

Restauración de Sitios Mineros Mediante Coberturas de Efecto SDR

M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa Carrasco

Director del Laboratorio de Concentración de Minerales, Universidad Técnica de Oruro
octahinojosacarrasco@hotmail.com

Dr. Ing. Antonio Salas Casado

Docente Titular de Concentración de Minerales, Universidad Técnica de Oruro
salasdeviaje@yahoo.es

Dr. Ing. Gerardo Zamora Echenique

Director de Postgrado y Docente de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica,
Universidad Técnica de Oruro
gerardozamoraechenique@yahoo.es

Resumen

Como consecuencia de la actividad Minero-metalúrgica desarrollada en nuestro país en el pasado, se han depositado grandes volúmenes de residuos mineros, denominados "pasivos ambientales", que contienen sulfuros (principalmente piritita) y, como no se han tomado en cuenta las correspondientes medidas ambientales en su disposición final, van generando Drenaje Acido de Roca, DAR, dando así lugar a una disminución del valor del pH de sus escorrentías y por ende a la contaminación de cuerpos acuosos.

Un ejemplo, es la antigua planta de concentración de minerales denominada "Frankeita", en la ciudad de Oruro- Bolivia, que ha dejado como residuos mineros colas de flotación, que han sido catalogados como los de "mayor potencial generador de drenajes ácidos", y actualmente se encuentran expuestos a oxidación sin ninguna medida de restauración o intervención ambiental.

En virtud de ello, el presente trabajo se encaminó a estudiar la aplicación de la cobertura SDR a nivel piloto. Para ello, se ha realizado la caracterización química, física e hidrológica de los materiales disponibles en el sitio; se ha investigado el comportamiento de la cobertura SDR simulando condiciones naturales y extremas válidas para Oruro, y se ha efectuado la medición y control de los parámetros más importantes en el monitoreo de una cobertura SDR.

Los resultados obtenidos muestran que el "suelo Frankeita", usado como cobertura principal, sirve para los propósitos de remediación ambiental cuando se usen las coberturas tipo SDR; el principio de barrera capilar funciona perfectamente tanto con coberturas de 80 cm, de altura como coberturas de altura menor como 50 cm, y en condiciones de extrema precipitación.

Palabras clave: Pasivos ambientales, drenaje ácido de roca, restauración, cobertura SDR.

Restoration of mining places through the use of SDR effect coverts

Abstract

Due to the mining and metallurgical activities in Bolivia during the past, big amounts of mining residues have been put down, which are called "environmental passives". These passives contain sulfurs, which generate acid mine water (DAR), because environmental cares about the final storage of these residues haven't been taken. The acid-mine-water contaminates and decreases the pH of the streams.

The old industry of minerals concentration "Frankeita" in Oruro is an example. This industry has left flotation waste as mineral residues. This waste has the biggest potential to create acid mine water. Now they're exposed to oxidation without any restoration program or environmental intervention.

This article is orientated to study the use of the SDR covert in a pilot level. The chemical, physical and hydrological characterization of the available material in the place was made. The behavior of the SDR covert simulating natural and extreme conditions in Oruro

ro was investigated, and the measurement and control of the most important parameters during the monitoring of the SDR covert was made.

The results show that the "Frankeita soil", which is used as principal covert, can be used for the environmental remediation when the SDR covert will be used. The capillary barrier principle works perfectly with 80 cm height coverts and with less than 50 cm height coverts, within extremely precipitation conditions.

Key works: Environmental passives, acid mine water, restoration program, SDR covert.

Restauração dos sítios de mineração através das coberturas de efeito SDR

Resumo

Devido à atividade de mineração desenvolvida na Bolívia no passado, foram depositados grandes volumes de resíduos de mineração, chamados "passivos ambientais". Eles contêm sulfures (principalmente pirita), e como não foram consideradas as medidas ambientais na sua disposição final, os resíduos estão criando "drenagem ácido da mina (DAR)", causando a diminuição do pH dos escoamentos e a contaminação dos meios aquosos.

Um exemplo é a antiga usina de concentração de minerais "Frankeita", que fica na cidade de Oruro, Bolívia; que deixou como resíduos de mineração os resíduos de flotação, que têm sido catalogados como os de "maior potencial de geração de drenagem ácido", e atualmente ficam expostos à oxidação sem nenhuma medida de restauração ou intervenção ambiental.

Por isso, o trabalho foi encaminhado a estudar a aplicação da cobertura SDR num nível piloto. Para isso, foi realizada a caracterização química, física e hidrológica dos materiais disponíveis no sítio: foi investigada a conduta da cobertura SDR simulando condições naturais e extremas, válidas para a cidade de Oruro, e foi feita a medição e controle dos parâmetros mais importantes no monitoramento duma cobertura SDR.

Os resultados obtidos mostram que o "solo Frankeita", utilizado principalmente como cobertura principal, serve para os propósitos do remédio ambiental quando são utilizadas coberturas de tipo SDR; o princípio da barreira capilar funciona perfeitamente tanto com cobertura de 80 cm de altura, como também com coberturas de altura menor a 50 cm, além de condições de precipitação extrema.

Palavras chave: Passivos ambientais, drenagem ácido da mina, restauração, cobertura SDR.

1. Introducción

Como consecuencia de la actividad minero-metalúrgica desarrollada en nuestro país en el pasado, hoy en día se encuentran abandonados muchos depósitos de residuos denominados "pasivos ambientales", como "colas y desmontes"; los que, por su alta generación de Drenajes Ácidos, se constituyen en fuentes potenciales de contaminación de metales pesados de aguas superficiales y subterráneas; por tanto, generan un fuerte impacto ambiental negativo.

En todas las regiones mineras del país se han depositado, en muchas décadas de actividad minera, grandes volúmenes de estos residuos que contienen sulfuros (principalmente pirita) y, como no se han tomado en cuenta las correspondientes medidas ambientales en su disposición final, en contacto con aguas superficiales o de lluvia y el oxígeno de la atmósfera, van generando Drenaje Acido de Roca, DAR, dando así lugar a una disminución del valor del pH de sus escorrentías y por tanto a la contaminación de cuerpos acuosos.

Es así que, por ejemplo la antigua planta de concentración de minerales denominada "Frankeita" en la ciudad de Oruro-Bolívia, a 3.706 m.s.n.m., ha dejado residuos mineros de gra-

nulometría fina denominadas colas de flotación, con potenciales netos de neutralización (NNP), fuertemente ácidos; los que se encuentran actualmente expuestos a su oxidación sin ninguna medida de restauración o intervención ambiental.

2. Identificación del Problema

De los muchos pasivos ambientales que se encuentran en el altiplano boliviano, uno de los que merece pronta y urgente atención por sus características de generación de DAR, es el de las colas sulfurosas denominadas "Colas Frankeita".

El análisis químico por metales pesados de dichas colas, expresados en mg/kg, es el siguiente: As = 200; Cd = 13; Pb = 300; Zn = 800; Cu = 290. Por lo que, de acuerdo a su alto NNP y su contribución de carga de metales pesados, las colas Frankeita han sido catalogadas como las de "mayor potencial generador de drenajes ácidos"; y por tanto, priorizadas para su inmediata remediación en la ciudad de Oruro (Dames & Moore 2000). La fotografía 1, muestra el lugar donde han sido depositadas las colas Frankeita.

Los drenajes ácidos de roca que se generan en el sector son perceptibles, como se demuestran en la fotografía 2; y por su ubicación, hace que sus escorrentías cargadas de metales pesados y con un pH de 1,25, drenen directamente a la cuenca vertiente del sector, y lleguen finalmente hasta el Lago

Artículo presentado al IX Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de Materiales. Potosí – Bolívia, noviembre de 2009.

Uru Uru, alimentado por parte de las aguas del Lago Titicaca a través del río Desaguadero, muy cerca de la ciudad de Oruro.

En el lago Uru Uru, otrora fuente de vida y de alimentación no sólo de las poblaciones indígenas de las inmediaciones sino de la ciudad de Oruro, se registra una elevada contaminación por metales pesados en el sabroso pejerrey.



Fotografía 1. Colas Frankeita, sector norte, San José, Oruro – Bolivia.



Fotografía 2. DAR generado por las colas Frankeita, sector norte, San José, Oruro-Bolivia.

La contaminación del lago Uru Uru, es debida, en parte, por la carga de metales procedentes del drenaje ácido de las colas “Frankeita”.

Entre las técnicas apropiadas para mitigar el impacto ambiental por DAR, se puede citar a la de coberturas de efecto de barrera capilar, existiendo una diversidad de variantes en esta modalidad, de las cuales una solución innovadora podría corresponder a la SDR, cuya aplicación se justificaría por su adaptabilidad a climas áridos. El uso de Coberturas SDR, como alternativa técnica de remediación, debe ser considerada para la remediación ambiental no sólo de las colas Frankeita, sino de otras similares puesto que debería aprovecharse el hecho de que la precipitación pluvial promedio en Oruro es de 460 mm y la evaporación cercana a 1.200 mm.

Por otra parte, los bancos de suelos, que se encuentran prácticamente a un costado de la pila de colas Frankeita, son técnicamente apropiados para su uso como parte de la cobertura SDR.

2.1. Caracterización de las Colas Frankeita

A continuación se presenta una caracterización física y química de las colas Frankeita y sus efectos inmediatos en la generación de DAR, principalmente.

Estas colas corresponden a una antigua planta de flotación de sulfuros polimetálicos complejos.

a) Caracterización Física

Para el análisis de tamaño de partícula se requirió de 1.000 gramos de muestra. Los resultados del análisis granulométrico son presentados en la gráfica siguiente.

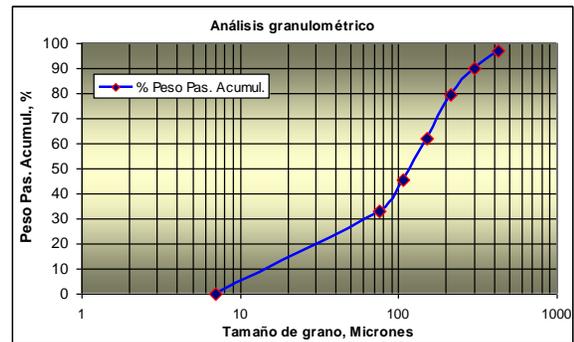


Figura 1. Curva de Distribución Granulométrica de las colas Frankeita.

De la gráfica anterior, es posible determinar que el d_{50} de la muestra es de 120 micrones.

La tabla 1, muestra los resultados obtenidos en la determinación de densidad y superficie específica del residuo estudiado.

TABLA 1. Valores de densidad y superficie específica del residuo.

Densidad	2,875	g/cm^3
Superficie específica	1,4675	m^2/g

b) Caracterización Química

Las colas de Frankeita están compuestas principalmente de cuarzo, arsenopirita y sulfuros.

El análisis químico por metales pesados de dichas colas, expresados en mg/kg es: As = 230; Cd = 15; Pb = 340; Zn = 890; Cu = 280.

c) Caracterización Mineralógica

Los resultados del análisis mineralógico cualitativo mediante Difracción de Rayos X, se presentan en la tabla 2.

TABLA 2. Análisis por Difracción de Rayos X de la muestra de Frankeita.

Minerales Sulfurados		Minerales Oxidados	
Principales	Secundarios	Principales	Secundarios
Pirita	Sulfosales	Minerale Pb-S-O	Cuarzo
Galena	Estannina-	Anglesita	Caolinita
Frankeita	Kesterita	Gipsita	
Esfalerita	Bournonita	Jarosita	
Boulangerita		Natrojarosita	
Jamesonita		Melanterita	

d) Caracterización mediante prueba Geoquímica Estática

A partir de la muestra obtenida, y con los resultados del análisis de % azufre total y % sulfato presentes en la muestra, se llevó a cabo la determinación del % de sulfuros y el cálculo del valor del Potencial Ácido de la Muestra (AP). Asimismo, en el laboratorio de análisis químico se determinó el valor del Potencial Neutro (NP). A partir de estos dos valores, se determinó el valor del Potencial Neto de Neutralización (NNP), (método ABA). En la tabla 3, se resumen los cálculos.

TABLA 3. Resultados del Potencial Neto de Neutralización (NNP) de la muestra de Frankeita.

Detalle	Colas Frankeita
% S total	16.87
% S sulfato	1.76
% S sulfuros	15.11
NP (kg CaCO ₃ /t)	1.8
AP (kg CaCO ₃ /t)	472.2
NNP (kg CaCO ₃ /t)	-470.4
NP/AP	0.0038

De los resultados obtenidos, se puede deducir:

Primer Criterio: Un residuo minero es considerado como generador de DAR si el valor del NNP es menor a -20 kg CaCO₃/t. Valores de NNP mayores a +20 kg CaCO₃/t, hacen que el residuo no sea generador de DAR. Si el valor de NNP se encuentra entre estos dos valores, entonces se tiene un rango de incertidumbre. Por tanto, la muestra estudiada **ES GENERADORA DE DAR**.

Segundo Criterio (ABA): Si la relación de NP/AP es menor a la unidad, entonces el residuo puede ser considerado como generador de DAR. Por el contrario, si dicha relación es mayor a 3, entonces el residuo no es generador de DAR. Valores intermedios, dan lugar a una incertidumbre sobre la generación o no de DAR. Por tanto, la muestra estudiada **ES GENERADORA DE DAR**.

Desde el punto de vista de la “exigencia para fines de restauración”, la normativa canadiense aplica una relación de NP/AP < 3.

Es decir, que para el caso del residuo minero de Frankeita estudiado, como la relación de NP/AP es de 0,0038; **son**

requeridas urgentes medidas de remediación del sitio minero.

También se efectuaron las pruebas geoquímicas dinámicas en celdas de humidificación. Los resultados permitieron ratificar ampliamente que el material en cuestión es altamente generador de DAR y no tiene el poder neutralizante suficiente.

3. Objetivos

El objetivo general de éste trabajo es estudiar la aplicación de la cobertura SDR a nivel piloto, bajo las condiciones climatológicas semi-áridas del altiplano boliviano, como alternativa de remediación ambiental al caso de los pasivos ambientales de Frankeita, situados en la zona Oeste de Oruro. Mientras que los objetivos específicos están encaminados a:

- Realizar la caracterización química, física é hidrológica de los materiales disponibles en el sitio.
- Investigar a nivel piloto (celdas en terreno), el comportamiento de la cobertura SDR simulando condiciones naturales y extremas.
- Efectuar la medición y control de los parámetros más importantes el monitoreo de una cobertura SDR.

4. Efecto de Barrera Capilar y Coberturas Tipo SDR

El principal problema ambiental de la industria minera es la generación del drenaje ácido de rocas (DAM o DAR), que proviene de la oxidación de residuos sulfurosos. Para limitar los impactos ambientales del DAR, se ha desarrollado una técnica nueva en el transcurso de los últimos años, se trata de las coberturas de multicapas con efecto de barrera capilar (CEBC), Bruno Bussiére (2001).

El concepto de CEBC, desarrollado sobre todo a partir de los años 80, utiliza las propiedades no saturadas de los materiales de tierra blanda para mantener una de las capas del recubrimiento con un grado de saturación (de humedad), elevada y de ese modo crear una barrera a la difusión del oxígeno (elemento esencial para la generación de DAR) y además, por el efecto de barrera capilar al colocar superpuestas dos capas de granulometría diferente, reducir la infiltración de agua, otro elemento esencial para la generación de DAR.

Numerosas son las publicaciones que describen el efecto de éstas coberturas, entre ellas se puede citar a Nicholson et al. (1989), Collin et Rasmuson (1990), Akindunni et al. (1991), Morel-Seytoux (1992), Aubertin et al. (1995), (1996), Yanful et al. (1999), Bussiére-Aubertin (2001).

Este tipo de recubrimientos puede ser construido sobre dique de colas, desmontes, pilas abandonadas de lixiviación, etc., (Richard et al. 1997; McMullen et al. 1997, Nastev et Aubertin 2000; Zhang et al. 2001).

4.1. Aplicación del Efecto de Barrera Capilar

La eficacia de una cobertura del tipo CEBC, para evitar la difusión de oxígeno hacia el residuo minero, es función de la distribución de humedad en las distintas capas.

El escurrimiento del agua en una cobertura de éste tipo es un fenómeno complejo que implica un escurrimiento no saturado en régimen transitorio en un medio estratificado donde las distintas capas tienen propiedades hidráulicas muy diferentes.

El comportamiento hidráulico de la barrera capilar se puede explicar con ayuda de las propiedades hidráulicas características de los materiales que conforman cada una de las capas.

En la figura 2, se representa el comportamiento hidráulico de dos suelos de diferente granulometría (arena y arcilla), relacionando el contenido volumétrico de agua θ que retiene el suelo bajo el efecto de la succión Ψ_a .

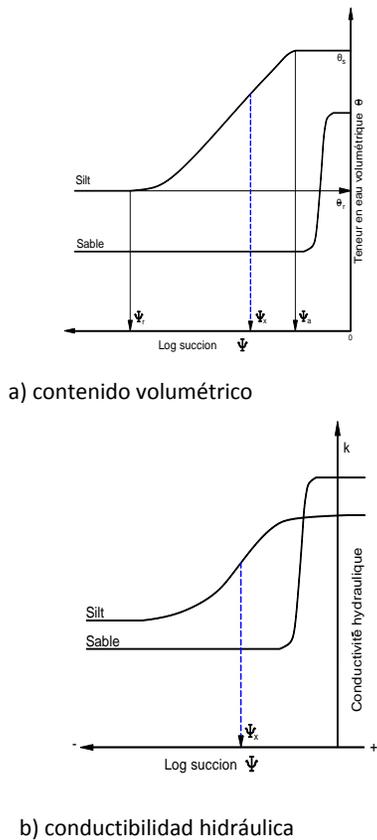


Figura 2. Comportamiento hidráulico de dos suelos de diferente granulometría (arena y arcilla), relacionando: a) el contenido volumétrico de agua θ que retiene el suelo bajo el efecto de la succión Ψ_a ; b) Conductividad hidráulica bajo el efecto de la succión (Aubertin et al. 1995).

En la figura 2a, se observa que a partir de una succión Ψ_a , el suelo de arcilla empieza a drenarse; mientras que en el suelo más grueso (arena), el inicio del drenaje se produce a una

succión más débil. También se observa que la humedad residual que conservan los suelos al finalizar el drenaje, conocida como *punto de sequía o marchites*, es diferente y característico para cada uno de los suelos. Un suelo fino mantiene mayor humedad residual que el suelo grueso y la succión residual de éste es menor a la succión que corresponde al punto de entrada de aire AEV del suelo fino; es importante resaltar que es recién a partir del AEV que comienza el drenaje del suelo fino, mientras que para esa succión el suelo grueso ya se drenó completamente.

En la figura 2b, se puede reconocer que existe similitud entre el diagrama de conductividad hidráulica y el diagrama anterior de contenido volumétrico de agua, pero con la diferencia de que cuando la arena está saturada en agua su conductividad hidráulica es mayor que de la arcilla, pero en cuanto la arena empieza a drenarse después del punto AEV, la conductividad hidráulica de la capa de arena es menor a la de arcilla y si la arena se coloca como capa de barrera capilar impedirá el paso de agua de la capa de arcilla hacia la arena.

En la figura 3, se explica la influencia del contenido volumétrico θ sobre la succión Ψ ; si se tienen dos capas superpuestas, una de arcilla encima de una de arena inicialmente totalmente saturadas (máxima saturación) y se aplica una determinada succión Ψ_1 , la capa de arena se drenará completamente quedando con un grado de saturación θ_1 , mientras que la capa de arcilla aunque perderá humedad su grado de saturación será mayor.

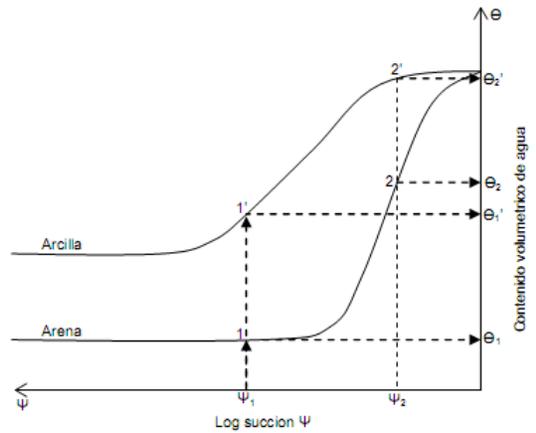


Figura 3. Comportamiento hidráulico de dos capas diferentes de suelos inicialmente saturadas, (Benois Demers, 2003).

Si se aplicara otra succión Ψ_2 menor a la anterior, los contenidos de humedad en ambas capas seguirá siendo diferente, por lo que la capa fina mantendrá siempre mucho más humedad evitando que percole agua hacia la capa gruesa inferior, porque esta presentará una conductividad hidráulica no saturada mucho más baja que la conductividad de la capa fina, con lo que se dificulta aún más la penetración de agua hacia la capa gruesa, *éste fenómeno se conoce con el nombre de barrera capilar*.

4.2. Cobertura SDR para Climas Áridos y Semi-áridos

Una cobertura de multicapa del tipo CEBC, evita la difusión de oxígeno y la infiltración de agua hacia los residuos que protege, siempre y cuando mantenga un elevado grado de saturación en la capa de retención de agua, llamada también capa de barrera impermeable (Aubertin et al. 1995).

En climas áridos y semi-áridos como los del altiplano boliviano, en períodos de sequía prolongados podría no ser posible mantener ese grado de saturación necesario, tomando en cuenta además que en la región la precipitación es menor que la evaporación, por lo que es necesario considerar una variante de cobertura multicapa del tipo SDR (Stockage & Relargage), de almacenamiento y descarga (figura 4).

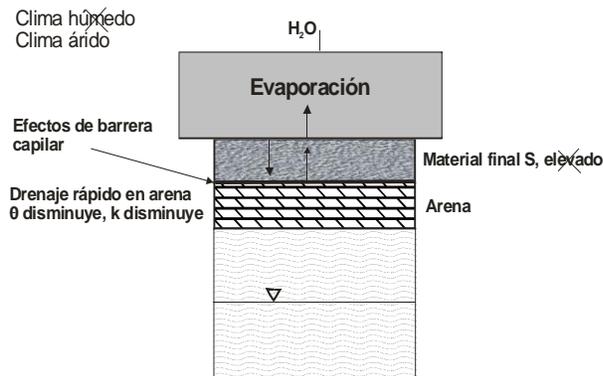


Figura 4. Cobertura SDR para climas áridos y semi-áridos, Bruno Bussiére, 2005.

En éste tipo de cobertura se busca acumular el agua de lluvia (y/o nieve), caída durante la estación húmeda en una capa fina de la cobertura, para retornarla a la atmósfera durante el período seco por evapotranspiración. Debajo de la capa fina se coloca una capa gruesa para formar la barrera capilar antes ya descrita, y evitar que el agua acumulada percole hacia el residuo que se protege con ésta cobertura. Varias son las referencias técnicas de aplicación de ésta nueva tecnología del control del drenaje ácido en zonas ácidas o semi-áridas: Bridget R Scanlon (2005), J. W. Nyhan (2005).

Para que una cobertura CEBC, del tipo SDR sea eficaz en un clima árido o semi-árido, es necesario que durante el período seco el máximo de espacios inter-granulares vacíos estén llenos de aire (bajísimo contenido de humedad en el suelo), para que cuando llegue la estación húmeda se tenga buena capacidad real de almacenamiento de agua.

La capacidad de almacenamiento, SC, se puede determinar a partir de las curvas de retención de agua características del suelo (WRC), conociendo el valor de la succión en el equilibrio residual.

La SC, de una capa del suelo puede ser determinada integrando el contenido volumétrico del agua, θ , sobre el espe-

sor b de la capa, figura 5. Asumiendo que la capacidad de campo de la capa sea constante, la capacidad de almacenamiento de una capa simple de la cobertura se puede calcular por la siguiente relación:

$$SC = \int_0^b \theta(z + h_w^*) dz = (FC)b$$

Donde:

- SC Capacidad de almacenamiento
- θ Contenido volumétrico de agua
- h_w^* Punto de entrada de aire, AEW
- z Distancia a la base de la capa del suelo
- b Espesor de la capa
- FC Capacidad de campo

Considerense las curvas características de retención de agua (WRC), de dos suelos (arena y limo arcilloso), colocadas sobre una capa de grava para formar una barrera capilar, tal como puede observar en la figura 5 a y b.

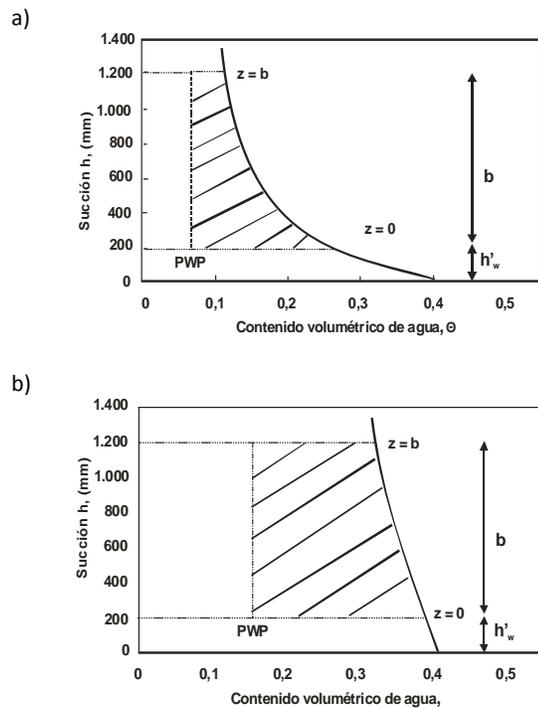


Figura 5. Curvas características de humedad de arena (a) y arcilla (b), para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de una barrera capilar (tomado de Stormer & Morris, 1998).

Debido a que la succión a cualquier espesor por encima de la interface de la barrera capilar se puede calcular aproximadamente por la siguiente relación:

$$h = z + h_w^*$$

Donde h es la succión.

El contenido de agua en función del espesor de la capa puede determinarse por la curva característica del contenido de agua del suelo.

El área (achurada), comprendida entre la curva característica de contenido de agua y el límite de la succión residual es la capacidad de almacenamiento de la barrera capilar.

La capacidad neta de almacenamiento puede ser determinada descontando, en la figura 5, el límite mínimo de agua residual que permanecerá en el suelo a pesar de que se incremente la succión, éste punto se conoce como el punto permanente de marchites o humedad residual (PWP), conforme se señala en la siguiente relación:

$$NSC = (FC - PWP).b$$

Donde:

- NSC Capacidad neta de almacenamiento
- FC Capacidad de campo
- PWP Humedad residual en el punto de marchites

Observando las curvas características de contenido de agua se tiene una confirmación visual de la discusión anterior sobre los factores que influyen en la capacidad de almacenamiento de la barrera capilar.

Las diferencias de textura de la capa (del suelo), se reflejan en la forma de la curva característica de contenido de agua como se ilustra por las diferencias entre las curvas que corresponden a una textura de arena (figura 5a) y de limo arcilloso (figura 5b).

Las curvas características de contenido de agua de un suelo fino tienden a ser empinadas indicando que su capacidad de almacenamiento es alta, y que esa capacidad es relativamente independiente del valor de h_w^* , (punto AEV). Sin embargo, el almacenamiento adicional proporcionado por la barrera capilar, comparado con el de una mono-capa simple de suelo, no debe ser significativo porque los suelos finos generalmente tienen altos valores de Capacidad de Campo.

Adicionalmente, la Capacidad Neta de Almacenamiento de estos suelos en ambas configuraciones de barrera capilar o de capa simple, será limitado si estos suelos tienen un valor elevado del punto de marchites o punto de humedad residual PWP.

Los suelos de granulometría gruesa generalmente experimentan un cambio substancial en el contenido de agua, incluso desde que se aplican bajas succiones como en el caso de la arena (figura 5a).

Una barrera capilar formada por una capa de arena de molde, pretenderá terminar o alcanzar su almacenamiento adicional cerca de la interface; es decir, que la capacidad de almacenamiento será relativamente sensible al valor de h_w^*

4.3. Diseño de una Cobertura SDR

El balance hídrico de una cobertura del tipo SDR, debe considerar la siguiente relación (Tanner, 1967):

$$E_t = P - R - P_r - L_f - \Delta S$$

Donde:

- E_t Evapotranspiración
- P Precipitación
- R Escorrentía superficial
- P_r Percolación
- L_f Flujo lateral
- ΔS Cambio en la cantidad de agua almacenada

Para diseñar apropiadamente una cobertura SDR, se requiere realizar pruebas experimentales en celdas de columna y celdas de terreno, empleando suelos debidamente caracterizados en sus propiedades granulométricas e hidráulicas bajo las condiciones climatológicas del área del proyecto.

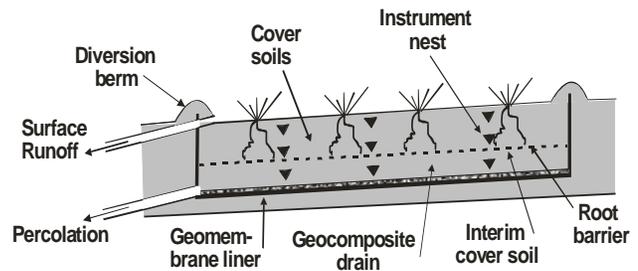


Figura 6. Esquema de flujos de agua en una cobertura para el cálculo del balance hídrico (Albright et al. 2004).

El esquema de la figura 6, muestra los flujos de agua que se mencionan en la ecuación de evapotranspiración.

Para el diseño de una barrera capilar se requiere de un modelo matemático que simule razonablemente el flujo no saturado, el balance de aguas y la energía superficial, la literatura reporta varios modelos que pueden ser empleados como el UNSAT-H (Milind v. Khire et al. 1999) HELP (Nichols, 1991) o Soil Cover.

5. Métodos y Características de los Materiales

5.1. Métodos

5.1.1. Caracterización Granulométrica

Los análisis granulométricos de las muestras de tierras seleccionadas para formar las capas de la cobertura SDR, se realizaron tanto en la UTO, como en la UQAT. En el trabajo realizado en la UTO, se utilizaron dos técnicas: el análisis isométrico (tamización), hasta la malla 400 (serie Tyler), 38 micrones y el análisis isodrómico (sedimentación), hasta el tamaño de 6 micrones. El trabajo en la UQAT se realizó por el método láser, método moderno y más confiable.

Los resultados son similares hasta el tamaño de 38 micrones (hasta donde se empleó la serie de tamices Tyler en la UTO), a partir de este tamaño de grano se observan marcadas diferencias; por ello, se tomó en cuenta, como resultado confiable, el trabajo realizado en la UQAT.

El análisis granulométrico de la grava fina se llevó a cabo solamente en la UTO, por no ofrecer mayor dificultad ya que

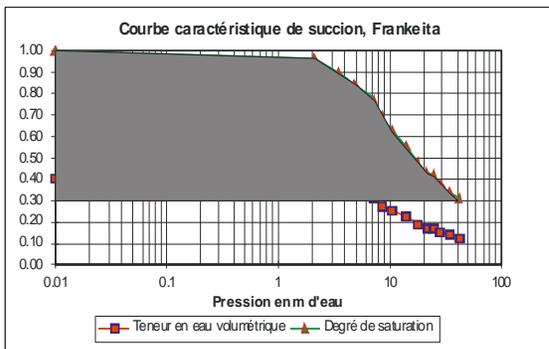
se realizó por análisis isométrico hasta la malla 200 (serie Tyler). Los resultados se muestran en la tabla 4.

TABLA 4. Suelos utilizados para la cobertura de las celdas de terreno.

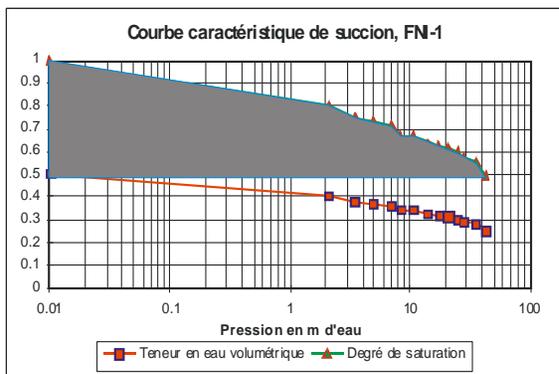
Suelo	Propiedades del suelo
Frankeita	$d_{80} = 0,22$ mm; $d_{50} = 0,15$ mm; $d_{10} = 0,03$ mm; $\rho = 2,604$ g/cm ³ ; Porosidad, $\epsilon = 0,44$; AEV = 300 cm
Grava fina	$d_{80} = 4,2$ mm; $d_{50} = 0,9$ mm; $d_{10} = 0,2$ mm; $\rho = 2,564$ g/cm ³ ; Porosidad, $\epsilon = 0,30$

5.1.2. Prueba de Retención de Agua de los Suelos

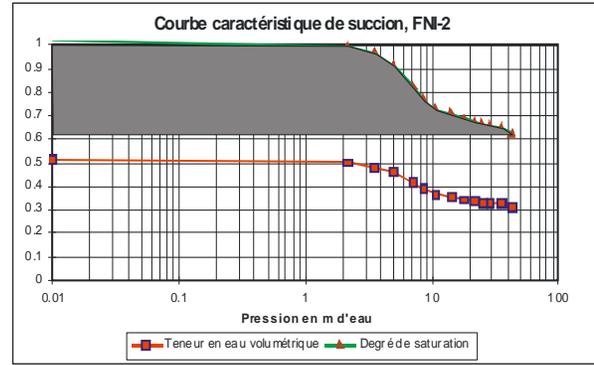
Las pruebas de succión-retención de agua, para las muestras de tierras elegidas, fueron realizadas en la UQAT empleando el método de la cámara de presión con base de cerámica porosa (ASTM D6836-02, 2003). Estas pruebas también se realizaron en la UTO, empleando el método de la simulación con el MK- Model modificado de Kovács (M. Aubertin, M. Mbonimpa, B. Bussi re et R.P. Chapuis, 2003). Los resultados que se lograron se muestran en la figura 7. La prueba de succión-retención de agua para la muestra de grava fina se realizó en la UTO, siguiendo el método de la columna drenante.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Curvas de succión-retención de agua.

Las superficies coloreadas (equivalentes a la capacidad de retención de agua), fueron calculadas por el método del cálculo de áreas de polígonos múltiples (Pedro A. Gutiérrez, 1996); según estos cálculos se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA 5.  rea de retención de agua de los suelos en estudio.

Muestra suelo	�rea
Frankeita	8.976
FNI - 1	5.757
FNI - 2	4.082

Estos resultados muestran que el suelo Frankeita tiene la mayor capacidad de retención de agua que los otros dos, y al estar junto al dique de colas Frankeita resulta ser el más adecuado para conformar la capa fina de la cobertura SDR.

5.1.3. Límite Plástico e índice de Plasticidad de los Suelos

La plasticidad de los suelos es otro parámetro de caracterización fundamental para definir si un suelo es apto o no para ser empleado como suelo de cobertura SDR. En éste caso se requiere que los suelos no sean plásticos para evitar deformaciones rápidas y para evitar que se desmorone o agriete al secarse. La determinación del límite líquido, límite plástico y del índice de plasticidad fue realizada por el método Casagrande.

Los resultados emitidos permitieron establecer que la muestra Frankeita *no es plástica* y por tanto, apta para formar una capa de la cobertura SDR.

5.1.4. Conductividad Hidráulica

Las pruebas de conductividad hidráulica se realizaron en los laboratorios de Spectrolab, según la ley de Darcy:

$$k_{sat} = \frac{L}{HA} * \frac{V}{T} \text{ (cm/h)}$$

Donde:

- L Altura de la muestra del suelo, (cm).
- H Altura de la muestra de suelo + la altura del agua, (cm).
- A Área del cilindro, (cm²).
- V Volumen de agua colectado en el vaso (cm³).
- T Tiempo transcurrido (horas).

Las pruebas de conductibilidad hidráulica que se realizaron en el laboratorio Spectrolab, dieron los siguientes resultados:

TABLA 6. Conductividad hidráulica de las muestras de suelos en estudio.

Muestra suelo	Conductividad	Unidades
Frankeita	0,63	cm/h
FNI - 1	0,50	cm/h
FNI - 2	0,39	cm/h

Estos resultados muestran que el suelo Frankeita es el de mayor valor en conductividad hidráulica lo que significa una mayor acumulación de agua en el suelo en cuestión.

5.2. Pruebas en Columnas

Con toda la información mostrada y antes de efectuar pruebas piloto en celda de terreno, se efectuaron pruebas de laboratorio en celdas columnares de 17 cm, de diámetro y 1 m, de altura para determinar y verificar el tipo de suelo mas adecuado para este tipo de coberturas, que previamente fueron estudiadas en laboratorios de la UQAT. Un esquema de la disposición y control de parámetros se observa en la figura 7 y fotografía 3.

Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios y se pudo establecer en estas pruebas de laboratorio que el suelo Frankeita es adecuado para este tipo de coberturas.

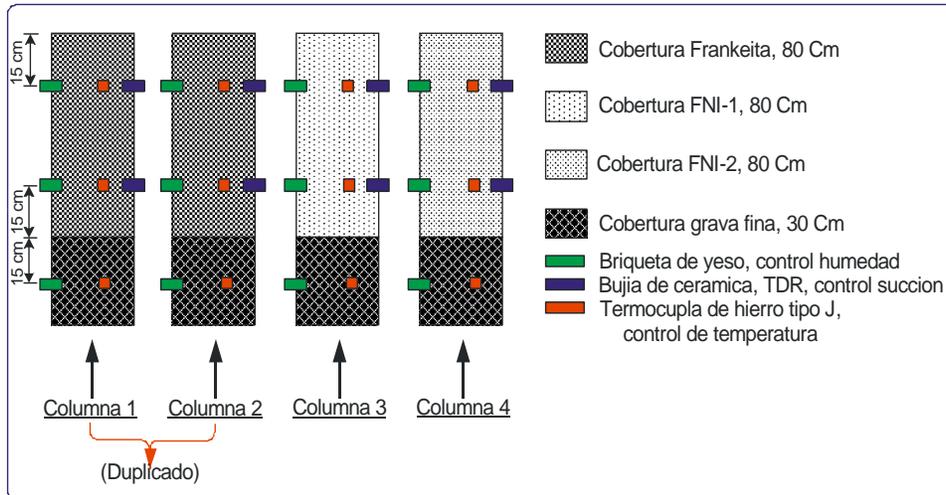


Figura 8. Esquema de la disposición final de las 4 columnas.



Fotografía 3. Vista general de la instalación experimental con las columnas.

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
Muestra 4	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Frankeita	Frankeita	FNI - 1	FNI - 2
$\epsilon = 0.44$	$\epsilon = 0.46$	$\epsilon = 0.41$	$\epsilon = 0.53$

5.3. Celdas de Terreno

Se prepararon dos celdas de terreno con áreas superficiales similares pero con diferente altura de cobertura Frankeita y

también se instalaron dos celdas columnares de 80 cm, de diámetro y con alturas similares a las celdas de terreno.

Un esquema de las celdas de terreno es el siguiente:

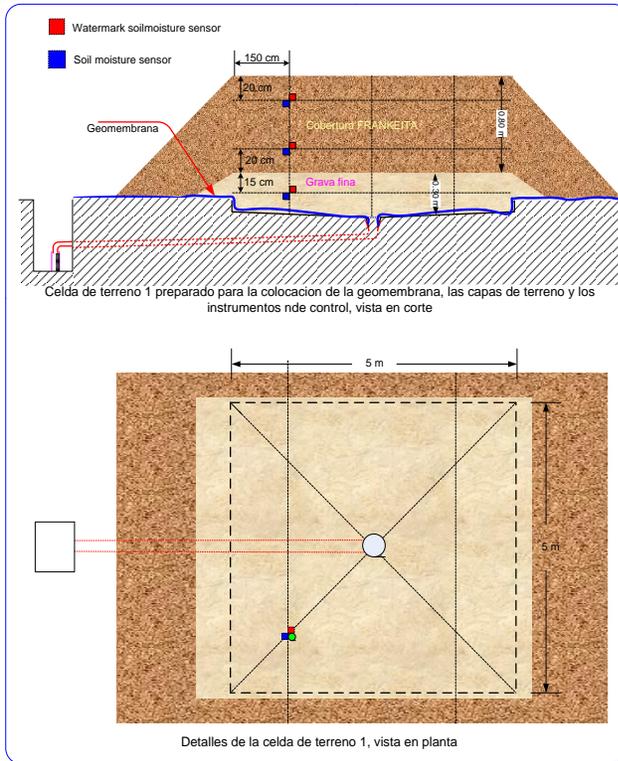


Figura 9. Esquema de la celda de terreno 1.

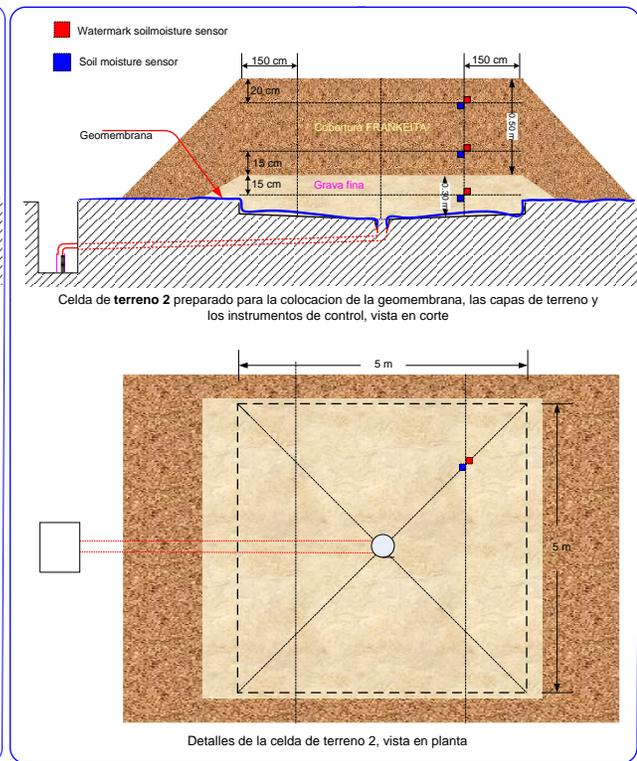


Figura 10. Esquema de la celda de terreno 2

La instrumentación que se usó para el control de la humedad fue el Watermark soilmoisture sensor y para la succión el soil moisture sensor. Estos instrumentos fueron colocados a diferentes alturas de la celda, tal como se detallan en las figuras 9 y 10.

Como se indicó anteriormente, también se instalaron otras dos celdas columnares pero de dimensiones un tanto más grandes que las usadas durante las pruebas de laboratorio. El propósito de estas celdas es obtener información respecto de la respuesta de la instrumentación y una comparación de resultados, tanto de las celdas de terreno como de las celdas columnares con la intención de realizar pruebas en el futuro con otro tipo de coberturas y empleando solamente este tipo de celdas columnares.

Un esquema de la disposición de estas celdas columnares se muestra en la figura 11.

La instrumentación usada para el control de la humedad y la succión es la misma que las usadas en las celdas de terreno.

Una vista general de la instalación de todas las celdas se puede ver en la fotografía 4.

6. Resultados

Las celdas de terreno fueron sometidas a dos programas de monitoreo:



Fotografía 4. Vista general de la instalación de las celdas experimentales

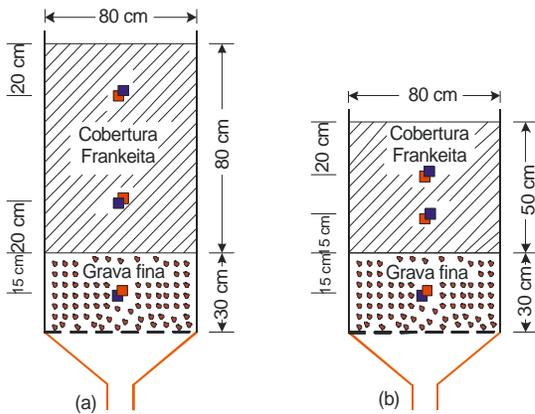


Figura 11. Celdas columnares instaladas paralelamente a las celdas de terreno.

- Condiciones de lluvia natural en el período húmedo de lluvias de Oruro, (241 días).
- Condiciones de lluvia máxima de 24 hrs, (26 días).

Los resultados logrados en esta experimentación, se muestran a continuación.

6.1. En Condiciones de Lluvia Natural

Durante el tiempo de experimentación, la precipitación pluvial tuvo la variación que se esquematiza en la figura 12.

Del grafico se puede establecer que:

- Las lluvias fueron discontinuas alternando días de lluvia con días secos de evaporación.
- Durante los 241 días de experimentación, se registraron algunas precipitaciones con un total de 227,41 mm, que significan un 63,88% del promedio anual de lluvias en la región en los últimos 10 años.

6.1.1. Monitoreo de Parámetros en la Celda de Terreno 1

6.1.1.1. Contenido Volumétrico de Agua

Como se explicó en el punto 5.3, la celda de terreno 1 tiene 4 puntos de control de humedad: superior, medio superior, medio inferior e inferior (ver figura 9); ahora bien, durante el tiempo de la experimentación solamente se registró humedad en los instrumentos ubicados en la parte superior de la celda; es decir, que la humedad no llegó a la profundidad en la que se encontraban los instrumentos por debajo del nivel superior.

Por ello, en la figura 13, se muestra este control y variación de humedad en los 4 niveles en los se efectuó este control.

Tomando en cuenta la precipitación pluvial, registrada durante el período de pruebas (figura 12), se puede colegir que:

- La humedad se incrementó solamente en la capa superior de la cobertura; a los otros niveles, prácticamente no ingresó el agua contenida en el nivel superior, debido a que la precipitación de lluvia natural no fue intensa.
- Este aspecto permite establecer que no se alcanzó saturar el suelo de la parte superior.
- En estas condiciones de lluvia de regular intensidad, el suelo usado como cobertura principal es adecuado, ya que será capaz de almacenar la lluvia sin dejar que haya infiltración hacia residuos mineros que podrían colocarse por debajo de la capa de barrera capilar de grava fina.

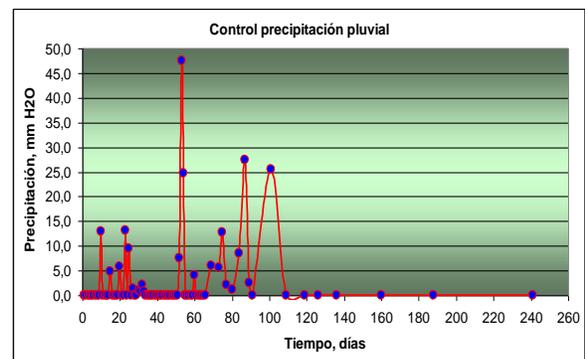


Figura 12. Relación de la precipitación en el tiempo de la experimentación.

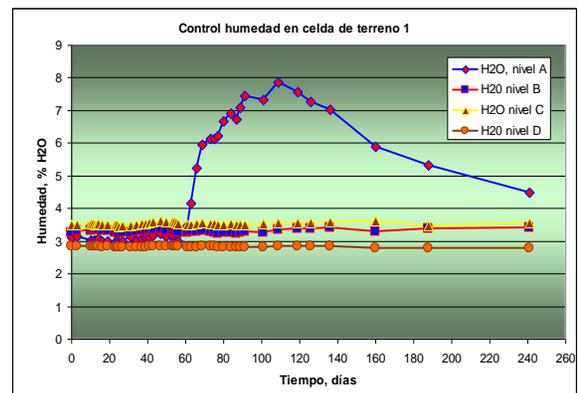


Figura 13. Control de humedad en diferentes niveles de la celda de terreno 1.

6.1.1.2 Succión, Presión en la Celda de Terreno

Este parámetro se controló con instrumentos llamados soil moisture cover, especiales para este trabajo. Los resultados que se obtuvieron se grafican en la figura 14.

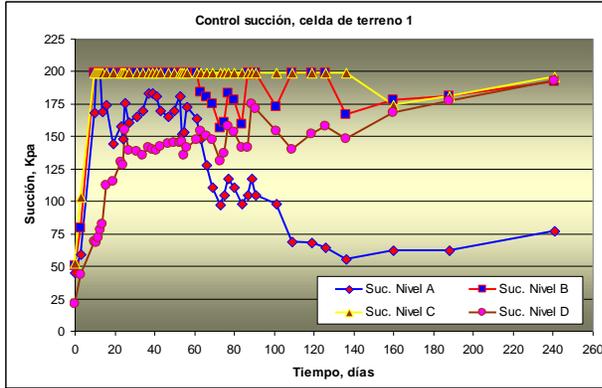


Figura 14. Registros de presión/succión en la celda de terreno.

De los gráficos se deduce que:

- Los registros de presión muestran un comportamiento dinámico con oscilaciones pequeñas en el nivel superior "A" de la celda, debido a las lluvias intermitentes y a las evaporaciones rápidas de la humedad en esas capas superiores de las columnas (Yanfull & Choo, 1997).
- En la celda de terreno 1, sólo se pudieron registrar variaciones de humedad en el nivel superior en los primeros 70 días en que hubieron lluvias, y a medida que dejó de llover y se incrementó la evaporación, fue disminuyendo la presión en éste nivel hasta estabilizarse entre los 60 y 65 Kpa.
- En los niveles "B", "C" y "D", de la celda de terreno 1, también se registró un incremento de la presión debido al incremento de peso de la columna que se incrementaba por la cantidad de agua que se estaba almacenando por la cobertura en el nivel A; pero no se observa la drástica reducción de presión concluido el periodo de lluvias porque lo que están midiendo los sensores es la presión de toda la cobertura por encima de ellos.
- En ningún caso se registró percolación en el drenaje de la geomembrana (ver figura 9), lo que significa que la cobertura pudo retener el agua acumulada sin dejar que descendiera el nivel de la capa de grava o peor aún el nivel de la geomembrana, y por lo tanto, cumplió su función protectora contra la formación de DAR, bajo las condiciones de lluvia natural.

6.1.2 Monitoreo de Parámetros en la Celda de Terreno 2

6.1.2.1. Contenido Volumétrico de Agua

Se debe recordar que esta celda tiene una altura de solamente 50 cm, de cobertura Frankeita y por tanto tiene 3 niveles de control de parámetros: superior, medio e inferior (ver figura 10).

En la figura 15, se muestra este control y variación de humedad en los 3 niveles en los que se efectuó este control.

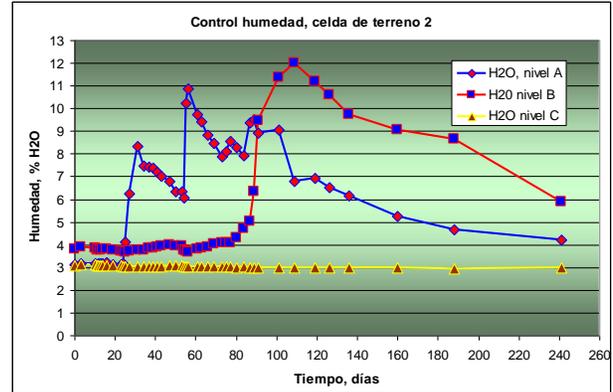


Figura 15. Control de humedad en diferentes niveles de la celda de terreno 2.

Tomando en cuenta la precipitación pluvial, registrada durante el periodo de pruebas (figura 12), se puede colegir que:

- La humedad se incrementó no solamente en la capa superior de la cobertura, sino que en esta celda penetró hasta la capa intermedia; al nivel inferior no ingresó, debido a que la barrera capilar de la cobertura de grava fina funcionó de acuerdo a lo que se esperaba.
- Es posible que solamente la capa superior se haya saturado y no así la intermedia, puesto que la variación de humedad en estas dos capas es diferente.
- La diferencia que se presentó en las celdas de terreno 1 y 2 radica en el hecho de que tienen diferentes espesores en la cobertura y variación leve en el grado de compactación, lo que provocó diferencias en el grado de humedad registrado en las capas A y B.
- Por tanto, con un grado diferente de compactación, con una menor altura de la cobertura principal y con la intensidad de lluvias como las que se dio en esta gestión, la cobertura funciona evitando que pudiera formarse DAR.

6.1.2.2. Succión, Presión en la Celda de Terreno 2

El control de este importante parámetro permite obtener resultados que se grafican en la figura 16.

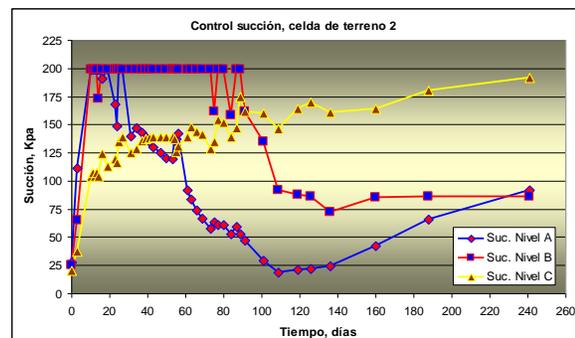


Figura 16. Registros de presión/succión en la celda de terreno.

De los anteriores gráficos se deduce que:

- Los registros de presión muestran un comportamiento dinámico con oscilaciones pequeñas en el nivel superior "A" de las columnas, debido a las lluvias intermitentes y a las evaporaciones rápidas de la humedad en esas capas superiores (Yanfull & Choo,1997).
- En el nivel "B" de la cobertura, se puede observar que la presión/succión se mantiene en forma constante, alrededor de los 200 Kpa, hasta los 90 días de duración del registro, debido al efecto acumulado de humedad en los niveles A y B, y recién disminuye la presión una vez que se acentúa la evaporación en esas capas (ver figura 15), hasta que se logra estabilizar la presión alrededor de 85 Kpa, por efecto de la humedad de la cobertura.
- En el nivel C, se observa que conforme se va cargando la cobertura con la humedad del agua de lluvia natural, la presión (equivalente al peso total de la columna de humedad en la cobertura), va incrementando; a pesar que en el nivel C, no ingresó humedad.
- En el nivel C, los valores de la presión resultan menores en comparación a los registros en el nivel B, debido a que los instrumentos están colocados en una capa de grava con mayor porosidad que la correspondiente a los niveles A y B.

6.2. En Condiciones de Lluvia Máxima de 24 Horas

El Servicio Nacional de meteorología de Bolivia (SENAMHI), reportó la siguiente estadística de lluvias para el Distrito de Oruro.

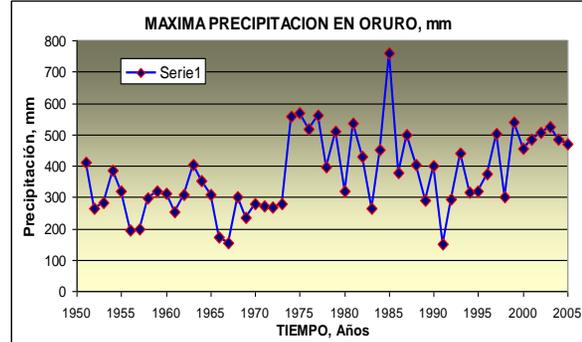


Figura 17. Precipitación anual en Oruro en un período de 55 años (SENAMHI).

Por otro lado, en la tabla 7, se detalla la máxima precipitación en 24 horas de los últimos 30 años.

TABLA 7. Máxima precipitación de lluvia en 24 horas (mm), (SENAMHI).

Año	Mes	Día	Prec.	Año	Mes	Día	Prec.	Año	Mes	Día	Prec.
1976	Abr.	7	34,3	1986	Dic.	21	21,9	1996	Feb.	21	22,4
1977	Ene.	2	49,0	1987	Ene.	6	35,1	1997	Sep.	19	27,8
1978	Feb.	2	40,0	1988	Feb.	12	19,2	1998	Nov.	18	18,4
1979	Ene.	15	26,7	1989	Feb.	8	21,1	1999	Mar.	28	66,7
1980	Feb.	19	21,4	1990	Ene.	30	27,8	2000	Ene.	15	32,2
1981	Feb.	3	49,0	1991	Mar.	9	21,0	2001	Mar.	21	26,6
1982	Mar.	1	46,5	1992	Dic.	31	18,3	2002	Feb.	25	48,2
1983	Feb.	4	16,3	1993	Dic.	9	34,1	2003	Ene.	25	22,6
1984	Feb.	3	32,7	1994	Feb.	11	28,5	2004	Ago.	18	13,8
1985	Feb.	14	34,9	1995	Feb.	26	28,1	2005	Feb.	6	21,4

De acuerdo a estos registros, se tomó la lluvia máxima de 24 horas del 28 de marzo de 1999, con un valor de 66,7 mm y se añadió esa cantidad de agua a cada una de las 4 columnas en tres etapas, cada 8 horas.

Para ésta serie de pruebas se utilizó las mismas 4 columnas de la serie de pruebas anterior; es decir, que las condiciones iniciales para éstas pruebas corresponden a las condiciones finales después de la serie de pruebas con lluvia natural.

Durante la realización de ésta serie de pruebas, no hubo precipitación atmosférica, porque se realizó después de que concluyó el período de lluvias de la estación húmeda en Oruro.

Los resultados obtenidos hasta el presente, como consecuencia de la simulación de la lluvia máxima en 24 horas se muestran en los siguientes capítulos.

6.2.1. Monitoreo de Parámetros en la Celda de Terreno 1

6.2.1.1. Contenido Volumétrico de Agua, Lluvia Máxima

En la figura 18, se muestra la variación de humedad en los 4 niveles en los que se efectuó este control.

Después de inundar la celda se observa una rápida subida del contenido de agua en el nivel superior y unos días después en el nivel superior intermedio.

- La humedad se incrementó solamente en las dos capas superiores; a los niveles inferiores (C y D), prácticamente no ingresó el agua contenida en la parte superior.
- Este aspecto permite establecer que aún en condiciones extremas de lluvia máxima la cobertura usada permite

proteger el posible residuo minero que podría cubrirse con esta cobertura.

- Después de transcurrido los primeros días el contenido de agua empieza a evaporar y la cobertura tiende a secarse; esta situación transcurre en forma normal hasta que se produzca una nueva precipitación pluvial tal como ocurrió a partir del día 23.

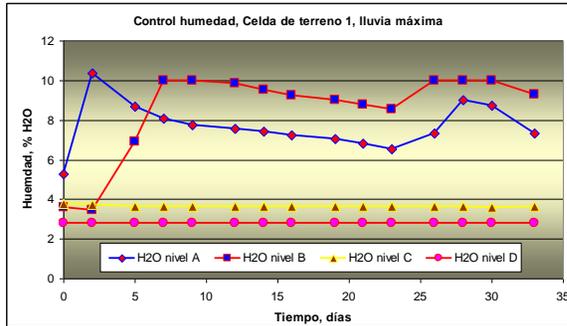


Figura 18. Control de humedad en diferentes niveles de la celda de terreno 1, en condiciones de lluvia máxima.

6.2.1.2 Succión, Presión en la Celda de Terreno

Los resultados que se obtuvieron se grafican en la figura 19.

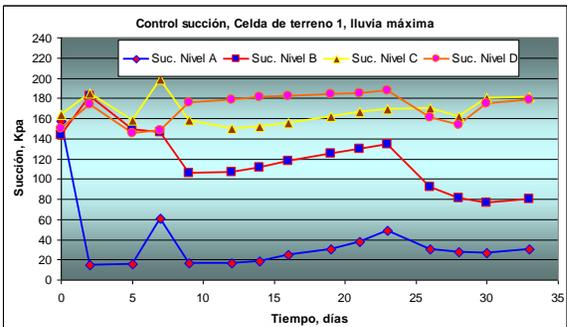


Figura 19. Registros de presión/succión en la celda de terreno.

De los anteriores gráficos se deduce que:

- Los registros de presión en el nivel superior "A", muestran un rápido descenso que ejercen principalmente los 66,7 mm, de agua sobre los sensores colocados en esa capa, presión que desciende rápidamente a medida que el agua se insume en la capa fina de suelo de la cobertura Franckeita.
- En el nivel "B", se observa que si bien la presión se incrementó rápidamente debido a la carga de agua de lluvia máxima, la presión cae alrededor de 100 Kpa, debido a que la evaporación ya es importante, (recuérdese que la transpiración es nula al no tener cobertura vegetal instalada en la celda).
- Los sensores de presión en los niveles C y D, tienen un comportamiento bastante próximo debido a que el agua

de lluvia no llegó a afectar el grado de humedad en esos niveles, y lo que los sensores registran son sólo el efecto acumulado de las capas superiores al nivel de registro.

6.2.2. Monitoreo de Parámetros en la Celda de Terreno 2

6.2.2.1. Contenido Volumétrico de Agua, Lluvia Máxima

En la figura 20, se muestra este control y variación de humedad en los 3 niveles en los que se efectuó este monitoreo.

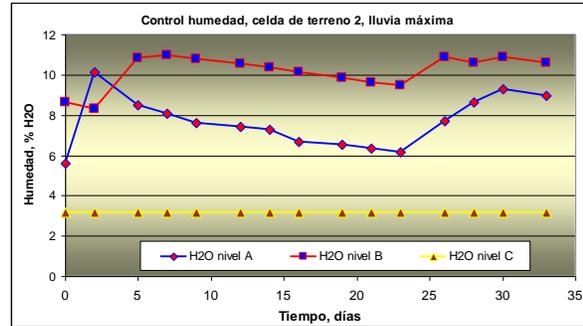


Figura 20. Control de humedad en diferentes niveles de la celda de terreno 2.

- La humedad se incrementó en las capas superiores; al nivel inferior no ingresó, debido a que la barrera capilar de la cobertura de grava fina funcionó de acuerdo a lo que se esperaba. No hubo percolación de agua por la base de la cobertura ya que no se registró ningún flujo de agua al nivel de la geomembrana.

- Por tanto, con un grado diferente de compactación, con una menor altura de la cobertura principal y con una posible lluvia de máxima intensidad la cobertura SDR, funciona a pesar de tener menor espesor.

6.2.2.2 Succión, Presión en la Celda de Terreno

El control de este importante parámetro permite obtener resultados que se grafican en la figura 21.

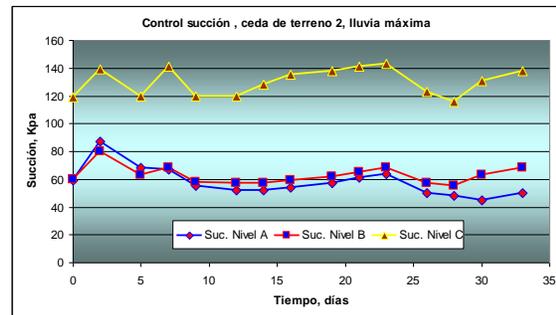


Figura 21. Registros de presión/succión en la celda de terreno 2.

De los anteriores gráficos se deduce que:

- Los registros de presión/succión en los niveles A y B, de esta cobertura tienen prácticamente el mismo comportamiento y se mantienen casi constantes alrededor de los 60 Kpa, debido a que el grado de humedad (proporcional al grado de saturación), se mantiene elevada en estos niveles.
- La presión en el nivel C, que corresponde al sensor colocado en la capa de grava muestra un elevado registro de presión, debido a la presión acumulada de las capas anteriores con un alto grado de saturación.

7. Conclusiones

De los resultados obtenidos y las observaciones realizadas durante la experimentación se puede concluir lo siguiente:

El suelo Frankeita, usado como cobertura principal sirve para los propósitos de remediación ambiental cuando se usen las coberturas tipo SDR.

El principio de barrera capilar funciona perfectamente tanto con coberturas de 80 cm, de altura como coberturas de altura menor como 50 cm.

La instrumentación usada para el control de la humedad y presión/succión funcionó bien y permitió seguir adecuadamente la variación de estos parámetros durante el tiempo de la experimentación, por lo que la selección de estos instrumentos de medición entre otros disponibles en el mercado fue acertada.

Este tipo de coberturas funcionarán aún cuando se dé la posibilidad de una máxima precipitación en 24 horas.

Como la cobertura SDR, impedirá el ingreso de agua sobre los residuos sulfurosos, no existirá la posibilidad de formación de DAR y por lo tanto no habrá formación de aguas de copagira, no existirá contaminación de metales pesados por aguas superficiales ni subterráneas, consiguiéndose una estabilidad química de los residuos sulfurosos bajo las condiciones climáticas semi-áridas de Oruro, lo cual es fundamental en una intervención de restauración de pasivos ambientales mineros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los profesores de la Universidad de Québec: Bruno Bussiere, Mostafá Benzaazoua, Mamert Bonimpa del Programa de Cooperación Canadiense REFORMIN II, por la transferencia de tecnología y asesoramiento en ésta investigación.

Expresan su gratitud a las empresas Mineras Inti Raymi y Sinchi Wayra, por habernos cooperado obsequiándonos las geomembranas utilizadas en la experimentación.

Damos público reconocimiento al grupo de personas técnicas y administrativas del laboratorio de Concentración de Minerales de la UTO, que nos ayudaron en las pesadas faenas de construcción y monitoreo durante los dos años que duró esta investigación.

Referencias

CHASE, F. M. "Tin-Silver veins of Oruro-Bolivia", Part I. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of economic geologists*. Vol XLIII No.5, Pg 333-470, 1948.

CHASE, F. M. "Tin-Silver veins of Oruro-Bolivia", Part II. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of economic geologists*. Vol XLIII No.5, Pg 333-470. 1948.

COMIBOL. "Reprocessing studies performed for COMIBOL". 1963.

COMIBOL. "Maps of San José waste dumps, with tin grades developed by COMIBOL". 1978.

DAMES & MOORE. "Environmental Audits of COMIBOL Installations – Unificada, Colavi, Colquechaca, Pulacayo, Telamayu, Chocaya, Tatasi, Chorolque, Matilde, Corocoro, Bolsa Negra, Kami". 1997.

SGAB. "Environmental Audit of the San José Mine; Final Version". SGAB/COMIBOL. 1995.

SGAB. "Mineral Wastes Deposited in the PPO Area", Proyecto Piloto Oruro -9611. 1996.

TURNEAURE, F.S. "A comparative study of major ore deposits of central Bolivia", Part I. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologist*. No 55, 217-254. 1960.

TURNEAURE, F. S. "A comparative study of major ore deposits of central Bolivia", Part II. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologist*. No 55, 574-606. 1960.

WEEKS, Edwin P. "Field determination of vertical permeability to air in the unsaturated zone", *Geological Survey Professional Paper 1051*. U.S. Government Printing Office, Washington: 1978.

AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R. P.; AACHIB, M.; BUSSIÈRE, B.; RICARD, J.-F. et TREMBLAY, L. "Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers", *Rapport MEND/NEDEM 2.22.2a*. 1995.

AUBERTIN, M.; BONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAOUIS R. P. A. "A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties". *Can. Geotech J.* No 40. 2003.

ALBRIGHT, W.; BENSON CRAIG & COL. "Fiel water Balance of Landfill final covers". *J. Environmental Qual.* Vol 33, 2004.

BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M. et CHAPUIS, R. P. "Écoulement non saturé à travers les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC): Modélisation physique et numérique avec application au drainage minier acide". *Rapport EPM/RT-97/03*. École Polytechnique de Montréal. 1997a.

BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M. et JULIEN, M. "Couvertures avec effets de barrière capillaire pour limiter le drainage minier acide: aspects théoriques et pratiques". *Vecteur environnement*. No 34. 37-50, 2001.

- BUSSIÈRE, B; AUBERTIN, M.; CHAPUIS R. P. "The behavior of inclined covers used as oxygen barriers". *Can. Geotech. J.* No 40, 2003.
- BUSSIERE, B. "Curso Bolivia Reformin II". Bolivia: 2006.
- AKINDUNNI, F. F.; GILLHAM, R. W. et NICHOLSON, R. V. "Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings". *Canadian Geotechnical Journal.* No 28, 446-451, 1991.
- ANDRE-JEHAN, R., ARNOULD, M., BILLIOTTE, J., DEVEUGHELE, M. et ROUSSET, G. "Une protection naturelle contre l'infiltration des eaux météoriques: la barrière capillaire - principe - modélisation des transferts d'eau". *Bull. Ass. Int. Géologie de l'Ingénieur.* No 37, 39-47, 1988.
- AUBERTIN, M., BUSSIERE, B., BARBERA, J. M., CHAPUIS, R. P., MONZON, M. et AACHIB, M. "Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings". *Proceedings of the 4th ICARD.* Vancouver: 715-730. 1997b.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M. et CHAPUIS, R. P. "Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols". *Hydrogéologie.* No 1, 3-13, 1996.
- DEMERS BENOIT. "Restauración de Sitios Mineros", *Curso proyecto REFORMIN- BOLIVIA.* 2003.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. "L'effet de barrière capillaire à l'interface de deux couches". 1992.
- McMULLEN, J.; FIRLOTTE, R. R.; KNAPP, R.; AUBERTIN, M. "Les terrains aurifères property site closure and rehabilitation". En: *Proceeding of 29th Meeting of the Canadian Mineral Processors.* Ottawa: 1997.
- NASTEV; AUBERTIN, M. "Hidrogeological modelling for reclamation work at the Lorrain Mine". En: *Proceeding Groundwater Special Conference.* Montreal: 2000.
- NYHAN, J. W. "A seven year water balance study of an evaporation landfill cover vrying in slope for semiarid regions". 2005.
- RICARD, J. F.; AUBERTIN, M.; FIRLOTTE, R. R.; KNAPP, R.; McMULLEN, J. "Design and construction of a dry cover made of tailings for closure of Les Rerrains Auriferes Sities Marlatic". En: *4th Conference on DAR.* Vancouver: 1997.
- SCALON, B.; REEDY, R.; KEESE, K.; DWYER, S. "Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the Southwestern USA". *Vadose Zone Journal.* No 4, USA: 55-71, 2005.
- YANFUL, E.; LIN PEI CHOO. "Measurement of evaporative fluxes from candidate cover soils". *Can. Geotech. J.* No 34. 447-459, 1997.
- MORRIS, C. E. et STORMONT, J. C. "Capillary barriers and Subtitle D covers: estimating equivalency". *Journal of Environmental Engineering.* No 123. 3-10. 1997.
- ZHAN, G.; AUBERTIN, M.; MAYER, A.; BURKE, K. and MC MULLEN, J. "Capillary cover design for leach pad closure", En: *SME Transaction 2001, Presented at the SME Annual Meeting, 26-28 February,* Denver, Colo: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Vol. 310, pp. 104-110. 2001.
- BENZAAZOUA, M. Curso sobre "Gestión Ambiental Minera"- Módulo II - Drenaje Ácido de Roca. UTO-REFORMIN. (Mayo 2002).
- ZAMORA, G. y BENZAAZOUA, M. "Predicción de DAR por Test Geoquímicos Estáticos y Dinámicos". *Revista Metalúrgica.* Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Nacional de Ingeniería, Oruro – Bolivia: No 23, Noviembre 2002.
- ASTM STANDART TEST meted for accelerated weathering of solid materials using a modified humity cell. D5744-96.
- ACID ROCK DRAINAGE PREDICTION MANUAL – CANMET - MSL DIVISON. Canada: Departament of Energy, Mines and Resources, MEND Project. 1.16.1, 1999.
- SHAW S. C.; GROAT, L. A. "Mineralogical study of base metal tailings with various sulfide contents, oxidized in laboratory columns and field lysimeters". *Enviromental Geology.* No 33. 1998.
- ELLIOT, C. M. and LIU, L. "Subaqueous Deposition of generating tailings into an acidic lake enviroment: Pilot column test results". En: *Procedings 29th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors.* Canadá: 1997.
- GERMAIN, M. D.; TASSE, N. and BERGERON, M. "Limit to self-neutralization in acid mine tailings". *Institut National de la recherché scientifique-georessources de Quevec.* 1997.
- LAWRENCE, R. W. and WANG, Y. "Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage". *MEND/NEDEM Report 1. 16.*