm	0-20	34,5	10,7	44,5	13	122,5	23,3	53,1	42,3
		20-40	31,9	10,8	40,8	9,4	119	12,7	59,3	16,1
Rb	ppm	0-20	39	46,6	26,7	41,2	32,7	44,6	50	58,2
		20-40	42,9	48,4	27,7	38,5	29,6	41,3	44,2	55,9

Re	ppm	0-20	0,093	0,003	0,062	0,003	0,056	0,003	0,029	0,004
		20-40	0,077	0,002	0,057	0,003	0,062	0,003	0,024	0,002
S	%	0-20	2,23	0,03	2,95	0,05	3,76	0,05	1,38	0,04
		20-40	2,4	0,02	3,46	0,02	3,44	0,02	1,17	0,02
Sb	ppm	0-20	3	1,01	3,3	0,93	4,8	0,96	3,02	0,83
		20-40	2,29	0,91	3,02	0,79	4,12	0,84	2,18	0,79
Sc	ppm	0-20	15,9	34,5	16,1	36,4	17,9	33,8	23,1	31,1
		20-40	16,9	35,3	14,8	39,4	15,6	39,3	19,4	36,7
Se	ppm	0-20	5	1	5	1	7	1	3	1
		20-40	4	1	6	1	6	1	3	2
Sn	ppm	0-20	1,2	1,4	1,4	2,1	1,3	8,9	1,9	45,1
		20-40	1,3	4	1,8	3,2	1,2	2,8	3,2	3,7
Sr	ppm	0-20	195	423	227	438	200	436	229	365
		20-40	203	424	185	466	189,5	446	215	399
Ta	ppm	0-20	1,35	0,23	0,76	0,19	0,63	0,18	0,38	0,25
		20-40	0,2	0,22	0,19	0,19	0,17	0,2	0,17	0,21
Te	ppm	0-20	0,26	<0,05	0,35	0,06	0,34	<0,05	0,39	0,06
		20-40	0,29	0,06	0,39	0,05	0,28	<0,05	1	<0,05
Th	ppm	0-20	5,6	3,9	4,6	3,5	4,6	3,5	4,5	3,7
		20-40	5,4	3,7	4,5	3,3	4,3	3,3	3,8	3,6
Ti	ppm	0-20	0,268	0,562	0,26	0,511	0,272	0,498	0,33	0,513
		20-40	0,28	0,567	0,243	0,525	0,268	0,537	0,285	0,555
Tl	ppm	0-20	0,17	0,13	0,09	0,12	0,13	0,11	0,6	0,15
		20-40	0,14	0,14	0,09	0,1	0,11	0,1	0,58	0,14
U	ppm	0-20	3,2	1	3,9	0,9	3,4	0,8	3,5	0,9
		20-40	3,4	1	3,4	0,8	3,1	0,8	3,5	0,9
V	ppm	0-20	100	257	94	249	108	236	152	218
		20-40	106	274	89	278	113	282	141	261
W	ppm	0-20	6	0,9	6,6	0,8	7	0,7	4,7	0,6
		20-40	4,8	0,8	7,6	0,8	5,7	0,7	10,9	0,7
Y	ppm	0-20	15,5	18,8	16,2	19	16,6	18,6	16,9	17,5
		20-40	16,8	19,3	14,4	20,1	15,2	19,7	15	19,5
Zn	ppm	0-20	135	92	146	97	239	114	137	156
		20-40	144	92	134	88	258	97	145	124
Zr	ppm	0-20	77,9	62,2	64,4	59	71,3	58,6	76,3	65,2
		20-40	69,9	65,6	58,7	60,2	57,5	59,4	59,1	65,5

Cuadro IV-13: Algunas propiedades químicas y contenido de elementos traza disponibles en los diferentes suelos y sustratos analizados para *Eucalyptus camaldulensis*.

	UNIDAD	PROF.	REL 1	SITIO 1	REL 2	SITIO 2	REL 3	SITIO 3	REL 4	SITIO 4
pH (agua) 1:2,5		0-20	7,60	6,80	7,70	6,40	7,50	6,40	7,80	6,35
		20-40	7,85	6,70	7,90	6,20	7,50	6,00	7,80	6,25
CE	dS/m	0-20	2,38	1,14	2,44	1,15	2,64	0,88	2,43	1,32
		20-40	2,41	0,91	2,28	0,92	2,41	0,87	2,46	0,56
MO	%	0-20	0,92	1,84	0,89	1,77	0,76	1,77	0,74	2,88
		20-40	1,13	1,69	0,81	1,57	0,59	1,35	0,87	1,13
Fe ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	39	21	31,00	27,00	39,00	30,00	43,00	34,00
		20-40	40,00	30,00	34,00	29,00	34,00	24,00	34,00	29,00
Cu ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	72	13	48,00	10,00	97,00	12,00	97,00	13,00
		20-40	94,00	14,00	58,00	9,00	104,00	9,00	96,00	10,00
Mn ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	6,7	40,9	4,10	42,80	5,90	50,10	4,20	52,83
		20-40	3,80	26,20	3,40	44,10	4,50	32,50	3,90	35,50
Zn ⁽¹⁾	mg/kg	0-20	9,4	2,5	8,20	1,80	15,00	2,60	3,70	3,20
		20-40	6,80	3,00	11,00	1,50	18,00	1,10	3,40	1,50
Al ⁽²⁾	mg/kg	0-20	0,5	1,3	0,90	0,90	0,50	0,60	0,30	0,60
		20-40	0,00	0,40	0,00	0,30	1,10	0,10	1,40	0,30

Cuadro IV-14: Contenido de elementos traza totales en los diferentes suelos y sustratos analizados para *Eucalyptus camaldulensis*

Elemento	unidades	PROF.	REL 1	SITIO 1	REL 2	SITIO 2	REL 3	SITIO 3	REL 4	SITIO 4
Ag	ppm	0-20	0,74	0,05	0,62	0,04	1,4	0,05	2,03	0,04
		20-40	0,62	0,06	0,62	0,04	1,32	0,04	2,34	0,02
Al	%	0-20	6,27	9,15	6,02	9,59	5,92	9,27	6,46	9,3
		20-40	5,6	9,63	5,6	9,6	5,9	9,34	6,34	9,2
As	ppm	0-20	104	7,4	97	7,4	170	7,4	50,6	7,8
		20-40	87	6,6	87	6,4	172	6,4	52,9	6,6
Ba	ppm	0-20	480	330	410	320	460	330	2070	320
		20-40	390	350	390	330	430	330	2770	310
Be	ppm	0-20	0,57	0,8	0,48	0,81	0,46	0,77	0,73	0,81
		20-40	0,48	0,8	0,48	0,76	0,5	0,73	0,63	0,72
Bi	ppm	0-20	0,54	0,06	0,51	0,05	0,52	0,06	1,31	0,06
		20-40	0,74	0,06	0,74	0,04	0,45	0,05	2,95	0,04
Ca	%	0-20	14	3,33	15,6	3,71	13,65	3,59	9,67	3,52
		20-40	14,15	3,47	14,15	3,66	14,25	3,48	9,72	3,48
Cd	ppm	0-20	0,34	0,11	0,32	0,11	0,76	0,1	0,62	0,09

		20-40	0,39	0,11	0,39	0,09	0,78	0,1	0,62	0,1
Ce	ppm	0-20	25,4	29,7	27,9	31	26,7	30,4	34,2	29,5
		20-40	24,8	28,4	24,8	31,9	27,5	31,2	30	29,8
Co	ppm	0-20	90,3	23,5	101,5	22,3	134,5	21,9	67,4	22,1
		20-40	116,5	22,1	116,5	23	129,5	22,2	54,5	21,8
Cr	ppm	0-20	26	26	25	29	23	29	34	31
		20-40	23	26	23	27	22	31	34	34
Cs	ppm	0-20	1,01	1,56	0,61	1,56	0,68	1,53	2,18	1,54
		20-40	0,71	1,48	0,71	1,55	0,64	1,66	2,84	1,54
Cu	ppm	0-20	958	163	715	127	2330	129,5	2720	129,5
		20-40	664	132,5	664	116	2280	113,5	3230	109,5
Fe	%	0-20	8,37	6,18	9,64	6,48	9,03	6,26	7,03	6,32
		20-40	8,87	6,17	8,87	6,47	8,76	6,33	6,76	6,24
Ga	ppm	0-20	13,45	19,15	13,2	19,6	12,65	18,95	15,5	19
		20-40	12,4	18,5	12,4	19,65	12,8	19,1	16,15	18,9
Ge	ppm	0-20	0,13	0,13	0,13	0,13	0,16	0,13	0,12	0,14
		20-40	0,13	0,12	0,13	0,16	0,13	0,14	0,11	0,13
Hf	ppm	0-20	2,3	1,8	2,1	1,9	1,9	1,9	2,1	1,9
		20-40	1,9	1,8	1,9	1,9	2	2	2,2	1,9
In	ppm	0-20	0,199	0,06	0,284	0,062	0,245	0,058	0,255	0,06
		20-40	0,257	0,056	0,257	0,061	0,278	0,061	0,381	0,054
K	%	0-20	1,28	1,24	0,89	1,23	0,98	1,24	1,31	1,25
		20-40	0,94	1,35	0,94	1,27	0,88	1,26	1,33	1,2
La	ppm	0-20	11,7	12,8	13,5	13,5	12,9	13,2	16,5	12,9
		20-40	12,2	12,3	12,2	13,7	13,6	13,8	14,3	13,1
Li	ppm	0-20	5,4	12,6	5,2	12,9	6,7	12,7	17,3	13,3
		20-40	5	12,5	5	12,8	6,5	13,1	21,3	13,2
Mg	%	0-20	1,39	0,94	1,55	0,92	1,27	0,88	2	0,94
		20-40	1,31	0,88	1,31	0,9	1,32	0,86	2,19	0,88
Mn	ppm	0-20	2550	1380	2820	1330	2570	1300	2450	1315
		20-40	2550	1360	2550	1355	2580	1305	2530	1290
Na	%	0-20	0,41	2,27	0,24	2,32	0,43	2,3	1,56	2,3
		20-40	0,2	2,51	0,2	2,33	0,46	2,24	1,58	2,25
Nb	ppm	0-20	2,5	2,6	2,4	2,5	2,2	2,5	2,2	2,5
		20-40	2,3	2,6	2,3	2,6	2,2	2,6	2,1	2,6
Ni	ppm	0-20	71,8	13	78	12,3	63	12,1	33,7	12,4
		20-40	78,9	11,5	78,9	12,5	63,1	13,4	23,9	12,9
P	ppm	0-20	1210	800	1240	770	1010	790	1000	790
		20-40	1100	870	1100	770	1040	710	930	710
Pb	ppm	0-20	31,9	17,3	35,5	11	118,5	11,7	73,6	11,8
		20-40	40,2	12,7	40,2	10,3	106	9,8	71,4	9,9
Rb	ppm	0-20	42,4	45,9	26,3	48,4	29,7	48	48,1	47,5

		20-40	30,8	47,9	30,8	50,6	26,5	53,7	51,3	47,9
Re	ppm	0-20	0,077	0,004	0,057	0,003	0,053	0,005	0,029	0,004
		20-40	0,052	0,003	0,052	0,004	0,053	0,005	0,026	0,004
S	%	0-20	2,4	0,02	3,04	0,02	3,92	0,02	1,34	0,02
		20-40	3,48	0,02	3,48	0,02	3,73	0,01	0,93	0,01
Sb	ppm	0-20	2,29	0,82	2,79	0,85	3,91	0,89	2,91	0,84
		20-40	3,21	0,84	3,21	0,84	3,77	0,81	2,36	0,81
Sc	ppm	0-20	16,9	32,7	16,5	34,2	15,7	33	22,5	33,3
		20-40	15,5	31,7	15,5	34,6	16,4	33,4	23,6	33,9
Se	ppm	0-20	4	1	5	1	7	1	3	1
		20-40	5	1	5	2	6	1	3	1
Sn	ppm	0-20	1,3	3,2	1,5	1,3	1,3	3	2	2,8
		20-40	1,5	1,5	1,5	1,6	1,2	1,6	2,8	1,2
Sr	ppm	0-20	203	469	224	518	187,5	502	223	490
		20-40	184,5	504	184,5	513	191,5	490	220	485
Ta	ppm	0-20	0,2	0,21	0,18	0,2	0,17	0,2	0,17	0,2
		20-40	0,18	0,2	0,18	0,2	0,17	0,2	0,17	0,19
Te	ppm	0-20	0,29	0,07	0,33	0,06	0,33	0,06	0,56	0,08
		20-40	0,38	0,06	0,38	0,06	0,32	0,07	1,17	0,06
Th	ppm	0-20	5,4	3,2	4,7	3,2	4,2	3,1	4,4	3,4
		20-40	4,6	3	4,6	3,1	4,3	3,2	4,2	3,1
Ti	ppm	0-20	0,28	0,495	0,263	0,513	0,259	0,504	0,313	0,514
		20-40	0,237	0,513	0,237	0,522	0,255	0,529	0,303	0,518
Tl	ppm	0-20	0,14	0,11	0,07	0,12	0,09	0,12	0,6	0,13
		20-40	0,1	0,12	0,1	0,13	0,09	0,12	0,69	0,13
U	ppm	0-20	3,4	0,8	3,7	0,8	3,2	0,8	3,5	0,8
		20-40	3,3	0,7	3,3	0,8	3,3	0,8	3,5	0,8
V	ppm	0-20	106	232	97	246	104	233	158	240
		20-40	8,4	230	84	247	105	243	158	238
W	ppm	0-20	4,8	0,6	6,7	0,7	6	0,7	5,7	0,7
		20-40	6,9	0,6	6,9	0,7	6,2	0,7	9,5	0,7
Y	ppm	0-20	16,8	18,1	15,7	18,6	15,2	18,1	16,5	18,2
		20-40	14,6	17,9	14,6	18,5	15,4	18,7	16	18,5
Zn	ppm	0-20	144	82	140	78	262	78	180	82
		20-40	131	82	131	77	264	76	168	77
Zr	ppm	0-20	69,9	50,6	62,7	54,5	59,6	53,2	69	52,3
		20-40	59,2	50,1	59,2	55	57,6	56,5	65,4	54,6

ANEXOS

Anexo I: Antecedentes generales de suelos en las III, IV y V regiones

Entre 1991 y 1990, INIA desarrolló dos estudios prospectivos del contenido total de As, Cd, Mo, Pb, y Zn en suelos aluviales entre los ríos Huasco (III región) y Simpson (XI región). Se entrega un resumen de los resultados, de acuerdo a los elementos trazas y la ubicación geográfica.

Cuadro I-1: Contenido de Cu, Mn, Mo y Zn en suelos cultivados de Chile regiones III a V

Valle	Región	Prom.	Mín.	Máx.	N° Observaciones
		-----mg kg ss ⁻¹ -----			
Cobre					
Huasco	III	31	13	53	29
Elqui	IV	87	14	160	21
Limarí	IV	65	36	100	18
Ligua	V	72	16	274	34
Manganeso					
Huasco	III	- ⁽¹⁾	-	-	
Elqui	IV	739	110	1450	18
Limarí	IV	876	570	1340	18
Molibdeno					
Huasco	III	<10,0	<10,0	<10,0	29
Elqui	IV	<10,0	<10,0	<10,0	21
Limarí	IV	<10,0	<10,0	<10,0	21
Cinc					
Huasco	III	81	44	140	29
Elqui	IV	179	40	320	19
Limarí	IV	92	43	170	18
Ligua	V	81	18	283	34

Fuente: INIA (1990)

Anexo II: Concentraciones de elementos trazas para varias especies en tejidos de hojas maduras (Kabata-Pendias (2000)).

Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹ , peso seco)		
	Suficiente o normal	Excesiva o tóxica	Tolerable en cultivos agrícolas
Cromo	0,1 – 0,5	5 - 30	2
Manganeso	30 - 300	400 - 1000	300
Níquel	0,1 - 5	10 - 100	1 - 10
Cobre	5 - 30	20 - 100	5 - 20
Cinc	27 - 150	100 - 400	50 – 100
Arsénico	1 – 1,7	5 - 20	0,1 – 1,0
Selenio	0,01 - 2†	5 - 30	1,0 - 5††
Cadmio	0,05 - 0,2	5 - 30	0,05 – 0,5
Mercurio	-	1 - 3	0,05 – 0,5
Plomo	5 - 10	30 - 300	0,5 - 10

† Base húmeda

†† 2-5 mg kg forraje peso seco causa toxicidad en animales
Los valores no incluyen a especies muy sensibles o tolerantes