



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL: COMPARACIÓN DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN
DE RELAVES CONVENCIONALES VERSUS RELAVES ESPESADOS CON
METODOLOGÍA TTD**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN
ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

MARCELO RAFAEL ARENAS SUAREZ

PROFESOR GUÍA:
LUIS PAREDES ACEVEDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PAULO HERRERA RICCI
CÉSAR PASTEN PUCHI

SANTIAGO DE CHILE
AÑO 2015

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras y Construcción
POR: Marcelo Rafael Arenas Suarez.
FECHA: 02/11/2015
PROFESOR GUÍA: Luis Paredes Acevedo.

**ESTUDIO EXPERIMENTAL: COMPARACIÓN DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN DE
RELAVES CONVENCIONALES VERSUS RELAVES ESPESADOS CON METODOLOGÍA
TTD**

El principal problema ambiental generado por los depósitos de relaves es la contaminación de las napas subterráneas debido a la infiltración en el subsuelo con aguas de proceso.

La metodología de depositación de relaves TTD (Thickened Tailings Disposal), implica someter al relave a un proceso de espesamiento, incrementando las concentraciones de sólido en comparación al relave convencional.

Este estudio presenta una comparación experimental del potencial de infiltración de relaves convencionales en comparación a relaves espesados con metodología TTD. Para ello se midió empíricamente en una columna de flujo de una dimensión, la infiltración en un suelo natural producida por la depositación sobre el mismo de capas sucesivas de relave de diferentes concentraciones de sólidos, buscando simular el crecimiento de un depósito de relaves. Se implementó una instalación experimental consistente en una probeta cilíndrica de acrílico de 20 cm de diámetro x 100 cm de altura en la que se dispuso en su parte inferior 50 cm de suelo natural compactado, instrumentado con sensores de humedad y un tensiómetro. Luego en forma sucesiva, se depositaron capas de relave, instrumentadas con medidores de humedad, tensiómetro y medidor de temperatura. El programa de ensayos consideró: 2 muestras de relave y 1 muestra de suelo de fundación. Se ejecutaron cuatro ensayos, dos por tipo de relave a dos distintas concentraciones de sólidos.

Para el Relave 1 (cobre), tanto el relave convencional como el espesado con metodología TTD, infiltraron el total de la muestra de suelo. Es necesario mencionar que la masa de relave espesado TTD corresponde a 1,85 veces la masa de relave convencional depositado y que en la probeta con relave convencional, en su parte inferior, se acumuló un exceso de agua que permitiría alcanzar una infiltración extra de 12%. Para el Relave 2 (oro y plata), la infiltración alcanzada en la prueba con relave espesado TTD alcanzó aproximadamente el 50% de la muestra de suelo, mientras que durante la prueba con relave convencional, se infiltró el total de la muestra de suelo. La razón entre la masa de relave espesado y la masa del relave convencional equivale a 1,36.

En base al análisis y resultados de los ensayos experimentales realizados se ha logrado concluir que la profundidad que alcanza la infiltración dentro del suelo de fundación es una función que depende de la cantidad de agua liberada por el relave hacia el subsuelo y de la curva de retención de agua del suelo, específicamente de su capacidad de campo.

*Tu amor sin exigencias, me empobrece;
Tus exigencias sin amor, me enfurecen;
Sólo tu amor exigente me engrandece.*

*Dedicado a Natalie y Angélica;
Por su amor exigente en las distintas etapas de mi vida.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer al profesor guía Luis Paredes, al profesor co-guía Paulo Herrera y al profesor integrante César Pasten por su constante apoyo y disposición para guiar este trabajo de título.

Agradezco a mi esposa Natalie por el amor que me regala diariamente, por inspirarme a ser una mejor persona y por alentarme a creer en mí durante los momentos de duda.

A mi familia, en especial a mi mamá Angélica, mi papá Rafael, mis hermanas Rocío y Claudia y mis abuelas Elena y María, por su amor y enseñanzas.

A los amigos que compartieron conmigo durante la etapa universitaria, en especial a Rony, Esteban, Lulo, Sergio, Hermes, Nico, Claudio y David.

A los amigos que me ayudaron a realizar este trabajo de título, en especial a Rodrigo, Juan Pablo, Jon, Omar y mi primo Felipe.

A mis amigos del MaravilloZoo por su constante preocupación y palabras de aliento.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Objetivo general	1
1.2	Objetivos específicos	1
2	Marco Teórico	2
2.1	Clasificación de los relaves	2
2.1.1	Relaves convencionales	5
2.1.2	Relaves espesados mediante tecnología TTD	6
2.1.3	Ventajas de la metodología TTD	7
2.2	Depósitos de relaves en Chile.....	9
2.3	Flujo de agua en medios parcialmente saturados.....	11
2.3.1	Propiedades físicas del suelo	12
2.3.2	Propiedades hidráulicas del suelo	12
2.4	Flujo de agua en medios parcialmente saturados.....	16
2.5	Estudios de infiltración en relaves.....	17
3	Caracterización de los suelos	20
3.1	Clasificación de los suelos	20
3.1.1	Análisis granulométrico.....	20
3.1.2	Límites de consistencia	22
3.1.3	Clasificación USCS.....	22
3.2	Gravedad específica	23
3.3	Permeabilidad de carga variable	23
3.4	Curva de retención de agua	25
3.5	Límite de contracción.	26
3.6	Ensayo de evaporación.....	28
4	Ensayo de infiltración en suelos naturales	31

4.1	Descripción general del ensayo	31
4.2	Metodología de ensayo	33
4.2.1	Calibración de sensores de humedad	36
4.3	Programa de ensayos	38
4.4	Ensayo Relave 1	39
4.4.1	Ensayo Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=70\%$	39
4.4.2	Ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=62\%$	39
4.5	Ensayo Relave 2	40
4.5.1	Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=72\%$	40
4.5.2	Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=62\%$	41
5	Resultados del programa de ensayos	41
5.1	Resultados de ensayo con Relave 1	41
5.1.1	Ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p = 70\%$	41
5.1.2	Ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=62\%$	46
5.2	Resultados de ensayo con Relave 2	51
5.2.1	Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=72\%$	51
5.2.2	Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=62\%$	56
5.3	Comentarios generales	61
6	Conclusiones.....	63
7	Recomendaciones para futuras investigaciones	65
7.1	Mejoras de instalación experimental	65
7.2	Directrices para siguientes investigaciones.....	65
8	Bibliografía	65

Índice de Tablas

Tabla 1: Valores típicos de <i>yield stress</i> – Boger (2002).	3
Tabla 2: Beneficios Percibidos de P&TTD, Tacey y Ruse (2006).	8
Tabla 3: Distribución de depósitos de relaves en Chile.....	9
Tabla 4: Distribución granulométrica.	20
Tabla 5: Límites de consistencia.	22
Tabla 6: Clasificación de suelos según USCS.	22
Tabla 7: Gravedad específica.....	23
Tabla 8: Conductividad hidráulica saturada.	24
Tabla 9: Puntos característicos curva de retención de agua en suelos.....	26
Tabla 10: Límite contracción.	27
Tabla 11: Especificación técnica sensor de humedad EC-5 de Decagon.	32
Tabla 12: Especificación técnica tensiómetro 200SS Watermark.	32
Tabla 13: Resumen de confección de ensayos de infiltración.....	38
Tabla 14: Estimación masa depositada – Relave 1 – Cp=70%.....	39
Tabla 15: Estimación masa depositada – Relave 1 – Cp=62%.....	39
Tabla 16: Estimación masa depositada – Relave 2 – Cp=72%.....	40
Tabla 17: Estimación masa depositada – Relave 2 – Cp=62%.....	41
Tabla 18: Resultados – Probeta Relave 1 – Cp=70%.	42
Tabla 19: Distribución de agua dentro de columna – Relave 1 (Cp=70%).....	43
Tabla 20: Medición de masa – Probeta Relave 1 – Cp=62%.....	46
Tabla 21: Resultados – Probeta Relave 1 – Cp=62%.	47
Tabla 22: Distribución de agua dentro de columna – Relave 1 (Cp=62%).....	47
Tabla 23: Medición de masa – Probeta Relave 2 – Cp=72%.....	51
Tabla 24: Resultados – Probeta Relave 2 – Cp=72%.	52
Tabla 25: Distribución de agua dentro de columna – Relave 2 (Cp=72%).....	53

Tabla 26: Medición de masa – Probeta Relave 2 – Cp=62%	56
Tabla 27: Resultados – Probeta Relave 2 – Cp=62%.	57
Tabla 28: Distribución de agua dentro de columna – Relave 2 (Cp=62%)	57

Índice de Figuras

Figura 1: Clasificación de los tipos de relave – Jewell y Fourie (2006).	4
Figura 2: (a) Relaves filtrados depositados por correas transportadoras - La Coipa, Chile; (b) Relaves filtrados depositados por camiones.....	4
Figura 3: Capas frescas de pasta, mina Bulyanhulu, Tanzania.....	5
Figura 4: Esquema embalse o tranque de relaves convencional.	6
Figura 5: Depósito TTD, Kidd Creek, Canadá (3-4 % de pendiente).....	6
Figura 6: Esquema depósito de relaves espesados TTD.....	7
Figura 7: Distribución nacional de depósitos de relave, según tipo de depósito	11
Figura 8: Distribución nacional de depósitos de relave en operación, según tipo de depósito.....	11
Figura 9: Curva de retención de agua en suelos y regiones definidas, Sillers et al (2001)	14
Figura 10: Ensayo de infiltración propuesto por Rivera (2012).....	18
Figura 11: Curva humedad vs. tiempo ensayo Rivera (2012)	19
Figura 12: Curvas de distribución granulométrica.	21
Figura 13: Ensayo de permeabilidad de carga variable. (a) Esquema ensayo, (b) Instalación experimental.....	24
Figura 14: Curvas de retención de agua en suelos en función de w (%).	25
Figura 15: Curvas de retención de agua en suelos en función de θ^*	26
Figura 16: Ensayo de límite de contracción. (a) Montaje probeta, (b) Probeta al límite de contracción.....	27
Figura 17: Montaje ensayo de evaporación.	28
Figura 18: Resultados ensayo de evaporación. (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2, (c) Ensayo 3.	30
Figura 19: (a) Sensor de humedad EC-5 de Decagon, (b) Tensiómetro 200SS Watermark.....	31
Figura 20: Modelo de ensayo.	33
Figura 21: Metodología de ensayo – Acondicionamiento de la muestra de suelo.....	34

Figura 22: Metodología de ensayo – Colocación de suelo de fundación	35
Figura 23: Probeta de calibración de sensores	36
Figura 24: Calibración de sensores de humedad.....	37
Figura 25: Curva de calibración – Suelo de fundación	37
Figura 26: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 1 (Cp=70%)	43
Figura 27: Mediciones sensores - Relave 1 - Cp=70%	44
Figura 28: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 1 - Cp=70%.....	45
Figura 29: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 1 (Cp=62%)	48
Figura 30: Mediciones sensores - Relave 1 - Cp=62%	49
Figura 31: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 1 - Cp=62%.....	50
Figura 32: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 2 (Cp=72%)	53
Figura 33: Mediciones sensores - Relave 2 - Cp=72 %	54
Figura 34: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 2 - Cp=72%.....	55
Figura 35: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 2 (Cp=62%)	58
Figura 36: Mediciones sensores - Relave 2 - Cp=62 %	59
Figura 37: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 2 - Cp=62%.....	60
Figura 38: Profundidad de infiltración vs. Agua depositada – Capa 1	62

Índice de Anexos

Anexo A: Registro Fotográfico de Ensayo de Infiltración en Suelos Naturales	67
---	----

1. Introducción

La industria minera nacional debe enfrentar además de los problemas del mercado de minerales crecientes costos de construcción y operación de las faenas mineras, vinculados a dificultades en el mercado energético, escasez de agua y regulaciones ambientales más exigentes que dificultan la aprobación de nuevos proyectos. Los depósitos de relaves contribuyen directamente en la mayoría de las variables señaladas anteriormente, por lo que sus diseños y operación deberán incorporar tecnologías más eficientes en el uso de recursos, a la vez procurar disminuir el impacto que provocan al medio ambiente.

La infiltración del subsuelo con aguas de proceso, las que eventualmente pudiesen contaminar napas subterráneas, afectando a las comunidades bajo su área de influencia es uno de los principales problemas ambientales generados por los depósitos de relaves.

La cantidad de agua presente en los relaves es una de las variables más importantes que influyen en el potencial de infiltración al subsuelo. Estudiar cómo afecta la concentración de sólidos y la metodología de depositación de los relaves a la infiltración de los suelos basales, permitirá mejorar los diseños de los depósitos.

1.1 Objetivo general

El objetivo general es realizar un análisis comparativo del potencial de infiltración de relaves convencionales versus relaves espesados con método TTD (*Thickened Tailings Disposal*), en base a estudios experimentales.

1.2 Objetivos específicos

De acuerdo al objetivo principal planteado anteriormente, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Establecer una metodología de ensayo que permita medir el potencial de infiltración para relaves convencionales y para relaves espesados mediante el método TTD. El ensayo deberá considerar las principales variables que diferencian ambos tipos de relave y que pudiesen afectar el potencial de infiltración, dentro de las que destacan:
 - Granulometría
 - Concentración de sólidos
 - Metodología de depositación
 - Depositación sucesiva de capas de relave.
- Estudiar empíricamente el potencial de infiltración de relaves sobre suelos de fundación de depósitos y sobre capas de relave previamente depositadas.
- Estudiar empíricamente el comportamiento de los flujos de agua dentro de los suelos y relaves, mediante la utilización de sensores de humedad y tensiómetros.

- Determinar las variables que rigen el potencial de infiltración sobre los distintos tipos de relaves.
- Determinar relaciones numéricas que representen el potencial de infiltración para distintos tipos de relaves.
- Establecer recomendaciones que permitan cuantificar el riesgo ambiental de infiltración en relaves.

2 Marco Teórico

2.1 Clasificación de los relaves

Con el fin de obtener metales y otros minerales necesarios para procesos industriales, diariamente se extraen grandes cantidades de rocas, las que son trituradas, pulverizadas y procesadas para extraer el mineral deseado. Como residuo de este proceso industrial, se generan los relaves que son, en general, una mezcla de partículas de roca fina en tamaños que van desde la arena hasta unos pocos micrones, productos químicos, orgánicos y agua de proceso.

Jewell y Fourie (2006) clasifican los relaves en 3 tipos: pulpa (*slurry*), pasta (*paste*) y filtrados (*cake*). Estos relaves se diferencian entre sí principalmente por su consistencia o densidad, habitualmente expresada como concentración de sólidos y por su resistencia al corte, habitualmente definido en función de su esfuerzo de fluencia (*yield stress*).

La concentración de sólidos (C_p) se relaciona con el contenido de agua que posee la pulpa de relave, y se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_p(\%) = \frac{\text{Peso del sólido}}{\text{Peso de la pulpa}} \cdot 100 \quad (1)$$

El esfuerzo de fluencia, (τ_y) es el esfuerzo al corte máximo que debe ser superado para que el relave fluya y se produzcan deformaciones irreversibles. Para esfuerzos de corte por debajo del *yield stress*, la red de partículas en suspensión dentro del relave se deforma elásticamente. Cuando el esfuerzo de corte es mayor al τ_y , el relave presenta un comportamiento de líquido viscoso, donde la viscosidad es una función decreciente del esfuerzo de corte. La relación existente entre el esfuerzo de corte y el *yield stress*, se expresa a través del modelo de comportamiento de Bingham, el que se presenta en las ecuaciones (2) y (3):

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \tau < \tau_y \quad (2)$$

$$\tau = \tau_y + \eta_{(\dot{\gamma})} \cdot \dot{\gamma} \quad \tau > \tau_y \quad (3)$$

Donde $\eta_{(\dot{\gamma})}$ corresponde a la viscosidad, τ es el esfuerzo de corte, τ_y corresponde al *yield stress* y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalle.

La Tabla 1 presenta valores típicos de *yield stress* para diferentes sustancias. Los valores utilizados para los relaves espesados TTD son utilizados actualmente en la industria del aluminio.

Tabla 1: Valores típicos de *yield stress* – Boger (2002).

SUSTANCIA	YIELD STRESS (Pa)
Salsa de tomates	15
Yogurt	80
Pasta de dientes	110
Mantequilla de maní	1900
Relaves espesados TTD	30 – 100
Relave en pasta – rellenos de minas	250 – 800

La Figura 1 presenta la clasificación de los relaves realizada por Jewell y Fourie (2006), en ella no se presentan valores cuantitativos para diferenciar los distintos tipos de relave, debido a que estos dependen de cada relave en particular en función de la mineralogía y de sus características granulométricas. Sin embargo, en la literatura encontramos rangos de concentración de sólidos, *yield stress* y definición de características cualitativas de cada tipo, que se detallan a continuación:

- Los relaves filtrados presentan habitualmente una concentración de sólidos mayor al 83% (contenido de humedad gravimétrico $w < 20\%$), esta concentración se logra mediante la utilización de filtros que pueden ser de distintos tipos (filtro de banda, filtro de disco, filtro de prensa). Estos relaves son transportados en correas o camiones, depositados y compactados, formando depósitos de relaves no saturados (Davis y Rice, 2001). La Figura 2 presenta ejemplos de depósitos de relaves filtrados.

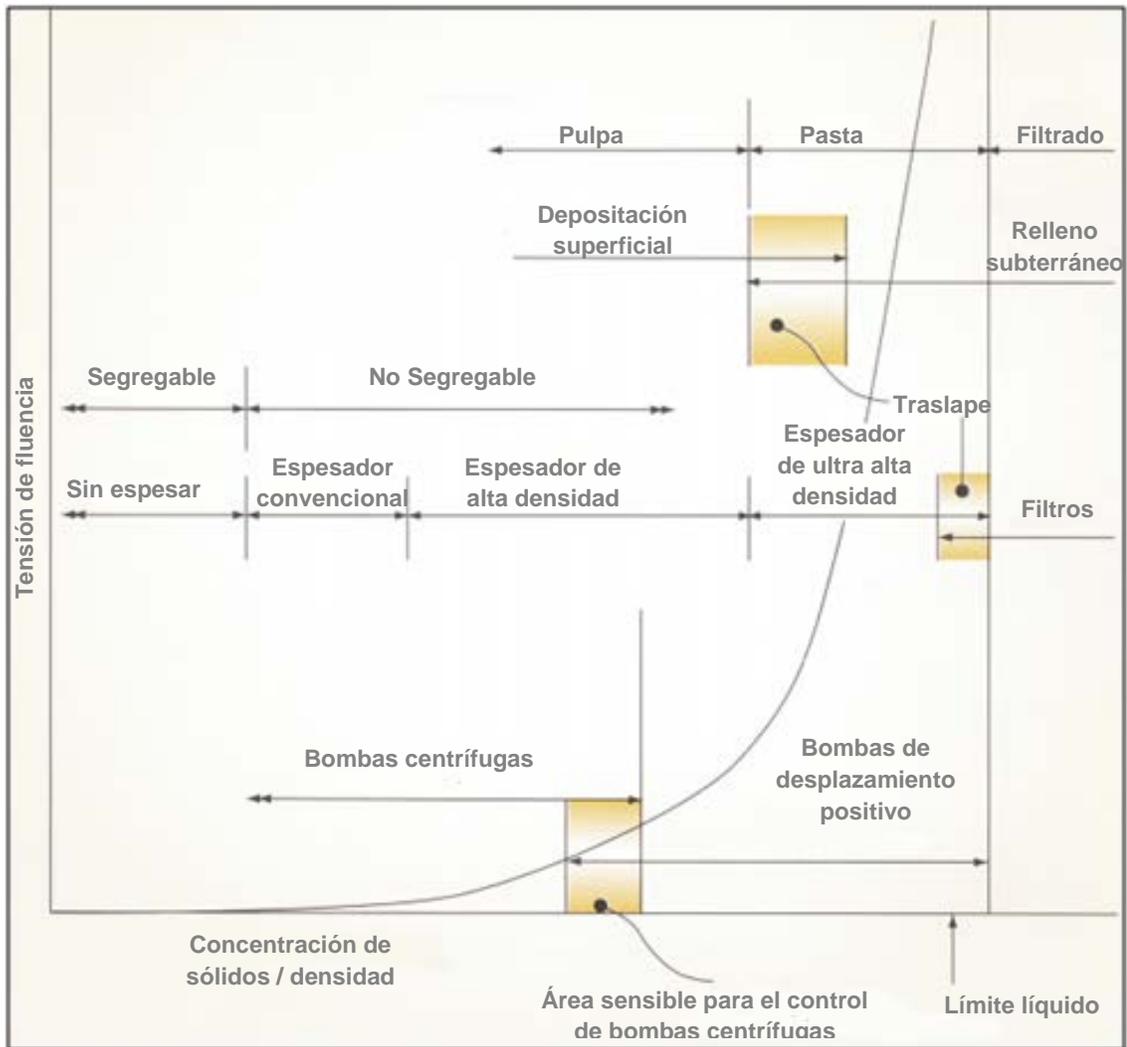


Figura 1: Clasificación de los tipos de relave – Jewell y Fourie (2006).



Figura 2: (a) Relaves filtrados depositados por correas transportadoras - La Coipa, Chile; (b) Relaves filtrados depositados por camiones¹

¹ Fuente: www.tailings.info

- La definición de pasta está basada en un valor de corte de *yield stress* de 100 Pa o 200 Pa, ambos límites tienen sus defensores (Fourie, 2012). Como se aprecia en la Figura 3, la consistencia de la pasta se aproxima a la del límite líquido del material y para su transporte son necesarias bombas de desplazamiento positivo. Esto limita la distancia a la que la pasta puede ser económicamente transportada (Theriault, Frostiaik et al. 2003).



Figura 3: Capas frescas de pasta, mina Bulyanhulu, Tanzania².

- Las pulpas (*slurries*), corresponden a relaves con valores de *yield stress* menores a 100 Pa. Habitualmente se dividen, de acuerdo a su grado y tecnología de espesamiento, en: relaves no espesados, relaves espesados en espesadores convencionales y relaves espesados en espesadores de alta densidad.

Coloquialmente se le denomina relaves convencionales a los espesados en espesadores del tipo convencional y se conservará esta notación en el desarrollo de este trabajo de título. En tanto, los relaves espesados con método TTD corresponden a un tipo en particular de relave de alta densidad.

En las siguientes subsecciones se presentan las principales características de relaves convencionales y espesados (TTD).

2.1.1 Relaves convencionales

Para obtener relaves convencionales, los relaves provenientes de la planta de proceso son espesados en espesadores convencionales o del tipo HRT, obteniendo relaves que virtualmente no presentan *yield stress*.

Los relaves convencionales son depositados en tranques o embalses, los que surgen como la alternativa de menor costo para depositar los residuos del proceso minero. El método más común consiste en poner esos residuos en una o más cuencas artificiales ubicadas lo más cerca posible de la mina. El relave es descargado con una gran cantidad de agua de proceso en el tranque, formando un depósito de sedimento

² Fuente: www.tailings.info

ligeramente cóncavo, lleno de líquido. El agua se recupera mediante torres de captación y se recicla usándola nuevamente en la concentradora, o se trata y se libera al medioambiente. A medida que el tranque se va llenando, la estructura de confinamiento se va elevando sobre la superficie original del terreno. Habitualmente, los tranques se construyen usando la parte gruesa de los mismos relaves tras un proceso de hidrociclado del relave (tranque, ver Sección 2.2).

La Figura 4 muestra un esquema de un tranque de relaves convencional, los relaves son descargados desde el muro de contención.

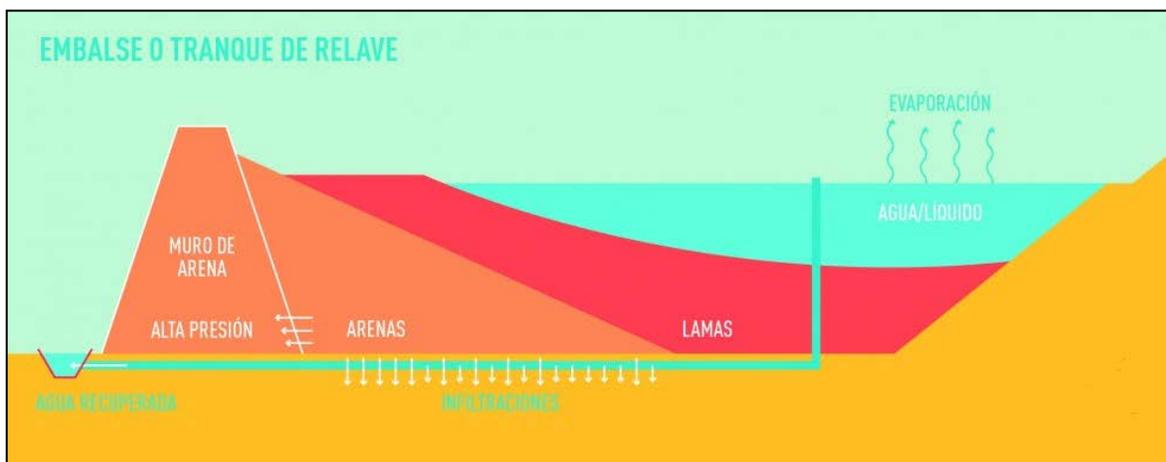


Figura 4: Esquema embalse o tranque de relaves convencional.³

2.1.2 Relaves espesados mediante tecnología TTD

El método de depositación de relaves espesados, TTD por sus siglas en inglés, surge en el año 1977 en la planta Kidd Creek en Ontario, Canadá (Figura 5). Se desarrolla e implementa con el objetivo de satisfacer los requerimientos de incorporar altos estándares de estabilidad, reducir infiltraciones a los suelos basales, incrementar la recuperación de agua y reducir la polución del aire.



³ www.conocedominga.cl

Para obtener relaves espesados TTD, los relaves provenientes de la planta de proceso son espesados en espesadores de Alta Densidad o espesadores de Cono Profundo, obteniendo relaves con valores de *yield stress* por sobre los 20 Pa.

Los relaves espesados TTD se depositan en valles, laderas de cerros o terrenos planos, ubicados en alguna parte cercana a la planta que genera los residuos. El material depositado es homogéneo, no existiendo segregación entre los sólidos y el agua de proceso.

La Figura 6 muestra un esquema de un depósito de relaves espesado TTD. Los relaves son descargados desde la zona alta del depósito.

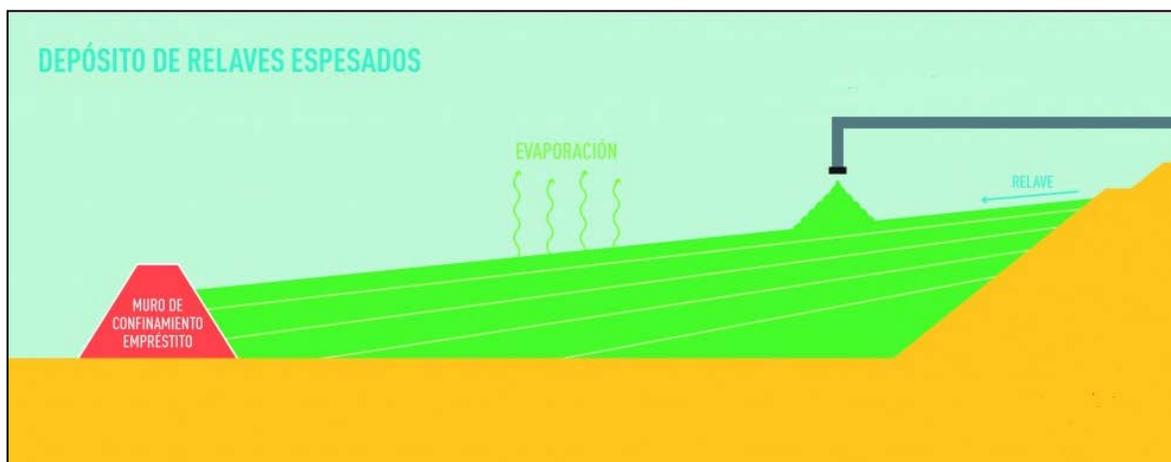


Figura 6: Esquema depósito de relaves espesados TTD.

2.1.3 Ventajas de la metodología TTD

La Tabla 2, desarrollada por Tacey y Ruse (2006), presenta un análisis de los aspectos claves del desarrollo de relaves en pasta y espesados TTD, de acuerdo al grado de desarrollo que ha tenido este método en comparación con los depósitos de relave convencionales. Se tiene una graduación (desde la A a la E) según el nivel de beneficios alcanzado. Para esto se utiliza la siguiente escala:

- A: Ha logrado beneficios, con algunas excepciones. Claramente superior.
- B: Ha logrado beneficios, pero con algunas limitaciones.
- C: No hay beneficios (o deficiencias) sustanciales, en comparación con el enfoque convencional.
- D: No ha logrado beneficios, aunque tiene algunas ventajas.
- E: No ha logrado beneficios. Claramente inferior.

Tabla 2: Beneficios Percibidos de P&TTD, Tacey y Ruse (2006).

Característica	Beneficios Económicos / Ingenieriles	Beneficios Medioambientales / Sociales	Grado
1. Capital similar y costos operacionales menores para eliminar el agua	Beneficio económico general	Menos recursos usados en tuberías y menos acciones correctivas	B
2. Costos devengados durante las operaciones	Reduce el requerimiento de bonos y aprovisionamiento	Costos conocidos por el operador, no hay responsabilidad con la comunidad a largo plazo	B
3. Aumento en la resistencia del depósito	Reduce el riesgo del colapso de las instalaciones	Evita impactos ambientales y de seguridad fuera de las instalaciones	C
4. Disminución del impacto en la superficie del depósito, al menos duplicando la altura de apilamiento	Reduce el costo de compra de suelo	Reduce la esterilización de suelo productivo, reduce el despeje	D
5. Disminución de la demanda de materiales de empréstito para construcción	Menos transporte y construcción	Reducción de la compensación por materiales de empréstito, reducción de la producción de gases causantes del efecto invernadero en la construcción	A
6. Reducción del riesgo de filtración de lixiviados	Mejor lixiviado y recuperación de reactivo	Reducción del riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas	B
7. Reducción o eliminación del estancamiento y los depósitos de lodo de baja resistencia	Aumento de accesibilidad de la superficie	Reducción de daño a la fauna, aumento de la seguridad del operador	B
8. Rápida creación de una superficie drenada en el cierre.	Creación temprana de superficie transitable	Rehabilitación progresiva o más rápida	C
9. Mejor y más temprana lixiviación y drenaje de la superficie	Lixiviación temprana de sustancias tóxicas desde la superficie	Establecimiento de vegetación más rápido, reducción del tiempo de generación de polvo	D
10. Potencialmente gran reducción en el uso de agua	Reducción de la necesidad de recolectar agua y de instalaciones de suministro, ahorro en energía de	Reduce la huella de las estructuras para recolectar, desviar o extraer agua	A

Característica	Beneficios Económicos / Ingenieriles	Beneficios Medioambientales / Sociales	Grado
	bombeo		
11. Reducción de potencial para la licuefacción	El depósito se mantiene firme y no fluirá	Reducción de impactos ambientales y de seguridad fuera del sitio	D
12. Potencialmente reducción de calor, menor demanda de agua	Reducción de uso de energía, ahorro de costos	Menores emisiones de gases de efecto invernadero	C
13. Reducción de requerimientos de reactivos	Potenciales ahorros de costos de operación	Reducción del riesgo de polución	C

2.2 Depósitos de relaves en Chile

De acuerdo al catastro nacional de depósitos de relaves, SERNAGEOMIN (2015), la industria extractiva del cobre es el sector minero que produce la mayor cantidad de relaves. En la actualidad, la producción anual de cobre fino alcanza 5,8 millones de toneladas. Para su obtención debe procesar entre 700 y 800 millones de toneladas de mineral, con leyes del orden de 0,8 % de cobre. La mayor parte corresponde a mineral de sulfuros primarios, que son sometidos al proceso de flotación, produciendo concentrado de cobre. Éste representa una pequeña fracción del total de mineral procesado y el resto pasa a formar parte del relave, que se acumula en distintos tipo de depósitos. A lo largo del tiempo, la forma y técnica de construcción de los depósitos ha ido cambiando e incrementando el tamaño de estas instalaciones.

El catastro nacional de depósitos de relaves, actualizado hasta el año 2014, identificó un total de 603 registros de depósitos de relaves en el país, los que se distribuyen mayoritariamente entre las regiones de Antofagasta y Metropolitana. La mayor cantidad de registros corresponde a las regiones de Atacama y Coquimbo. La Tabla 3 presenta la distribución espacial de depósitos de relaves en el país:

Tabla 3: Distribución de depósitos de relaves en Chile.

REGIÓN	ESTADO DEPÓSITO		
	ACTIVO	NO ACTIVO	SIN INFO.
II	21	13	2
III	55	18	91
IV	86	179	28

REGIÓN	ESTADO DEPÓSITO		
	ACTIVO	NO ACTIVO	SIN INFO.
RM	10	6	7
V	28	22	14
VI	9	4	1
VII	1	1	0
XI	4	1	0
XV	2	0	0
N° POR ESTADO	216	244	143
TOTAL DE REGISTROS			603

De acuerdo al Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves, SERNAGEOMIN (2007), se distinguen cinco tipos de depósitos de relaves en Chile:

1. El embalse, que implica un muro de contención construido con material de empréstito (por ejemplo, sacado de un cerro aledaño) y que se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno.
2. El depósito de filtrados, donde los relaves son previamente sometidos a un proceso de filtración para que su humedad sea inferior a 20%.
3. El depósito de pasta de relave, que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el filtrado, y su depósito no requiere compactación.
4. Depósito espesado, que implica un proceso previo de sedimentación para eliminar una importante cantidad de agua presente en el relave.
5. El tranque de relaves, que implica la construcción de un muro de contención construido con la fracción más gruesa del relave (arena).

Tomando en cuenta la clasificación presentada anteriormente, del total de 603 depósitos de relaves existentes en el país, existen 62 embalses, 6 depósitos de filtrados, 4 depósitos de pasta, 5 depósitos de relaves espesados, 500 tranques de relave y 26 depósitos de los cuales no se tiene información. La Figura 7 presenta la distribución porcentual de los distintos tipos de depósitos existentes en el país.

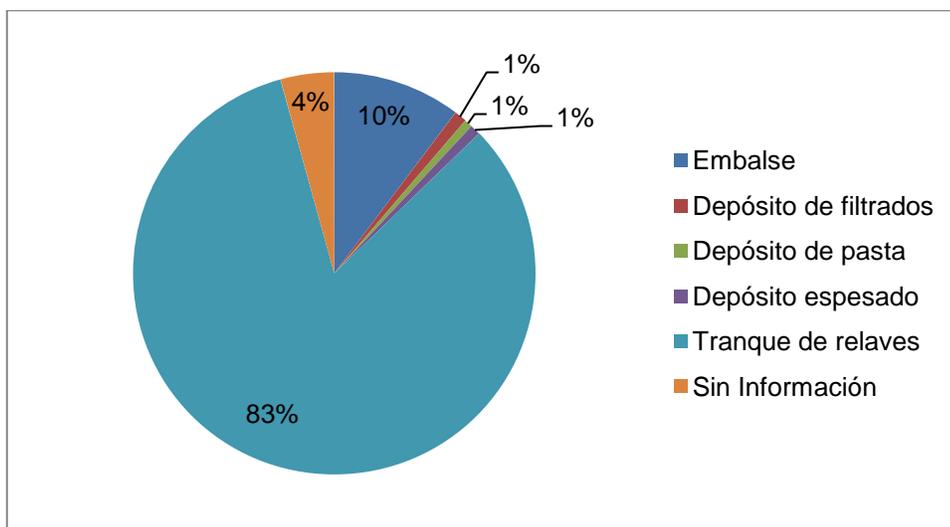


Figura 7: Distribución nacional de depósitos de relave, según tipo de depósito

Si consideramos sólo los depósitos activos, del total de 216 depósitos de relaves actualmente en funcionamiento existen 37 embalses, 6 depósitos de filtrados, 4 depósitos de pasta, 5 depósitos de relaves espesados y 164 tranques de relave. La Figura 8 presenta la distribución porcentual de los depósitos de relaves en operación.

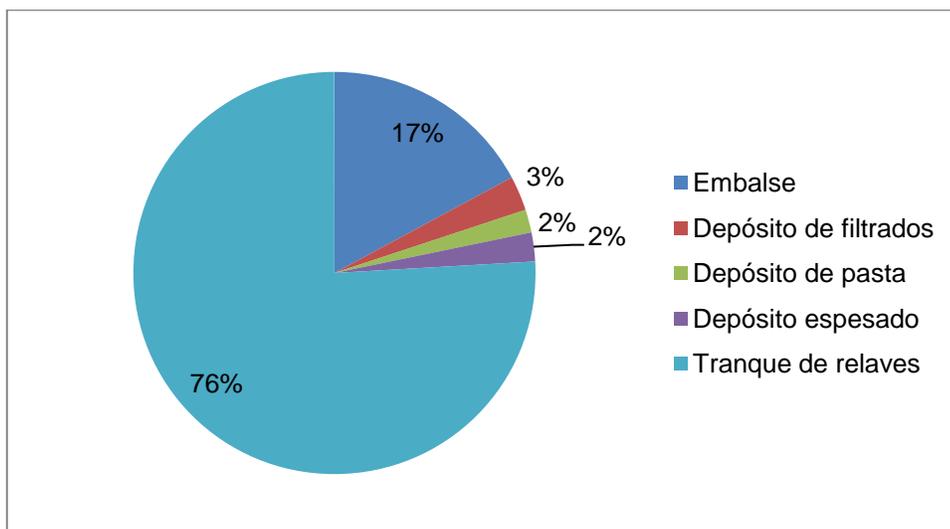


Figura 8: Distribución nacional de depósitos de relave en operación, según tipo de depósito.

2.3 Flujo de agua en medios parcialmente saturados

Tradicionalmente las leyes de flujo de agua en suelos han sido desarrolladas para el caso de un medio poroso saturado, es decir, aquel cuyos poros se encuentran llenos de agua. El flujo de agua en medios parcialmente saturados extiende las leyes de flujo a suelos que presentan poros parcialmente ocupados por agua, mientras que el resto se encuentra ocupado por aire.

Las siguientes subsecciones muestran las principales variables y modelos que rigen el flujo en medios parcialmente saturados.

2.3.1 Propiedades físicas del suelo

Dentro de las propiedades físicas que afectan el comportamiento de los flujos de agua en suelos, se puede destacar la porosidad (n) y el índice de vacíos (e), los que se definen de la siguiente manera:

$$n = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s} \quad (4)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \quad (5)$$

donde V_v es el volumen de vacíos (volumen de agua + volumen de aire), V_s el volumen de las partículas sólidas, V_t el volumen total de la muestra de suelo, γ_d corresponde a la densidad seca del suelo y G_s la gravedad específica de las partículas sólidas.

2.3.2 Propiedades hidráulicas del suelo

Las propiedades hidráulicas que afectan el comportamiento de los flujos de agua en suelos, son principalmente dos: (i) la curva de retención de agua, que relaciona el contenido de agua en el suelo con la presión de poros; y (ii) la función de conductividad hidráulica, que describe la relación entre el contenido de agua en el suelo con su permeabilidad.

A continuación se presenta una descripción de las propiedades hidráulicas que afectan el flujo de aguas en el suelo:

- **Contenido de humedad**

El contenido de humedad del suelo puede ser definido en función de su masa (w), su contenido volumétrico (θ) o su grado de saturación (S).

El contenido másico de humedad (w) se define de acuerdo a la Ecuación (6), presentada a continuación:

$$w = \left(\frac{W_w}{W_s} \right) \cdot 100(\%) \quad (6)$$

donde W_w corresponde al peso del agua contenida en la masa de suelo y W_s es el peso de las partículas sólidas.

El contenido de humedad volumétrico (θ) se define como:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{w \cdot \gamma_d}{\gamma_w} \quad (7)$$

donde V_w corresponde a el volumen de agua dentro del suelo y γ_w es la densidad específica del agua.

En la mayoría de las aplicaciones hidráulicas, el contenido volumétrico de agua se presenta en su forma adimensional (θ^*):

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

donde θ_s es el contenido volumétrico de agua a saturación natural y θ_r el contenido volumétrico de agua residual. Debido a que existe aire atrapado en los poros, es difícil poder alcanzar la saturación total del suelo. Rogowski (1971) propone un valor de $\theta_s = 0,9n$. Este valor depende de cada suelo y se encuentra físicamente bien definido según Haverkamp (2005) y Leij (2005). Por otra parte el valor de θ_r es ambiguo, existen varios estudios en la literatura que eligen un valor θ_r igual a 0 como por ejemplo Kool (1987), Van Genuchten (1991) y Leij (1996).

El grado de saturación S , relaciona el contenido volumétrico de agua en el suelo con su porosidad, y se define en la Ecuación (9):

$$S = \frac{\theta}{n} \quad (9)$$

- **Potencial hídrico del suelo**

El potencial hídrico del suelo (Φ), definido en la Ecuación (10), corresponde a la energía por cantidad unitaria (volumen, masa o peso), necesaria para transportar una cantidad infinitesimal de agua libre desde un recipiente a una elevación específica y bajo presión atmosférica estándar, a un punto del suelo dado.

$$\Phi = \phi_c + \phi_g + \phi_o \quad (10)$$

donde ϕ_c corresponde al potencial mátrico o capilar, ϕ_g el potencial gravitacional y ϕ_o el potencial osmótico, el que está asociado a gradientes de sales disueltas.

Cuando se expresa en unidades de masa, el potencial gravitacional corresponde a la altura piezométrica y el potencial mátrico o capilar se relaciona con la altura de presión (h), de acuerdo a la ecuación (11):

$$\phi_c = \gamma_w \cdot g \cdot h \quad (11)$$

La altura de presión (h) es mayor que cero bajo el nivel freático y negativa sobre este. En la zona no saturada la presión negativa, habitualmente recibe el nombre de succión mátrica o matriz.

- **Curvas de retención de agua en suelos**

Esta curva describe la capacidad del suelo de almacenar y liberar agua, y corresponde a la relación entre el contenido de agua presente en el suelo y la succión. Este contenido de agua es generalmente representado por el contenido de humedad gravimétrico (w), el contenido de humedad volumétrico (θ) o el grado de saturación (S).

La curva de retención de agua del suelo presenta tres regiones, las cuales están definidas en función del proceso de saturación del suelo (Sillers et al, 2001), zona de saturación capilar, zona de desaturación y zona de saturación residual. Las tres regiones y sus límites se muestran en la Figura 9.

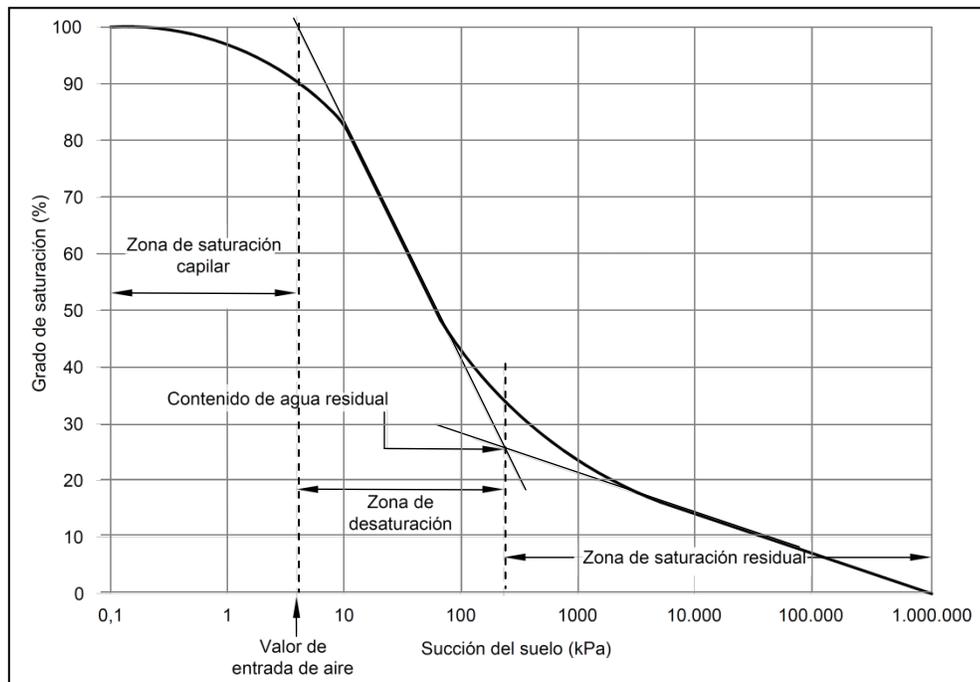


Figura 9: Curva de retención de agua en suelos y regiones definidas, Silles et al (2001)

A continuación se presenta una descripción de las tres regiones de la curva de retención de agua:

1. Zona de saturación capilar. En esta zona la presión de poros es negativa y el suelo se encuentra esencialmente saturado. El límite de la zona de saturación capilar es entendido como el valor de entrada de aire, también conocido como presión de burbujeo. El valor de entrada de aire del suelo es el valor de la succión que se debe exceder para que los poros más grandes del suelo comiencen a drenar y el aire empiece a ocupar los poros.
2. Zona de desaturación. En esta zona el agua que se encuentra dentro de los poros es desplazada por el aire en forma creciente. La zona de desaturación termina en el contenido de agua residual, donde el agua dentro de los poros se torna esencialmente inmóvil respecto a la estructura del suelo, donde los incrementos en la succión no producen un descenso significativo del contenido de agua.

Un punto importante de esta zona de la curva es la Capacidad de Campo (CC), que corresponde al contenido de agua en el suelo una vez drenado libremente en el perfil, aproximadamente 24 a 48 horas después de la saturación. En esta condición sólo una parte de los poros está llena de agua (microporos). Esta situación se asocia a una tensión en el suelo de 33 kPa (0.3 bares).

3. Zona de saturación residual. En esta zona el agua se mantiene fija y el movimiento de humedad principalmente ocurre como flujo de vapor. Existe una baja conductividad hidráulica de agua a través de los poros. La zona de saturación residual termina en condiciones de contenido de agua cero, que corresponde a una succión de 1.000.000 kPa (Croney y Coleman, 1961).

Un punto importante de esta zona de la curva es el denominado, en ciencias agronómicas, Punto de Marchitez Permanente (PMP), que corresponde al contenido de agua en el suelo en el cual una planta es incapaz de extraer agua y se marchita sin poder recuperarse al restablecer el contenido de humedad. El agua está retenida en delgadas películas y con mucha fuerza alrededor de las partículas de suelo, asociada a una tensión de 1.500 kPa (15 bares).

Existen distintos métodos para realizar la medición de la succión. Éstos se clasifican como métodos directos o indirectos, dependiendo de si la presión de poro del agua se mide de forma directa o si se deduce por medio de otro parámetro. Además, existen varios modelos que permiten estimar la curva de retención de agua en suelos, como los desarrollados por Aubertin et al (2003), Fredlund and Xing (1994) y Van Genuchten (1980).

Fredlund and Xing (1994) propuso una ecuación que describe la curva de retención de agua del suelo para todas las posibles funciones negativas entre 0 y -1.000.000 kPa, basado en el conocimiento de tres parámetros. Esta relación se presenta en la Ecuación (12):

$$\theta_w = C_\Psi \cdot \frac{\theta_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^\omega\right) \right]^\kappa} \quad (12)$$

donde θ_w corresponde al contenido volumétrico de agua; θ_s es el contenido volumétrico de agua en la saturación; e es el número de Euler; Ψ es la presión de poros; a es la presión de poros en el punto de inflexión de la curva de retención (Ψ_i) cuyo valor es ligeramente mayor al valor de entrada de aire; $\kappa = 3,67 \cdot \ln(\theta_s/\theta_i)$, donde θ_i es el contenido volumétrico de agua en el punto de inflexión de la curva de retención; $\omega = (1,31^{\kappa+1}/\kappa \cdot \theta_s) \cdot (3,72 \cdot s \cdot \Psi_i)$ donde s es la tangente a la función que pasa por el punto de inflexión y C_Ψ es un coeficiente de corrección asociado a la succión correspondiente al contenido de agua residual del suelo, definido como:

$$C_\Psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\Psi_0}{\Psi_r}\right)} \quad (13)$$

- **Conductividad hidráulica del suelo**

La conductividad hidráulica corresponde a la habilidad del suelo de transportar aguas, a distintos niveles de saturación. En un suelo saturado inicialmente todos los espacios entre los poros están llenos de agua. Una vez que es alcanzado el valor de entrada de aire del suelo, parte de los poros se llenan con aire y se vuelven no conductivos incrementando las tortuosidades en el flujo de agua. Como consecuencia de esto, la capacidad de transportar agua decrece.

De acuerdo a lo señalado anteriormente, la capacidad del suelo de transportar agua depende de la cantidad de este líquido presente en el suelo, la que se representa a través de la función de contenido volumétrico de agua. La medición de la curva de conductividad hidráulica requiere de un importante gasto de tiempo y recursos, razón por la cual esta variable es habitualmente estimada en función de la curva de retención de agua del suelo y de la conductividad hidráulica saturada. Existen distintos modelos que permiten estimar la curva de conductividad hidráulica del suelo, como los desarrollados por Fredlund et al (1994), Green and Corey (1971) y Van Genuchten (1980).

Van Genuchten (1980) propuso una ecuación que describe la conductividad hidráulica del suelo en función de la succión matriz. Esta relación se presenta en la Ecuación (14):

$$k_w = k_s \cdot \frac{[1 - (a \cdot \Psi^{(\alpha-1)}) \cdot (1 + (a \cdot \Psi^{(\alpha)})^{-\beta})^2]}{\left[(1 + (a \cdot \Psi^{(\alpha)})^{\frac{\beta}{2}}) \right]} \quad (14)$$

donde k_s corresponde a la conductividad hidráulica saturada; a , α , β son parámetros de ajuste de la curva; $\alpha = 1/(1 - \beta)$ y Ψ representan el rango de succión requerido. Van Genuchten (1980) indica que los parámetros a y β pueden ser estimados gráficamente a partir de la curva de contenido de agua del suelo.

2.4 Flujo de agua en medios parcialmente saturados

Para el siguiente análisis, supondremos que el movimiento del agua en el suelo es isotérmico y unidimensional, mientras que la influencia de la expansión y la contracción del material poroso del suelo, no será considerada.

Para el flujo vertical en una dimensión, la ecuación de continuidad toma la forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (15)$$

donde q es flujo por unidad de área de agua en el suelo; z es la profundidad tomada positiva hacia abajo; y t es tiempo. Combinado con la ley de Darcy generalizada (1856):

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (16)$$

donde H es la carga hidráulica definida como:

$$H = h(\theta) - z \quad (17)$$

La ecuación de transferencia de agua al suelo se puede escribir como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (18)$$

donde h es la carga de presión del agua en el suelo con respecto a la presión atmosférica ($h \leq 0$); K es la conductividad hidráulica como función de θ .

Para suelos no expansivos, la carga hidráulica (H) representa la energía de agua en el suelo por unidad de masa a una profundidad dada (z); el posible componente osmótico que surge de la presencia de solutos en el agua del suelo, es despreciable. La Ecuación (18) puede ser expresada como una ecuación dependiente de θ introduciendo el concepto de difusividad del agua del suelo (Childs y Collis-George, 1950):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right) \right] \quad (19)$$

donde $D(\theta)$ es la difusividad definida por:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (20)$$

De la misma manera, la Ecuación (17) se puede expresar como función de carga de presión del agua en el suelo (h) introduciendo el concepto de capacidad específica:

$$C(\theta) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (21)$$

donde C es la capacidad específica dada por $C(\theta) = d\theta/dh$. La Ecuación (21) es la ecuación de Richards (1931) en una dimensión, corresponde a la ecuación de transferencia de agua en suelos no saturados y modela problemas de flujo saturados y no saturados acoplados.

La resolución de la ecuación de Richards, requiere que se conozcan previamente las curvas de retención de agua y la conductividad hidráulica en un medio poroso no saturado.

2.5 Estudios de infiltración en relaves

Rivera (2012) implementó un ensayo que simula la depositación de relave espesado sobre terreno natural el cual permite medir la variación de humedad del suelo natural tras depositar sobre él una capa de relave espesado.

En probetas cilíndricas de acrílico de 40 y 50 cm de altura, y 10 cm de diámetro se colocó en la base una capa de material compactado, el que simulaba los suelos de fundación de los depósitos de relaves. Sobre este material, se vertió una capa de relave espesado. Parte del agua contenida en los relaves infiltró el suelo subyacente.

Se midió la humedad, tanto de los relaves como del suelo de fundación, a distintas profundidades mediante un sistema de adquisición de datos de registro continuo conectado a sensores de humedad de tipo capacitivo que miden la humedad mediante la constante dieléctrica del suelo. Para simular el efecto de la evaporación producida en terreno, en algunos ensayos se utilizó una lámpara de calor infrarroja.

La Figura 10 presenta la configuración del ensayo realizado por Rivera (2012). En éste, se pueden apreciar las probetas deacrílico (pruebas en duplicado), los sensores de humedad y la lámpara infrarroja.



Figura 10: Ensayo de infiltración propuesto por Rivera (2012).

La prueba se realizó para tres tipos de relave de cobre y dos suelos de fundación (8 ensayos en total). Se analizaron las propiedades geotécnicas e hidráulicas de los materiales involucrados, mediante ensayos de granulometría ASTM D422 - 63(2007), límites de Atterberg ASTM D4318-05, peso específico ASTM D854 – 10, clasificación de suelos según USCS ASTM D2487 – 11, proctor modificado ASTM D 1557-70, densidad máxima y mínima NCh 1726, permeabilidad ASTM D2434 - 68(2006), curva de retención de agua ASTM D 2325 y límite de contracción.

De cada ensayo, se obtuvo la curva de humedad versus tiempo a distintas profundidades. La Figura 11 presenta a modo de ejemplo, la curva de humedad versus tiempo obtenida por Rivera (2012) para el suelo de fundación 2 (SC) y el relave 1 (ML).

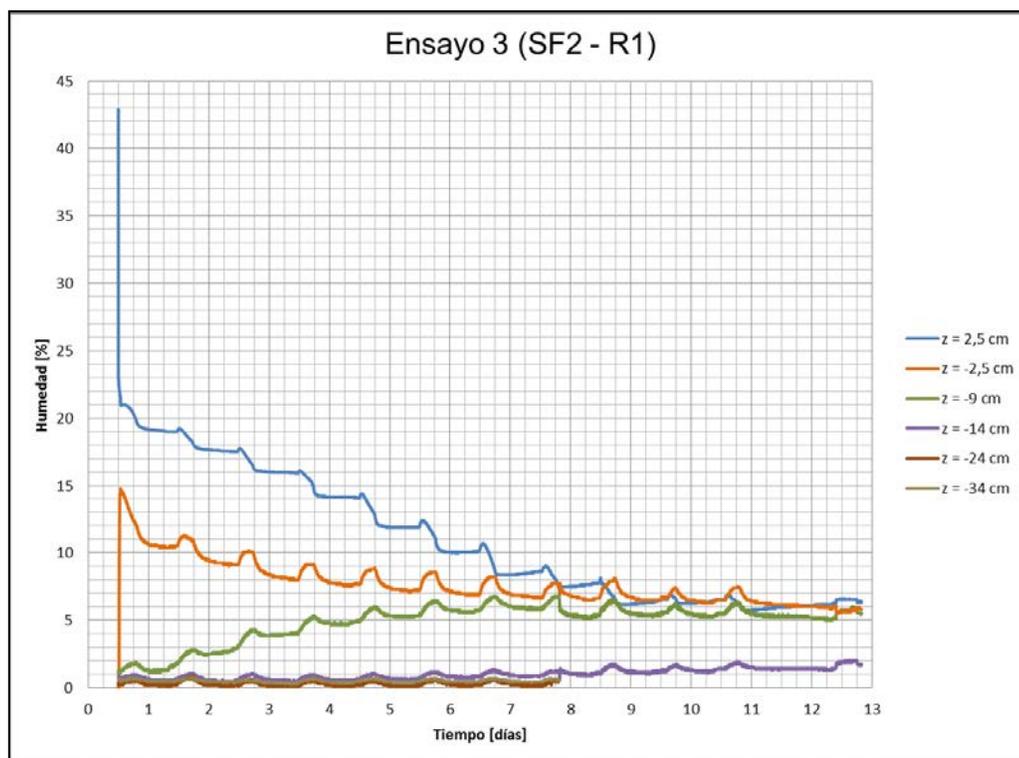


Figura 11: Curva humedad vs. tiempo ensayo Rivera (2012)

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

- La infiltración en el suelo es producida en su mayor parte, inmediatamente después de la depositación del relave.
- La humedad final que presentan los relaves para ambos suelos de fundación son similares, lo que indicaría que ésta no es afectada por el suelo de fundación y sería controlada más bien por la evaporación.
- La humedad final de los suelos de fundación para los tres relaves es similar, lo que indicaría que ésta depende de las propiedades intrínsecas del suelo de fundación y no de las características del relave. Estas propiedades intrínsecas pueden tener relación con la capacidad de retención del suelo. No obstante, la depositación de relaves frescos sobre capas de relaves que no han sido secados totalmente, podría provocar gradientes hidráulicos mayores a los utilizados en esta investigación.
- La infiltración al suelo de fundación no se ve afectada de manera importante por el efecto de la radiación producida por la lámpara infrarroja. No ocurre lo mismo en el relave, donde la humedad final se ve controlada principalmente por este efecto.
- La infiltración producida en los suelos de fundación no superó humedades de 7% y profundidades mayores a 25 cm.

3 Caracterización de los suelos

Para la realización de este estudio se utilizaron 2 muestras de relave (Relave 1 y Relave 2) y una muestra de suelo de fundación.

Los relaves utilizados cuentan con las características necesarias para su depositación como relaves espesados. El Relave 1 ha sido obtenido mediante la flotación de mineral cobre, mientras que el Relave 2, se obtuvo de la flotación de mineral de oro y plata. El agua de proceso del Relave 1 corresponde a agua de mar sin desalar. El agua de proceso del Relave 2 corresponde a agua dulce de pozo.

El suelo de fundación, se extrajo de un sector cercano al lugar proyectado para ubicar el depósito para el Relave 2. Éste presenta características similares al suelo de fundación del lugar donde se construirá dicho depósito.

A continuación se presenta la caracterización de las propiedades geotécnicas e hidráulicas del suelo y relaves utilizados en el análisis. En el caso de que los ensayos se hayan realizado de acuerdo a normas estandarizadas, éstas se señalan en cada apartado. En caso contrario, se presenta un resumen de la metodología aplicada en cada ensayo.

3.1 Clasificación de los suelos

Se realizó la clasificación de las muestras de suelo de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos USCS (por sus siglas en inglés).

3.1.1 Análisis granulométrico

Se realizó un análisis granulométrico por tamizado de los suelos, utilizando mallas estandarizadas hasta un tamaño de 0,025 mm de acuerdo a la metodología definida en la norma ASTM D422.

La Tabla 4 presenta la distribución granulométrica de los suelos utilizados en el estudio, los resultados se presentan como porcentaje de material que pasa por cada tamiz.

Tabla 4: Distribución granulométrica.

Tamiz ASTM	Apertura (mm)	Suelo de fundación (%)	Relave 1 (%)	Relave 2 (%)
1 1/2 in	37,5	100		
1 in	25,0	99		
3/4 in	19,0	99		
1/2 in	12,5	99		
3/8 in	9,5	98		
1/4 in	6,3	97		

Tamiz ASTM	Apertura (mm)	Suelo de fundación (%)	Relave 1 (%)	Relave 2 (%)
N°4	4,75	96	100	
N°10	2,0	94,6	99,9	
N°20	0,850	81,9	99,8	
N°30	0,600	69,6	98,8	100
N°40	0,425	56	96,1	99,9
N°60	0,250	35	86,2	99,6
N°100	0,150	25,7	73,5	93,8
N°200	0,075	18,7	54,6	67
N°270	0,053	14,4	44	55,1
N°325	0,045	9,2	39,4	49,4
N°400	0,038	8,1	34	43,9
N°500	0,025	6,4	27,5	41,5

La Figura 12 muestra la curva de distribución granulométrica de los suelos utilizados en el estudio.

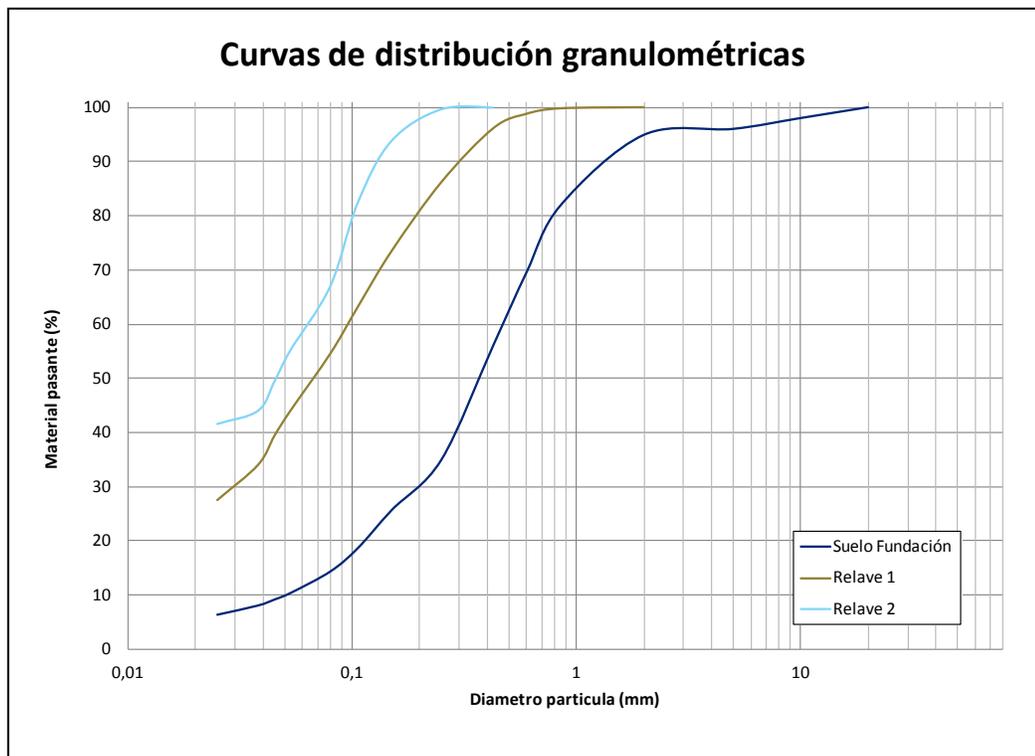


Figura 12: Curvas de distribución granulométrica.

3.1.2 Límites de consistencia

Se efectuó la determinación de los límites de consistencia de los suelos. El límite líquido se determinó de acuerdo a la norma chilena NCh 1517/1 Of79. El límite plástico se definió de acuerdo a la norma chilena NCh 1517/2 Of79.

Debido a las características de plasticidad de los materiales, sólo fue posible obtener resultados para los límites de consistencia del Relave 1. Sin embargo, para el Relave 2, se obtuvo resultados a partir del informe de caracterización geotécnica de los relaves presentado al Sernageomin durante el proceso de aprobación del depósito de relaves espesados. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Límites de consistencia.

Parámetro	Unidad	Tipo de suelo		
		Suelo de fundación	Relave 1	Relave 2
Límite líquido	[%]	-	17	19,2
Límite plástico	[%]	-	4	-

3.1.3 Clasificación USCS

La Tabla 6 muestra la clasificación de los suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos *USCS*.

Tabla 6: Clasificación de suelos según USCS.

Parámetro	Unidad	Tipo de suelo		
		Suelo de fundación	Relave 1	Relave 2
Gravas	[%]	4	-	-
Arenas	[%]	77,3	45,4	33
Finos	[%]	18,7	54,6	67
Límite Líquido	[%]	-	17	19,2
Límite plástico	[%]	-	13	-
Índice de plasticidad	[%]	NP	4	NP
D ₆₀	[mm]	0,460	0,095	0,063

Parámetro	Unidad	Tipo de suelo		
		Suelo de fundación	Relave 1	Relave 2
D ₃₀	[mm]	0,200	0,030	< 0,025
D ₁₀	[mm]	0,050	< 0,025	< 0,025
Coeficiente de uniformidad (Cu)		9,2	-	-
Coeficiente de curvatura (Cc)		1,7	-	-
Clasificación USCS		SM	CL - ML	ML

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 6, el suelo de fundación es una arena limosa, formado por una mezcla de arenas y limo mal graduado (SM). El Relave 1 obtiene la doble graduación CL-ML, correspondiente a limo inorgánico y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad (ML) o arcilla inorgánica de baja a media plasticidad, arcillas limosas (CL). El Relave 2 corresponde a un limo inorgánico y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad (ML).

3.2 Gravedad específica

La determinación de la gravedad específica (G_s) se realizó de acuerdo a metodología presentada en la norma ASTM D854-58. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Gravedad específica.

Tipo de suelo	G_s
Suelo de fundación	2,67
Relave 1	2,66
Relave 2	2,78

3.3 Permeabilidad de carga variable

El ensayo de permeabilidad de carga variable se utiliza para determinar la conductividad hidráulica saturada en suelos que contengan una cantidad de partículas finas (bajo malla #200) mayor al 10% en peso. Este ensayo no se encuentra estandarizado por lo que a continuación se presenta un resumen de la metodología con la que se llevó a cabo:

1. Se llena la probeta de acero con suelo, compactándolo a la densidad requerida para el ensayo. Posteriormente, la probeta se satura.

2. Se conecta el tubo capilar a la probeta mediante una manguera flexible. Luego se llena el tubo capilar con agua destilada.
3. Se abre la válvula y se registra el tiempo Δt que tarda el agua en bajar una altura Δh dentro del tubo capilar.
4. Se calcula la conductividad hidráulica saturada del suelo mediante la siguiente fórmula:

$$K = \frac{a \cdot L_0}{A \cdot \Delta t} \cdot Ln \frac{h_1}{h_2}$$

Las dimensiones a , L_0 , A , h_1 y h_2 , se presentan en la Figura 13(a).

La Figura 13(a) muestra un esquema del ensayo con sus elementos y dimensiones principales.

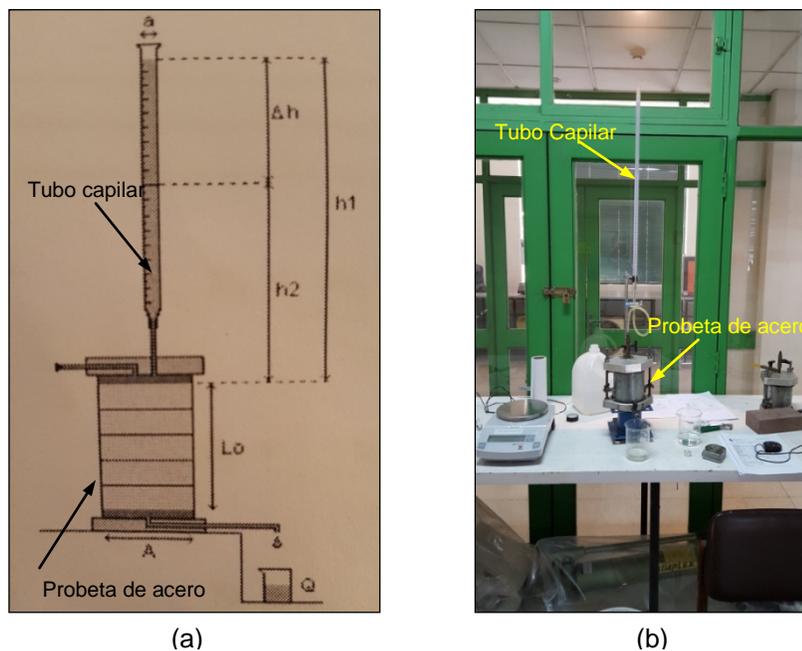


Figura 13: Ensayo de permeabilidad de carga variable. (a) Esquema ensayo, (b) Instalación experimental.

La conductividad hidráulica saturada del suelo de fundación y los relaves se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Conductividad hidráulica saturada.

Tipo de suelo	K [cm/s]
Suelo de fundación ($\gamma_d=1,65 \text{ g/cm}^3$)	1,65E-4
Suelo de fundación ($\gamma_d=1,75 \text{ g/cm}^3$)	3,20E-4

Tipo de suelo	K [cm/s]
Relave 1 ($\gamma_d=1,50 \text{ g/cm}^3$)	1,86E-5
Relave 2 ($\gamma_d=1,50 \text{ g/cm}^3$)	3,64E-5

3.4 Curva de retención de agua

El ensayo de retención de agua en suelos lo llevó a cabo el Laboratorio del Instituto de Investigación de Ciencias Agropecuarias. Los ensayos se realizaron de acuerdo a la metodología presentada en la norma ASTM D2325. La Figura 14 y la Figura 15 presenta las curvas de retención de agua para los suelos analizados en función de su contenido gravimétrico de humedad (w) y de su contenido volumétrico de agua (θ^*) respectivamente.

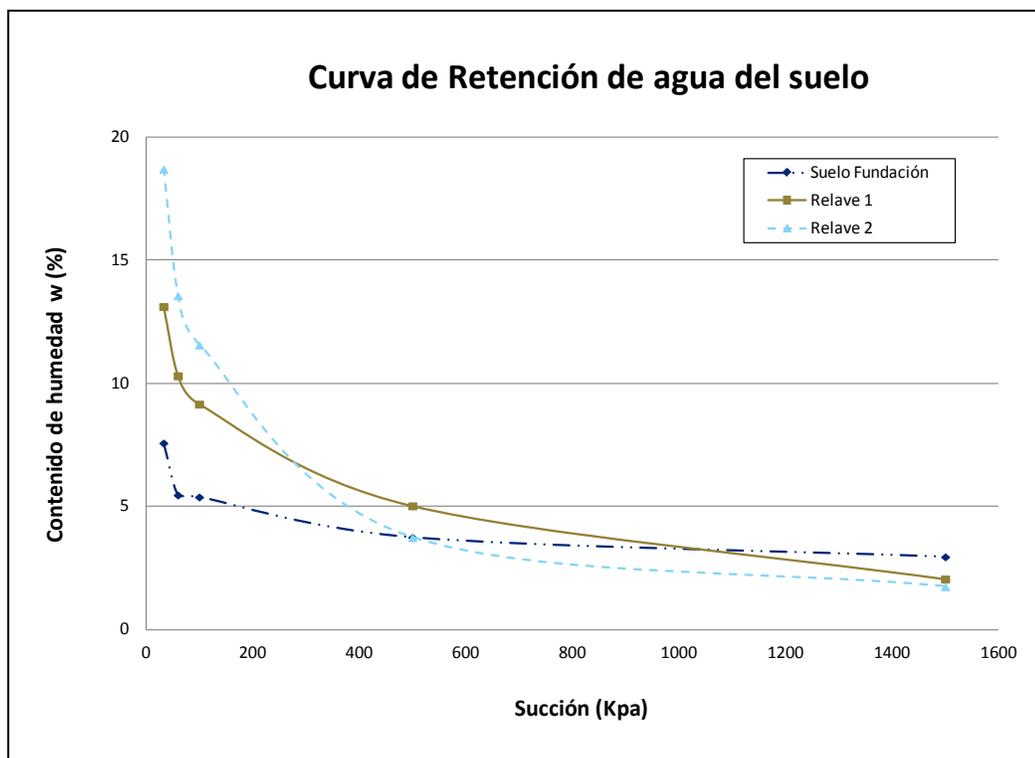


Figura 14: Curvas de retención de agua en suelos en función de w (%).

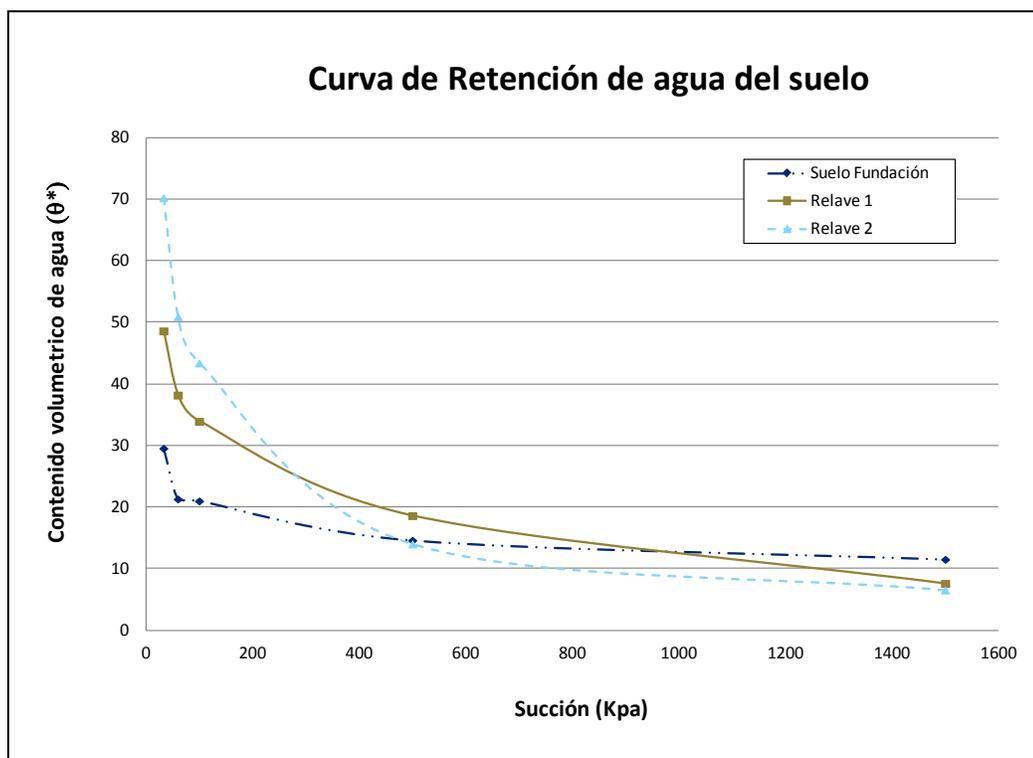


Figura 15: Curvas de retención de agua en suelos en función de θ^* .

La Tabla 9 presenta la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 9: Puntos característicos curva de retención de agua en suelos.

Punto en curva de retención	Contenido de humedad w (%)			Contenido volumétrico de agua (θ^*)		
	Suelo de fundación	Relave 1	Relave 2	Suelo de fundación	Relave 1	Relave 2
Capacidad de campo	7,6	13,1	18,7	29,6	48,6	70,3
Punto de marchitez permanente	3,0	2,1	1,8	11,6	7,6	6,6

3.5 Límite de contracción.

El límite de contracción (w_{LC}), es la humedad gravimétrica máxima de un suelo bajo la cual, variaciones del contenido de agua del material no causan variaciones en el volumen del mismo.

El límite de contracción se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por Robinsky (1999) la que se resume a continuación:

1. Relave espesado TTD, es vertido en duplicado en tubos de PVC de 45 mm de diámetro y 75 mm de altura. Los cilindros son aceitados en su interior, con el fin de evitar grietas producto del encogimiento de los relaves (Figura 16 (a)).
2. Los relaves se dejan secar lentamente, monitoreando su variación volumétrica y de peso.
3. Cuando los relaves están suficientemente secos, no observándose variaciones en su volumen, se pesan y posteriormente son secados en el horno a una temperatura de entre 40°– 50° durante 5 a 6 horas. En el caso de detectar variaciones de volumen, el ensayo debe repetirse (Figura 16 (b)).
4. Mediante diferencia de peso, se obtiene la humedad gravimétrica w (%) de los relaves en el límite de contracción.

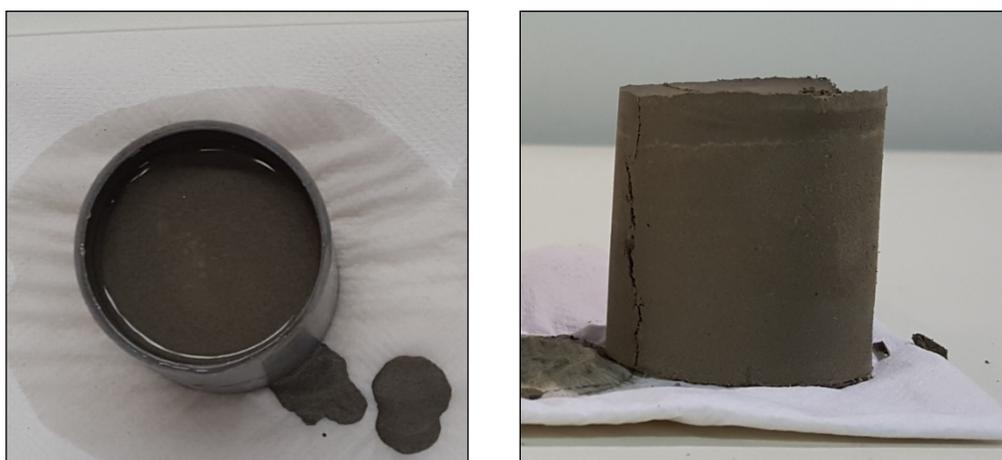


Figura 16: Ensayo de límite de contracción. (a) Montaje probeta, (b) Probeta al límite de contracción.

La Tabla 10 presenta los resultados del ensayo de límite de contracción.

Tabla 10: Límite contracción.

Tipo de suelo	W_{LC} (%)
Relave 1	19,3
Relave 2	23,1

3.6 Ensayo de evaporación

Este ensayo tiene como finalidad medir la tasa de evaporación en el tiempo para los diferentes relaves utilizados en las pruebas de infiltración y compararlas con la tasa de evaporación del agua bajo las mismas condiciones.

El ensayo se realizó de acuerdo a la siguiente metodología:

1. Se prepararon muestras de cada tipo de relave en vasos de vidrio de iguales dimensiones, llenados hasta la misma altura.
2. Las muestras se pusieron a secar junto a un vaso lleno de agua. Para acelerar el proceso de evaporación, se instaló una lámpara infrarroja sobre los vasos, a una distancia de 50 cm sobre el borde de los mismos (Figura 17).
3. Se midió la evaporación en el tiempo, medido como diferencia de peso.



Figura 17: Montaje ensayo de evaporación.

Al inicio del ensayo, con el objetivo de ver cuándo se secaba la superficie de agua libre sobre cada relave, se dejó la lámpara encendida y se pesaron los vasos cada 2 horas. La lámpara permaneció apagada durante el tiempo que no se pudo realizar supervisión directa. Luego, se mantuvo la lámpara encendida de manera continua.

La Figura 18 (a) muestra los resultados del ensayo de evaporación N°1, en el se presenta la evaporación acumulada (gr) para cada vaso en función del tiempo de

secado. Las flechas representan el momento en que la superficie de agua libre sobre el relave se evaporó por completo. A partir de este punto, se observa que la tasa de evaporación se reduce, en particular para los vasos de Relave 1.

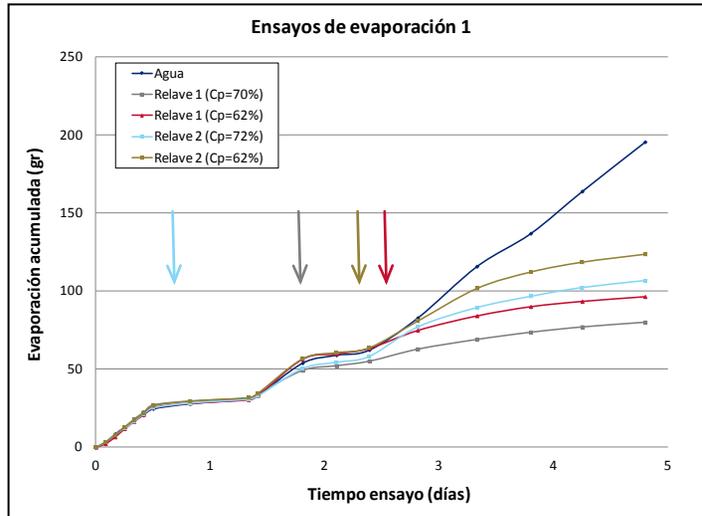
La figura muestra que la evaporación acumulada es mayor en las probetas de Relave 2, aún cuando la cantidad de agua disponible para evaporar en el vaso de Relave 2 con concentración de sólidos de 72% (línea celeste) es bastante menor que las probetas preparadas con Relave 1. La evaporación acumulada para el Relave 1, con concentración de sólidos de 62%, corresponde a un 78% de la evaporación acumulada para el Relave 2 a la misma concentración.

Analizando los ensayos de permeabilidad de ambas muestras y la curva de retención de agua, era esperable que bajo las mismas condiciones el Relave 1 se secase más rápido, debido a que presenta una mayor permeabilidad y una menor succión matriz. Esto no se observó por lo que es probable que el contenido de sales afecte la evaporación del agua al interior de los relaves.

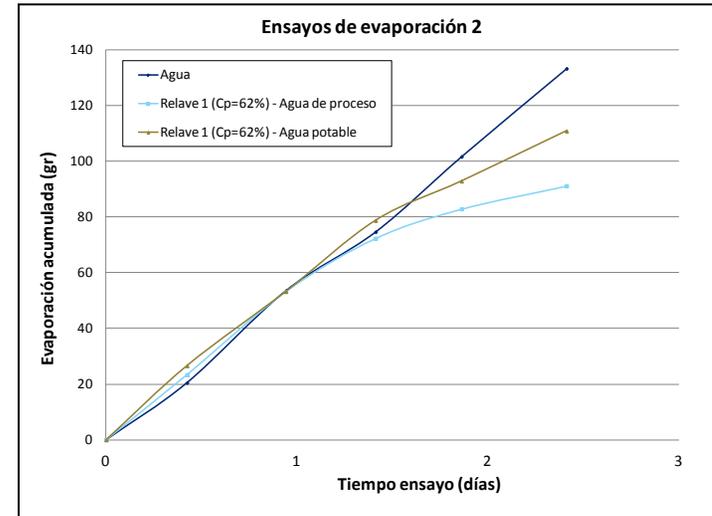
Para medir el efecto del contenido de sales, se realizó una prueba repitiendo la metodología anterior (Ensayo N°2). Se usaron dos vasos con Relave 1 concentrado a 62% de sólidos, uno con agua de procesos y el otro con agua potable (Figura 18 b). La evaporación acumulada para el relave con agua de proceso corresponde a un 82% de la evaporación acumulada para el relave con agua potable. Además, se observa que en un comienzo las tasas de evaporación son similares, diferenciándose a partir de la evaporación de la superficie libre de agua sobre el relave.

Por último, el Ensayo N°3 comparó la evaporación de agua potable con el agua salada de proceso (Figura 18 c). La evaporación acumulada para el vaso con agua de proceso corresponde a un 86% de la evaporación acumulada para el vaso con agua de potable.

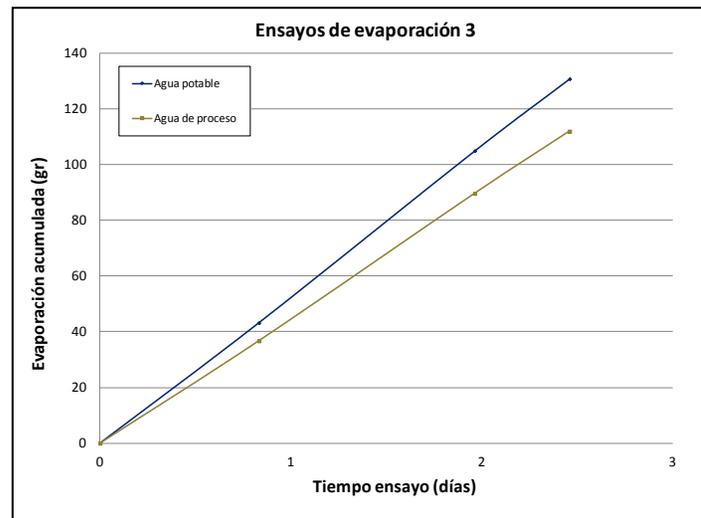
La diferencia de evaporación del Ensayo N°2 es mayor a la obtenida durante el Ensayo N°3. Este resultado indica la existencia de otro fenómeno físico que afecta la evaporación cuando el agua está dentro del relave, probablemente se deba incluir el componente osmótico ϕ_o en la ecuación del potencial hídrico del suelo (10), el que está asociado a gradientes de sales disueltas.



(a)



(b)



(c)

Figura 18: Resultados ensayo de evaporación. (a) Ensayo 1, (b) Ensayo 2, (c) Ensayo 3.

4 Ensayo de infiltración en suelos naturales

El objetivo del ensayo es medir empíricamente la infiltración en un suelo natural producida por la depositación sobre el mismo de capas sucesivas de relave de diferentes concentraciones de sólidos, intentando simular el crecimiento de un depósito de relaves.

4.1 Descripción general del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en una probeta cilíndrica de acrílico de 20 cm de diámetro x 100 cm de altura. Dentro de la probeta se colocó en su base 50 cm de suelo natural compactado. Dentro del suelo se instalaron sensores de humedad EC-5 de Decagon (Figura 19a) a una altura H de 10, 20, 30, 40, 45 y 48 cm medidos desde el fondo del cilindro. También se colocó un tensiómetro 200SS Watermark (Figura 19 b) a 10 cm desde el fondo del cilindro. Posteriormente, se depositaron capas de relave de entre 5 a 10 cm de espesor (3 a 4 capas) sobre suelo natural.

Cada capa de relave se instrumentó con un medidor de humedad. Además, se instaló un tensiómetro y un medidor de temperatura en la primera capa ($H= 55$ cm desde el fondo del cilindro).



(a)



(b)

Figura 19: (a) Sensor de humedad EC-5 de Decagon, (b) Tensiómetro 200SS Watermark.

La Tabla 11 presenta la especificación técnica del sensor de humedad EC-5 de Decagon.

Tabla 11: Especificación técnica sensor de humedad EC-5 de Decagon.

Variable	Descripción
Rangos de medición	0-100% VWC
Salida	Voltaje, relación con constante dieléctrica del medio, porcentaje volumétrico de agua (VWC)
Tiempo de medición	10 ms.
Temperatura	-40°C a +50°C
Precisión	Suelo mineral: ±3 % VWC, para suelos minerales, hasta 8 dS/m. ±1% VWC calibración específica del suelo hasta 8 dS/m. Rockwool: ±3% VWC, 0.5 hasta 8 dS/m. Tierra para macetas: ±3% VWC, 3 hasta 14 dS/m.
Dimensiones	8.9 cm x 1.8 cm x 0.7 cm

La Tabla 12 presenta la especificación técnica del tensiómetro 200SS Watermark.

Tabla 12: Especificación técnica tensiómetro 200SS Watermark.

Variable	Descripción
Rangos de medición	0 – 239 Cbar
Dimensiones	Diámetro 22 mm, largo 83 mm
Peso	0,067 kg

En la Figura 20 se presenta un esquema general del ensayo.

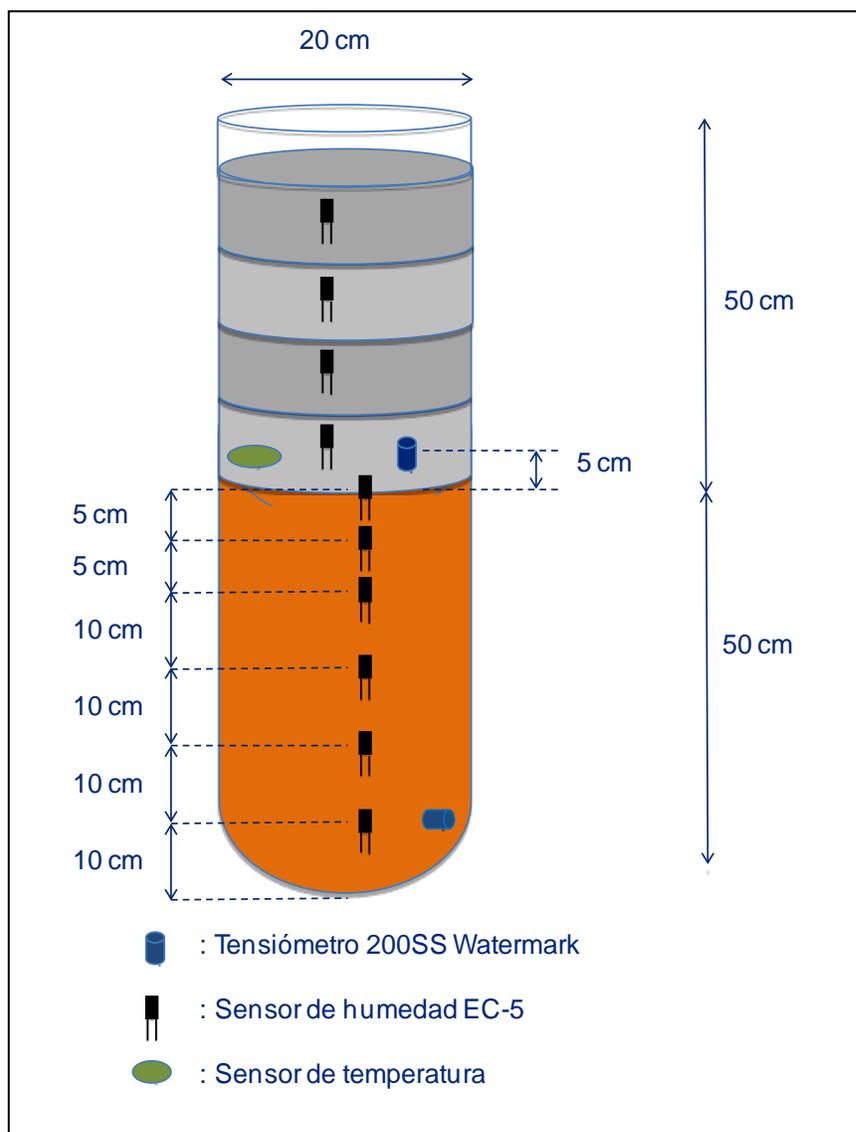


Figura 20: Modelo de ensayo.

4.2 Metodología de ensayo

A continuación se presenta la metodología general utilizada para el montaje de la probeta y la realización de cada ensayo:

1. Acondicionamiento muestra de suelo: Como primera actividad se homogenizó la muestra de suelo, se retiró las gravas y se secó en horno. Luego se añadió agua, entre 1% y 2% en peso dependiendo del ensayo, con el fin de simplificar su colocación (ver Figura 21).



Figura 21: Metodología de ensayo – Acondicionamiento de la muestra de suelo

2. Acondicionamiento muestra de relave: El relave es preparado a la concentración de sólidos correspondiente al ensayo. El relave fue proporcionado en estado seco y se debió incorporar el agua de proceso hasta alcanzar la concentración de sólidos requerida, utilizando la ecuación (1).
3. Colocación suelo de fundación: El suelo acondicionado es colocado en capas de entre 2 a 3 cm dentro del molde de acrílico, compactándolo de forma uniforme con un pisón de madera hasta alcanzar un espesor de aproximadamente 50 cm. Se instalan los instrumentos de medición de humedad a las alturas correspondientes (ver Figura 22), de acuerdo al diseño presentado en la Figura 20. La energía de compactación es baja, cuidando de no dañar los equipos instalados dentro del suelo.

Una vez colocados los 50 cm de suelo de fundación y los instrumentos de medición para la primera capa de relave, la probeta es pesada, registrando su masa antes de la depositación de los relaves.

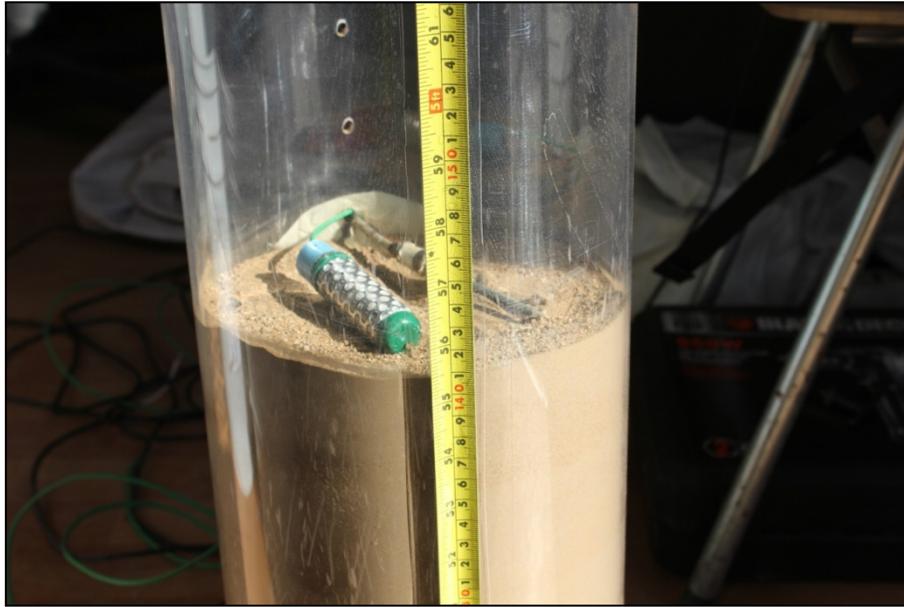


Figura 22: Metodología de ensayo – Colocación de suelo de fundación

4. Depositación de relaves: Sobre el suelo de fundación se deposita una capa de entre 7 a 10 cm de relave, dependiendo del ensayo. La capa es instrumentada con un sensor de temperatura, un sensor de humedad EC-5 y un tensiómetro 200SS Watermark. La capa se deja secar por una cantidad de días variable, dependiendo del ensayo.

Posteriormente se deposita una nueva capa de relave sobre la capa previamente depositada, instrumentándola con un sensor de humedad EC-5. Este proceso se repite 2 o 3 veces dependiendo del total de capas depositadas.

La probeta se pesó antes de la depositación de una nueva capa e inmediatamente después de la depositación de la misma.

En el caso en que se utilice una lámpara infrarroja para la realización del ensayo, ésta se instala luego de la depositación de cada capa a una distancia de 50 cm por sobre la superficie libre del relave.

La depositación de los relaves para los distintos ensayos realizados, se presenta en el

Anexo A.

5. Durante la ejecución de cada ensayo se realizó un registro visual de la variación de la superficie húmeda y se controló la evaporación instalando una probeta de agua en el lugar del ensayo y registrando su variación en peso.
6. Término de ensayo: Al término de cada ensayo se desarma la probeta cuidadosamente. En los lugares en donde se ubican los sensores de humedad EC 5, se toma muestras de suelo y se mide su humedad gravimétrica.

4.2.1 Calibración de sensores de humedad

Al término de cada ensayo se calibraron los sensores de humedad EC-5 de Decagon tanto para el suelo de fundación (a la humedad de confección de la probeta), como para los relaves. Se calibraron seis sensores (sensores 1, 2, 3, 4, 5, 6) para medir la humedad del suelo de fundación y se calibraron cinco sensores (sensores 7, 8, 9, 10, 11) para medir la humedad de los relaves.

Con el fin de simular las condiciones del ensayo, la calibración de los sensores de humedad se realizó dentro de una probeta especialmente fabricada para este fin, permitiendo recrear las condiciones de colocación de los sensores en el ensayo principal.



Figura 23: Probeta de calibración de sensores

A continuación se presenta la metodología utilizada para la calibración de los sensores:

1. Se prepararon muestras de suelo y relaves de humedad variable en los rangos de humedades esperados para el ensayo.
2. Se introdujo los sensores dentro del suelo y relave para cada humedad, registrando los voltajes de cada sensor. La Figura 24 muestra los sensores inmersos en el suelo de fundación durante la calibración.



Figura 24: Calibración de sensores de humedad

3. Se toma una muestra de suelo y se registra su masa. Esta muestra se seca en un horno a 90° durante 24 horas. Luego, se registra nuevamente la masa de la muestra y se calcula la humedad a partir de la ecuación (6).
4. Se grafican los voltajes y humedades. Después, se aproxima la curva a una relación lineal que se utilizará durante el ensayo para estimar la humedad del suelo en el tiempo. A modo de ejemplo Figura 25 presenta la curva de calibración para el suelo de fundación obtenida con el agua de proceso del Relave 2.

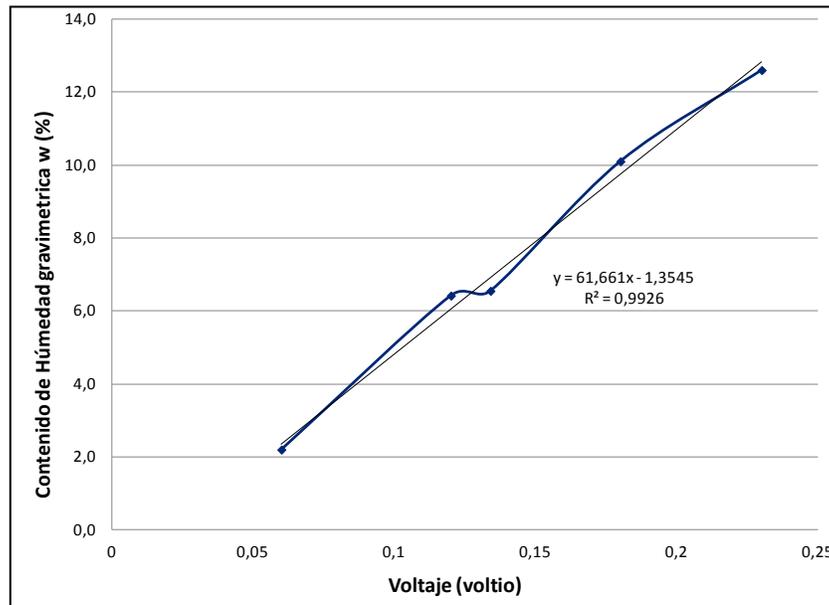


Figura 25: Curva de calibración – Suelo de fundación

4.3 Programa de ensayos

El programa considera la ejecución de cuatro ensayos, dos por tipo de relave a dos distintas concentraciones de sólidos (relave convencional y relave espesado TTD).

Los ensayos con Relave 1 se realizaron a una concentración de sólidos $C_p = 70\%$ (relave espesado TTD) para el ensayo número 1, y $C_p = 62\%$ (relave convencional) para el ensayo número 2.

Los ensayos con Relave 2 se realizaron a una concentración de sólidos $C_p = 72\%$ (relave espesado TTD) para el ensayo número 1, y $C_p = 62\%$ (relave convencional) para el ensayo número 2.

La Tabla 13 presenta la altura de suelo, densidad húmeda y humedad de confección de cada ensayo. Además se presenta la altura, medida desde la base de la probeta, donde se colocaron los sensores de humedad EC-5 y tensiómetros 200S.

Tabla 13: Resumen de confección de ensayos de infiltración.

Ensayo	Altura de suelo (cm)	Densidad húmeda (gr/cm^3)	Humedad inicial –suelo de fundación w (%)	Ubicación sensores EC 5 (cm)	Ubicación tensiómetro 200SS (cm)
Relave 1 $C_p = 70\%$	50,5	1,64	1%	Suelo: 10, 20, 30, 41, 45 y 49 Relave: 55, 64, 71 y 79	Suelo: 41 Relave: 55 y 71
Relave 1 $C_p = 62\%$	51,5	1,71	1%	Suelo: 10, 20, 30, 40, 45 y 49 Relave: 55, 64, 71 y 79	Suelo: 10
Relave 2 $C_p = 72\%$	52,5	1,63	2%	Suelo: 10, 20, 30, 39, 44 y 50 Relave: 55, 63, 71 y 76	Suelo: 10 Relave: 55
Relave 2 $C_p = 62\%$	52,5	1,62	2%	Suelo: 10, 20, 32, 41, 46 y 50 Relave: 54, 62, y 69	Suelo: 20 Relave: 55

4.4 Ensayo Relave 1

A continuación se presenta un resumen de los ensayos realizados con el Relave 1.

4.4.1 Ensayo Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=70\%$

Sobre el suelo natural, se depositaron 4 capas de relave espesado TTD de 10 cm de espesor. El intervalo de depositación fue aproximadamente 1 semana entre cada capa, dejando secar la última capa durante 24 días.

Debido a que no se registró la masa de cada capa durante la realización del ensayo, ésta se estimó en función de la concentración de sólidos de la pulpa, volumen depositado y el peso específico del relave y el agua, la que se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14: Estimación masa depositada – Relave 1 – $C_p=70\%$

CAPA	Masa pulpa (kg)	Masa relave (kg)	Masa agua (kg)
1	5,45	3,82	1,64
2	5,35	3,75	1,61
3	5,25	3,67	1,57
4	5,09	3,56	1,53
Total	21,14	14,80	6,35

La Figura A1, A2 y A3 pertenecientes al Anexo A muestran fotografías del ensayo durante el tiempo de ejecución.

4.4.2 Ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=62\%$

Sobre el suelo natural, se depositaron 3 capas de relave espesado de 10 cm de espesor sobre el suelo natural. El intervalo de depositación fue de 7 a 9 días entre cada capa.

La masa total de pulpa, relave y agua depositados en cada capa se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Estimación masa depositada – Relave 1 – $C_p=62\%$

CAPA	Masa pulpa (kg)	Masa relave (kg)	Masa agua (kg)
1	5,15	3,19	1,96

CAPA	Masa pulpa (kg)	Masa relave (kg)	Masa agua (kg)
2	4,61	2,86	1,75
3	4,84	3,00	1,84
Total	14,60	9,05	5,55

La Figura A4 y A5, pertenecientes al Anexo A muestran fotografías del ensayo durante el tiempo de ejecución.

4.5 Ensayo Relave 2

Para la realización de los ensayos se utilizó una lámpara infrarroja (250 W) a 50 cm sobre la superficie libre del relave. La lámpara se encendió diariamente durante 8 horas.

A continuación se presenta un resumen de los ensayos realizados con Relave 2.

4.5.1 Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=72\%$

Sobre el suelo natural, se depositaron 4 capas de relave espesado de 7 cm de espesor sobre el suelo natural. El intervalo de depositación fue variable. La condición utilizada para la depositación de una nueva capa fue que el relave previamente depositado alcanzará su límite de contracción.

La masa total de pulpa, relave y agua depositados en cada capa se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16: Estimación masa depositada – Relave 2 – $C_p=72\%$

CAPA	Masa pulpa (kg)	Masa relave (kg)	Masa agua (kg)
1	4,56	3,28	1,27
2	4,10	2,95	1,14
3	4,50	3,24	1,26
4	3,90	2,81	1,09
Total	17,06	12,28	4,79

La Figura A6, A7 y A8 pertenecientes al Anexo A, muestran fotografías del ensayo durante el tiempo de ejecución.

4.5.2 Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=62\%$

Sobre el suelo natural, se depositaron 3 capas de relave de 10 cm de espesor sobre el suelo natural. El intervalo de depositación fue variable, intentando replicar la secuencia utilizada en el ensayo de $C_p=72\%$ (tiempo entre descargas).

La masa total de pulpa, relave y agua depositados en cada capa se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17: Estimación masa depositada – Relave 2 – $C_p=62\%$

CAPA	Masa pulpa (kg)	Masa relave (kg)	Masa agua (kg)
1	5,18	3,21	1,97
2	4,50	2,79	1,71
3	4,80	2,97	1,82
Total	14,48	8,98	5,50

La Figura A9 y A10 pertenecientes al Anexo A, muestran fotografías del ensayo durante el tiempo de ejecución.

5 Resultados del programa de ensayos

5.1 Resultados de ensayo con Relave 1

Los sensores de humedad EC-5 registraron correctamente la humedad al ubicarlos dentro del suelo de fundación. Sin embargo, los sensores ubicados dentro de los relaves, registraron un valor constante durante el análisis de datos debido a la alta concentración de agua de mar dentro de los relaves. Esto llevó a salir de los rangos de medición de datos.

5.1.1 Ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p = 70\%$

La evaporación promedio durante la realización del ensayo corresponde a 2,2 mm/día. La evaporación se midió por diferencia de pesos en la probeta de agua potable ubicada bajo las mismas condiciones del ensayo.

El sensor de humedad EC-5 ubicado a 10 cm sobre la base de la probeta (sensor 1), mantuvo un comportamiento oscilante durante el ensayo, por lo que sus datos no fueron considerados en el presente análisis.

La humedad de saturación del relave corresponde a $w_{sr} = 23,9\%$ y la del suelo de fundación es $w_{ss} = 24\%$.

Al término del ensayo se midió el contenido de humedad gravimétrico w (%) dentro del relave el que varió entre un 22,8 % a un 23,5%.

La Figura 27 muestra los resultados obtenidos por los sensores de humedad EC-5, el tensiómetro 200SS Watermark y el sensor de temperatura utilizados en el ensayo. A partir de ellos se puede destacar lo siguiente:

- La humedad máxima controlada por los sensores de humedad EC-5 fue de aproximadamente 14%, registrada por el sensor 6 ubicado 2 cm bajo la interfaz suelo-relave ($H=48$ cm). Esto se observó cada vez que se depositó una nueva capa de relave.
- El gráfico Sensor de temperatura, presenta la variación de la temperatura dentro del relave durante la realización del ensayo. La temperatura mínima alcanzada fue 17 °C y la máxima 34°C. El promedio fue 24,1°C.
- Los tensiómetros presentan en la mayoría de las mediciones, valor 0, lo que de acuerdo a las especificaciones del manual de usuario del instrumento, corresponde a suelo saturado (entre 0 a 10 cbar). Es posible observar que en el tensiómetro ubicado en ($H=40$ cm) se saturó luego de la depositación de la segunda capa de relave.

La Figura 28 muestra el perfil de humedad en profundidad del suelo de fundación para cada capa de relave depositada. La Tabla 18 presenta un resumen de los resultados previo a la depositación de una nueva capa de relave.

Tabla 18: Resultados – Probeta Relave 1 – $C_p=70\%$.

CAPA	Profundidad infiltración (cm)	Humedad final suelo w (%)	Humedad final relave w (%)	Figura
1	19,5 ($H=31$)	6 – 7	NR	A1 (b)
2	35,5 ($H=15$)	6 – 10	NR	A2 (b)
3	48,5 ($H=2$)	8 – 10	NR	A2 (c)
4	50,5 ($H=15$)	8 – 10	22 - 24	A3 (b)

NR: No registrado

La profundidad de infiltración, se mide desde interfaz suelo-relave. H se mide desde base de probeta.

Figuras A1 a A3 pertenecen al Anexo A.

Se estimó la cantidad de agua dentro de la probeta para cada capa depositada, manteniendo la relación entre evaporación media en vaso de evaporación y la evaporación dentro de la columna suelo-relave encontrada en el ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=62\%$.

Posteriormente, utilizando las humedades medidas por los sensores EC-5 dentro del suelo de fundación, se calculó la masa de agua retenida dentro del mismo. Los resultados se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Distribución de agua dentro de columna – Relave 1 (Cp=70%)

CAPA	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo
	Capa (g)	Total (g)	Total (g)
1	1394,8	1394,8	607,5
2	1287,2	2682,0	1191,1
3	1292,2	3974,2	1743,5
4	545,3	4519,4	1936,4

La Ecuación 22 muestra la relación numérica entre el agua total acumulada dentro de la columna (suelo y relave) A_t y el agua acumulada dentro del suelo A_s . Esta relación se obtiene de la curva con mejor ajuste para los datos graficados en la Figura 26. Este cálculo implica que la humedad gravimétrica dentro de los relaves al término del ensayo es 20%, valor menor al realmente medido. Sin embargo, debido a que la evaporación dentro del relave no se midió directamente, este resultado es del orden esperado.

$$A_s = 0,43 \cdot A_t + 24,61 \quad (22)$$

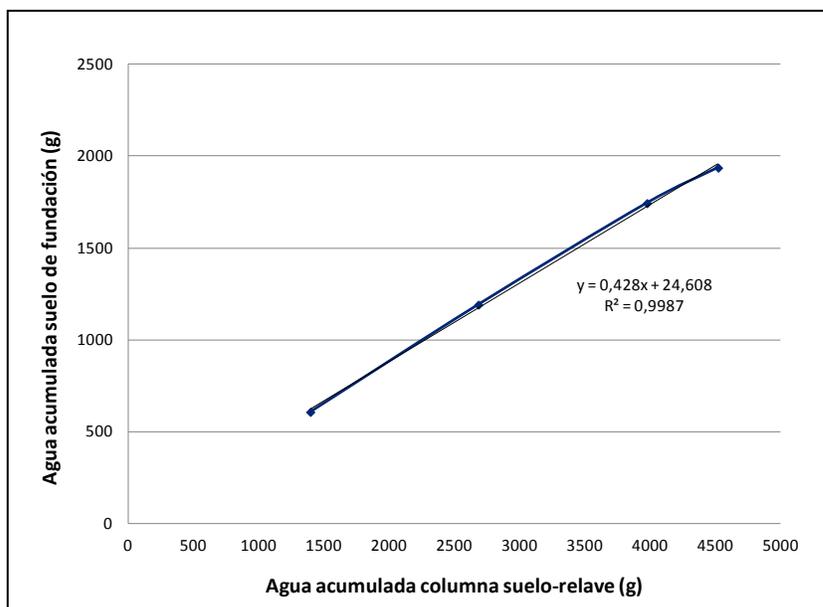


Figura 26: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 1 (Cp=70%)

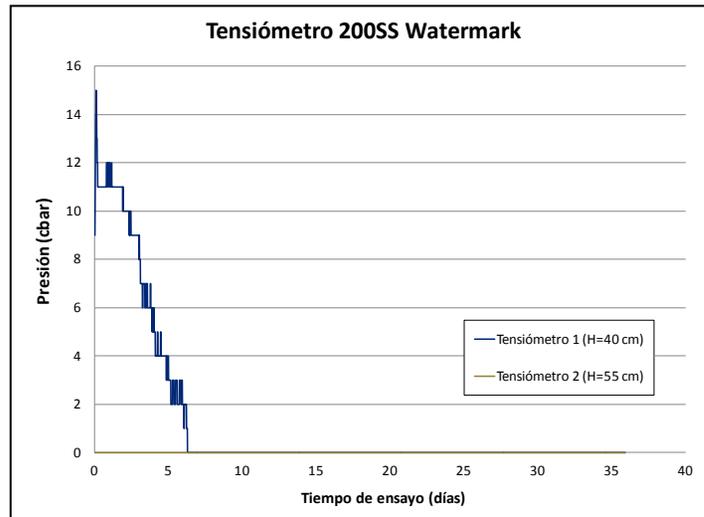
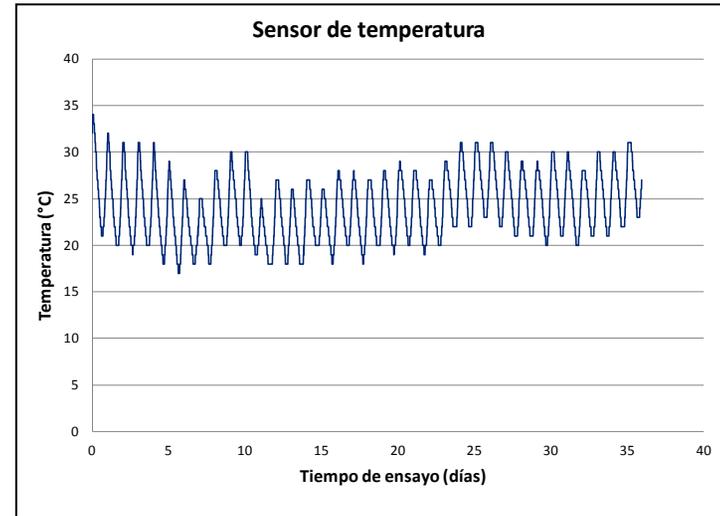
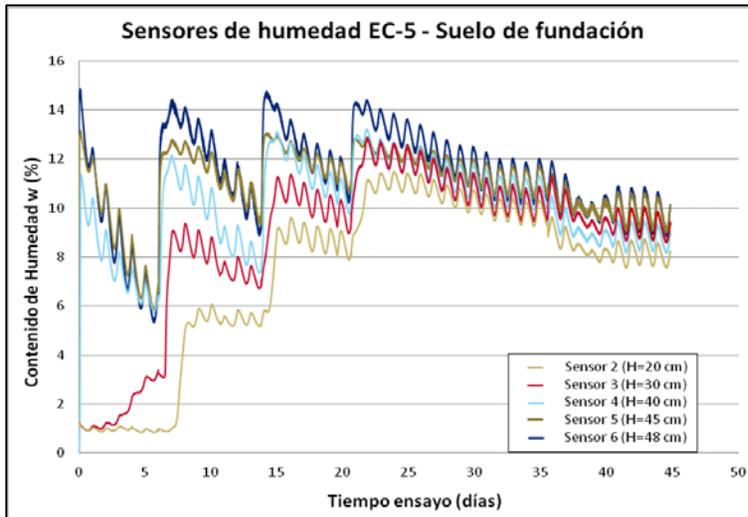


Figura 27: Mediciones sensores - Relave 1 - $C_p=70\%$

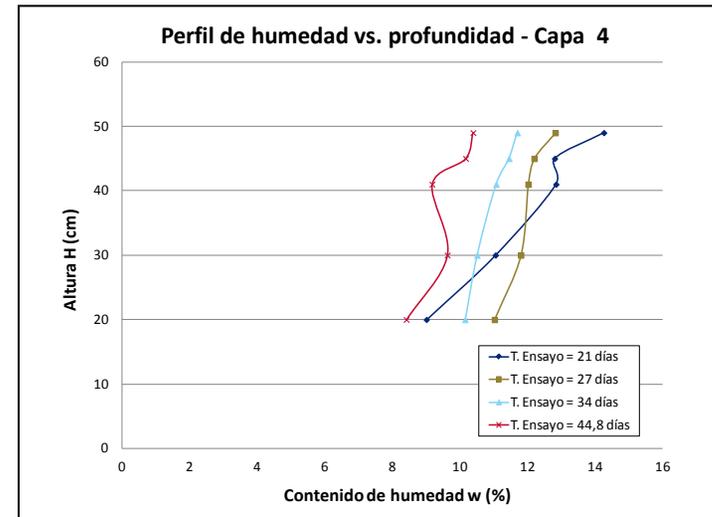
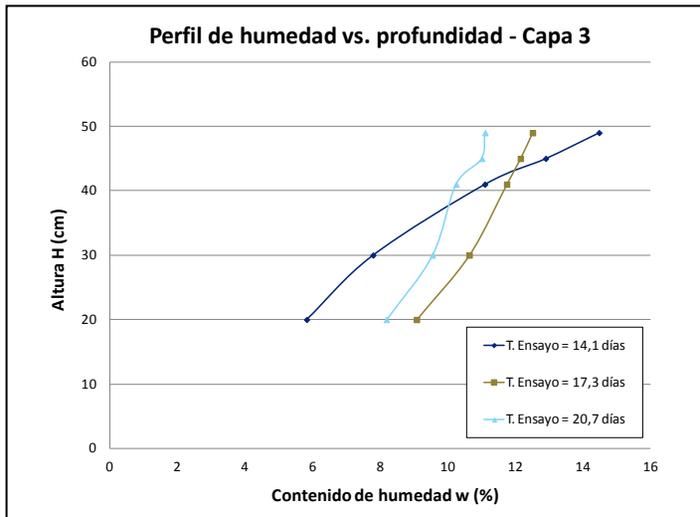
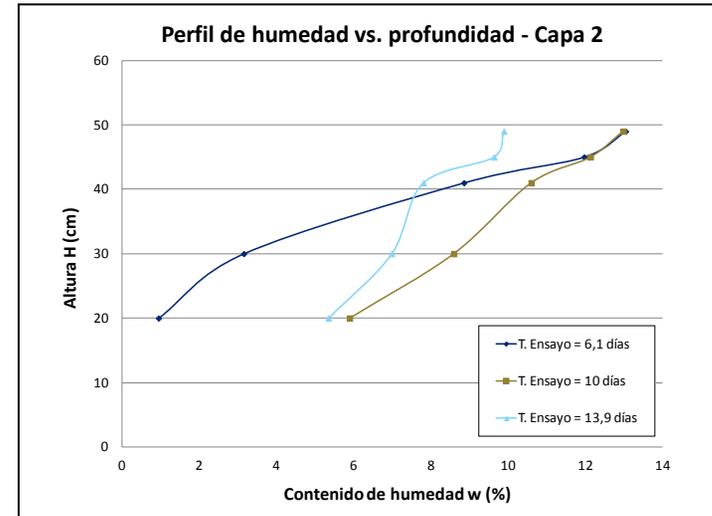
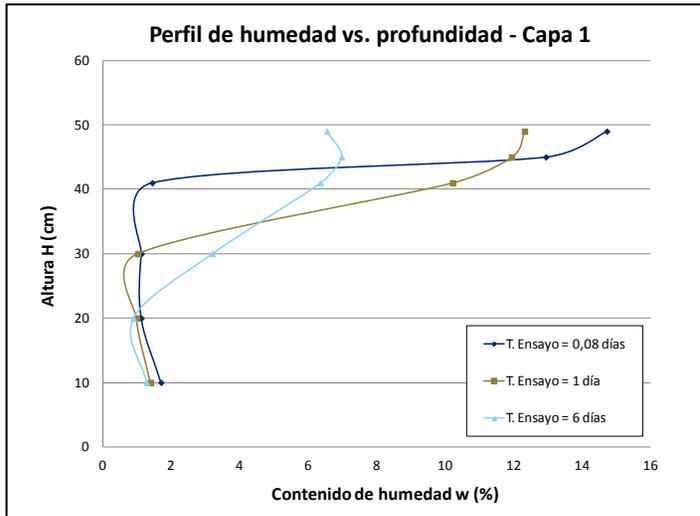


Figura 28: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 1 - Cp=70%

5.1.2 Ensayo con Relave 1 a concentración de sólidos $C_p=62\%$.

La evaporación promedio durante la realización del ensayo corresponde a 1,07 mm/día. Durante la prueba se midió la variación de la masa de la probeta. Los resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20: Medición de masa – Probeta Relave 1 – $C_p=62\%$

CAPA	Masa inicial (kg)	Masa final (kg)	Evaporación total (kg)	Tasa de evaporación (mm/día)
1	33,86	33,66	0,2	0,79
2	38,27	38,11	0,16	0,79
3	42,89	42,46	0,43	0,58

La tasa de evaporación promedio dentro de los relaves corresponde a 0,66 mm/día, lo que equivale aproximadamente a un 62% de la tasa de evaporación promedio de la probeta con agua durante el mismo intervalo de tiempo. Al término del ensayo se midió el contenido de humedad dentro del relave el que varió entre un 24,7 % a un 25,3%.

La humedad de saturación del relave corresponde a $w_{sr} = 24,8\%$ y la del suelo de fundación es $w_{ss} = 21,4\%$.

La Figura 30 muestra los resultados obtenidos de los sensores de humedad EC-5, sensor de temperatura y tensiómetro 200SS Watermark, utilizados en el ensayo. A partir de ellos se puede destacar lo siguiente:

- La humedad máxima registrada por los sensores de humedad EC-5 fue de aproximadamente 17%, registrada por el sensor 1 ubicado 40 cm bajo la interfaz suelo-relave ($H=10$ cm). Esto se debe a que parte del agua descargada se acumulo en el fondo de la probeta.
- El gráfico “Sensor de temperatura”, presenta la variación de la temperatura dentro del relave durante la realización del ensayo. La temperatura mínima alcanzada fue 9 °C y la máxima 27°C. El promedio fue 17,1°C.
- El tensiómetro ubicado a una altura $H=10$, marcó hasta aproximadamente el día 11 un valor de 254, lo que de acuerdo al manual de instrumento, corresponde a un suelo muy seco (sobre 80 cbar). Posteriormente, el sensor marca el valor 0 que corresponde a un suelo saturado. Este resultado es consecuente con el aumento de humedad registrado por el sensor EC-5.

La Figura 31 muestra el perfil de humedad en profundidad del suelo de fundación para cada capa de relave depositada. La Tabla 21 presenta un resumen de los resultados previo a la depositación de una nueva capa de relave.

Tabla 21: Resultados – Probeta Relave 1 – Cp=62%.

CAPA	Profundidad infiltración (cm)	Humedad final suelo w (%)	Humedad final relave w (%)	Figura
1	29 (H=22,5)	6 – 7	NR	A4 (a)
2	50,5 (H=0)	8	NR	A4 (c)
3	50,5 (H=0)	10	NR	A5 (b)

NR: No registrado

La profundidad de infiltración, se mide desde interfaz suelo-relave. H se mide desde base de probeta.

Figuras A4 a A5 pertenecen al Anexo A.

Durante la depositación de la Capa 3, el contenido de humedad al interior de la probeta aumento de forma constante hasta la altura H=20 cm. Bajo esta cota se comenzó a acumular el exceso de agua que no alcanzó a ser retenida por el suelo de fundación. En una situación normal, esta agua habría infiltrado a profundidades superiores a las que permite medir el ensayo, para poder cuantificar esta infiltración extra sería necesaria la instalación de un sistema de drenaje bajo la probeta.

A partir de los resultados, se realizó un balance de aguas dentro de la probeta, al total de agua depositada se le restó la evaporación, obteniendo el agua retenida dentro de la columna suelo-relave. Luego, utilizando las humedades medidas por los sensores EC-5 dentro del suelo de fundación, se calculó la masa de agua retenida dentro del mismo y la humedad de los relaves. Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22: Distribución de agua dentro de columna – Relave 1 (Cp=62%)

CAPA	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo	Humedad relave w (%)
	Capa (g)	Total (g)	Total (g)	
1	1760	1760	903,5	26,8
2	1590	3350	1694,4	27,3
3	1410	4760	2322,2	24,8

La Ecuación 23 muestra la relación numérica entre el agua total acumulada dentro de la columna (suelo y relave) A_t y el agua acumulada dentro del suelo A_s . Esta relación se obtiene de la curva con mejor ajuste para los datos graficados en la Figura 29 . Este cálculo implica que la humedad gravimétrica dentro de los relaves al término del ensayo es 24%, valor equivalente al medido al término del ensayo 23%.

$$A_s = 0,47 \cdot A_t + 82,43 \quad (23)$$

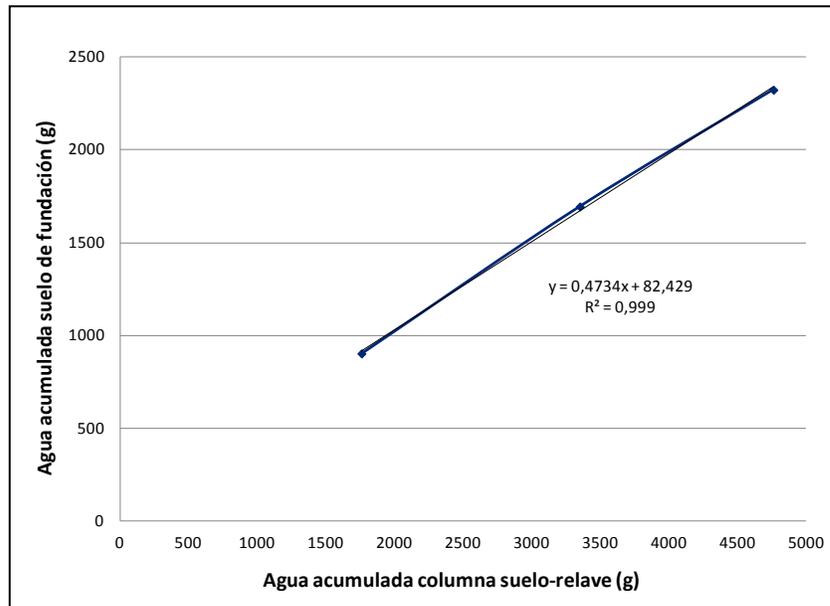


Figura 29: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 1 (Cp=62%)

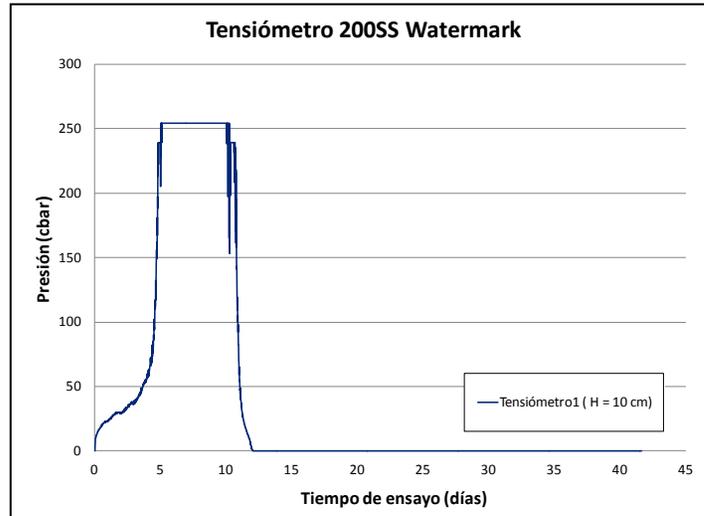
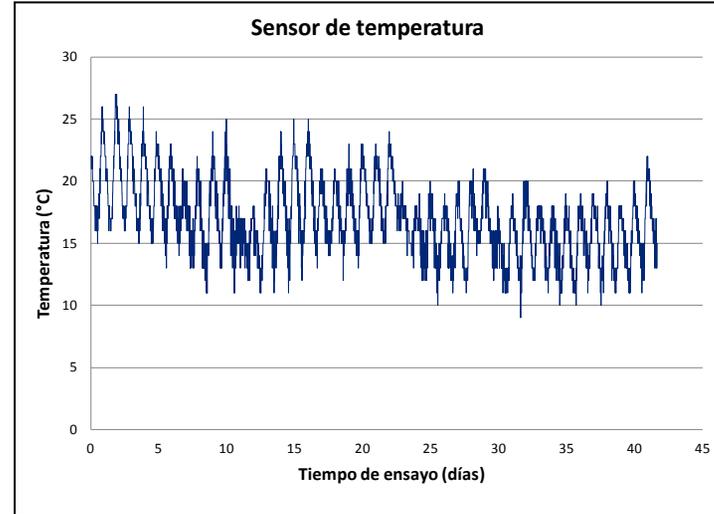
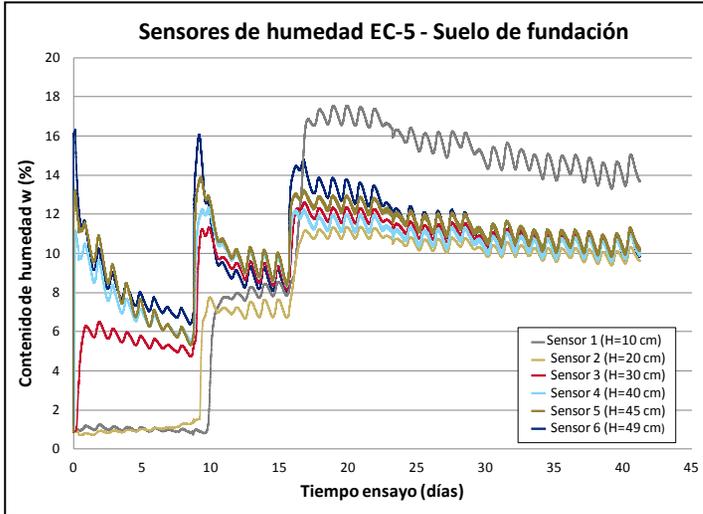


Figura 30: Mediciones sensores - Relave 1 - Cp=62%

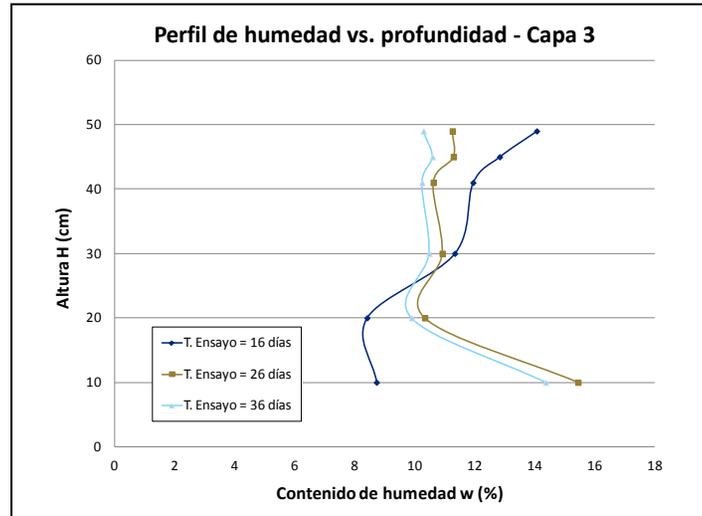
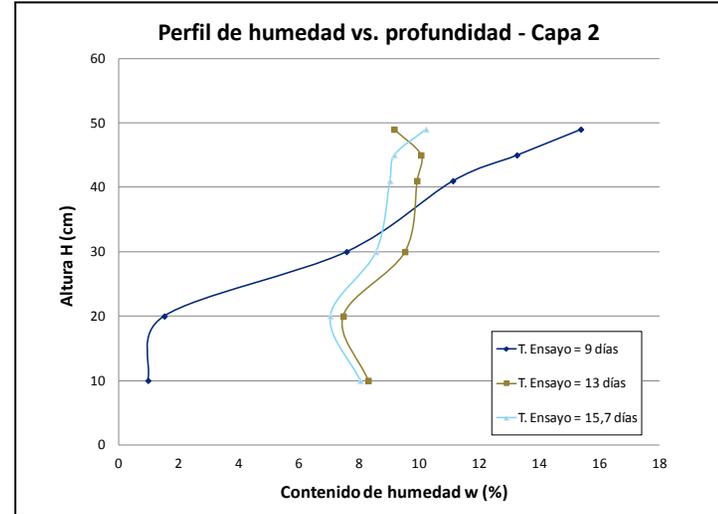
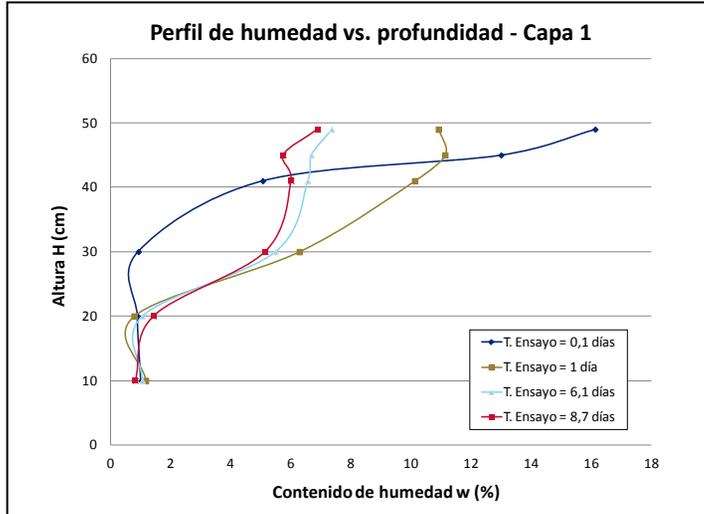


Figura 31: Perfis de umidade em profundidade – Ensayo con Relave 1 - Cp=62%

5.2 Resultados de ensayo con Relave 2

5.2.1 Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=72\%$.

La evaporación promedio durante la realización del ensayo corresponde a 2,42 mm/día. Durante la prueba se midió la variación de la masa de la probeta. Los resultados se presentan en la Tabla 23. La tasa de evaporación promedio dentro de los relaves corresponde a 2,84 mm/día, un 17% mayor a la tasa de evaporación promedio de la probeta con agua durante el mismo intervalo de tiempo. Este resultado es anómalo si se compara con los resultados obtenidos en los ensayos de evaporación. En ellos se obtuvo que la evaporación de los relaves es menor o igual a la de la probeta con agua bajo las mismas condiciones. Este resultado pudo deberse a la presencia de aire a mayor temperatura encapsulado en la probeta sobre el relave (quedan entre 20 a 40 cm de aire sobre la superficie libre del relave), o a que las paredes de la probeta se calentaran con la lámpara infrarroja y transmitieron calor al relave aumentando la evaporación.

La humedad de saturación del relave corresponde a $w_{sr} = 25,2\%$ y la del suelo de fundación es $w_{ss} = 24,9\%$.

Tabla 23: Medición de masa – Probeta Relave 2 – $C_p=72\%$

CAPA	Masa inicial (kg)	Masa final (kg)	Evaporación total (kg)	Tasa de evaporación (mm/día)
1	33,46	33,10	0,36	2,40
2	37,26	36,68	0,58	2,23
3	41,24	40,76	0,48	2,41
4	44,74	43,78	0,96	4,17

El sensor de humedad EC-5 ubicado a 55 cm (sensor 7) sobre la base de la probeta, no registró datos durante el tiempo de secado de la primera capa de relave depositado, debido a un problema en la conexión de los cables.

La Figura 33 muestra los resultados obtenidos de los sensores de humedad EC-5, sensor de temperatura y tensiómetro 200SS Watermark, utilizados en el ensayo. A partir de ellos se puede destacar lo siguiente:

- La humedad máxima controlada por los sensores de humedad EC-5 en el suelo de fundación fue de aproximadamente 12%, registrada por el sensor 1 ubicado a 2 cm bajo la interfaz suelo-relave ($H=50$ cm).

- La humedad mínima controlada por los sensores de humedad EC-5 en el relave fue de aproximadamente 15%, registrada por el sensor 8 ubicado a una altura H=63 cm sobre la base de la probeta.
- El gráfico Sensor de temperatura, presenta la variación de la temperatura dentro del relave durante la realización del ensayo. La temperatura mínima alcanzada corresponde a 10°C y la máxima a 26°C. El promedio fue de 14,1°C. Sin embargo, debido a que el sensor de temperatura estaba en la primera capa de relave, durante las siguientes depositaciones la temperatura de las capas superiores probablemente fue mayor.
- El tensiómetro ubicado a una altura H=10 fue aumentando su medición de presión a medida que llegaba al equilibrio con el suelo circundante llegando a medir 200 cbar. De acuerdo al manual del instrumento, se trata de un suelo muy seco (sobre 80 cbar), acorde con el 2% de humedad constante que tuvo el suelo a esa profundidad.
- El tensiómetro ubicado a una altura H=55 marcó presiones de entre 0 a 20 cbar, lo que corresponde a un rango entre suelo saturado a muy húmedo.

La Figura 34 muestra el perfil de humedad en profundidad del suelo de fundación y de los relaves para cada capa depositada. La Tabla 24 presenta un resumen de los resultados previo a la depositación de una nueva capa de relave.

Tabla 24: Resultados – Probeta Relave 2 – Cp=72%.

CAPA	Profundidad infiltración (cm)	Humedad final suelo w (%)	Humedad final relave w (%)	Figura
1	13,5 (H=37)	6 – 7	16	A6 (b)
2	18,5 (H=32)	8	10 – 15	A7 (a)
3	19,5 (H=31)	8	18	A7 (c)
4	20,5 (H=30)	8	18	A8 (b)

La profundidad de infiltración, se mide desde interfaz suelo-relave. H se mide desde base de probeta. Figuras A6 a A8 pertenecen al Anexo A.

Durante el tiempo entre capas, tanto suelos como relaves, equilibraron su contenido de humedad en torno al valor de sus respectivas capacidades de campo.

A partir de los resultados, se realizó un balance de aguas dentro de la probeta, siguiendo la metodología presentada en Sección 5.1.2. Los resultados se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25: Distribución de agua dentro de columna – Relave 2 (Cp=72%)

CAPA	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo	Humedad relave
	Capa (g)	Total (g)	Total (g)	w (%)
1	910	910	331,9	17,6
2	560	1470	475,7	15,2
3	780	2250	514,1	18,2
4	130	2380	540,4	15,0

La humedad del relave calculada difiere en algunos puntos con las mediciones de los sensores de humedad para los relaves. Esto puede atribuirse a la precisión de la balanza con la que se pesa la probeta completa, la que corresponde a 0,1 kg. De todas formas los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud a los registrados por los sensores de humedad EC-5.

La Ecuación 24 muestra la relación numérica entre el agua total acumulada dentro de la columna (suelo y relave) A_t y el agua acumulada dentro del suelo A_s . Esta relación se obtiene de la curva con mejor ajuste para los datos graficados en la Figura 32.

$$A_s = 202,18 \cdot \ln(A_t) - 1030,60 \quad (24)$$

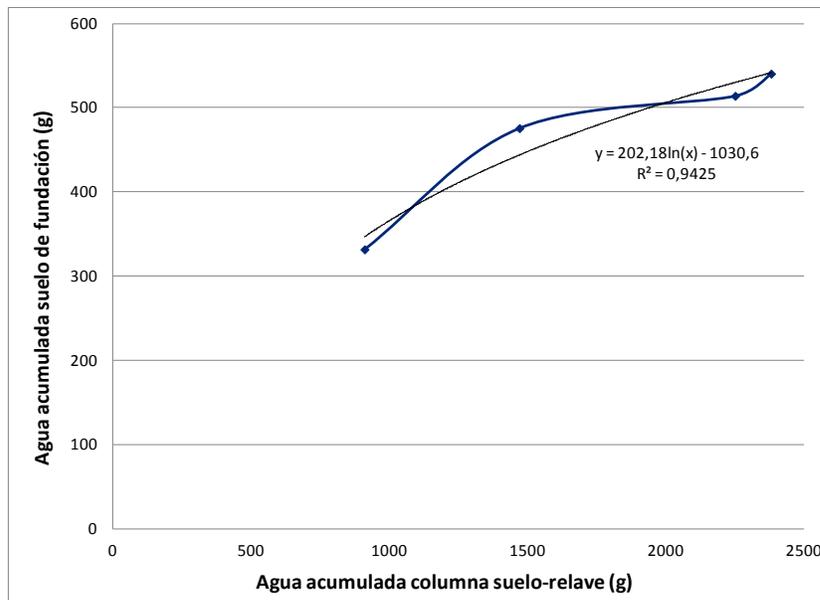


Figura 32: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 2 (Cp=72%)

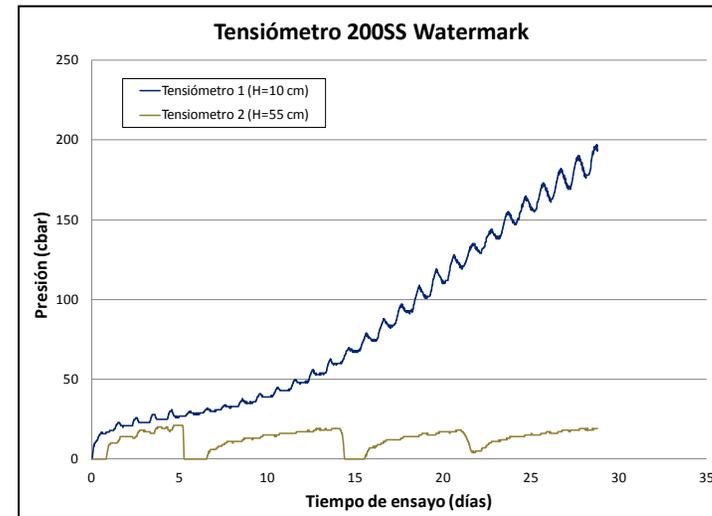
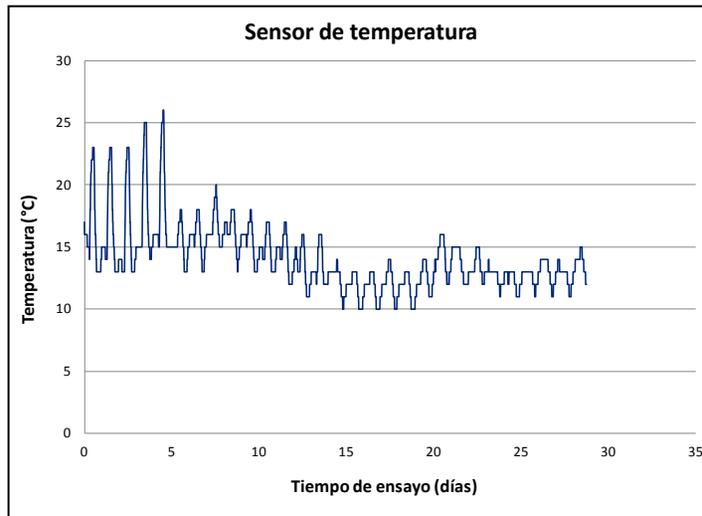
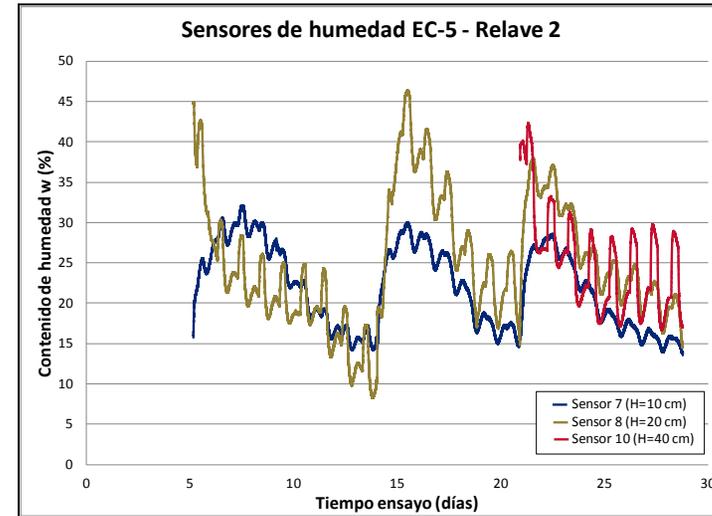
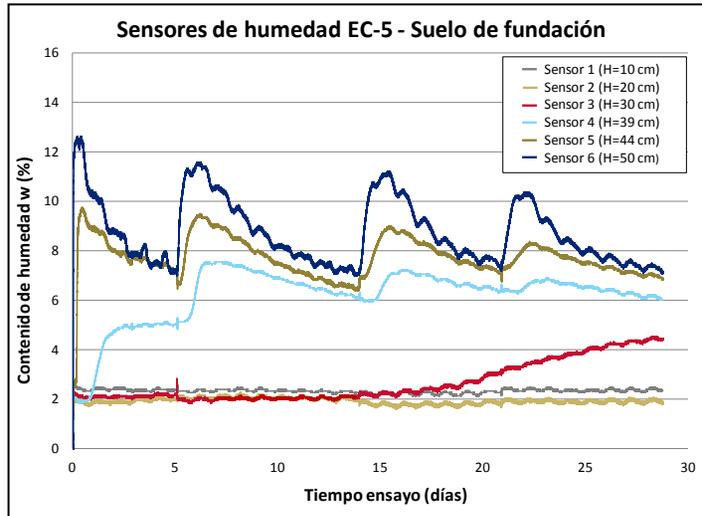


Figura 33: Mediciones sensores - Relave 2 - Cp=72 %

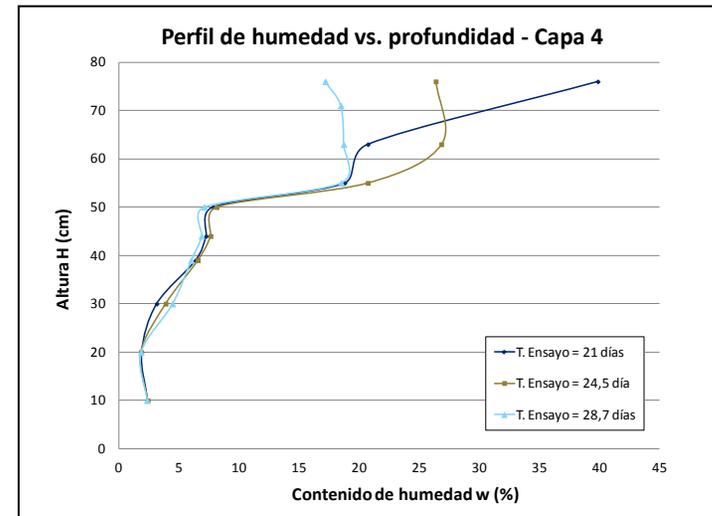
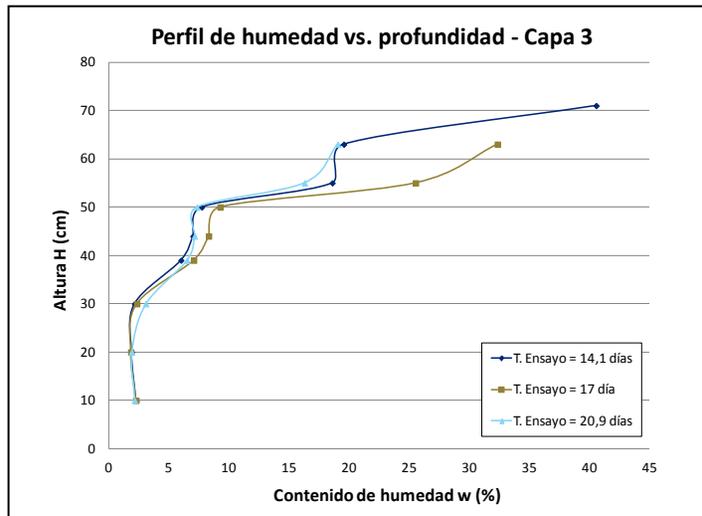
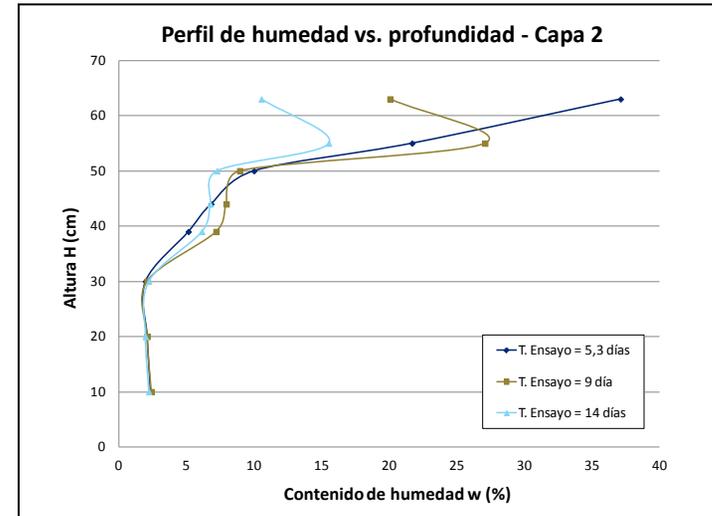
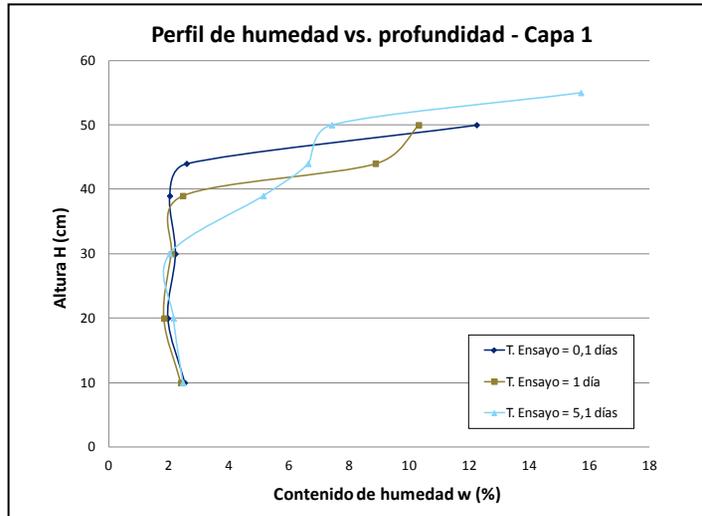


Figura 34: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 2 - $C_p=72\%$

5.2.2 Ensayo con Relave 2 a concentración de sólidos $C_p=62\%$.

La evaporación promedio durante la realización del ensayo corresponde a 1,61 mm/día. Este resultado es menor al obtenido para el ensayo realizado al Relave 2 a una concentración de sólidos del 72%, debido a que durante el tiempo de depositación de la primera capa, no funcionó la lámpara infrarroja. Durante la prueba se midió la variación de la masa de la probeta. Los resultados se presentan en la Tabla 26.

La humedad de saturación del relave corresponde a $w_{sr} = 28,4\%$ y la del suelo de fundación es $w_{ss} = 25,3\%$.

Tabla 26: Medición de masa – Probeta Relave 2 – $C_p=62\%$

CAPA	Masa inicial (kg)	Masa final (kg)	Evaporación total (kg)	Tasa de evaporación (mm/día)
1	33,86	33,62	0,24	1,39
2	38,18	37,52	0,66	3,22
3	42,36	42,04	0,32	1,09

La tasa de evaporación promedio dentro de los relaves corresponde a 1,82 mm/día, 13% mayor a la tasa de evaporación promedio de la probeta con agua durante el mismo intervalo de tiempo.

La Figura 36 muestra los resultados obtenidos de los sensores de humedad EC-5, sensor de temperatura y tensiómetro 200SS Watermark, utilizados en el ensayo. A partir de ellos se puede destacar lo siguiente:

- La humedad máxima controlada por los sensores de humedad EC-5 en el suelo de fundación fue aproximadamente 12%, registrada por el sensor 1 ubicado 2 cm bajo la interfaz suelo-relave ($H=50$ cm).
- La humedad mínima controlada por los sensores de humedad EC-5 en el relave fue aproximadamente 12%, registrada por el sensor 8 ubicado a una altura $H=62$ cm sobre la base de la probeta.
- El gráfico Sensor de temperatura, presenta la variación de la temperatura dentro del relave durante la realización del ensayo. La temperatura mínima alcanzada corresponde a 7°C y la máxima a 22°C . El promedio fue de $13,5^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, debido a que el sensor de temperatura estaba en la primera capa de relave, durante las siguientes depositaciones, la temperatura de las capas superiores probablemente fue mayor.

- El tensiómetro ubicado a una altura H=10 marcó presiones de alrededor de 200 cbar durante los primeros 8 días de ensayo. De acuerdo al manual de instrumento, corresponde a un suelo muy seco (sobre 80 cbar), acorde con el 2% de humedad constante que tuvo el suelo a esa profundidad. Luego y como consecuencia de la llegada del frente húmedo a la cota del sensor, éste comenzó a marcar valores 0 lo que corresponde a un suelo saturado.
- El tensiómetro ubicado a una altura H=55 marcó presiones de entre 0 a 20 cbar, lo que corresponde a un rango entre suelo saturado a muy húmedo.

La Figura 37 muestra el perfil de humedad en profundidad del suelo de fundación y de los relaves para cada capa depositada. La Tabla 27 presenta un resumen de los resultados previo a la depositación de una nueva capa de relave.

Tabla 27: Resultados – Probeta Relave 2 – Cp=62%.

CAPA	Profundidad infiltración (cm)	Humedad final suelo w (%)	Humedad final relave w (%)	Figura
1	30 (H=22,5)	8	23	A9 (b)
2	45,5 (H=7)	7 - 8	10 – 20	A10 (a)
3	52,5 (H=0)	8	24	A10 (c)

La profundidad de infiltración, se mide desde interfaz suelo-relave. H se mide desde base de probeta. Figuras A9 a A10 pertenecen al Anexo A.

A partir de los resultados, se realizó un balance de aguas dentro de la probeta siguiendo la metodología presentada en Sección 5.1.2. Los resultados se presentan en la Tabla 28 .

Tabla 28: Distribución de agua dentro de columna – Relave 2 (Cp=62%)

CAPA	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo-Relave	Agua retenida Suelo	Humedad relave w (%)
	Capa (g)	Total (g)	Total (g)	
1	1730	1730	891,5	26
2	1050	2780	1308,5	24
3	1500	4280	1509,8	30

La humedad del relave calculada difiere en algunos puntos con las mediciones de los sensores de humedad para los relaves. Esto puede atribuirse a la precisión de la balanza con la que se pesa la probeta completa, la que corresponde a 0,1 kg y a posibles deficiencias en la calibración del Sensor 8. De todas formas, los

resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud a los registrados por los sensores de humedad EC-5.

La Ecuación 25 muestra la relación numérica entre el agua total acumulada dentro de la columna (suelo y relave) A_t y el agua acumulada dentro del suelo A_s . Esta relación se obtiene de la curva con mejor ajuste para los datos graficados en la Figura 35.

$$A_s = 685,83 \cdot \ln(A_t) - 4192,3 \tag{25}$$

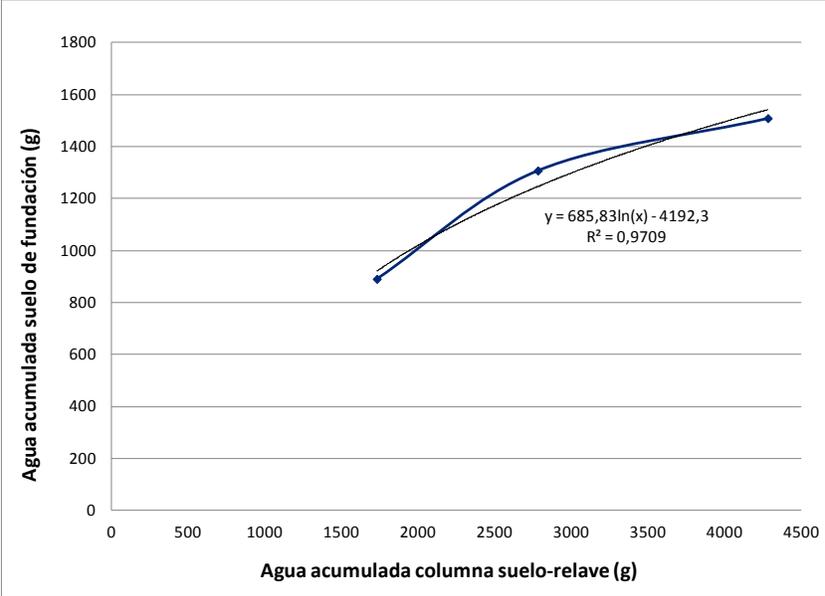


Figura 35: Agua en columna versus agua en suelo – Relave 2 (Cp=62%)

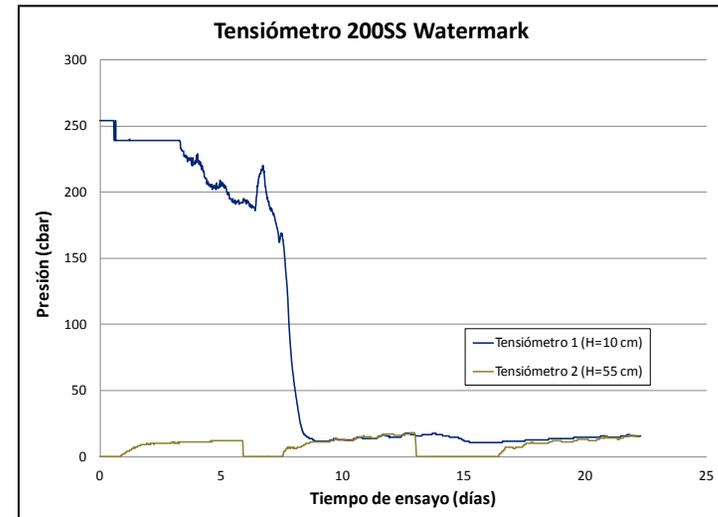
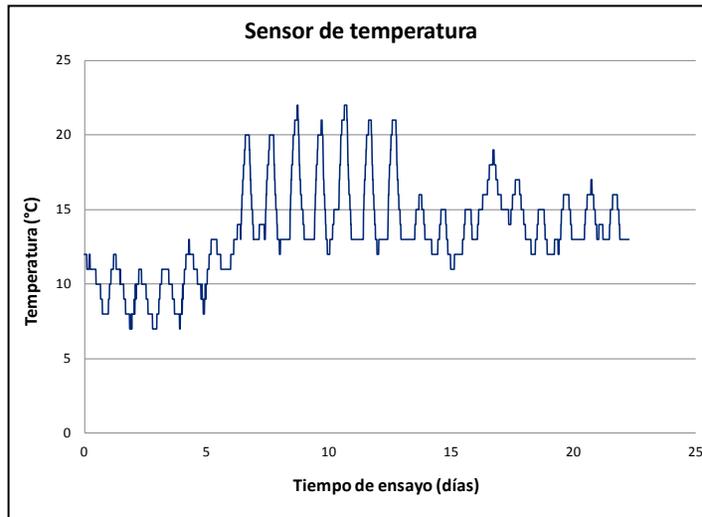
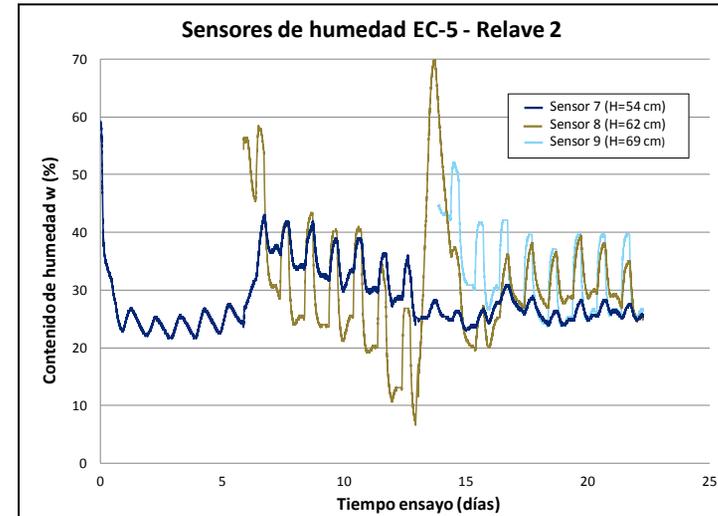
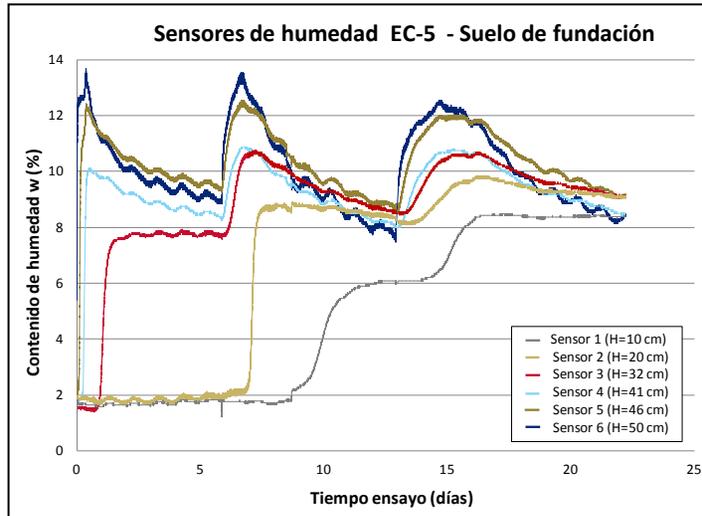


Figura 36: Mediciones sensores - Relave 2 - Cp=62 %

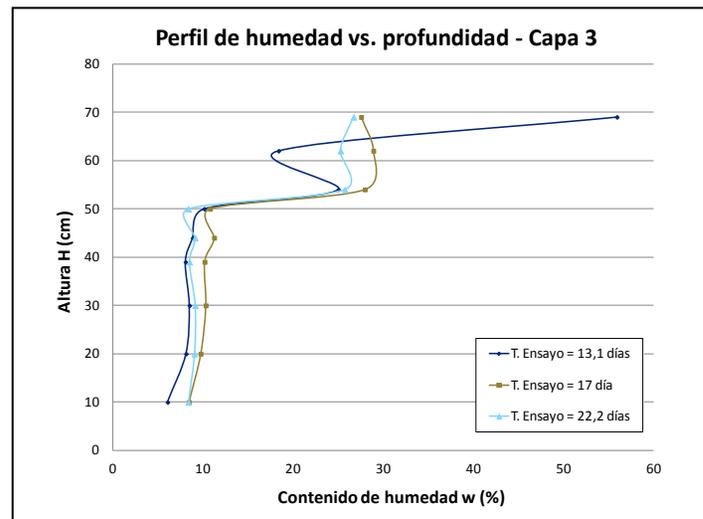
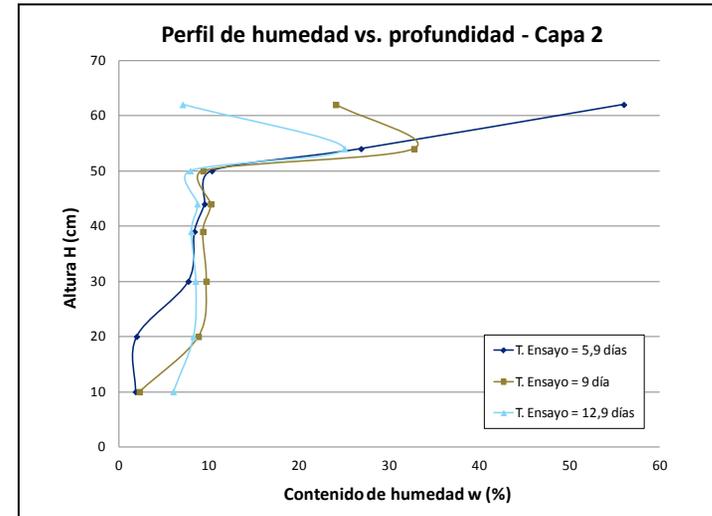
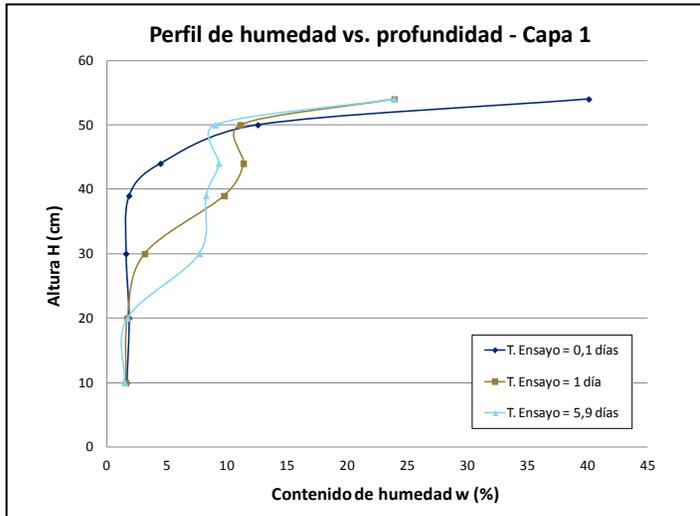


Figura 37: Perfiles de humedad en profundidad – Ensayo con Relave 2 - $C_p=62\%$

5.3 Comentarios generales

Los sensores ubicados en los 10 cm superiores del suelo de fundación, aumentan rápidamente su contenido de humedad después de cada depositación de relaves. Después, su humedad comienza a bajar, principalmente debido a drenaje e infiltración en el suelo más profundo. En general, se observó que después de la depositación de una nueva capa de relave, el agua drenó hasta que el perfil de suelo equilibró su contenido de humedad en un valor cercano a su capacidad de campo, correspondiente a un contenido de humedad gravimétrica de 7,5 %.

Se observa que a medida que se depositan las siguientes capas de relave, los sensores de humedad más profundos aumentan su contenido de humedad. Luego, es posible estimar el intervalo de tiempo que demora el agua en llegar hasta estos sensores. Este intervalo de tiempo disminuye a medida que se depositan las capas, lo que implica que la conductividad hidráulica del suelo aumenta cuando crece el contenido de humedad del suelo.

A partir del balance de agua realizado para cada ensayo, se encontró una relación numérica que vincula la cantidad total de agua depositada en la columna suelo-relave A_t con el agua retenida dentro del suelo de fundación A_s .

Para el Relave 1, la curva que mejor se ajusta a los datos es una línea recta. La forma de la curva es consecuente con las mediciones de los tensiómetros dentro del relave, los que midieron suelo saturado durante todo el ensayo. Al estar saturados, todo el exceso de agua drena libremente al suelo de fundación.

Para el Relave 2, la curva que mejor se ajusta a los datos es una función logarítmica, la cantidad de agua traspasada por las nuevas capas al suelo de fundación es decreciente. Esto se debe a que la humedad de los relaves es menor a la humedad de saturación, permitiendo retener parte del agua de la nueva capa y evitando su flujo hacia el subsuelo. En este punto, es importante señalar que mientras mayor es la capacidad de retención de agua dentro de los relaves y menor su humedad, menor es el agua traspasada al subsuelo.

Durante la depositación de la primera capa y debido a que la conductividad hidráulica del relave es mayor a la evaporación, el agua no retenida en los relaves drena libremente. Es posible encontrar una relación numérica entre la profundidad alcanzada por la infiltración y la cantidad de agua depositada. Esta relación se presenta en la Figura 38. En general, el contenido de humedad alcanzado por el suelo de fundación luego de alcanzar el equilibrio, corresponde a un valor cercano a su capacidad de campo 7,5%.

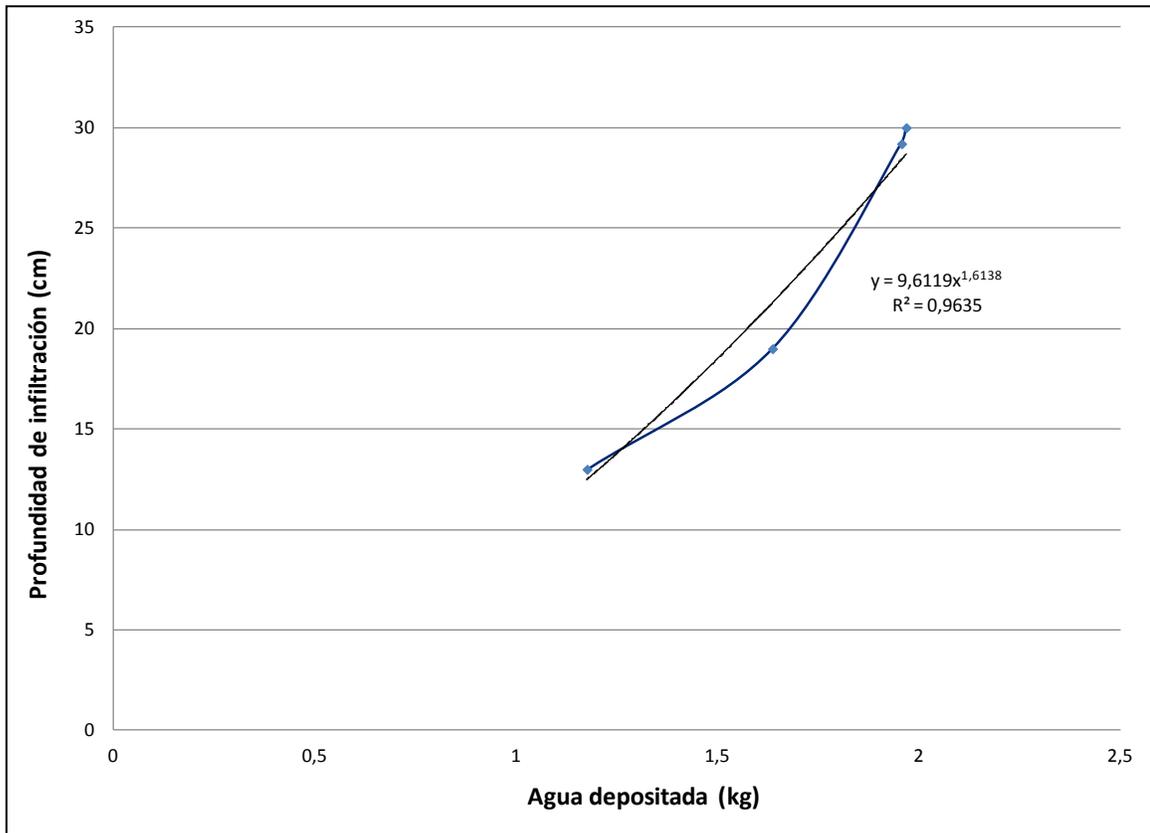


Figura 38: Profundidad de infiltración vs. Agua depositada – Capa 1

Para el Relave 1, el relave convencional y el espesado con metodología TTD, infiltraron los 50 cm de suelo. Sin embargo, la masa de relave TTD depositado corresponde a 1,85 veces la del relave convencional.

Para el Relave 2, la infiltración del relave espesado TTD alcanzó una profundidad de 24,5 cm, mientras que el relave convencional infiltró 50 cm.

El análisis realizado considera relaves convencionales a una alta concentración de sólidos ($C_p=62\%$). Habitualmente éstos son descargados a concentraciones cercanas a un 55%. Además, la situación evaluada corresponde a una situación intermedia entre el punto de descarga y la laguna de aguas claras presentada en la Figura 4. Debido al gradiente hidráulico permanente es imposible controlar las infiltraciones, bajo la laguna de aguas claras

La tasa de evaporación promedio de los ensayos es baja comparada por ejemplo, con la tasa de evaporación promedio anual de la región de Coquimbo que es del orden de 4 mm/día.

El ensayo de evaporación demostró que el contenido de sales disminuye la evaporación, tanto en agua como en los relaves. Debido a esto se aumenta la cantidad de agua en el sistema suelo-relave, lo que favorece la infiltración.

6 Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones del estudio:

Se desarrolló de forma satisfactoria una instalación experimental que permitió medir la infiltración del agua proveniente de relaves espesados TTD y de relaves convencionales, con concentraciones de sólido variable de entre 62% a 72%, cuando son depositados sobre un suelo de fundación. El espesor de relave máximo depositado alcanzó una altura aproximada de 30 cm (ensayo con Relave 1 – Cp=70%).

Para todos los ensayos realizados, la infiltración producida por los relaves convencionales superó la infiltración producida por los relaves espesados TTD, aun cuando la concentración de sólidos de los relaves convencionales utilizados se encuentra dentro del límite superior para este tipo de relaves, este resultado era esperable debido a que los relaves espesados TTD poseen menos agua que los relaves convencionales.

Para el Relave 1, tanto el relave convencional como el espesado con metodología TTD, infiltraron el total de la muestra de suelo. Es necesario mencionar que la masa de relave espesado TTD corresponde a 1,85 veces la masa de relave convencional depositado y que en la probeta con relave convencional, en su parte inferior, se acumuló un exceso de agua que permitiría alcanzar una infiltración extra de 12%.

Para el Relave 2, la infiltración alcanzada en la prueba con relave espesado TTD alcanzó aproximadamente el 50% de la muestra de suelo, mientras que durante la prueba con relave convencional, se infiltró el total de la muestra de suelo. La razón entre la masa de relave espesado y la masa del relave convencional equivale a 1,36.

La profundidad a la que llega la infiltración dentro del suelo de fundación depende de la cantidad de agua liberada por el relave hacia el subsuelo y de la curva de retención de agua del suelo. En general, se observó que después de la depositación de una nueva capa de relave, el agua drenó hasta que el perfil de suelo equilibró su contenido de humedad en un valor cercano a su capacidad de campo, correspondiente a un contenido de humedad gravimétrica de 7,5 %.

A partir del balance de agua realizado para cada ensayo, se encontró una relación numérica que vincula la cantidad total de agua depositada en la columna suelo-relave A_t con el agua retenida dentro del suelo de fundación A_s , las que se presentan a continuación.

- Relave 1 – Cp = 70% $A_s = 0,43 \cdot A_t + 24,61$
- Relave 1 – Cp = 62% $A_s = 0,47 \cdot A_t + 82,43$
- Relave 2 – Cp = 72% $A_s = 202,18 \cdot \ln(A_t) - 1030,6$
- Relave 2 – Cp = 62% $A_s = 685,83 \cdot \ln(A_t) - 4192,3$

Para el Relave 1, la curva que mejor se ajusta a los datos es una línea recta. La forma de la curva es consecuente con las mediciones de los tensiómetros dentro del relave las que corresponden a un suelo saturado. Para el Relave 2, la curva corresponde a una función logarítmica, es posible apreciar que la cantidad de agua traspasada por las nuevas capas al suelo de fundación es una función decreciente.

A partir de las relaciones numéricas presentadas anteriormente, es posible estimar la profundidad de infiltración de las nuevas capas de relave para cada ensayo, asumiendo que la humedad final del suelo posterior al drenaje libre es similar a su capacidad de campo.

La cantidad de agua liberada por el relave depende de los siguientes factores:

- La concentración de sólidos del relave. A menor concentración de sólidos, mayor la cantidad de agua liberada.
- El espesor de la capa de relave depositada. A mayor espesor de la capa, mayor es la masa de agua liberada.
- El espesor del relave sobre el suelo de fundación y la humedad a la que se encuentre: Al igual que en el caso del suelo de fundación, el agua proveniente de las nuevas capas de relave drena a través del relave depositado anteriormente. Si éste tiene la capacidad de retener parte del agua, la cantidad de agua que podrá infiltrar al suelo de fundación disminuye. Este resultado se observa en los ensayos realizados con Relave 2, mostrando profundidades de infiltración decrecientes con cada nueva capa de relave depositada. Para el Relave 2 – $C_p=72\%$, las últimas dos capas depositadas infiltraron 1 cm adicional.

El diseño de los depósitos de relaves espesados TTD, supone que los relaves alcanzan su límite de contracción previo a la depositación de nuevas capas de relave, considerando la evaporación media del lugar donde se emplaza el depósito en la estimación del tiempo de secado. De acuerdo a los resultados del estudio, se recomienda alcanzar la Capacidad de Campo del material previo a la depositación de nuevas capas de relave. En el caso de los relaves analizados, el valor de la Capacidad de Campo es menor al límite de contracción, permitiendo un diseño conservador.

Cuando el agua de proceso sea agua de mar sin desalar, se deberá tomar en cuenta cómo la concentración de sales influye en el proceso de evaporación y en las curvas de retención de los materiales, esto último debido a la aparición del componente osmótico (ϕ_o) en el potencial hídrico del suelo presentado en la Ecuación (10). Existen procedimientos experimentales para estimar la curva de retención de agua en suelos como función de succiones totales. Un ejemplo de ello es el método de papel fieltro, el que se detalla en la norma ASTM D5298, en ella se describe el procedimiento de ensayo para determinar la succión mátrica (método de contacto) o la succión total del suelo (método sin contacto).

7 Recomendaciones para futuras investigaciones

A partir de la experiencia obtenida durante la realización del programa de ensayos, se presentan recomendaciones que pueden ser útiles en futuras investigaciones. Las recomendaciones se enmarcan en dos puntos principales: 1) Mejoras de la instalación experimental y 2) Directrices para siguientes investigaciones:

7.1 Mejoras de instalación experimental

- Incorporación de sistema de drenaje en el fondo del cilindro y sistema que permita medir la cantidad de agua que sale de la probeta.
- Homogenizar las condiciones de evaporación a las que se realizan los ensayos.
- Incorporar sistema de aislación térmica en las paredes del cilindro.
- El contenido de sales dentro del Relave 1 no permitió medir su variación de humedad con los sensores EC-5. Se recomienda, en el caso de usar agua de mar sin desalar como agua de proceso, utilizar sensores de humedad que no se vean afectados por el contenido de sal.

7.2 Directrices para siguientes investigaciones

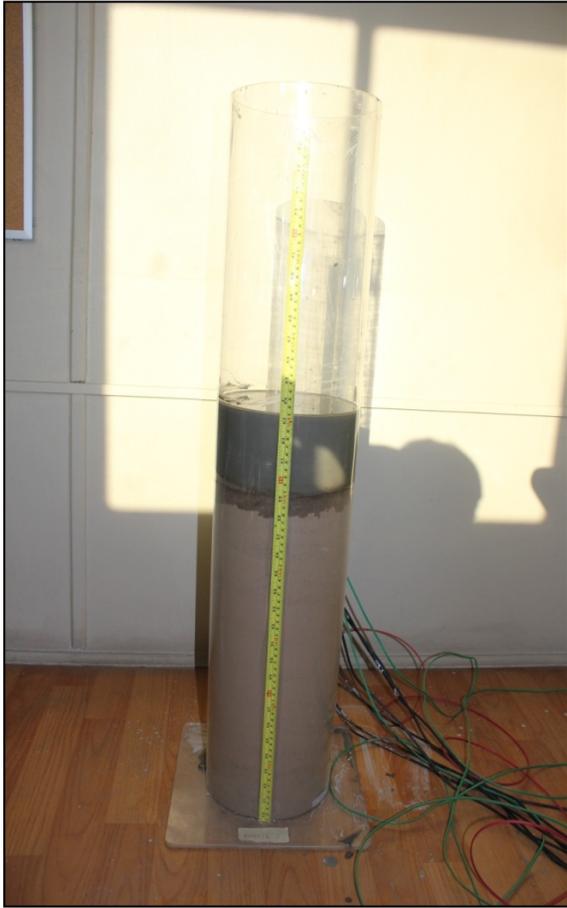
- Ampliar el rango de estudio, incorporando una variedad mayor de concentraciones de sólidos, suelos de fundación y tipos de relave.
- Repetir el ensayo variando el tipo de agua de proceso para el ensayo realizado con agua de mar.
- Estudiar la infiltración producida por la laguna de aguas claras en depósitos de relaves convencionales.

8 Bibliografía

1. Robinsky, Eli I.; (1999); Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry.
2. Boger, David; Paste and Thickened Tailings – a Guide; Chapter 3 Rheological Concepts.
3. Jewell, R.J. and Fourie, A.B. (eds) (2006) Paste and Thickened Tailings – A Guide, 2nd edition, Australian Centre for Geomechanics, Perth.
4. Fourie, A.B.; Perceived and realised benefits of paste and thickened tailings for surface deposition.
5. Davies, M. P. and S. Rice (2001). An alternative to conventional tailing management – “dry stack” filtered tailings, AMEC Earth & Environmental.
6. Theriault, J., J. Frostiak, et al. (2003). Surface Disposal of Past Tailings at the Bulyanhulu Gold Mine, Tanzania. Mining & the Environment III Conference: Sudbury 2003 - Mining and the Environment.
7. Tacey, W. and Ruse, B. (2006) Making tailings disposal sustainable; a key business issue, in Paste and Thickened Tailings – A Guide, 2nd edition.
8. Rogowski, A. S. (1971). Watershed physics: model of soil moisture characteristics.

9. Haverkamp, R., Leij, F. J., Fuentes, C., Sciortino, A., and Ross, P. J. 2005. Soil water retention: I. Introduction of a shape index. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 1881–1890.
10. Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J., and Yates, S. R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report EPA/600/2-91/065, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK.
11. Bustamante, H. (1986). Potencial del agua en el suelo. *Revista de la facultad de agronomía*. Pág. 27- 38.
12. Sillers W.S., Fredlund D.G. & Zakerzadeh N. (2001) “Mathematical Attributes of Some Soil-Water Characteristic Curve Models” *Unsaturated Soil Concepts and their Application in Geotechnical Practice*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
13. Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. and Chapuis, R.P. 2003. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6): 1104- 1122 (2003)
14. Fredlund, D. G., and Anqing Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, pp: 521-532.
15. Green, R.E. and Corey, J.C., 1971. Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods. *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 35, pp. 3-8.
16. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:892-898.
17. Rivera, Daniela and Paredes, Luis (2012); Estudio experimental del potencial de infiltración de relaves espesados con metodología TTD depositados directamente sobre suelos naturales.
18. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves (2007).
19. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Catastro nacional de depósitos de relaves – Depósitos activos y no activos, 2015.
20. Engels, J. (2005). Página web, <http://www.tailings.info/upstream.htm>.

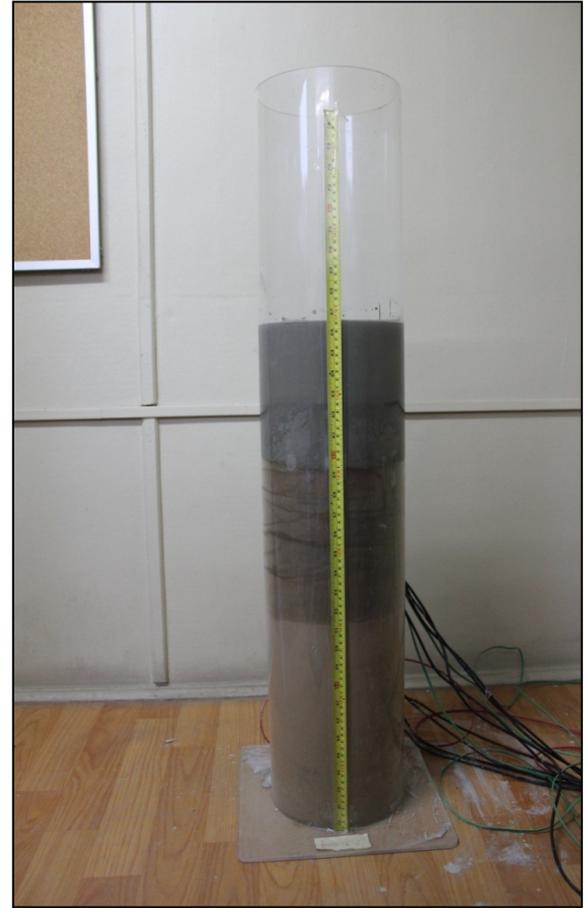
Anexo A: Registro Fotográfico de Ensayo de Infiltración en Suelos Naturales



(a)



(b)



(c)

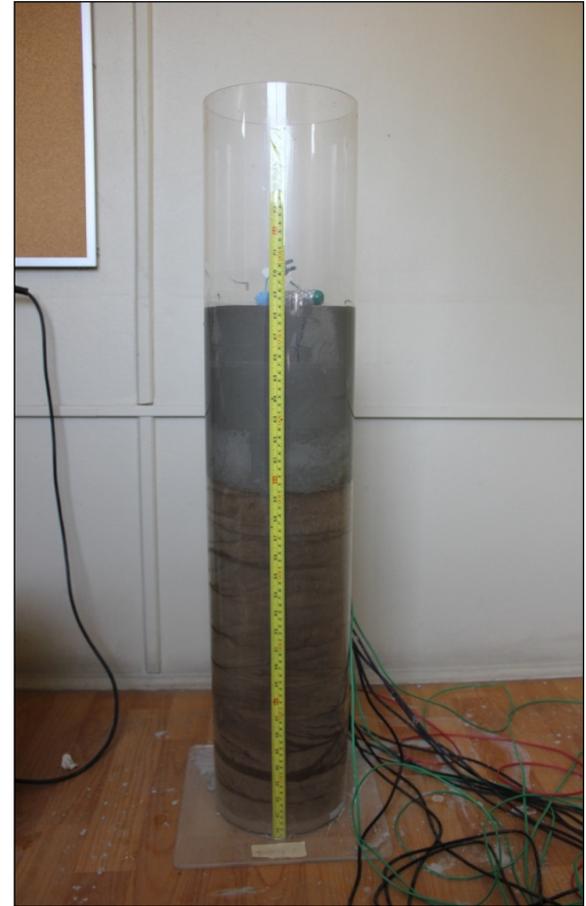
Figura A1: Deposición de relave R1 - $C_p=70\%$: (a) Deposición de capa 1, (b) Capa 1 a siete días de deposición, (c) Deposición de capa 2.



(a)



(b)



(c)

Figura A2: Depositación relave R1 - $C_p=70\%$: (a) Capa 2 a siete días de depositación, (b) Depositación de capa 3, (c) Capa 3 a siete días de depositación.

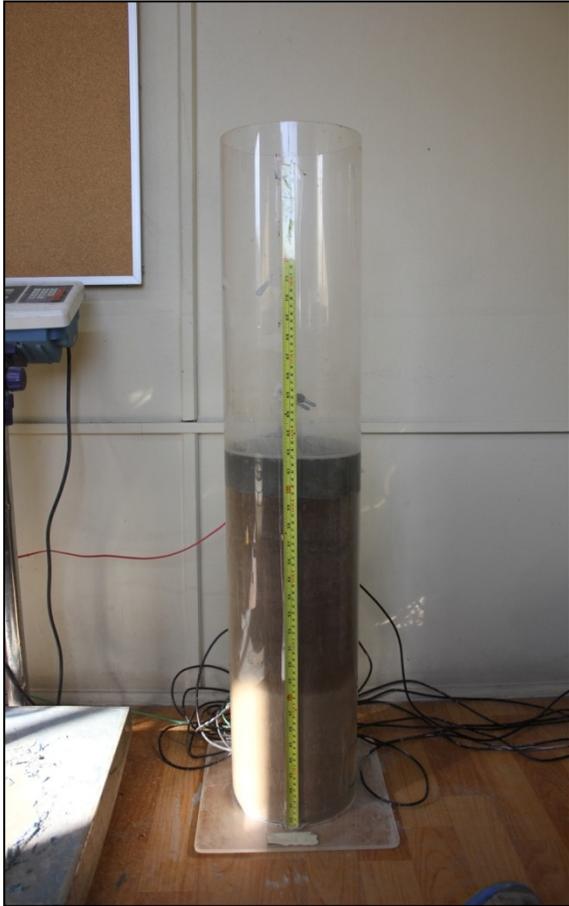


(a)



(b)

Figura A3: Deposición relave R1 - $C_p=70\%$: (a) Deposición de capa 4, (b) Capa 4 a veinticinco días de deposición.



(a)

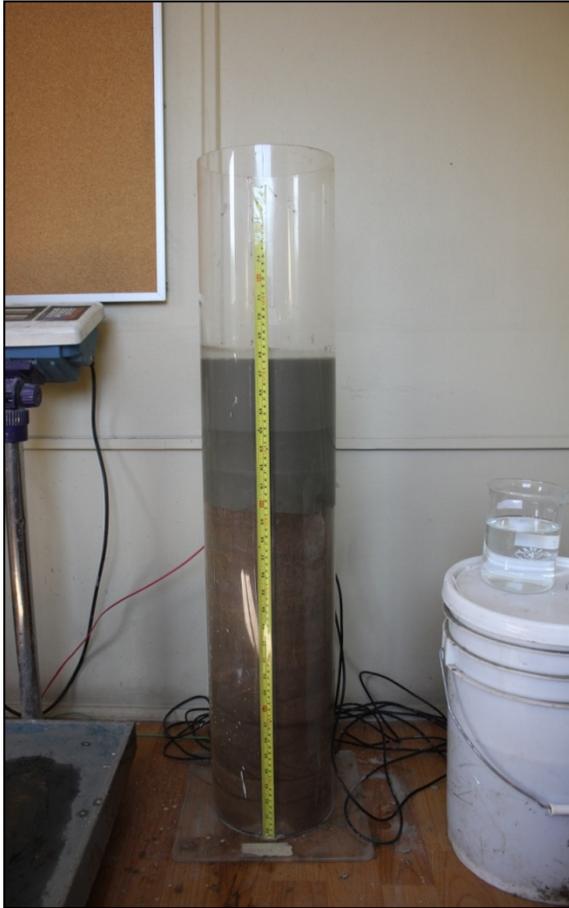


(b)



(c)

Figura A4: Depositación Relave 1 - $C_p=62\%$: (a) Capa 1 a nueve días de depositación, (b) Depositación capa 2, (c) Capa 2 a siete días de depositación.

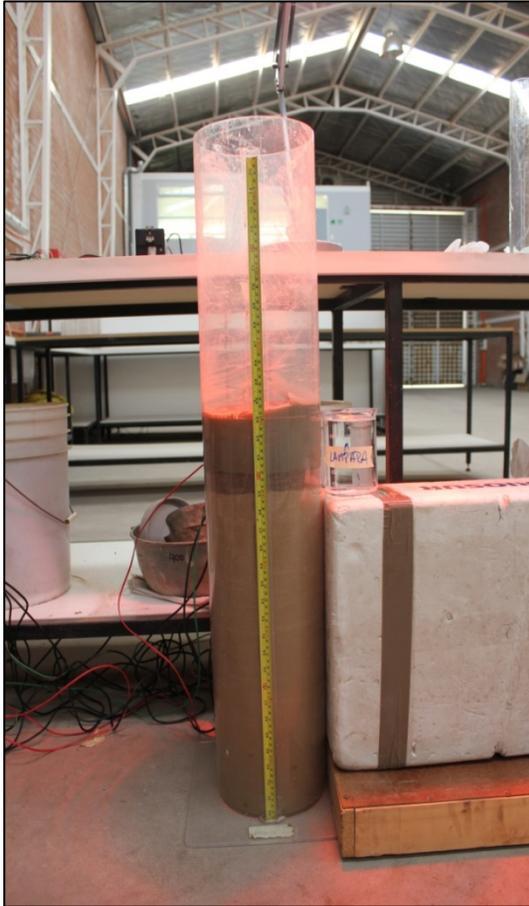


(a)



(b)

Figura A5: Deposición Relave 1 - $C_p=62\%$: (a) Deposición capa 3, (b) Capa 3 a veintiséis días de deposición.



(a)

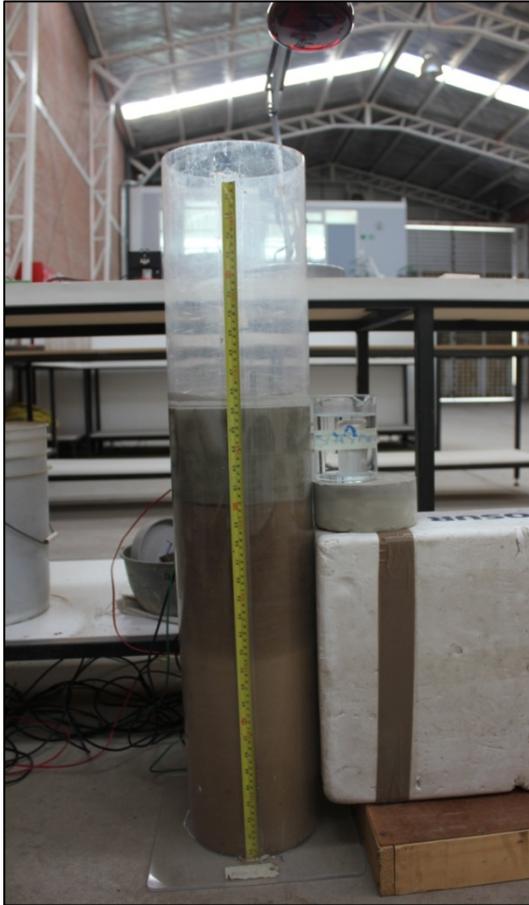


(b)



(c)

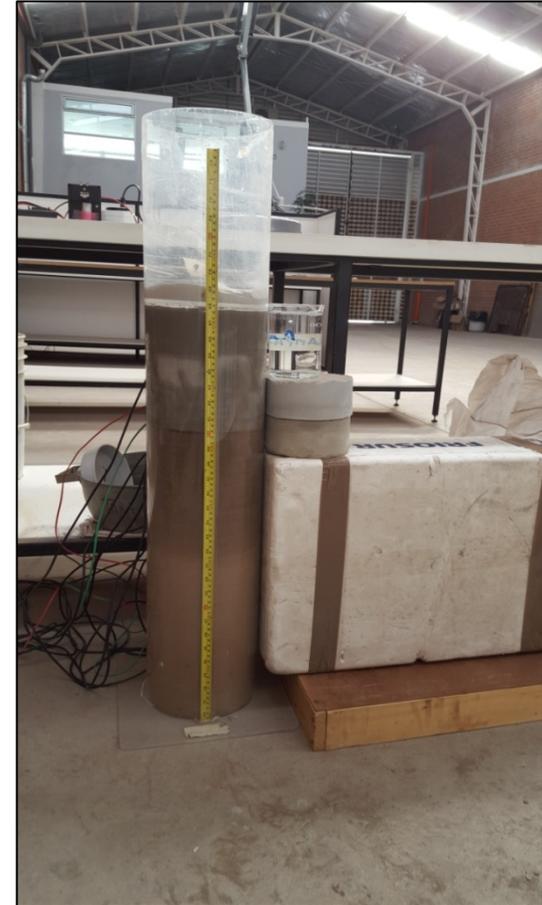
Figura A6: Deposición Relave 2 - $C_p=72\%$: (a) Deposición capa 1, (b) Capa 1 a cinco días de deposición, (c) Deposición capa 2.



(a)



(b)



(c)

Figura A7: Deposición Relave 2 - $C_p=72\%$: (a) Capa 2 a ocho días de deposición, (b) Deposición capa 3, (c) Capa 3 a seis días de deposición.

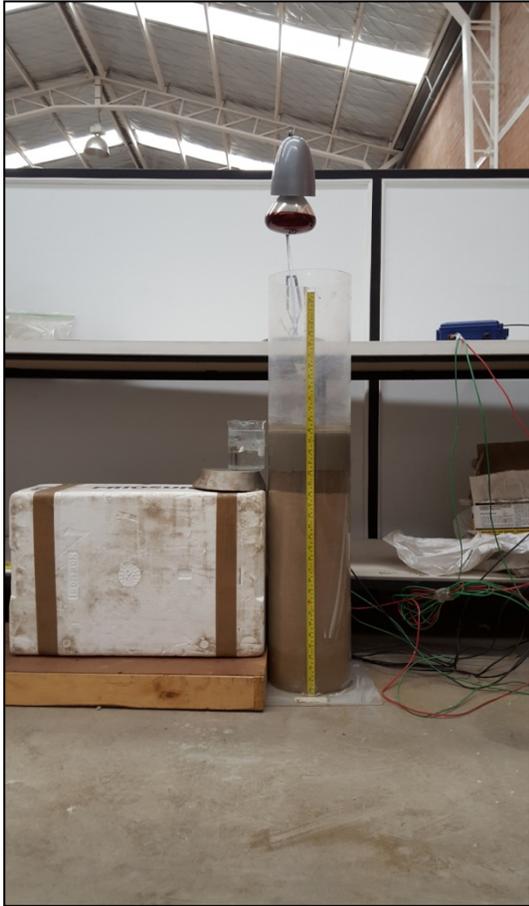


(a)



(b)

Figura A8: Deposición Relave 2 - $C_p=72\%$: (a) Deposición capa 4, (b) Capa 4 a siete días de deposición.



(a)



(b)

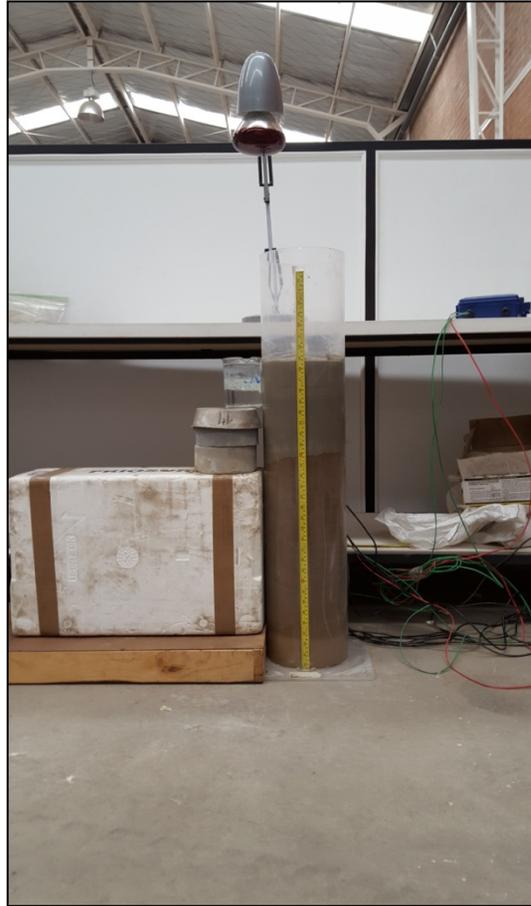


(c)

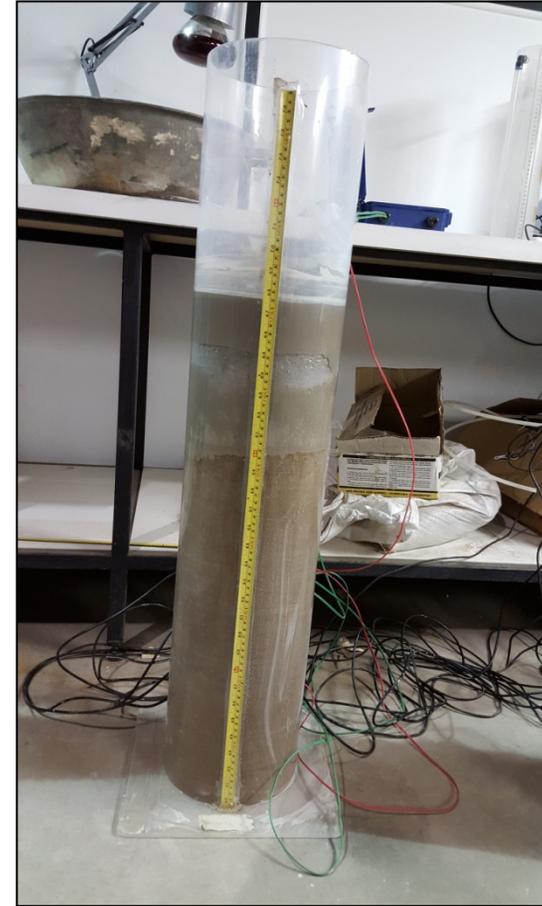
Figura A9: Deposición Relave 2 - $C_p=62\%$: (a) Deposición capa 1, (b) Capa 1 a seis días de deposición, (c) Deposición capa 2.



(a)



(b)



(c)

Figura A10: Depositación Relave 2 - $C_p=62\%$: (a) Capa 2 a siete días de depositación, (b) Depositación capa 3, (c) Capa 3 a nueve días de depositación.

