

USO DE VETIVERIA ZIZANIOIDES PARA LA REHABILITACIÓN DE SITIOS MINEROS EN CHILE

A.Arochas*, K. Volker*, R. Fonseca*

*Fundación Chile,

Av. Parque Antonio Rabat Sur 6165, Vitacura, Santiago, Chile.

Email: "Rocio Fonseca" <rfonseca@fundacionchile.cl>

Resumen

Vetiveria zizanioides es una planta herbácea gramínea, perenne, de crecimiento muy rápido que tolera amplios rangos de salinidad y acidez, pudiendo alcanzar en poco tiempo matas muy densas.

El principal uso del Vetiver en Latinoamérica ha sido la producción esencial en países como Argentina, Brasil y Puerto Rico y en pequeña escala para controlar la erosión en Bolivia (Nat Res Council, 1993). Sin embargo, desde los 1990s como resultado de la promoción del Banco Mundial y posteriormente de la Red Internacional del Vetiver, otros usos de la hierba Vetiver son actualmente conocidos y ampliamente adoptados en la región

Aunque el Sistema de Vetiver ha sido investigado, desarrollado y empleado en más de 100 países en los últimos 20 años, su aplicación en Latinoamérica ha sido limitada al control de la erosión, particularmente a la estabilización de pendientes escarpadas en América Central y algo de rehabilitación de minas en Venezuela y probablemente en Surinam y Guiana

La aplicación de VS en Chile, ha sido mínima hasta ahora, por esta razón la Fundación Chile lanzó en el año 2005 un programa para introducir el VS en Chile.

El foco principal de este trabajo consistió en la generación de dos 4 pilotajes de fitoremediación en los desechos generados de minería de cobre, con la tecnología VGT. Estas pruebas fueron implementadas en el año 2005 en dos faenas mineras de la zona central de Chile: Minera Nueva Pudahuel y Anglo American Chile Div. El Soldado.

El objetivo central de los ensayos piloto fue principalmente determinar si la tecnología Vetiver podía crecer y estabilizar físico químicamente los tranques de relave y rípios de lixiviación. El presente trabajo describe los resultados obtenidos en el monitoreo realizado cinco años después de la implementación de la prueba VGT en ambas faenas mineras.

Vetiveria zizanioides puede establecerse y crecer satisfactoriamente, ya que las pruebas piloto VGT soportaron altas concentraciones de metales y distintas unidades de pH. Sin embargo requieren ciertas condiciones de manejo, tales como: riego permanente y protección contra herbívoros. Sin embargo.

1- INTRODUCCIÓN

En Chile el principal ingreso económico proviene de la minería, los principales problemas ambientales de la industria minera están en directa relación con los residuos que generan los distintos procesos. Tales como el material de descarte denominado relave, rípios de lixiviación en pilas y otros que provienen del proceso de concentración de minerales sulfurados de cobre y subproductos.

A pesar de esta gran abundancia y producción mineral, hasta ahora el esfuerzo chileno en la rehabilitación de sitios mineros ha sido escaso, particularmente en el área de fitorremediación de desechos sólidos y líquidos provenientes de la actividad minera.

Actualmente, la mayor parte de los desechos no son reprocesados ni reutilizados en el proceso productivo, por lo que el almacenamiento es la única opción viable para su manejo.

Los residuos están totalmente desprovistos de suelo orgánico y de nutrientes esenciales y son tóxicos para las especies vegetales facilitando la erosión debido a la ausencia de vegetación en estos terrenos, contaminación de la superficie y de las aguas subterráneas con metales pesados, por lo tanto normalmente permanecen estériles durante años a causa de las condiciones hostiles que presentan.

Ante esta necesidad, Fundación Chile a partir del año 2005, genera una serie de estudios pilotos de VGT como una herramienta innovadora, efectiva y fácil de aplicar para restaurar ecosistemas dañados y estabilizar los desechos producidos por la actividad minera en sitios post-operativos de la zona central de Chile.

En la última década, el Sistema del Pasto Vetiver (VGT) ha emergido como el más innovador, bajo costo y ambientalmente amigable de los métodos de fitorremediación de residuos de la actividad minera. La tecnología VGT ha sido empleada con éxito para rehabilitar este tipo de residuos en Australia, China, Sudáfrica, Tailandia y Venezuela.

Vetiveria zizanioides es una planta herbácea gramínea, perenne, sin tallo aparente, de crecimiento muy rápido, forma en poco tiempo matas muy densas que van engordando y creciendo sin ser invasivas como otras hierbas, alcanza una altura desde 0,50 hasta casi dos metros. No tiene, ni desarrolla, rizomas o estolones. Longevidad notable, de más de 50 años, es extremadamente resistente a la sequía, a la contaminación y la salinidad. Adaptable a todo tipo de condiciones de cultivo.

Posee un sistema radicular extremadamente poderoso y muy resistente que crece en dirección vertical, formando una auténtica barrera y un formidable anclaje en el subsuelo, alcanzando hasta más de cinco metros de profundidad. Este sistema radicular no es invasivo y apenas se extiende hacia los lados. Las raíces son muy largas, verticales y de grosor uniforme. Las raíces se adaptan a todo tipo de terrenos, son muy fuertes, forman una masa esponjosa, y muy ramificada, manteniendo el suelo protegido y sujeto.

Proceso de investigación que se centró en cuatro líneas principales:

1. Determinar si el Vetiver puede crecer en tranques de relave, rípios de lixiviación y depósitos de estériles, los cuales presentan elevadas concentraciones de cobre y otros metales.
2. Determinar si el vetiver puede crecer en condiciones climáticas extremas: invierno frío y húmedo - verano muy cálido y seco.
3. Averiguar si el vetiver puede establecerse en las paredes de tranques de relave y pilas de lixiviación (construidas sólo con material de desecho) para proporcionar estabilidad física en estos.

4. Determinar si la tecnología VGT puede convertirse en una tecnología efectiva para detener la erosión eólica e hídrica presente en tranques de relave, pilas de lixiviación y depósitos de estériles que se encuentren tanto en uso como abandonados.

En el presente trabajo se exponen los principales resultados obtenidos a la fecha en 2 sitios experimentales de VGT que fueron implementados el año 2005 en la zona central del país:

- Nueva Pudahuel S.A. : Lo Aguirre: Pilas de Lixiviación
- Anglo American Chile: Faena El Soldado: Tranque de Relave fuera de operación

2- EXPERIENCIA PILOTO: PILAS DE LIXIVIACIÓN MINA LO AGUIRRE

2.1 Descripción del Sitio y Problemática

La mina lo Aguirre esta operativa entre los años 1980 y 2000. Mina Lo Aguirre fue la primera minera en el mundo en emplear el proceso de lixiviación para extraer cobre desde el mineral. Chile en la actualidad se encuentra desarrollando leyes y guías para el cierre de faenas mineras.

En este escenario, el primer paso para la rehabilitación ambiental de La Mina lo Aguirre, fue la revegetación de los depósitos de estériles y pilas de lixiviación para controlar la erosión hídrica y eólica. Sin embargo, debido a la elevada concentración de elementos, particularmente cobre y sulfatos, y bajo contenido de nutrientes, no fue posible el establecimiento de especies nativas sobre estos desechos.

Las pilas de lixiviación son ácidas (pH=3.6), con elevadas concentraciones de sulfato (29000 mg/kg), EC (39600 uS/cm), Cobre Total (2369 mg/Kg) y Mg (9433 mg/Kg), pero con bajas concentraciones de N Total (0.1mg/kg) y P (0.2 mg/Kg).

Los principales objetivos de este proyecto piloto son determinar la adaptación y la capacidad de crecimiento del Vetiver en Pilas de Lixiviación.

2.2 Materiales y Métodos

Debido al limitado financiamiento existente para esta experiencia, se incorporaron 370 plantas en 50m. lineales de VGT. La plantación fue realizada en Octubre de 2005, con plantas de calidad heterogénea, algunos individuos poseían hojas y raíces fuertes, mientras que otras prácticamente estaban desprovistas de estos tejidos vegetales. Los ejemplares fueron trasladados con suelo vegetal y nutrientes. En la Figura 1 se observa el sector donde fue realizada la experiencia VGT.

Cabe destacar que las condiciones climáticas existentes en Mina lo Aguirre corresponden a las siguientes:

- Precipitación anual: 320 mm
- T° mínima: 0°C
- T° máxima 38°C

Al comenzar la experiencia, a la barrera de Vetiver se le aplicó riego profundo una vez por semana, pero una vez iniciada la época estival se aumentó la frecuencia de riego a dos veces por semana, ya que Enero corresponde al mes más cálido de la región metropolitana, sector donde se realiza la prueba ($\pm 30^{\circ}\text{C}$).

Al inicio de la prueba, el monitoreo se realizó cada 6 semanas por un periodo de 6 meses, registrándose en cada visita el estado fitosanitario de la especie vegetal y su crecimiento.

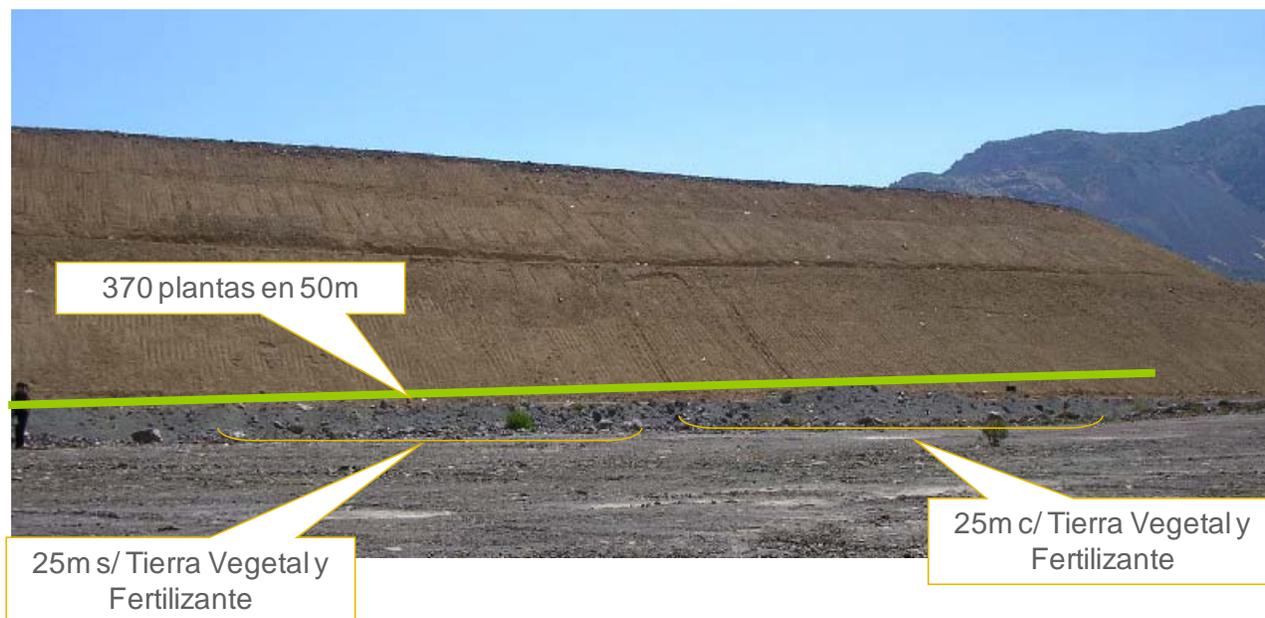


Figura 1.- Localización y características de la prueba VGT en Pilas de Lixiviación Mina Lo Aguirre

2.3 Resultados y Discusión

Pese a la mala calidad de algunos ejemplares incorporados a la prueba, a las elevadas temperaturas y a la sequedad ambiental; el establecimiento de la planta fue muy satisfactorio al inicio de la prueba, a continuación se describe los resultados de la prueba en dos periodos diferentes de monitoreo:

- **Año 2005:** Transcurridos 3 meses de la plantación, se alcanzó un 79% de establecimiento exitoso. Sin embargo algunos ejemplares fueron afectados por herbívora de conejos y caballos (Figura 2).
- **Año 2010:** Luego de 5 años de realizada la prueba de la barrera VGT, el monitoreo presentó un daño considerable debido básicamente al ataque por depredación de animales herbívoros, por lo tanto se observa una baja sobrevivencia (15%), muchos individuos se observan con daño no recuperable o ausencia de individuos. Sin embargo, los ejemplares a los que no se les aprecia ningún tipo de daño, cuentan con un buen desarrollo de la mata y altura por sobre 100 cm de altura (Figura 3).

Los resultados expuestos son determinantes, ya que los individuos han soportado una fuerte aridez y fríos intensos en los cuatro años desde su incorporación. Se presume que con la llegada de la estación primaveral comience el rebrote de tejidos vegetales sobre los ejemplares que se han mantenido en latencia sin dar muestras de ataque de herbívoros o deshidratación.

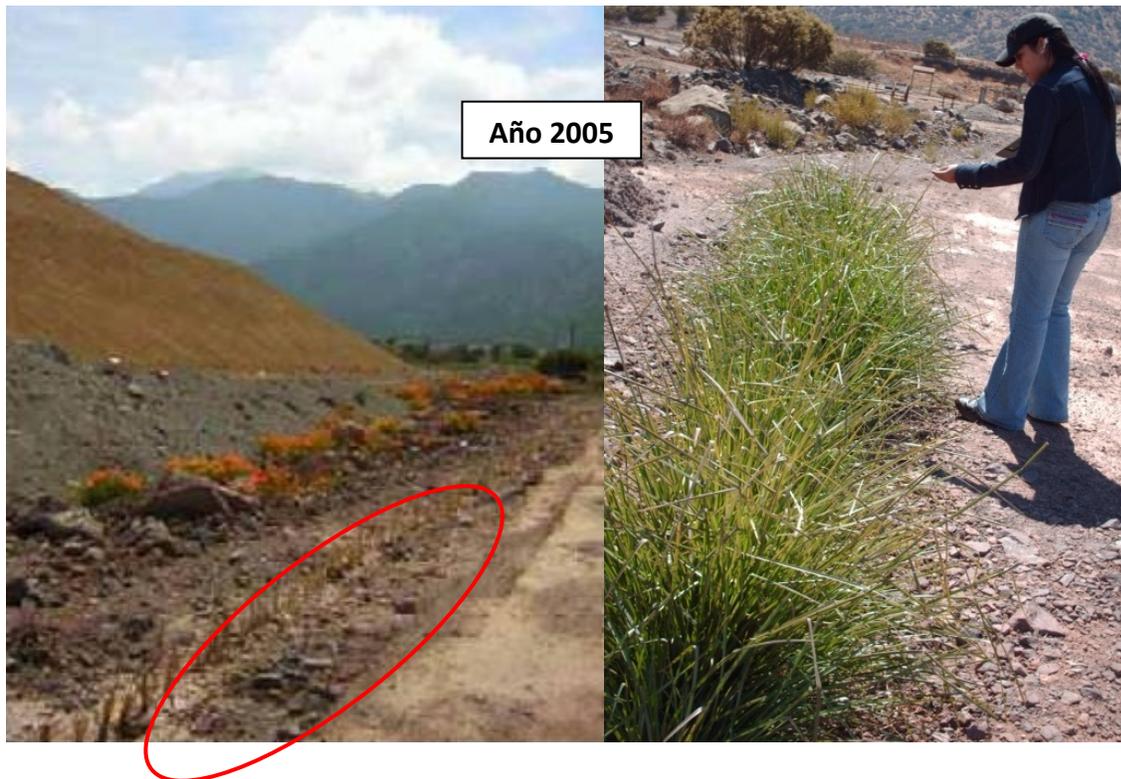


Figura 2.- Ensayo de VGT Pilas de lixiviación Mina Lo Aguirre. Monitoreo año 2005



Figura 3.- Ensayo de VGT Pilas de lixiviación Mina Lo Aguirre. Monitoreo año 2010

3- EXPERIENCIA PILOTO: TRANQUE DE RELAVE FUERA DE OPERACIÓN FAENA EL SOLDADO

3.1 Descripción del Sitio y Problemática

Anglo American comenzó sus operaciones en Chile en 1980 a través de la Empresa Minera de Mantos Blancos. Posteriormente, compró el 44% de la propiedad de la compañía minera Doña

Inés de Collahuasi. En 2002 adquirió la Compañía Minera Disputada de Las Condes, hoy Minera Sur Andes.

Es la segunda minera privada más importante del país, con una producción anual que en 2004 alcanzó a 667 mil toneladas de cobre fino y con ventas cercanas a US\$ 2 mil millones anuales, incluyendo el 44% de participación de la compañía en la propiedad de Collahuasi.

Está dedicada a la exploración, explotación, procesamiento y comercialización de cobre, como concentrado, ánodo/blíster y cátodos. También comercializa subproductos, como el molibdeno y el ácido sulfúrico.

La faena en donde se realizó la prueba VGT corresponde a El Soldado, la cual se encuentra ubicada en la comuna de Nogales, región de Valparaíso, a 132 kilómetros de Santiago en plena Cordillera de la Costa. Comprende una mina subterránea y otra a rajo abierto, posee una vida útil estimada en 20 años. Además, cuenta con plantas de tratamiento de minerales oxidados y sulfurados.

Los objetivos del proyecto VGT para esta faena fue:

- Determinar la capacidad de crecimiento y adaptación del Vetiver en residuos sólidos de la actividad minera del cobre.
- Controlar erosión eólica e hídrica.
- Estabilizar el talud.

El tranque de relave posee una textura arenosa, pH básico (pH = 8.0), bajo cobre total (2420mg/kg), Magnesio (1051mg/kg) y muy bajas concentraciones de Nitrógeno (>0.1mg/Kg) y Fósforo (>0.1mg/Kg).

3.2 Materiales y Métodos

El área de emplazamiento de la prueba fue delimitada con malla e instalado un sistema de riego por goteo en el sector del ensayo.

La prueba consideró la plantación de 3.000 ejemplares de la especie *Vetiveria zizanoides*, de ellas 2.300 de unidades fueron traídas desde Chillán, mientras que las restantes se obtuvieron desde un vivero pre-establecido en la ciudad de Los Andes.

La plantación se efectuó en el mes de Julio del año 2005. Los ejemplares fueron distribuidos en tres cuadrantes según se detalla en la Tabla 1.

Tabla1.- Distribución de cuadrantes de plantación en el tranque de relaves

Parámetro	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3
Ancho	25 m	25 m	25 m
Largo	35 m	28 m	21 m
Distancia entre hileras	5 m	4 m	3 m
Distancia entre plantas	0.2 m	0.2 m	0.2 m
N° de hileras	8	8	8
N° de Plantas	1000	1000	1000

La plantación se inició con la excavación de zanjas con una profundidad de 30 cm. En los sectores en que existían cárcavas éstas fueron rellenadas para realizar el trazado. En el fondo de cada una de las zanjas excavadas se aplicó fosfato diamónico (40 g/m²) y una capa de material de relave.

Las plantas se dispusieron a raíz desnuda de acuerdo al diseño pre-establecido, posteriormente se cubrieron con material de relave. Las cintas de riego se dispusieron al interior de las zanjas con la finalidad de optimizar en riego. El riego se inició con la implementación de la experiencia y se extendió hasta la estación otoñal con una frecuencia de día por medio. La siguiente figura expone la disposición de plantas en cada cuadrante ensayado sobre el tranque de relaves. (Figura 4).

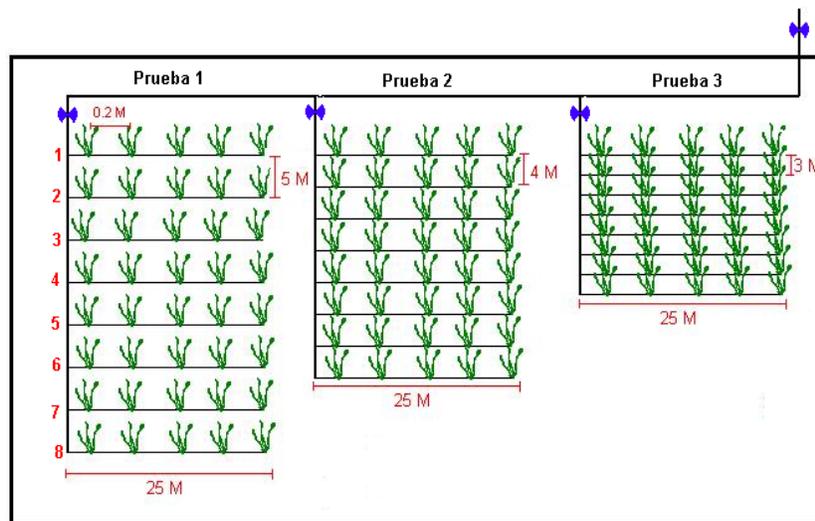


Figura 4.- Disposición de ejemplares de *Vetiveria zizanoides* en el tranque de relaves.

3.3 Resultados y Discusión

En base al monitoreo, los ejemplares fueron caracterizados según el estado observado de cada individuo de acuerdo a las siguientes categorías:

- Buen estado: no se aprecia ningún tipo de daño en la especie vegetal.
- Dañado: Identificado con causas de daño por herbívora, ataque de hongos o deshidratación. Se considera que los individuos dañados son recuperables previo manejo.
- Muerto: Individuo con daño no recuperable o ausencia de individuos.

Cabe destacar que en el transcurso del ensayo y hasta la fecha no se observó deterioro por depredación en ninguno de los cuadrantes. Sin embargo, algunos individuos sufrieron daño por deshidratación, desde el año 2006 fue suspendido el riego en los cuadrantes piloto.

A continuación se exponen los resultados de los monitoreos realizados en los años 2005 y 2010.

• **Año 2005:** Dos meses trascurridos desde la plantación, los individuos se desarrollaron y establecieron en un 100%. Las plantas alcanzaron una altura aproximado de 35 cm. con una raíz de 40 cm. (Figura 5).

• **Año 2010:** Después de 5 años de la incorporación de vetiver al tranque de relaves y sin que medien aportes de riego al ensayo, los cuadrantes de VGT continúan en buen estado con una alta mortalidad de especies y con un desarrollo reducido de la mata que alcanza una altura que 35 cm de longitud, dando cuenta de una media respuesta de la especie a las arenas de relave (Figura 6).

Actualmente, se observa un 25% de individuos vivos, con una extensa pero delicada trama radical de aproximadamente 85 cms. de longitud, que es posible de observar en el perfil (figura 7).

Los resultados expuestos son concluyentes, ya que los individuos han soportado una fuerte aridez observándose un alto porcentaje de individuos muertos o dañados (75%) considerando que los individuos no se adaptaron al nuevo sitio con reducido contenido de nutrientes, nula estructura física y carencia de agua. Sin embargo, algunos individuos superaron las condiciones de estrés adaptándose satisfactoriamente al sitio piloto.

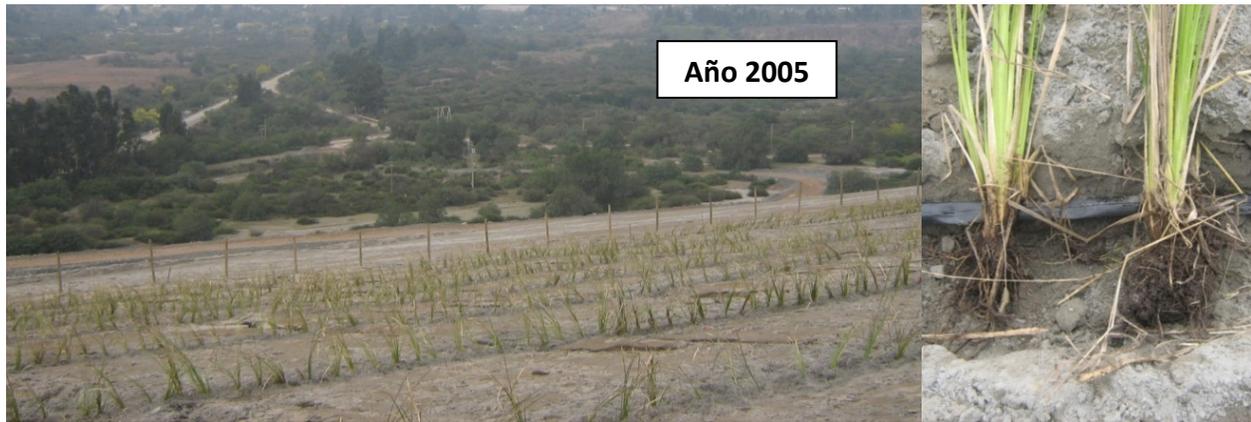


Figura 5.- Ensayo piloto VGT en tranque de relave. Mina El Soldado. Monitoreo año 2005



Figura 6.- Ensayo piloto VGT en tranque de relave. Mina El Soldado. Monitoreo año 2010



Figura 7.- Trama de raíces desarrolladas por *Vetiveria zizanoides*
Tranque de relaves El Soldado. Monitoreo año 2010

4. CONCLUSIÓN

De la información recogida, puede observarse que *Vetiveria zizanoides* puede establecerse y crecer satisfactoriamente sin necesidad de suelo vegetal solo con adición de nutrientes al inicio de la plantación sobre tranques de relave y pilas de lixiviación con altos niveles de cobre (2369mg/kg).

De los individuos incorporados hasta la fecha en pilas de lixiviación, solo un 15% de ellos se encuentran en óptimas condiciones debido básicamente a la depredación por herbívoros. Sin observarse diferencias entre el desarrollo de plantas con o sin suelo vegetal, pudiendo concluir que vetiver puede crecer y desarrollarse directamente sobre pilas de lixiviación, con resguardo preventivo de herbívoros. Evidenciando nuevos tejidos vegetales y ausencia de signos de desecamiento, o acción de hongos en los individuos que no fueron dañados por herbívoros.

Los ejemplares que fueron incorporados en arenas de relaves presentaron un 25% de sobrevivencia, presentando un desarrollo regular del sistema radicular. Sin embargo las raíces son débiles mientras que las hojas alcanzan un reducido desarrollo en longitud y diámetro. Se observó que el mayor daño a esta especie en el relave fue ocasionado por la deshidratación, no observándose daño por herbívoros.

Para lograr la aclimatación óptima de la planta se deberá contar como mínimo con:

- Calidad óptima del individuo a incorporar en la plantación.
- Adición de nutrientes y aporte de estructura al suelo.
- Riego al menos dos veces a la semana en época estival en el transcurso del primer año.
- Protección ante herbívoros.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Armando Enrique Valenzuela Jara . History of Mining in Chile, Chilean Copper Commission, Santiago, Chile

Shu. H, Xia, W. (2003). Integrated Vetiver Technique for Remediation of Heavy Metal Contamination: Potential and Practice. The Third International Conference on Vetiver, Guangzhou, China, April 2003.

Truong, P.N. and Baker, D. (1998). Vetiver Grass System for environmental protection. Technical Bulletin No.1. Pacific Rim Vetiver Network, Bangkok, Thailand.