



Efecto de la reforestación sobre las propiedades edáficas del tranque de relaves Cauquenes, mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O'higgins-Chile

Effect of reforestation on soil properties in Cauquenes tailings dam, El Teniente mine, Libertador Bernardo O'higgins Region, Chile

Rodríguez-Oroz, D.^{a,b*}, Maturana, J.^c; Malhue, R.^b, Llona, M.^b

^a Centro de Investigación en Sustentabilidad y Gestión Estratégica de Recursos, Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo. Avenida Plaza 680, Las Condes, Santiago, Chile.

^b ONG Suelo Sustentable. Avenida Miguel Claro 867 oficina 501, Providencia, Santiago, Chile.

^c Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

ARTICLE INFO

Keywords:
Phytostabilisation
Tailings
Temporal evolution
Heavy metals

Original Research Article,
Soil Science

**Corresponding author:*
Delia Rodríguez-Oroz
E-mail address:
mdrodriguez@udd.cl

ABSTRACT

Phytostabilisation involves the simultaneous use of exclusive metalophilic plants and substrate conditioners to achieve the physical, chemical, and biological stabilisation of degraded soil. This work is based on a comparative study of four phytostabilisation campaigns with *Acacias*, *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Quillaja*, and *Cryptocaria* among others, and one target area, both located in the Cauquenes tailings dam, 12 km far from the city of Rancagua. The study evaluated the effectiveness of phytostabilisation as a remediation technique through the monitoring of substrate physico-chemical variables using comparative analysis of their space-time distributions, considering an initial incorporation of lime. The studied properties were the organic matter content (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), pH, electrical conductivity (EC), humidity, texture and heavy metals concentration (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd). Non-metric multidimensional scaling (NMDS) and statistical analysis showed that edaphic properties improved over time. This improvement was observed as an increase in the clay percentage, the contents of OM and N, K, P and a decrease in acidity after years of phytostabilisation. The concentration of heavy metals showed a time decrease for Cu, Cr, Ni, Pb, and As attributed to phytoextraction processes. Results showed that phytostabilisation is an effective technique that leads to the physical and chemical stabilisation of the Cauquenes tailings dam, which is observed through the improvement of edaphic properties and decrease of the risk of pollutant dispersion, and it can be applied in other places.

RESUMEN

La fitoestabilización consiste en el uso simultáneo de plantas metalófitas excluyentes y de acondicionadores de sustrato para lograr la estabilización física, química y biológica de un suelo degradado. Este trabajo se basa en un estudio comparado de cuatro campañas de fitoestabilización con *Acacias*, *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Quillaja* y *Cryptocaria*, entre otras, más un blanco, localizados en el tranque de relaves Cauquenes, emplazado a 12 km de Rancagua. Considerando una aplicación inicial de cal apagada, el estudio evaluó la efectividad de la fitoestabilización como técnica de remediación a través del monitoreo de las variables físico-químicas del sustrato mediante análisis comparativos de sus distribuciones espacio-temporales. Las propiedades estudiadas fueron los contenidos en materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), pH, conductividad eléctrica (CE), humedad, textura y contenido en metales pesados (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd). Las técnicas de mapeo de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) y el análisis estadístico mostraron que las propiedades edáficas fueron mejoradas con el tiempo. Esta mejora se observó como un incremento en el porcentaje de arcillas, los contenidos de MO y N, K, P y disminución en la acidez con los años de fitoestabilización. La concentración de metales pesados mostró una disminución temporal para Cu, Cr, Ni, Pb y As atribuida a procesos de fitoextracción. De acuerdo con los resultados obtenidos la fitoestabilización se califica como una técnica efectiva que conduce a la estabilización física y química del relave Cauquenes, lo cual se observa a través de la mejora de las propiedades edáficas, la disminución de los riesgos de dispersión de contaminantes y puede ser aplicada en otros lugares.

Palabras clave: Fitoestabilización, Relave, Evolución temporal, Metales pesados.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos es un problema medioambiental que afecta a la biodiversidad y puede tener efectos dañinos en la salud humana. Algunos contaminantes presentes en los relaves son metales potencialmente peligrosos, caracterizados por un peso atómico superior a 5 g cm^{-3} y número atómico superior a 20 que se dividen en: elementos esenciales (micronutrientes) y los que no lo son. Los suelos contaminados pueden ser recuperados mediante la fitorremediación, técnica que consiste en la implantación de especies metalófitas, preferentemente nativas y endémicas de una zona, en los depósitos de relaves postoperativos, enfocada en el cumplimiento de los objetivos de estabilización física, química y biológicamente del relave (León-Lobos *et al.*, 2011). La estabilización física busca prevenir la erosión eólica e hídrica, la estabilización química, la inmovilización de los contaminantes y la estabilización biológica, la manera de lograr la auto sustentabilidad del ecosistema (Ginocchio y Santibáñez, 2009). La actividad biológica relacionada con las plantas, tiene potencial de transformación, inmovilización y extracción de los contaminantes, alcanzando la remediación de ambientes contaminados (Rehman *et al.*, 2019).

En los últimos años en Chile, se han llevado a cabo algunos estudios sobre el uso de distintas especies nativas enmarcadas en la tecnología de fitoestabilización (Parra *et al.*, 2016; Orchard *et al.*, 2009) y otros que determinan la capacidad de fitoextracción de distintas especies en suelos con altas concentraciones de metales tóxicos (Tapia *et al.*, 2011; 2013). La meteorización de los tranques de relaves de minerales sulfurados ha derivado con frecuencia en problemas de acidificación que inhiben el crecimiento de las plantas y proporciona material particulado susceptible de ser removilizado por el viento y el agua (Valentín-Vargas *et al.*, 2018). CODELCO, en 1979 fue la primera compañía minera en realizar fitoestabilización en Chile en el tranque de relaves Cauquenes, uno de los cuatro embalses de la mina El Teniente. Inicialmente su objetivo principal no era mejorar el sustrato a través de la fitorremediación, sino frenar el desplazamiento del polvo en suspensión desde la zona de los relaves hacia los campamentos mineros. Las condiciones fisicoquímicas iniciales del relave eran de un sustrato arenoso, sin materia orgánica ni nutrientes esenciales, con pH ácido (Lobos y Silva, 1990) y una gran variedad de elementos tóxicos (Al, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, As, Cd) (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019). Posteriormente, en los años 2005 y 2010 se aumentó la superficie de sustrato fitoestabilizado, demostrándose el éxito del crecimiento de las especies vegetales metalófitas en el relave y la disminución de material particulado en suspensión (Videla, 2012).

En el año 2015, se realizó una nueva plantación que además de continuar con la fitoestabilización del rela-

ve, y basándose en la hipótesis de que el crecimiento de especies vegetales había facilitado la edafogénesis y generado un suelo en la superficie del relave, proporcionó un registro temporal detallado los efectos fisicoquímicos de la fitoestabilización tras 37, 11, 6 y 1 años de su aplicación. Por tanto, se definió como objetivo de este trabajo evaluar la efectividad de la fitoestabilización en la remediación ambiental realizada en los depósitos de relaves del Embalse Cauquenes a través del análisis comparativo de algunos parámetros del suelo como textura, pH, MO, CE, NPK y metales, entre ellos micronutrientes como Zn, Cu, Ni y elementos tóxicos como Cr, As, Pb y Cd, de los ensayos realizados en los años 1980, 2005, 2006, 2010 y 2015 (Figura 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El relave Cauquenes se localiza en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, 12 km al sur de la ciudad de Rancagua, en la Comuna de Requínoa, emplazado en la cuenca del estero Parrón, tributario del Río Cachapoal. El tranque contiene los productos desechados por la minera El Teniente como resultado de la explotación de un sistema porfídico de aproximadamente 100.000.000 toneladas de Cu (Skewes *et al.*, 2002; 2005). El clima es predominantemente templado mediterráneo, caracterizado por las altas temperaturas estivales, acompañadas de altas tasas de evaporación, e inviernos con elevadas precipitaciones. Las temperaturas promedio oscilan entre $6,6 \text{ }^\circ\text{C}$ en invierno y $19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ en verano y las precipitaciones entre 4 mm y 184 mm para la estación seca y húmeda respectivamente (Dirección Meteorológica de Chile, 2017). Dada la fisiografía del margen este del Valle Central de Chile, la dirección del viento, cuya velocidad oscila $1,6 \text{ m s}^{-1}$ y $3,3 \text{ m s}^{-1}$, procede del sur de los tranques de relaves en dirección norte hacia la comuna de Rancagua. Desde el cese de las operaciones en el relave Cauquenes se han llevado a cabo 4 campañas de fitoestabilización en los años 1979, 2005, 2010 y 2015 en las parcelas F79, F05, F10 y F15, respectivamente, las cuales se trataron al inicio una única vez con un polímero que habilitó los suelos para fines agrícolas y forestales (Parra *et al.*, 2016) formado por una mezcla de 14 Tm de cal apagada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, 1,4 Tm salitre potásico $[\text{KNO}_3]$ y 0,6 Tm superfosfato triple $[\text{P}_2\text{O}_5]$ por hectárea, cubriendo un área total de 22,34 ha de sustrato. Además, se implantaron diferentes especies arbóreas como *Acacias*, *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Quillaja*, *Cryptocaria*, entre otras (Lobos y Silva, 1990; Malhue, 2015).

Método de muestreo

Debido a la existencia de 4 parcelas fitoestabilizadas se escogió el método de muestreo por estratifica-

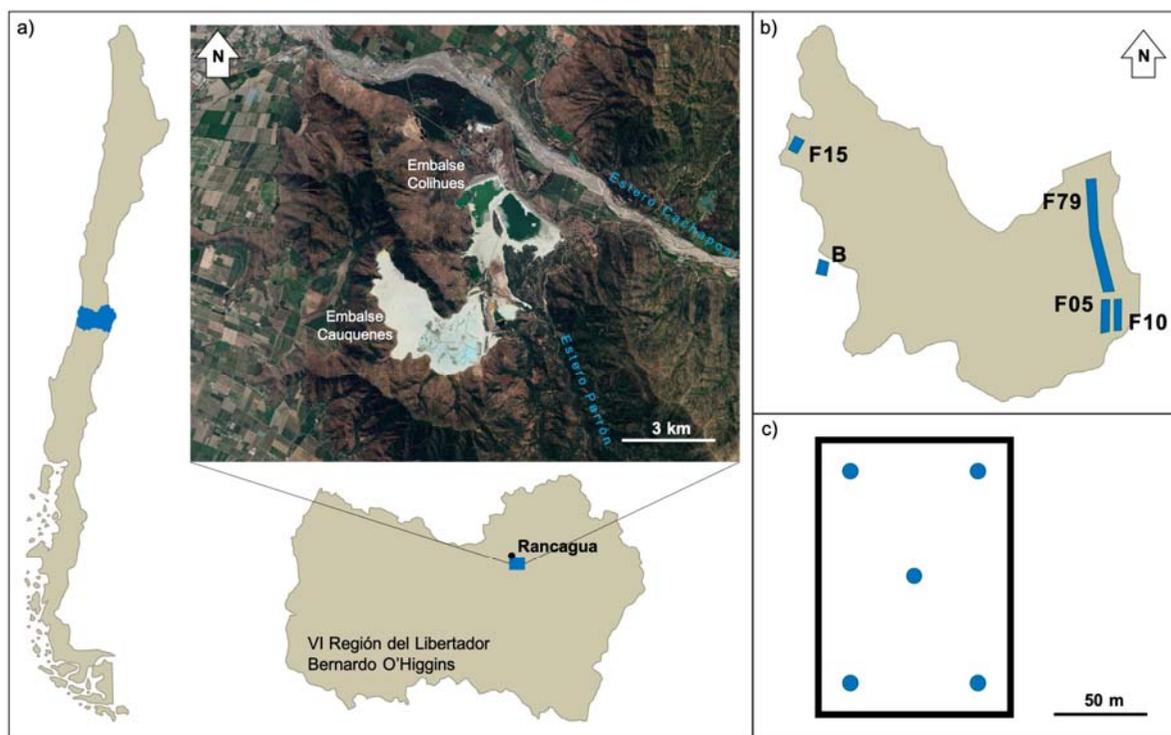


Figura 1. a) Ubicación y fotografía aérea del relave Cauquenes, b) polígonos azules indicando la localización e identificación las parcelas donde se han efectuados las campañas de fitoestabilización, c) esquema de la malla de muestreo empleado.

Figure 1. a) Location and aerial images of the Cauquenes tailings, b) blue polygons indicate the location and plot identification where the phytostabilisation campaigns have been carried out, c) scheme of the sampling mesh used.

dos. Los estratos son marcadores directos del parámetro a medir, que en este estudio es la calidad del suelo o sustrato en relación al tiempo de fitoestabilización. Para el análisis comparativo de las parcelas fitorremediadas se añadió al estudio una parcela control (C), relave tratado con polímero, pero sin fitoestabilizar, como punto de inicial del estudio y una parcela blanco (B), suelo natural de pradera, como punto final “ideal” de la fitorremediación. Por tanto, en el diseño final del muestreo quedaron 5 parcelas donde se localizaron 5 puntos de muestreo por cada una de ellas (Figura 1). Por cada punto se tomó una muestra de 0-20 cm de profundidad, obteniéndose un total de 5 muestras por cada parcela estudiada, 25 muestras en total.

La herramienta utilizada en la fase del muestreo fue una barrena de suelo y sedimento Eijkelpkamp, donde la cabeza de perforación empleada se escogió atendiendo a las propiedades físicas del suelo. Una vez extraídas las muestras, éstas se retiraron manualmente usando guantes de vinilo para ser introducidas en bolsas de polipropileno, previamente etiquetadas donde fueron transportadas al laboratorio y guardadas hasta su posterior análisis. En el muestreo se removieron los materiales no representativos de la parcela en cuestión, como cantos superficiales, acículas de pináceas y cos-

tras de materiales estabilizadores añadidos en la preparación basal del sustrato.

Metodologías de análisis de suelo

Cada uno de los parámetros analizados se ha obtenido por duplicado. El análisis macronutrientes esenciales, nitrógeno, potasio y fósforo (N, K, P), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), humedad, y pH se realizó en el laboratorio Agrolab Ltda., utilizándose la metodología de análisis recomendada para suelos chilenos (Sadzawka *et al.*, 2007). La textura se determinó a según la metodología establecida por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1999). El análisis mineralógico se llevó a cabo mediante la técnica difracción de rayos X (DRX), en un difractómetro Bruker D8 Advance con detector lineal LynexEyer y la determinación de la concentración de metales pesados (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd y Pb) mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) tras la digestión de las muestras en agua regia ($1\text{HNO}_3 : 3\text{HCl}$) en el Laboratorio de Análisis Sólidos (L.A.S) y Laboratorio de Análisis Elemental (L.A.E) de la Universidad Andrés Bello, respectivamente.

Análisis Estadístico

La evaluación de las correlaciones entre los distintos parámetros analizados se llevó a cabo a través de análisis estadísticos basados en gráficos bivariados de correlación, correlaciones de Pearson y regresiones lineales simples. Mediante el programa Primer 6.1.6 se sometieron los parámetros estudiados a pruebas de NMDS donde se analiza la contribución de los parámetros estudiados a la diferenciación o similitud entre parcelas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis químicos (Cuadro 1) indican una tendencia general de mejora de las propiedades edáficas del relave con el tiempo, lo que muestra que la fitoestabilización mejora la calidad del suelo de forma proporcional a los años de su aplicación (Porta *et al.*, 2003; Ginocchio y Santibáñez, 2009).

Con respecto a la acidez, se produjo un aumento del pH con los años de fitorremediación, alcanzando rangos de moderada a ligera acidez (USDA, 1999), próximos a los de los suelos naturales aledaños. Esto no puede ser únicamente atribuido a la fitoestabilización, sino también a la influencia del tratamiento a base de nutrientes y cal aplicado al sustrato. Las parcelas F05 y F15 presentaron valores de pH comparativamente inferiores al resto. En el caso de la parcela F05, el descenso del pH se atribuye al aporte de partículas transportadas por los vientos procedentes de la parcela F15, que durante

los años previos a la aplicación en el 2015 del polímero proporcionó material particulado que fue dispersado hacia el este, donde fue depositándose sobre la parcela F05. Este efecto de dispersión eólica de partículas queda evidenciado por la presencia de dunas (Figura 2) en torno a la pantalla vegetal de la parcela. Respecto a la parcela F15, cuando tras un año de fitoestabilización se realizó el muestreo se vio que el polímero estabilizador no estaba integrado en el suelo, ya que se presenta como una costra superficial que fue removida durante el muestreo, por lo que no hubo un efecto en el aumento del pH del suelo.

Los valores de conductividad están bajo 1 dS m^{-1} y no presentan grandes variaciones a lo largo de los años, por lo que los suelos del relave Cauquenes son suelos no salinos y aptos para cualquier tipo de cultivo bajo este parámetro.

Inicialmente el sustrato, totalmente inerte, carecía de materia orgánica y tras 37 años de fitoestabilización se observó una importante colonización de organismos y plantas, que se refleja en un mayor contenido de materia orgánica. Sin embargo, este aumento no es significativo en las parcelas de más reciente fitoestabilización, 11, 6 y 1 año, respectivamente. Por otro lado, el análisis estadístico reveló que no hay una asociación lineal entre las variables materia orgánica y tiempo, por lo que se sugiere que los contenidos de materia orgánica de las parcelas están afectados por otros factores atemporales como el contenido de arcillas, o nutrientes como N y P, siendo éste un punto a estudiar en futuras investigaciones.

Cuadro 1. Valor promedio de los parámetros fisicoquímicos analizados en las parcelas en relación a los años de fitoestabilización. Los tamaños de partícula empleados para definir la clase textural son: arena de 2 mm a 53 μm ; limo de 53 μm a 2 μm y arcilla < 2 μm (USDA, 1999).

Table 1. Average value of the physical-chemical parameters analysed in the plots related to the years of phytostabilisation. The particle sizes used to define the textural class are: sand from 2 mm to 53 μm ; silt from 53 μm to 2 μm , and clay < 2 μm (USDA, 1999).

Nombre de parcela	F79	F05	F10	F15	C	B
Años de fitoestabilización	37	11	6	1	0	0
pH (agua, relación 1;2,5)	6,31	5,64	6,81	5,07	5,07	6,47
C. eléctrica dS/m	0,163	0,363	0,269	0,118	0,330	0,113
% MO	2,83	0,26	0,30	0,36	0,24	3,16
Humedad %	7,74	11,58	5,95	18,13	6,4	7,81
N disponible mg kg ⁻¹	30	23	21	21	-	35
P disponible mg kg ⁻¹	42	34	29	29	-	15
K disponible mg kg ⁻¹	41	42	46	36	-	233
Clase textural	Franca	Franco limosa	Franco limosa	Franco arenosa	-	Franca
% Arcillas	8,5	5,2	4,8	2,2	-	23,5
% Limo	43,8	52,3	63,6	33,7	-	48,6
% Arena	47,7	42,6	31,6	64,1	-	27,9

El % de humedad presenta una tendencia a disminuir con el tiempo transcurrido de la fitoestabilización, pero no existe correlación lineal entre ambos parámetros, por lo que pudiera estar afectada por la cantidad de biomasa que absorbe la humedad del suelo. Por otra parte, el Cuadro 2 muestra una correlación inversamente proporcional entre pH y la humedad ($r = -0,75$) lo que se relaciona con la generación de procesos de hidrólisis que liberan cationes H^+ al medio edáfico y a la emisión de CO_2 por descomposición de la materia orgánica (Magalhaes da Silva *et al.*, 2014).

En cuanto al contenido en nutrientes, se comprueba que N y P aumentan proporcionalmente con los años de fitoestabilización (Figura 3), no siendo así para el K. Sin embargo, no se alcanzan totalmente los objetivos de la remediación, ya que se observaron manchas o coloraciones extrañas en el follaje de la vegetación producidas por un déficit de nutrientes. Esto podría estar indicando que los nutrientes, particularmente el N que es más fácilmente acumulado en las plantas al aumentar el pH (Chaney *et al.*, 2014), está teniendo problemas para ser fijado por la biomasa. Por tanto, se recomien-

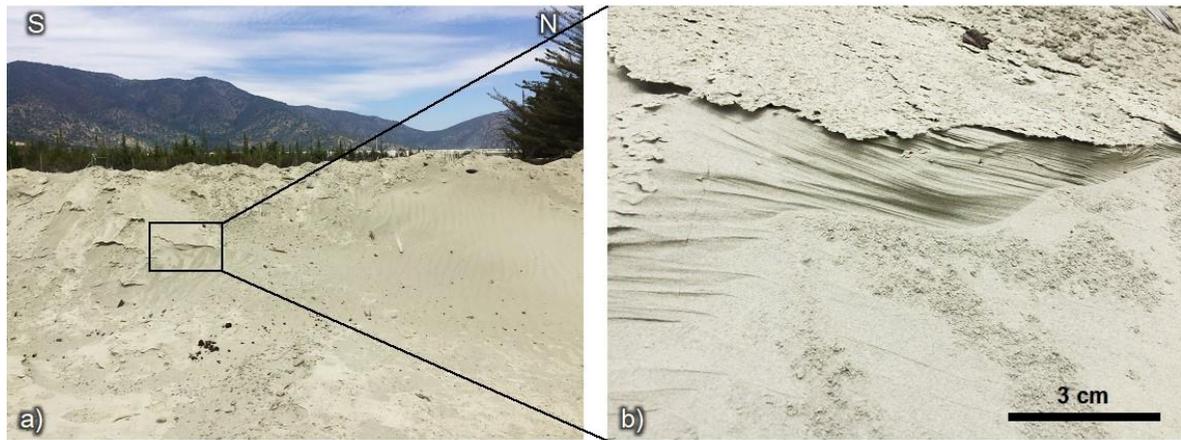


Figura 2. Dunas de la parcela F05 formadas por depósitos eólicos de material fino.

Figure 2. Dunes in the plot F05 formed by wind deposits of fine material.

Cuadro 2. Correlaciones entre la concentración de elementos metálicos y las propiedades edáficas estudiadas en el relave Cauquenes.

Table 2. Correlations between metallic elements concentration and the edaphic properties studied in Cauquenes tailings.

	% Humedad	% Arcillas	% MO	pH	CE	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Cd
% Humedad	1											
% Arcillas	-0,36	1										
% MO	-0,32	0,79	1									
pH	-0,75	0,47	0,3	1								
CE	-0,03	-0,1	-0,22	0,45	1							
Cr	0,63	-0,88	-0,7	-0,68	0,01	1						
Ni	0,59	-0,93	-0,71	-0,65	0,02	0,98	1					
Cu	0,45	-0,65	-0,6	-0,22	0,37	0,71	0,71	1				
Zn	-0,05	0,32	0,16	-0,02	-0,21	-0,19	-0,23	-0,18	1			
As	0,79	-0,6	-0,5	-0,83	-0,16	0,78	0,75	0,38	-0,06	1		
Pb	0,62	-0,5	-0,49	-0,49	0,23	0,66	0,64	0,56	-0,18	0,51	1	
Cd	-0,17	-0,03	-0,06	0,45	0,45	-0,04	-0,02	0,57	-0,12	-0,22	-0,05	1

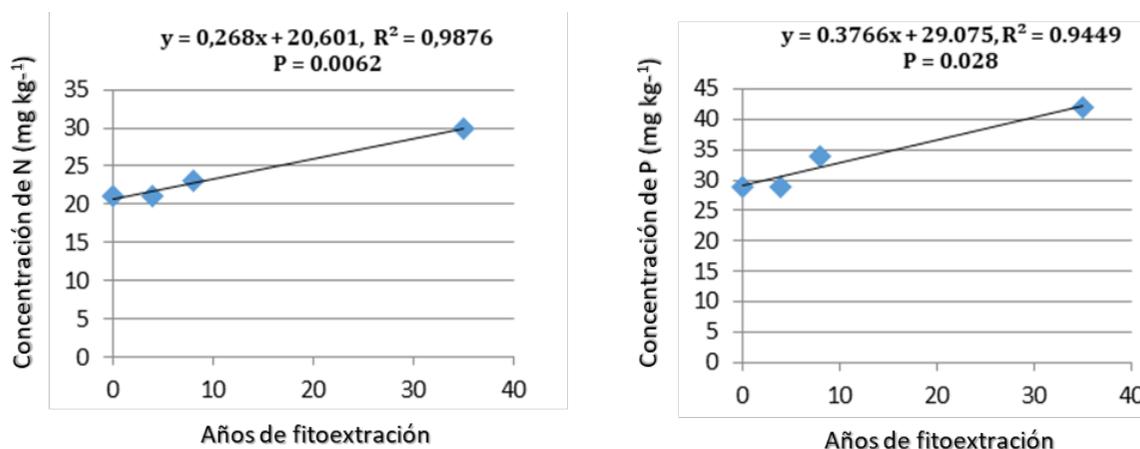


Figura 3. Correlaciones lineales de N y P respecto a los años de aplicación de la fitoestabilización.

Figure 3. Linear correlations of N and P with respect to phytostabilisation years.

da mejorar la fitoremediación a través de la inoculación de bacterias simbiotas fijadoras de N (Mahieu *et al.*, 2011) en futuras experiencias y lograr así superar todas las limitantes de factores nutricionales en el proceso de fitoremediación.

La clase textural con el tiempo aumentó su contenido en arcillas, proporcionando una mayor estabilidad al sustrato, pasando éste desde una clase textural franco arenosa a una franca. La parcela F05 muestra una mayor proporción de material fino (limo + arcilla) que las parcelas F15 y F79, pero menos que la F10 debido al ya comentado transporte eólico de material particulado procedente del sector oeste del relave y que se traduce en una textura con una tendencia más limosa hacia el este (Cuadro 1). Este hecho, junto con el aumento de la cristalinidad de la fracción fina descrita por Maturana (2017), sugiere procesos de neo-formación de arcillas en los suelos (Besoain, 1985) que mejoran su calidad en términos de fertilidad (Moral y Rebollo, 2017) al tiempo que disminuye la erosión eólica potencial (Rojas *et al.*, 2013) y por tanto, la dispersión de los contaminantes que presentes en el relave.

Además, los datos de correlaciones (Cuadro 2) obtenidos entre porcentaje de arcillas y materia orgánica ($r = 0,79$), junto con lo contrastado por otros autores (Matus y Maire, 2000; Ncizah y Wakindiki, 2012) confirma que la presencia de arcilla favorece la retención de materia orgánica en los suelos, disminuyendo a su vez la erosión eólica potencial (Chenu *et al.*, 2018).

A través del análisis estadístico por regresiones lineales se observa que los parámetros de N y P (Figura 3), pero no así de K mantienen una correlación lineal con los años de antigüedad de las fitoestabilizaciones. Según la identificación mineral realizada a través de DRX de los principales minerales presentes en los suelos son cuarzo (24,2%), plagioclasa (21,2%) y feldespato

potásico (17,1%) y como accesorio la titanomagnetita (1,4%) junto con arcillas como illitas (20,8%), caolinitas (8,9%) y cloritas (8,25%). La illita es el principal mineral portador de K en la fracción arcilla de los suelos, por tanto, la capacidad de intercambio catiónico es ocupada principalmente por el K que presenta una gran afinidad por los lugares interlaminares (López-Mateo *et al.*, 2005; INTAGRI, 2017). Por tanto, se atribuye esta falta de correlación al aumento en el contenido en arcillas con los años de fitoestabilización (Cuadro 1).

En las pruebas estadísticas de similitudes de cada estrato, en el mapa de NMDS (Figura 4) se observa que la fitoestabilización con 37 años de antigüedad (F79) es la más similar al blanco de suelo natural de zonas aledañas al relave (B), encontrándose ambas en la zona superior del mapa. El resto de parcelas con 11, 6 y 1 año de fitoestabilización (F05, F10 y F15), se encuentran bastante lejanas de la parcela B, lo que se atribuye principalmente a la escasez de nutrientes esenciales (N, P, K), ya que el relave inicial sin plantaciones carecía de éstos (Cuadro 1). Cabe mencionar que la parcela F10 ocupa una posición más distante de este grupo lo que se explica debido a la escasa humedad y mayor pH que presenta esta parcela comparativamente con F05 y F15.

En cuanto a las concentraciones medias de los metales analizados en las distintas parcelas (Figura 5), se observa que los depósitos del relave Cauquenes presentan en promedio las menores concentraciones elementales para el Cd ($0,150 \text{ mg kg}^{-1}$) y las mayores para Cu ($287,9 \text{ mg kg}^{-1}$), manteniéndose relativamente similares las concentraciones de Cr ($53,63 \text{ mg kg}^{-1}$), Ni ($23,15 \text{ mg kg}^{-1}$), Zn ($58,00 \text{ mg kg}^{-1}$), As ($78,22 \text{ mg kg}^{-1}$) y Pb ($29,28 \text{ mg kg}^{-1}$). Esta misma figura muestra para la distribución del contenido en Cr, Ni, Zn, As y Pb una leve disminución temporal atribuida a procesos de fitoextracción. Sin embargo, la concentración de Cu y

Cd muestran una tendencia inversa, aumentando en las parcelas con más años de tratamiento. Esto podría deberse a que las técnicas de extracción del Cu que se ocupan en minería han mejorado en eficiencia con los

años, y por tanto, los relaves fitoestabilizados en primer lugar, al ser más antiguos, tienen contenidos de Cu mayores. En base al aumento temporal que se observa para el pH, otra explicación posible es que el Cu, al presentar una marcada inmovilidad a pH superiores a 6, se encuentre menos disponible en la solución edáfica y precipite en el suelo aumentando en él su concentración (Kabata-Pendias, 2010; Pérez-Esteban *et al.*, 2014). Esta explicación, concuerda con lo observado en la parcela F05, que muestra un menor pH y una menor concentración de Cu. No obstante, en el caso de la parcela F15 que también presenta un pH inferior a 6, no se cumple este supuesto.

Todo lo anterior, junto con la ausencia de correlación entre el Cu y el pH (Cuadro 2), hace que finalmente se postule que son varios los factores que interaccionan entre sí y que afectan a la concentración de Cu en los suelos de los relaves, entre ellos los contenidos de materia orgánica y arcillas (Lagomarsino *et al.*, 2011, Xue *et al.*, 2018). La movilidad del Cd puede verse reducida ya que se une fuertemente a la materia orgánica del suelo (ATSDR, 2012; Tang *et al.*, 2017). Sin embargo, las correlaciones obtenidas (Cuadro 2) no se muestran significativas entre Cd y este parámetro, mientras que la CE ($r = 0,45$) combinada con altos niveles de Cd sí afectaría a la actividad enzimática de las plantas (Rehman *et al.*, 2019), disminuyendo la acumulación de Cd en la biomasa mientras que favorecería la acumulación de Cd en el suelo por efecto de la precipitación de sa-

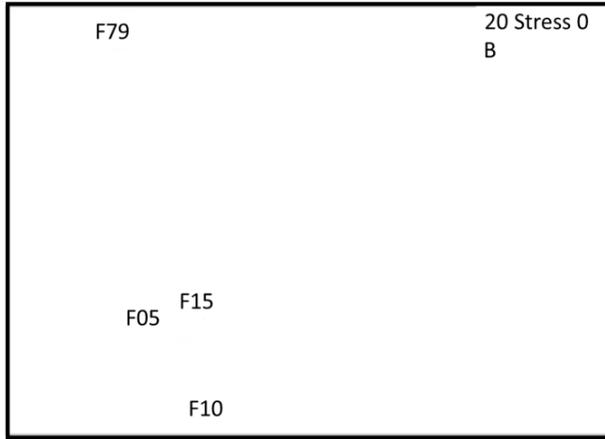


Figura 4. Representación gráfica del análisis NMDS llevado a cabo con las variables analizadas en cada parcela fitoestabilizada (F79, F05, F10 Y F15) y en la parcela de suelo blanco (B).

Figure 4. Graphical representation of the NMDS analysis carried out with the data analysed in each phytostabilised plot (F79, F05, F10 and F15) and in the target soil plot (B).

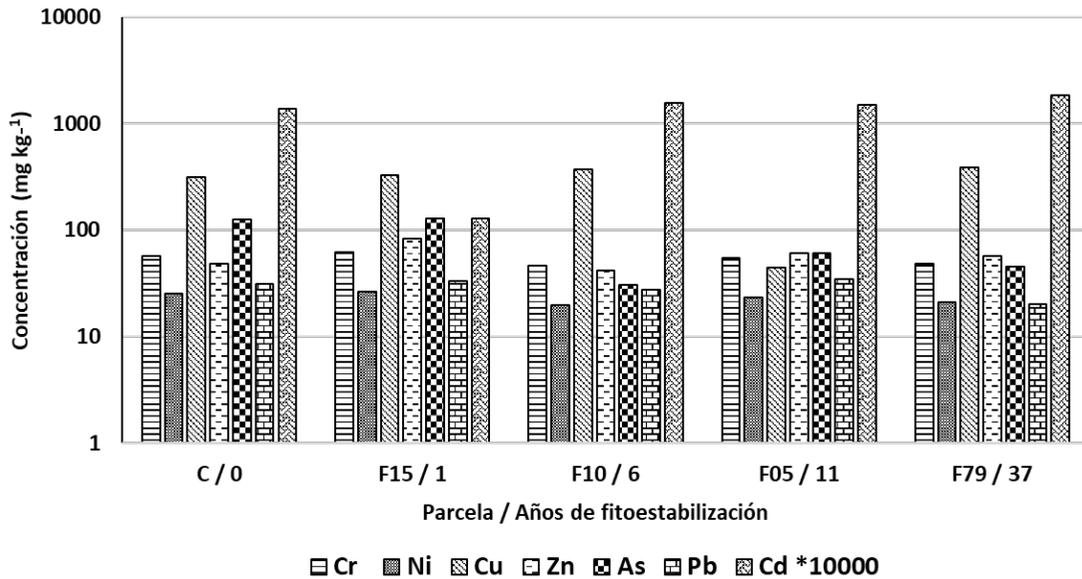


Figura 5. Evolución temporal de la concentración (mg kg^{-1}) de metales pesados analizados en relación a los años de fitoestabilización en las parcelas de estudio.

Figure 5. Time evolution of the concentration (mg kg^{-1}) of heavy metals analysed with respect to the years of phytostabilisation in the study plots.

les cadmio (SO_4Cd , CO_3Cd , $(\text{NO}_3)_2\text{Cd}$) (Sun *et al.*, 2018; Filipović *et al.*, 2018).

En cuanto al As (Figura 5) se puede apreciar que las parcelas C y F15 son las que presentan mayores concentraciones, siendo que éstas disminuyen con el tiempo, pero sin un patrón definido. Para el resto de elementos, en atención a la dirección de los vientos preferentes y al ya mencionado efecto de apantallamiento ejercido por los árboles, es posible que la distribución de las concentraciones de estos elementos guarde relación con la dispersión eólica de las partículas tamaño arena y limo. Apoyando esta hipótesis, se puede apreciar que elementos como Cr, Ni, Cu, As y Pb presentan una correlación negativa con las arcillas (Cuadro 2), partículas más finas que las arenas que pueden ser desplazadas a mayores distancias por efecto de la dispersión eólica.

CONCLUSIONES

Mediante la introducción de especies vegetales se evidencia una mejora en la textura del sustrato debido al aumento del contenido de materia orgánica y arcillas, lo que disminuye el riesgo de erosión eólica potencial. El carácter (pseudo) metalófito acumulador de algunas especies plantadas (*Eucalyptus* y *Quillaja*) se ve reflejado en la disminución de las concentraciones de Cu, Cr, Ni, Pb y As a lo largo del tiempo. El aumento de la salinidad y la escasa actividad enzimática reducen la fitoextracción de algunos metales como Cd. Se cumplen por tanto los objetivos de la fitoestabilización, lográndose mejorar las propiedades físicas y químicas del relave Cauquenes, proporcionando un sustrato adecuado para actividades de silvicultura ecológica que pueden ser replicadas en otros relaves del territorio chileno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la consultora ambiental Biocys la oportunidad de participar en el proyecto de restauración ambiental del relave Cauquenes y a la empresa Minera Valle Central por su buena praxis y conformidad en la publicación y divulgación de los resultados obtenidos de este estudio.

REFERENCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2012. Toxicological Profile for Cadmium. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service, Atlanta, Georgia.

Besoain, E., 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Iberoamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica.

Chaney, R.L., Reeves, R.D., Baklanov, I.A., Centofanti, T., Broadhurst, C.L., Baker, A., Van der Ent, A., Roseberg, R.J., 2014. Phytoremediation and phytomining: using plants to remediate contaminated or mineralized environments, in:

Rajakaruna, N., Boyd, R.S., Harris, T.B. (Eds.), Plant Ecology and Evolution in Harsh Environments. Nova Science Publishers, Inc., USA, pp. 365-392.

Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2018. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64 (4), 1479-1486. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441479x>

Dirección Meteorológica de Chile, 2017. Reporte climático año 2017 (Volumen 2). Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, Dirección Meteorológica de Chile – Dirección General de Aeronáutica Civil, Santiago, Chile, pp. 1-22. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/reporteClimatologico/2017>

Filipović, L., Romić, M., Romić, D., Filipović, V., Ondrašek, G., 2018. Organic matter and salinity modify cadmium soil (phyto)availability. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 147, 824-831. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.041>

Ginocchio, R., Santibañez, C., 2009. Fitoestabilización de depósitos de relaves: una tecnología basada en el uso de la forestación. *Revista Forestal* 7, 14-21.

INTAGRI, 2017. Fijación de Potasio en el Suelo. Serie Suelos N° 31, Artículos Técnicos de INTAGRI, México, 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/fijacion-de-potasio-en-el-suelo>

Kabata - Pendias, A., 2010. Trace elements and soils and plants, fourth ed. CRC Press, New York.

Lagomarsino, A., Mench, M., Marabottini, R., Pignataro, A., Greco, S., Renella, G., Stazi, S.R., 2011. Copper distribution and hydrolase activities in a contaminated soil amended with dolomitic limestone and compost. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74 (7), 2013-2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.06.013>

León-Lobos, P., Ginocchio, R., Baker, A.J.M., Cuevas, J., Jiménez, I., Silva, S., 2011. Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile. Guía N° 3: Flora y vegetación asociadas a relaves mineros abandonados. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM), Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile, 62 pp.

Lobos, C., Silva, R., 1990. Introducción de vegetación sobre un relave colmatado de relaves de cobre. Relave Cauquenes. CODELCO Chile, División El Teniente, 20 pp.

López-Mateo, C., Álvarez, E., Fernández-Marcos, M.L., 2005. Adsorción y desorción de potasio en suelos de Galicia (España) desarrollados sobre distintos materiales de partida. *Edafología* 12 (3), 173-185.

Magalhaes da Silva, S.P.; Morais, A.R.C.; Bogel-Lukasik, R., 2014. The CO₂-assisted autohydrolysis of wheat straw. *Green Chemistry* 16, 238-246. <https://doi.org/10.1039/C3GC41870G>

Mahieu, S., Frérot, H., Vidal, C., Galiana, A., Heulin, K., Maure, L., Brunel, B., Lefévre, C., Escarré, J., Cleyet-Marel, J.C., 2011. *Anthyllis vulneraria/Mesorhizobium metallidurans*, an efficient symbiotic nitrogen fixing association able to grow in mine tailings highly contaminated by Zn, Pb and Cd. *Plant and Soil* 342 (1-2), 405-417. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0705-7>

Malhue, R., 2015. Análisis de efectividad de las fitoestabilizaciones del Embalse de Relave Cauquenes, CODELCO. Tesis de Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Andrés Bello. 114 p.

- Maturana, J., 2017. Evaluación de efectividad de la fitorremediación mediante la caracterización de los suelos de relaves del Embalse Cauquenes, VI Región del Libertador General Bernardo O'higgins; Chile. Tesis de Grado de Geología, Universidad Andrés Bello. 98 p.
- Matus, F.J., Maire, C.R., 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica* 60 (2), 112-126. <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-2807200000200003>
- Moral, F.J., Rebollo, F.J., 2017. Characterization of soil fertility using the Rasch model. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 17 (2), 486-498. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000035>
- Nciizah, A.D., Wakindiki, I.I.C., 2012. Particulate organic matter, soil texture and mineralogy relations in some Eastern Cape ecotopes in South Africa. *South African Journal of Plant and Soil* 29(1), 39-46. <https://doi.org/10.1080/02571862.2012.688882>
- Orchard, C., León-Lobos, P., Ginocchio, R., 2009. Fitoestabilización de desechos mineros masivos con recursos fitogenéticos nativos: potencial para el uso sustentable y la conservación de la flora nativa de la zona centro-norte de Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 36(3), 329-352. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202009000300002>
- Parra, A. Zornoza, R. Conesa, E. Gómez-López, M.D., Faz, A., 2016. Evaluation of the suitability of three Mediterranean shrub species for phytostabilization of pyritic mine soils. *Catena* 136, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.018>
- Pérez-Esteban, J., Escolástico, C., Masaguer, A., Vargas, C., Moliner, A., 2014. Soluble organic carbon and pH of organic amendments affect metal mobility and chemical speciation in mine soils. *Chemosphere* 103, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.055>
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C., 2003. *Edafología para agricultura y el medio ambiente*, third ed. MundiPrensa, Madrid.
- Rehman, S., Abbas, G., Shahid, M., Saqib, M., Umer Farooq, A.B., Hussain, M., Murtaza, B., Amjad, M., Naeem, M.A., Farooq, A., 2019. Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in conocarpus exposed to cadmium stress: implications for phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.077>
- Rojas, J.M., Buschiazzo, D.E., Arce, O., 2013. Parámetros edáficos relacionados con la erosión eólica en Inceptisoles del Chaco. *Ciencia del suelo* 31 (1). <http://ref.scielo.org/zgfqz3>
- Sadzawka, A., Flores, H., Grez, R., Carrasco, M.A., Mora, M.L., Neaman, A., Demanet, R., 2007. *Métodos de análisis de lodos y suelos*. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019. Geoquímica superficial de depósitos de relaves de Chile. <http://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Skewes, M.A., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P., Stern, C.R., 2002. The giant El Teniente breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement, in: Goldfarb, R.J., Nielson, R.L. (Eds.), *Global exploration 2002: integrated methods of discovery*. Society of Economic Geologists Special Publications, pp. 299-332.
- Skewes, M.A., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P., Stern, C.R., 2005. The El Teniente megabreccia deposit, the world's largest copper deposit, in: Porter, T.M. (Ed.), *Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*, Adelaide: PGC Publishing, pp. 83-114.
- Sun, M., Liu, G., Lin, H., Zhang, T., Guo, W., 2018. Effect of salinity on the bioaccumulation and depuration of cadmium in the pacific cupped oyster, *Crassostrea gigas*. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 62, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.05.018>
- Tang, W., Zhong, H., Xiao, L., Tan, Q., Zeng, Q., Wei, Z., 2017. Inhibitory effects of rice residues amendment on Cd phytoavailability: a matter of Cd-organic matter interactions?. *Chemosphere* 186, 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.152>
- Tapia, Y., Cala, V., Eymar, E., Frutos, I., Gárate, A., Masaguer, A., 2011. Phytoextraction of cadmium by four Mediterranean shrub species. *International Journal of Phytoremediation* 13 (6), 567-579. <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.495152>
- Tapia, Y., Diaz, O., Pizarro, C., Segura, R., Vines, M., Zúñiga, G., Moreno-Jiménez, E., 2013. *Atriplex atacamensis* and *Atriplex halimus* resist As contamination in Pre-Andean soils (northern Chile). *Science of the Total Environment* 450-451, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.021>
- USDA, 1999. *Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*, second ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Services, Agriculture Handbook No 436, Washington, DC.
- Valentín-Vargas, A., Neilson, J.W., Root, R.A., Chorover, J., Maier, R.M., 2018. Treatment impacts on the temporal microbial community dynamics during phytoestabilization of acid-generating mine tailings in semiarid regions. *Science of The Total Environment*, 618, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.010>
- Videla, J.J., 2012. Factibilidad de fitoestabilización en un relave de relaves de la División El Teniente de Codelco Chile. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Xue, K., Zhou, J., Nostrand, J.V., Mench, M., Bes, C., Giagnoni, L., Renella, G., 2018. Functional activity and functional gene diversity of a Cu-contaminated soil remediated by aided phytostabilization using compost, dolomitic limestone and a mixed tree stand. *Environmental Pollution* 242, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.057>

