

# USO DE VETIVER GRASS PARA LA REHABILITACIÓN DE SITIOS MINEROS EN CHILE: RESULTADOS PRELIMINARES

R. Fonseca\*, C. Diaz\*, M. Castillo\*, J.R. Candia\* and P. Truong\*\*

\*Fundacion Chile, Av. Parque Antonio Rabat Sur 6165, Vitacura, Santiago, Chile

[rfonseca@fundacionchile.cl](mailto:rfonseca@fundacionchile.cl)

\*\*TVN Director and East Asia and South Pacific Representative,  
Veticon Consulting,

23 Kimba St, Chapel Hill, Brisbane 4069, Australia

[truong@uqconnect.net](mailto:truong@uqconnect.net)

## Resumen:

Chile es un país cuyo principal ingreso económico proviene de la actividad minera, principalmente la minería del cobre. Es por este motivo que Fundación Chile se encuentra realizando una serie de estudios pilotos de VGT en los desechos producidos por este tipo de actividad, pues representan una fuente de contaminación importante de las principales matrices ambientales (aguas, suelo y aire).

Los principales objetivos de implementación de la Tecnología VGT son los siguientes:

- ❑ 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.
- ❑ Determinar si el vetiver puede crecer en condiciones climáticas extremas: Altitud, frío y húmedo invierno y muy cálido y seco verano.
- ❑ 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.
- ❑ 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.

Los resultados a la fecha son muy alentadores. El vetiver puede establecerse tanto en pilas de lixiviación como en tranques de relave con elevadas concentraciones de cobre, en donde la parte aérea de esta planta ha crecido hasta 1.5m en sólo 6 meses desde su plantación.

En plantaciones realizadas a 2500m de altura y en pleno invierno con heladas constantes se ha observado un razonable crecimiento y establecimiento del vetiver.

**Palabras Clave:** Minería, cobre, tranques de relave, pilas de lixiviación, Erosión hídrica, Erosión Eólica.

## 1.0 INTRODUCCIÓN

Chile ha sido uno de los productores de mineral más grandes del mundo desde el siglo XVIII hasta hoy. Las actividades mineras se concentran en cinco grupos de minerales: cobre y sus subproductos, metales preciosos, hierro y acero, minerales industriales, carbón y petróleo.

Chile es el principal productor y exportador de cobre, produciendo el 36% del cobre del mundo en el año 2003; también produce oro, plata, molibdeno y renio. Nuestro país es también uno de los principales productores del mundo de minerales industriales tales como nitrato de potasio y de sodio, yodo, sales de litio, borato, sal, entre otros.

Antes de 1970, la producción de cobre chilena era 700.000 toneladas (el 11% del mundo total). Con la nacionalización de la industria de cobre en 1971, el Gobierno Chileno comenzó operar las cuatro minas de cobre más grandes del país: Chuquibambilla, El Teniente, Andina, y Salvador. En 1976, fue formada la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), convirtiéndose en el productor y exportador de cobre más grandes del mundo. Hoy, produce cerca de 1.6 millones de toneladas de cobre (el 33% de la producción de cobre chilena) desde cuatro divisiones: Codelco División Norte, Codelco División El Teniente, Codelco División Andina, y Codelco División El Salvador.

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.

Debido a esto Fundación Chile (FCH) ha estado buscando activamente desde hace más de 3 años, Soluciones Tecnológicas Innovadoras que puedan proporcionar una medida práctica, eficaz y sustentable a los problemas de contaminación.

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.

Es así como Fundación Chile ha iniciado una serie de estudios experimentales en diferentes minas del Norte y Centro del país, con los objetivos de:

- Determinar si el Vetiver puede crecer en tranques de relave, rios de lixiviación y depósitos de estériles, los cuales presentan elevadas concentraciones de cobre y otros metales.
- Determinar si el vetiver puede crecer en condiciones climáticas extremas: Altitud, frío y húmedo invierno y muy cálido y seco verano.
- 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.

- 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.

Desde el año 2005 a la fecha, se han implementado 5 sitios experimentales de VGT:

- Nueva Pudahuel S.A. : Lo Aguirre : Pilas de Lixiviación
- Nueva Pudahuel S.A. : La Africana : Tranques de Relave fuera de operación.
- Codelco Andina : Piuquenes : Tranque de Relave fuera de operación.
- Angloamerican : El Soldado : Tranque de Relave fuera de operación.

## **2.0 PILAS DE LIXIVIACIÓN MINA LO AGUIRRE**

### **2.1 Descripción del Sitio y Problemática**

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. Como en la actualidad Chile se encuentra desarrollando leyes y guías para el cierre de faenas mineras, esta minera será pionera en acatar la nueva normativa chilena.

Para esto, el primer paso para la rehabilitación ambiental de la mina, es revegetar 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 se observa el establecimiento de especies endémicas 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.

### **2.1 Materiales y Métodos**

Debido al limitado financiamiento existente para esta prueba sólo se plantaron 50m lineales de VGT. La plantación fue realizada en Octubre de 2005. La calidad de las plantas, traídas a la mina en bolsas plásticas con suelo y nutrientes, era muy heterogénea, variando de plantas con hojas y raíces fuertes a otras en donde la presencia de estas últimas era casi nula.

La Foto 1 muestra la ubicación y características de la prueba VGT:

- 25m con suelo vegetal y fertilizante (el tipo y cantidad de fertilizante es desconocida).
- 25m con fertilizante.

Foto 1: Ubicación y Características de la Prueba VGT.



Al inicio de la experiencia, la barrera de Vetiver fue regada una vez por semana, pero una vez iniciada la época estival se aumentó la frecuencia de riego a dos veces por semana, pues Enero corresponde al mes más cálido de Santiago ( $\pm 30^{\circ}\text{C}$ ).

El monitoreo se realizó cada 6 semanas por un periodo de 6 meses, registrándose el estado de la especie vegetal y su crecimiento.

### 2.3 Resultados y Discusión

A pesar de la mala calidad del material vegetal plantado, de las elevadas temperaturas y sequedad ambiental, el establecimiento de la planta fue muy satisfactorio, logrando un 96% de establecimiento después de 7 semanas y del 79% después de 3 meses según lo demostrado en la Tabla 1 y Foto 2.

Tabla 1: Tasas de Establecimiento de la Planta

Condición	Age of plants		
	Al inicio	7 semanas	3 meses
Buen Crecimiento	370	357	294
Plantas Muertas		13	76

Para evaluar el crecimiento del Vetiver en Mina Lo Aguirre, las alturas de las plantas fueron clasificadas como: alto, medio y bajo. La Tabla 2 muestra el crecimiento de éstas a 3 meses de la plantación.

**Tabla 2:** Distribución de largos de la Planta

Condición de la Planta	% Plantas	Crecimiento de la Hoja (cm)
1 (Alto)	17	50 – 70
2 (Medio)	76	30 – 49
3 (Bajo)	7	< 29

**Foto 2:** Establecimiento de la Planta



10 días después de la plantación

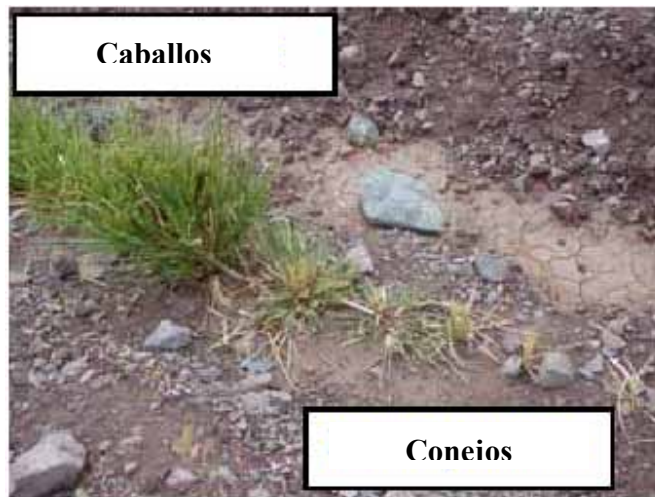
Un mes después de la Plantación (02-12-2005)

**Foto 3:** Crecimiento de la Especie a los 3 meses (izquierda) y después de 8 meses (derecha)



Desafortunadamente, luego de 5 meses de plantación, algunos sectores de la prueba VGT fueron afectados por conejos y caballos, como muestra la Foto 4.

**Foto 4:** Plantas Afectadas por Caballos (Izquierda) y Conejos (Derecha)



De la información recogida durante el estudio, puede observarse que el Vetiver puede establecerse y crecer satisfactoriamente sobre las Pilas de Lixiviación con un nivel de Cobre Total muy alto (2369mg/Kg) y un pH ácido de 3.6. A la fecha no se observa diferencia entre el desarrollo de plantas con y sin suelo vegetal, por lo que se puede concluir que, el Vetiver puede crecer y desarrollarse directamente sobre las Pilas de Lixiviación.



### **3.0 TRANQUES DE RELAVE FUERA DE OPERACIÓN, MINA LA AFRICANA.**

#### **3.1 Descripción del Sitio y Problemática**

Esta mina de cobre fue cerrada hace 10 años aproximadamente. Posee dos tranques de relave inactivos que se encuentran desprovistos de vegetación y con problemas de erosión, tanto hídrica como eólica (Ver Foto 5). El objetivo preliminar de esta prueba es determinar si el Vetiver puede establecerse y crecer sobre el tranque de relave, y en segundo lugar determinar la potencialidad de escalar la prueba para la rehabilitación completa de éste.

El tranque de relave posee una textura arenosa, con un pH ácido ( $\text{pH} = 4.4$ ), elevados contenidos de sulfato ( $29500\text{mg/Kg}$ ), EC ( $21200\text{uS/cm}$ ), Cobre Total ( $3921\text{mg/kg}$ ), Magnesio ( $5507\text{mg/kg}$ ); pero muy bajo contenido de N disponible ( $0.1\text{mg/kg}$ ) y P ( $0.2\text{mg/kg}$ ). (Foto 5).

**Foto 5:** Tranques de Relave sin presencia de Vegetación y con problemas de Erosión



#### **3.2 Materiales y Métodos**

Similar a la experiencia en Mina Lo Aguirre, en esta prueba se plantaron aproximadamente 500 ejemplares en Octubre del 2005. La calidad de las plantas, traídas a la mina en bolsas plásticas con suelo y nutrientes, era muy heterogénea, variando de plantas con hojas y raíces fuertes a otras en donde la presencia de estas últimas era casi nula.

El proyecto se realizó en Octubre del 2005. Se plantó una cantidad de 500 plantas distribuidas en 5 barreras de 10 metros cada una a un intervalo vertical de 1 metro. En forma ascendente la barrera 1 y 2 se plantaron a raíz desnuda para medir la incidencia del material tóxico sobre la especie. Las barreras 3,4 y 5 se plantaron con contenedores plásticos.

### 3.3 Resultados y Discusión

Las especies vegetales de La Africana debían ser regadas por el cuidador del sitio una vez a la semana, lo que no fue suficiente según se pudo evaluar en la inspección correspondiente a dos meses después de la plantación, fecha en la cual se detectó que aproximadamente el 50% de las especies se encontraban muy deterioradas. La razón de ello pudo ser que el riego semanal no se efectuó o bien que la frecuencia no era la suficiente. Por este motivo se solicitó incrementar la frecuencia de riego a dos veces por semana. De la evaluación correspondiente a 3 meses después de la plantación se observó que el 90 % de las especies vegetales se encontraban secas, debido a las extremas condiciones de temperatura ( $\pm 35^{\circ}\text{C}$ ) y sequedad del ambiente; y que al parecer no habían sido regadas. (Foto 6 y 7).

**Foto 6:** Distribución de las plantas en Tranque La Africana



**Foto 7:** 90% de las Plantas Muertas





Con una implementación de riego de dos veces por semanas posterior a la inspección realizada 5 meses después de la plantación, se observó en una visita después de los 8 meses iniciada la experiencia que, aproximadamente un 70% de las plantas se encontraban verdes y con raíces muy bien desarrolladas, a pesar de que las plantas fueron afectadas por una plaga de conejos existente en la zona. (Foto 8)

**Foto 8:** Brotes verdes y buen establecimiento de raíz



Los resultados descritos demuestran claramente que pese a las condiciones climáticas y a la ausencia casi total de riego, el Vetiver puede crecer bajo condiciones extremadamente hostiles en tranques de relave ácidos ( $\text{pH} = 4.4$ ), cobre total ( $3921\text{mg/kg}$ ), sulfato ( $29500\text{ mg/kg}$ ) y EC ( $21200\text{uS/cm}$ ).

#### **4.0 TRANQUE DE RELAVE FUERA DE OPERACIÓN, CODELCO ANDINA.**

##### **4.1 Descripción del Sitio y Problemática**

La división Andina opera el yacimiento Río Blanco, cuya riqueza era conocida desde 1920. Pero los intentos por iniciar su explotación no se concretaron hasta medio siglo después, en 1970.

Andina produce unas 248.137 toneladas métricas finas anuales de concentrados de cobre que son materia prima fundamental para obtener el metal refinado. Además, coloca en los mercados 3.244 toneladas métricas de molibdeno al año.

En el presente, Codelco Andina posee tres tranques de relave: Ovejería (activo desde el año 2000), Los Leones (usado sólo para descargas de emergencia) y Piuquenes (inactivo desde el año 2000). Es en este último que la compañía se encontró dispuesta a realizar una prueba piloto de VGT para resolver algunos problemas de erosión eólica existentes.

Los objetivos del proyecto son:

- ❑ Determinar la capacidad de crecimiento y adaptación del Vetiver en extremas condiciones de frío y altitud.
- ❑ Determinar la capacidad de crecimiento y adaptación del Vetiver en residuos sólidos de la actividad minera del Cobre.
- ❑ Controlar erosión eólica.
- ❑ Para disminuir las emanaciones de material particulado.

El tranque de relave posee una textura arenosa, pH ácido (pH = 3.2), bajo EC (418uS/cm), bajo Cobre Total (872mg/kg), Magnesio (2140mg/kg) y muy bajas concentraciones de Nitrógeno (37mg/Kg) y Fósforo (1.2mg/Kg).

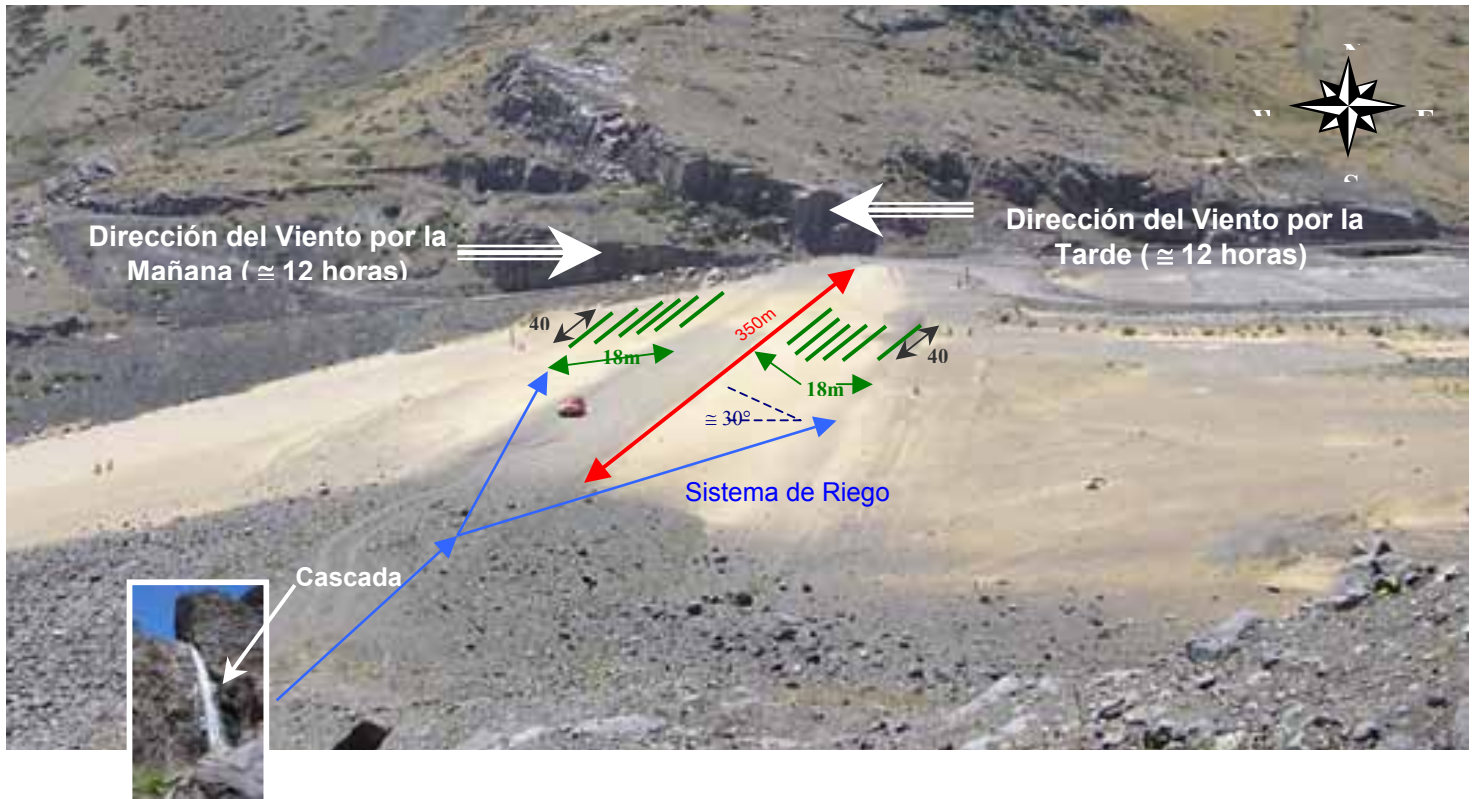
**Foto 9:** Panorámica del Tranque de relave (izquierda) y bloqueo del camino debido al fuerte viento.



#### 4.2 Materiales y Método

Seis filas de Vetiver fueron plantadas a cada lado del camino que se desea proteger, con un espaciamiento de aproximadamente 2m entre barreras y de 10cm entre planta, como se puede observar en las Fotos 10 y 11.

**Foto 10:** Diseño de plantación para tranque Piuquenes



**Foto 11:** Plantación de Vetiver (Marzo 2006)



### 4.3 Resultados y Discusión

En la inspección realizada a principios de Junio del 2006, dos meses después de la plantación, fue sorprendente que, pese al extremo frío, aproximadamente un 85% de la plantación se encuentra establecida y con un crecimiento de brotes de entre 10 a 15cm con un buen desarrollo y anclaje de la raíz sobre el suelo. Foto 12.

**Foto 12:** Plantación de Vetiver (Marzo 2006)



Cuatro meses después de la plantación, debido al inicio del invierno, las barreras fueron cubiertas durante un mes con 50cm de nieve. En la inspección realizada 5 meses después de iniciada la experiencia, se puede observar que, pese a que no hay presencia de hojas en la plantación, las raíces se encuentran vivas en aproximadamente el 80% de la plantación. Por otra parte, aproximadamente un 30% de las plantas se encontraban completamente cubiertas de material del tranque debido a los fuertes vientos, pero al excavar para ver la condición en la cual se encuentra la planta, se puede observar que las raíces están ancladas al suelo y con presencia de nuevos brotes. Foto 13 y 14.



**Foto 13:** Plantación de Vetiver (Agosto 2006)



**Foto 14:** Plantas completamente cubiertas con material del tranque (izquierda) y fuerte anclaje de la raíz en el suelo (derecha)





## **5.0 TRANQUE DE RELAVE FUERA DE OPERACIÓN, ANGLOAMERICAN.**

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

Los objetivos del proyecto VGT son:

- ❑ 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.
- ❑ Disminuir las emanaciones de material particulado.

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). (Foto 15)

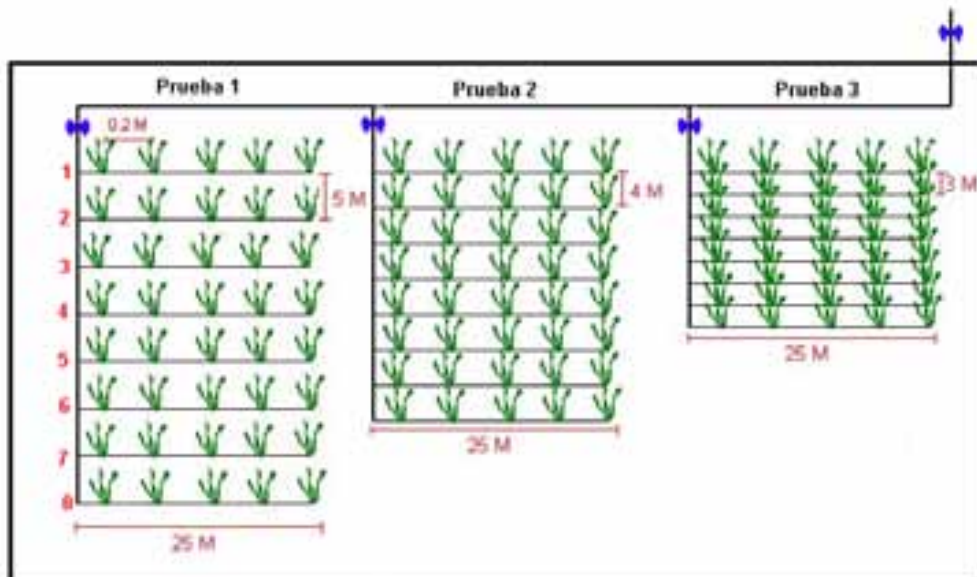
**Foto 15:** Características del Tranque en Mina El Soldado



## 5.2 Materiales y Método

Esta prueba fue diseñada para observar la capacidad de la planta para contener el talud del muro y evitar el socavamiento de este por efecto de las lluvias, tomando como parámetro de referencia una inclinación del muro de  $20^\circ$ . (Foto 16)

**Foto 16:** Diseño de plantación para Mina El Soldado



La prueba consiste en tres segmentos de 25 m de ancho cada una con 8 filas de 125 plantas con una separación entre si de 20 cm. Cada fila esta separada a una distancia que varia entre segmentos, El primer segmento o prueba tiene una separación entre filas de 5 m, la segunda prueba 4m y la tercera prueba 3m.

### 5.3 Resultados y Discusión

Los ejemplares se distribuyeron en tres pruebas previamente delimitadas al interior de un área resguardada por malla, en cada prueba se implemento, con anterioridad al establecimiento de las plantas, un sistema de riego por goteo.

La plantación se comenzó con la excavación de zanjas con una profundidad de 30 Cm. En los sectores en que existían grietas de erosión estas fueron rellenadas para trazar a zanja, en el fondo de cada una de las zanjas se aplico Fosfato Diamónico ( $40 \text{ g/m}^2$ ) y una capa de material de relave, todo de acuerdo al diseño preestablecido.

Las plantas se dispusieron a raíz desnuda a una distancia de 20 cm. y se cubrieron con material de relave. Las Cintas de riego se dispusieron al interior de las zanjas con la finalidad de optimizar en riego.



(17)



(18)



(19)



(20)



(21)



(22)

En estas imágenes se muestra el trabajo de implementación de las pruebas, la forma como se dispusieron los ejemplares y las cintas de riego (fotos 17, 18 y 19), el relleno y la plantación en grietas (fotos 20 y 21) y la disposición final de las pruebas en el muro (foto 22).

## 6.0 REFERENCIAS

- 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. hilippines, April 1999.
- Truong, P.N. and Baker, D. (1998). Vetiver Grass System for environmental protection. Technical Bulletin No.1. Pacific Rim Vetiver Network, Bangkok, Thailand.

## BREVE INTRODUCCIÓN SOBRE EL PRIMER AUTOR

La señorita Rocío Fonseca posee tres años de experiencia profesional en el área de medio ambiente, abordando temas de tecnologías de Biorremediación de suelos, agua y aire; evaluación de riesgo y minimización de residuos.

Se ha especializado en el diseño y puesta en marcha de sistemas biológicos para el tratamiento de aguas residuales y suelos contaminados con metales e hidrocarburos.

Desde hace dos años se encuentra promoviendo y desarrollando la tecnología VGT para la fitorremediación, estabilización y rehabilitación de residuos sólidos de la actividad minera del Cobre.