



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

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITOS DE ESTÉRILES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSEFINA PAZ LEÓN SALAS

PROFESOR GUÍA:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JULIO CORNEJO MORALES
FÉLIX PÉREZ SOTO

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2010

RESUMEN

La gran minería del cobre a rajo abierto en Chile, involucra la movilización de enormes cantidades de materiales estériles. Estos materiales son acarreados desde el rajo y depositados en áreas específicamente preparadas para este fin, configurando depósitos de estériles o botaderos de grandes dimensiones.

En este trabajo se busca identificar las bases conceptuales para establecer un análisis cuantitativo de estos sistemas hidrogeológicos artificiales, para desarrollar una metodología de modelación hidrogeológica de depósitos de estériles que permita evaluar, en términos de cantidad, los flujos de agua en este medio de características no saturadas.

Se desarrolla un modelo conceptual que incluye las principales características físicas e hidráulicas del depósito y los desechos rocosos, y donde se describen los principales procesos que intervienen en el flujo a través de un depósito de estériles. Luego, se propone una metodología de modelación numérica que permita determinar la cantidad de agua que percola en la base del botadero, sin considerar los temas de calidad del recurso hídrico.

Los procesos de flujo que pueden ocurrir al interior de un botadero se dividen principalmente en flujo mátrico y flujo preferencial, donde el primero ocurre en suelos finos gracias a las fuerzas de succión mátrica y el segundo ocurre por la presencia de zonas de fracturas o macroporos interconectados. La ocurrencia de los diversos procesos de flujo depende de las características hidrogeológicas y la estructura interna del depósito de estériles. Estas características y el comportamiento hidrogeológico del botadero en general, son determinadas por la geología original de la zona en explotación, la operación minera, las técnicas de construcción del depósito de estériles, los procesos de erosión y las condiciones climáticas.

Para la modelación numérica se realiza una revisión de diferentes métodos de simulación, así como de las herramientas computacionales disponibles, con el objetivo de entregar recomendaciones para su utilización. A partir de esta revisión, se propone utilizar el programa VisualHELP para determinar la tasa neta de infiltración y el programa HYDRUS-2D para evaluar el almacenamiento de humedad al interior del depósito y la percolación en la base.

El modelo desarrollado es aplicado a un caso específico de la minería chilena, Minera El Morro en la III región, cuya información característica se encuentra disponible en organismos públicos, específicamente en las bases de datos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA – CONAMA). Con esto se evalúa la aplicabilidad y eficiencia de la metodología de modelación propuesta.

Los resultados de una modelación hidrogeológica de depósitos de estériles, serán de mucha utilidad en estudios futuros que se orienten a evaluar potenciales problemas ambientales, tanto por la alteración de los flujos naturales de aguas subterráneas y superficiales, como por contaminación de las mismas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes Generales.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Metodología.....	4
1.4	Organización de la memoria.....	6
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Introducción: ¿Qué es un depósito de estériles?.....	7
2.2	Propiedades físicas de los botaderos.....	7
2.2.1	Estructura interna.....	8
2.2.2	Parámetros físicos.....	10
2.3	Flujo de agua en sistemas no saturados.....	11
2.3.1	Propiedades de suelos no saturados.....	11
2.3.2	Flujo no saturado.....	13
2.3.3	Parámetros hidráulicos característicos.....	14
2.4	Procesos de flujo.....	17
2.4.1	Flujo Mátrico.....	17
2.4.2	Flujo Preferencial.....	18
2.5	Revisión de instrumentación y técnicas de análisis hidrogeológico.....	23
2.5.1	Pilas de prueba.....	24
2.5.2	Determinación de parámetros hidráulicos.....	24
2.6	Revisión de estado del arte y discusión bibliográfica.....	26
3	HERRAMIENTAS PARA LA EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITOS DE ESTÉRILES.....	29
3.1	Métodos para el balance de flujo en medio no saturado.....	29
3.1.1	Modelos de balance hídrico.....	29
3.1.2	Modelo de embalses lineales.....	31
3.1.3	Modelos de flujo en medio poroso.....	32
3.2	Herramientas de modelación numérica.....	34
3.2.1	SoilCover.....	35
3.2.2	Visual HELP.....	36

3.2.3	HYDRUS-2D	37
3.2.4	SEEP/W	38
3.2.5	HILLFLOW	39
3.2.6	FEFLOW	40
4	MODELO CONCEPTUAL Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITOS DE ESTÉRILES	41
4.1	Componentes del Modelo	42
4.1.1	Infiltración neta	43
4.1.2	Consumo de la humedad disponible en el depósito	44
4.1.3	Percolación en la base	45
4.2	Modelo Conceptual	45
4.3	Metodología de modelación numérica para el flujo a través de un depósito de estériles.	47
4.3.1	Determinación de Infiltración neta	48
4.3.2	Consumo de la humedad disponible en el depósito	49
4.3.3	Percolación en la base y tiempo de migración al acuífero de potenciales contaminantes	53
4.4	Resumen Metodología	53
5	APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO	55
5.1	Antecedentes generales Proyecto El Morro	55
5.1.1	Ubicación del proyecto	55
5.1.2	Clima y Meteorología	58
5.1.3	Hidrología	59
5.1.4	Hidroeología	62
5.1.5	Características Depósito de Estériles	63
5.2	Modelo conceptual del depósito de estériles Proyecto El Morro	64
5.3	Evaluación numérica del modelo de simulación	67
5.3.1	Determinación de la tasa de infiltración neta	67
5.3.2	Evaluación del almacenamiento de humedad y percolación en la base del depósito de estériles	70
5.4	Resultados	76
5.4.1	Determinación de la tasa de infiltración neta	76
5.4.2	Evaluación del almacenamiento de humedad y percolación en la base del depósito de estériles	79
5.4.3	Tiempo para el consumo de la humedad disponible en el depósito, método de Guymon	87
5.5	Comentarios y Conclusiones	89

6	CONCLUSIONES.....	92
6.1	Síntesis de resultados y Conclusiones.....	92
6.2	Recomendaciones para la modelación hidrogeológica de depósitos de estériles y desarrollos de estudios posteriores.....	94
7	REFERENCIAS	96
8	ANEXOS.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Vista del depósito de un estériles (mina Ajo, Arizona) destacando presencia de capas inclinadas en el ángulo de reposo (Savci y Williamson, 2002).....	9
Figura 2.2: Esquema de la estructura interna de un depósito de estériles	9
Figura 2.3: Elemento de suelo no saturado mostrando las cuatro fases que lo componen.....	12
Figura 2.4: Componentes de una curva característica suelo-agua.....	15
Figura 2.5: Flujo preferencial en un suelo no saturado debido a flujo macroporo.....	19
Figura 2.6: Flujo preferencial en un suelo no saturado debido a flujo “tipo dedos”	20
Figura 2.7: Flujo preferencial en un suelo no saturado debido a flujo concentrado.....	22
Figura 2.8: Flujo concentrado en un suelo arenoso,.....	23
Figura 3.1: Componentes del modelo EPA-1975.....	30
Figura 4.1: Perfil esquemático para el modelo conceptual de un depósito de estériles.	42
Figura 4.2: Componentes para el análisis hidrológico no saturado de depósitos de estériles	43
Figura 4.3: Componentes para el análisis de la infiltración neta.....	44
Figura 4.4: Modelo conceptual para la evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles.	46
Figura 4.5: Esquema de la metodología de modelación numérica propuesta para la evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles (Elaboración Propia).....	54
Figura 5.1: Plano de ubicación general del Proyecto El Morro	56
Figura 5.2: Ubicación general Área Mina-Planta.....	57
Figura 5.3: Distribución mensual de temperatura promedio Campamento El Morro	59
Figura 5.4: Distribución mensual de precipitación generada para Quebrada Larga	60
Figura 5.5: Distribución mensual de precipitación generada para Campamento El Morro	61
Figura 5.6: Esquema depósito de estériles Proyecto El Morro	64
Figura 5.7: Esquema representativo depósito de estériles con geometría cilíndrica equivalente.....	65
Figura 5.8: Cálculo de volumen tronco de cono	66
Figura 5.9: Modelo conceptual para la evaluación hidrogeológica.....	67
Figura 5.10: Perfiles simulados en Visual HELP de 2, 5 y 10 m de profundidad,.....	69
Figura 5.11: Geometría de modelación para flujo axisimétrico.	71
Figura 5.12: Perfiles de distribución de materiales	73
Figura 5.13: Perfiles de distribución de materiales	74
Figura 5.14: Perfiles de distribución de materiales	75
Figura 5.15: Tasa neta de infiltración al depósito de estériles, a nivel mensual	76
Figura 5.16: Balance hídrico perfil Superficie botadero 1 (espesor 2 m). Tasa total anual de agua	77

Figura 5.17: Balance hídrico perfil Superficie botadero 1 (espesor 2 m). Volumen de agua acumulado. (Elaboración Propia)	77
Figura 5.18: Comparación resultados para distintos niveles de discretización, escenario S1 (50 años).....	80
Figura 5.19: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años.....	82
Figura 5.20: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años.....	83
Figura 5.21: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años.....	84
Figura 5.22: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años.....	85
Figura 5.23: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Serie mensual de temperatura estación Campamento El Morro	58
Tabla 5.2: Distribución mensual de Precipitación Quebrada Larga.....	60
Tabla 5.3: Distribución mensual de precipitación Campamento El Morro.....	61
Tabla 5.4: Discretización vertical Hidrogeología de la zona	62
Tabla 5.5: Características de diseño del Depósito de Estériles	63
Tabla 5.6: Determinación dimensiones geometría cilíndrica representativa del depósito de estériles	65
Tabla 5.7: Información meteorológica de entrada para el modelo Visual HELP.....	68
Tabla 5.8: Parámetros característicos de los materiales	70
Tabla 5.9: Propiedades hidráulicas de los materiales.....	71
Tabla 5.10: Escenarios de simulación	72
Tabla 5.11: Parámetros balance hídrico superficial, tasa acumulada.....	78
Tabla 5.12: Análisis de sensibilidad método CN para la determinación de la escorrentía.....	79
Tabla 5.13: Parámetros método de Guymon	87
Tabla 5.14: Tiempo para agotar el almacenamiento de humedad disponible en el botadero.....	88

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

La industria minera produce un impacto significativo tanto en la economía como en el medio ambiente. Esta industria remueve y transporta más material que cualquier otra, con sus consecuentes impactos al medio ambiente local. Como resultado del aumento global en las operaciones mineras, estos impactos locales están recibiendo mayor atención mundial. En las últimas décadas, las prácticas mineras han dejado su anterior tendencia de la generación de ganancias sin preocuparse por los problemas socio-ambientales (Bay, 2009). Hoy en día, una industria minera económicamente viable es aquella que produce un beneficio utilizando prácticas que respeten las normativas ambientales. En este sentido, como indica Wilson (2003), la investigación ha contribuido significativamente a la minimización del impacto ambiental de las operaciones mineras. A través de la investigación se generan mejoras en las prácticas de explotación actual, que pueden conducir a nuevos desarrollos mineros menos costosos y ambientalmente más sustentables.

En Chile la minería es una actividad productiva fundamental y creciente, siendo crecientes también las exigencias en la mitigación y control de impactos medioambientales, por lo que es necesario mejorar el manejo de los residuos mineros.

Con respecto a la legislación ambiental aplicable en Chile, todo proyecto de desarrollo minero debe someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) contenido en la Ley 19.300 Bases Generales del Medio Ambiente, el cual es un instrumento de gestión ambiental cuya finalidad es evaluar la viabilidad ambiental de un proyecto en las condiciones propuestas por su titular, pudiendo aceptar o rechazar la ejecución del proyecto. Para temas relacionados con residuos sólidos mineros, los principales reglamentos contenidos en la normativa chilena son:

- DS N° 148/03 Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.
- DS N° 248/06 Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves.
- DS N° 132/02 Reglamento de seguridad minera; que establece mayores exigencias para el cierre de los depósitos de relaves y regula aspectos relacionados con los botaderos de estériles, tanto desde consideraciones técnicas y ambientales como desde el punto de vista de la seguridad y la salud de las personas.

Con esto, es fundamental evaluar los impactos ambientales de las actividades mineras, siendo de interés para este trabajo lo relacionado con las potenciales alteraciones y/o modificaciones del recurso hídrico por efecto de la acumulación de desechos estériles.

Las actividades mineras producen una gran cantidad de materiales de desecho que plantean el problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de seguridad e integración con el ambiente. Uno de los almacenamientos de desechos mineros menos estudiados son los depósitos de estériles, también denominados botaderos, donde se depositan residuos rocosos en grandes pilas o acumulaciones verticales, los que constituyen una eventual perturbación en los flujos de aguas subterráneas o superficiales, ya sea por reducción de caudales o por contaminación. Este trabajo se enfoca al análisis de los flujos a través de un botadero en términos cuantitativos.

Para realizar una predicción confiable del comportamiento hidrogeológico de depósitos de estériles, se debe considerar su interacción con la atmósfera. El flujo de agua a través de un botadero es alimentado por precipitaciones de agua lluvia o nieve, y puede ocurrir según diversos procesos de flujo que dependen de las condiciones físicas e hidráulicas del depósito. Por esto es necesario determinar la estructura interna y las propiedades hidrogeológicas del depósito de desechos rocosos. La falta de comprensión de las propiedades de la roca estéril puede generar predicciones incorrectas con lo que no se tomarían adecuadas medidas de control (Wilson, 2003).

La heterogeneidad de los depósitos de estériles ha sido reconocida en diversos estudios, realizados a nivel de monitoreo de campo (Morin et al. 1994; Stockwell et al., 2006), estudios en botaderos de prueba a gran escala (Nichol et al. 2005; Webb et al., 2008) y modelación numérica (Fala et al. 2003, 2005, 2008). Dada la gran heterogeneidad en las propiedades físicas de los depósitos de estériles, no existe un modelo físico generalizado que describa el comportamiento hidrogeológico de estos depósitos. Es por esto que en este trabajo se busca identificar y describir las principales características que influyen en el comportamiento hidrogeológico de un botadero, y analizar los posibles procesos de flujo de agua que se den en su interior. Luego, se desarrolla un modelo hidrogeológico de depósitos de estériles que incluya parámetros fundamentales, tanto características físicas como procesos de flujo de agua más frecuentes en botaderos, según lo expuesto en estudios internacionales.

Para efectos de modelación, se busca desarrollar una metodología de análisis hidrogeológico para evaluar el flujo de agua a través del depósito de estériles, considerando ciertos aspectos principales: tasa neta de infiltración, tiempo requerido para consumir la humedad disponible en el botadero y, finalmente, el monto de percolación en la base.

Por otra parte, estas instalaciones pueden generar impactos negativos a largo plazo asociados a la infiltración de precipitaciones a través de los depósitos de estériles, ya que existe la posibilidad de generar drenaje ácido cuya descarga al medio ambiente puede afectar la calidad de aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, dentro de los objetivos de esta memoria no se analizan estos efectos, concentrando el análisis en la componente de flujo.

Para el estudio de botaderos se pueden realizar análisis simplificados o más complejos utilizando herramientas computacionales de modelación con programas comerciales específicos. Por esto se busca identificar las herramientas más utilizadas, tales como HYDRUS 2D, SEEP/W, etc., además de analizar sus ventajas y desventajas, con el objetivo adicional de proponer recomendaciones para su aplicación.

La metodología desarrollada será aplicada a un caso específico, cuyos antecedentes están disponibles en organismos públicos. Específicamente se trabajará con el Proyecto El Morro, de Sociedad Contractual Minera El Morro, el cual corresponde a un proyecto extracción a rajo abierto para producción de concentrado de cobre en la III región de Atacama. La información necesaria para aplicar el modelo se obtiene del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto, presentado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) el año 2008, que actualmente se encuentra en evaluación.

Estos resultados son de utilidad para la evaluación impacto generado por el depósito de estériles en los flujos de aguas subterráneas y superficiales, lo cual influye en la disponibilidad y calidad química del recurso hídrico.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es establecer un modelo hidrogeológico que permita evaluar los flujos al interior de un depósito de estériles, en términos cuantitativos, en función de los diferentes parámetros de diseño del sistema y procesos que intervienen.

Lo anterior permitiría identificar el impacto ambiental de estos depósitos de residuos estériles de minería, en términos de su influencia en los niveles de recarga al acuífero.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- i. Determinación los parámetros hidrogeológicos y principales características físicas de un depósito de estériles.

- ii. Desarrollo de un modelo conceptual para el flujo a través del depósito de estériles.
- iii. Desarrollo de una metodología de simulación numérica que permita evaluar los flujos del recurso hídrico a través del sistema con sus diferentes aspectos en estudio, considerando etapas específicas: infiltración, tiempo requerido para consumir humedad disponible en el botadero y percolación en la base.
- iv. Identificación y caracterización de un caso ejemplo de depósitos de estériles en el norte de Chile: Proyecto Minera El Morro.
- v. Aplicación de la metodología propuesta al caso específico identificado anteriormente.

El trabajo de modelación propuesto en esta memoria estudia el flujo de agua a través de un botadero de estériles, sistema considerado como medio poroso no saturado, sin considerar reacciones químicas o transporte de gas. Por lo tanto, el objetivo de la modelación es predecir, en términos cuantitativos, el efecto de estos depósitos de desechos rocosos sobre el recurso hídrico, sin analizar efectos en la calidad del recurso. Con esto, los alcances de esta memoria se pueden considerar como una etapa inicial para la modelación hidrogeológica completa de un depósito de estériles.

1.3 Metodología

A continuación se indica la metodología de trabajo definida para cumplir los objetivos específicos indicados anteriormente.

- i. Determinación de parámetros hidrogeológicos.
 - Revisión bibliográfica para determinar las características físicas (tamaño, composición, estratigrafía, etc.) e hidráulicas (permeabilidad, conductividad, etc.) de los depósitos de estériles.
 - Determinar las características hidrológicas del sistema: precipitaciones, temperatura, radiación solar, tasa de evaporación, etc.
 - Estudiar principales instrumentos de medición y posibles métodos de predicción de los parámetros antes mencionados

ii. Modelo conceptual.

- Revisión bibliográfica para identificar los principales procesos que intervienen en el flujo al interior del botadero.
- Determinar factores que influyen en la estructura interna del botadero, considerando: contexto geológico, operación minera y prácticas de construcción, etc.
- Realizar una revisión de modelos de simulación de depósitos de estériles y de sistemas similares con mayor nivel de estudio, como rellenos sanitarios, y analizar su aplicabilidad para la modelación de botaderos.

iii. Metodología de modelación numérica

- Revisión de los métodos de simulación hidrogeológica de depósitos de estériles, desarrollados en diversos estudios.
- Revisión de los programas de modelación numérica disponibles, como HYDRUS 2D y Visual HELP, analizando sus ventajas y desventajas.
- A partir de la revisión de técnicas y herramientas de simulación, y según el modelo conceptual definido, se propone una metodología de modelación numérica.

iv. Caso ejemplo para depósitos de estériles

- A partir de la revisión de proyectos con información disponible en organismos públicos, específicamente en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de la Comisión Nacional de Medio Ambiente (SEIA - CONAMA), se identificará y caracterizará el caso específico de depósitos de estériles en minería en Chile denominado Proyecto El Morro.

v. Aplicación del modelo desarrollado

- Se aplicará la metodología propuesta al caso de botadero identificado anteriormente, cuyos parámetros de diseños y condiciones hidrológicas son conocidos (estos antecedentes son obtenidos del informe de Evaluación de Impacto Ambiental presentado al SEIA).

1.4 Organización de la memoria

La presente memoria consta de distintas etapas definidas de acuerdo a los objetivos inicialmente planteados. Primero, este capítulo presenta información general, la motivación y los alcances de este trabajo. El Capítulo 2 constituye un marco teórico con información sobre las principales características físicas e hidráulicas de un depósito de estériles, así como de los procesos de flujo que puedan ocurrir en su interior, además de una revisión del estado del arte en torno al análisis hidrogeológico de depósitos de estériles. En el Capítulo 3 se entrega información respecto de los principales métodos y herramientas disponibles para la simulación del flujo al interior de botaderos. En el Capítulo 4 se define un modelo conceptual y una metodología de modelación hidrogeológica, desarrollados a partir de los antecedentes analizados en los capítulos anteriores. Para evaluar la aplicabilidad, ventajas y desventajas del modelo propuesto se realiza una aplicación a un caso real de depósito de estériles de la minería chilena, que se desarrolla en el Capítulo 5. Finalmente, el Capítulo 6 resume los principales resultados y conclusiones del trabajo desarrollado y en el Capítulo 7 se entregan las referencias necesarias para la realización de esta memoria.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introducción: ¿Qué es un depósito de estériles?

Como parte de las operaciones mineras se generan dos formas principales de residuos: relaves mineros y roca estéril. Los relaves son el material de grano fino sobrante luego del procesamiento del mineral, mientras que la roca estéril es el material de recubrimiento de bajo grado que rodea un depósito de mineral y debe ser removido. Con respecto a los relaves y los procesos de lixiviación se ha realizado una cantidad considerable de investigaciones, mientras el conocimiento sobre depósitos de residuos rocosos de minería es mucho menor (Bay, 2009).

Los desechos de roca estéril se generan en la tronadura (explosiones realizadas como parte de los procesos de extracción del mineral), resultando una amplia variedad de partículas rocosas altamente heterogéneas, cuyo rango de tamaño varía de arcillas a grandes bloques. Las propiedades físicas y mineralógicas de las partículas rocosas dependen principalmente de la naturaleza de la formación geológica original y de los métodos utilizados en la operación minera. Estos desechos se disponen en grandes pilas o sitios de depósito situados cerca del rajo, también denominados botaderos, donde suelen permanecer de forma indefinida.

Como Nichol et al. (2005) describe, las pilas de desechos estériles son generalmente gruesas zonas no saturadas de decenas a cientos de metros de altura que se componen de materiales física y químicamente heterogéneos, presentando gran variabilidad en tamaño, textura, permeabilidad, macroporos, fracturas y roturas capilares. La estructura interna de un depósito de estériles depende en gran medida del método con el que se deposita el material, que a su vez depende de las condiciones del sitio y la disponibilidad de equipos (Fala et al., 2003).

2.2 Propiedades físicas de los botaderos.

Para entender los procesos hidrológicos que ocurren al interior del depósito de estériles es fundamental realizar una caracterización detallada de las propiedades físicas de los residuos rocosos. La heterogeneidad física en la roca estéril (en términos de tamaño de partícula, textura, litología, composición química, estratificación, canalización, segregación y permeabilidad) genera impacto en la tasa, dirección y uniformidad de flujo a través de la roca estéril (Bay, 2009).

2.2.1 Estructura interna.

La estructura interna de un depósito de estériles se ve influenciada por diversos factores (Azam et. al., 2006):

- Geología original (propiedades del material y composición mineral)
- Operación minera (tronadura)
- Prácticas de construcción (transporte y depósito de los desechos rocosos estériles)
- Condiciones climáticas (temperatura y precipitación)

Además, la configuración interna del depósito evoluciona en el tiempo debido a los procesos de meteorización física y química sobre los materiales depositados (Molson et. al., 2005)

Corazao (2007) realiza una comparación entre diferentes métodos de disposición de residuos, siendo los dos más convencionales *push-* y *end-dumping*. *Push-dumping* consiste en depositar el material en capas en la parte superior de una pila, empujándolo con un bulldózer; mientras que *end-dumping* consiste en descargar el material directamente a través de la cresta de la pila de desechos rocosos. En ambos métodos la roca estéril es segregada y da lugar a diferentes estructuras internas que producen diferentes vías de flujo al interior del botadero. *Push-dumping* genera una zona gruesa inferior y una zona superior no uniforme, con las superficies de tránsito horizontal entre capas. En *end-dumping*, la segregación de material se produce en el depósito de los desechos desde el camión, las rocas de mayor tamaño se acumulan en la parte inferior de la pendiente, mientras limos y arenas tienden a asentarse en la parte superior de la pila (Fala et al., 2005). Esto se traduce en un depósito heterogéneo, altamente anisotrópico, con conductividad hidráulica variable espacialmente (Figura 2.1). Información más detallada respecto de los métodos de construcción y geometría de depósitos de estériles se encuentra en Campos (2004) y Martín (2003).

Según estudios anteriores en diferentes depósitos de estériles (Fala et al., 2005; Stockwell et al., 2006; Azam et al., 2006), al interior del depósito se forman capas discontinuas, inclinadas e intercaladas de material de grano grueso y grano fino. Estas capas, que mantienen aproximadamente en el ángulo de reposo ($\sim 37^\circ$), resultan del asentamiento preferencial de los materiales más gruesos debajo de los materiales de grano fino que se asientan a un ritmo más lento, lo que puede llevar a un flujo orientado (Figura 2.1).

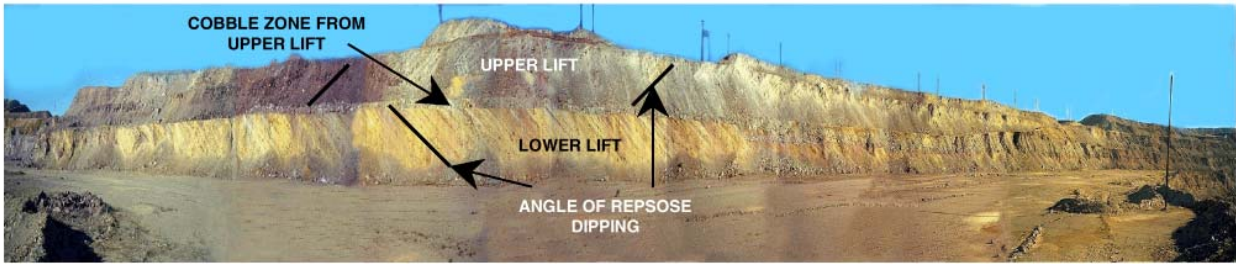


Figura 2.1: Vista del depósito de un estériles (mina Ajo, Arizona) destacando presencia de capas inclinadas en el ángulo de reposo (Savci y Williamson, 2002)

En la Figura 2.2 se hace una representación esquemática de los principales elementos de la estructura interna de un depósito de estériles. Este esquema considera la presencia de estratos conformados por los diferentes bancos construidos en el depósito. Cada banco presenta una zona superior subhorizontal de grano fino compactada por el tráfico de maquinaria pesada, resultando una capa de menor permeabilidad donde la infiltración es mucho más lenta en comparación con las zonas material de grano grueso (Fala et al., 2005). Se muestra también la segregación de las partículas rocosas a lo largo del talud, que generan capas inclinadas y discontinuas de material grueso y fino; con la acumulación de partículas gruesas al fondo de la pila y de cada banco. Esto lleva a grandes diferencias en el régimen hidrogeológico de la pila y a la canalización del flujo de agua.

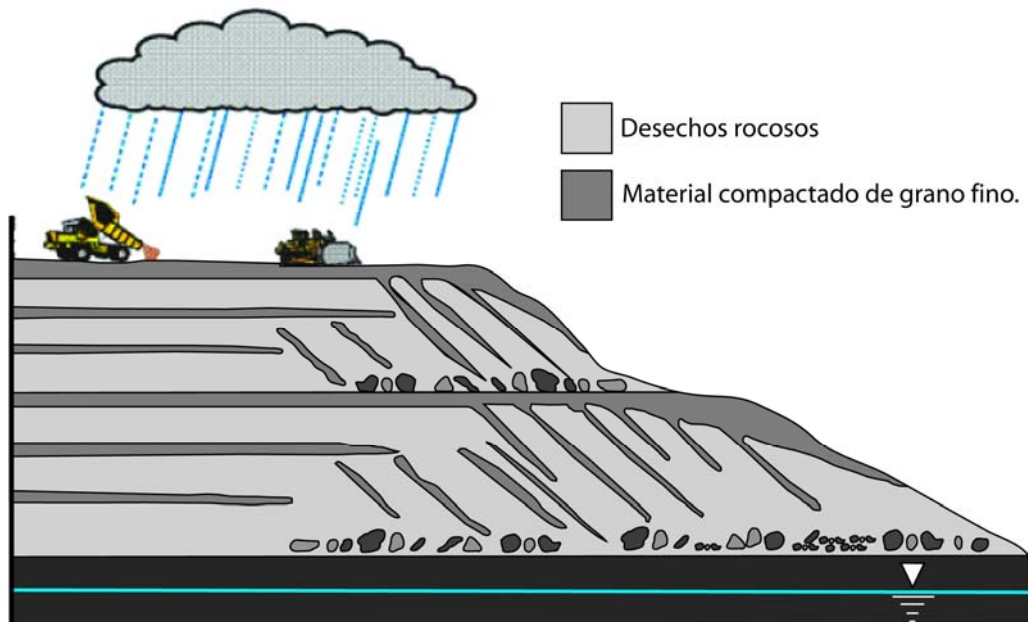


Figura 2.2: Esquema de la estructura interna de un depósito de estériles (Modificado de Aubertin et al., 2005)

Dada la dificultad técnica y económica para determinar la estructura interna de un depósito de estériles, se han realizado estudios que muestran la eficiencia de utilizar métodos geofísicos (Campos et al., 2003; Poisson et al., 2008). Los métodos de resistividad y georadar de penetración (GPR) han resultado muy útiles para caracterizar la estructura interna de botaderos mostrando las vías de flujo preferencial, y además permiten detectar variaciones estacionales en el contenido de agua.

2.2.2 Parámetros físicos.

En general, los dos principales factores que controlan el flujo de fluidos y transporte de químicos en los residuos de roca son la distribución de tamaño de partículas y la textura. Ambos factores son ampliamente determinados por las propiedades litológicas del yacimiento, de los métodos de explotación del mineral y de las técnicas de construcción de la pila de desechos rocosos estériles (Smith y Beckie, 2003).

- **Distribución de tamaño de partículas**

Los desechos de roca estéril normalmente presentan un rango de tamaños de grano que se extiende por casi seis órdenes de magnitud, entre 1 μm y 1 m, dependiendo de los diferentes procesos y métodos de depósito (Fala et al., 2005). Esta heterogeneidad física hace que la predicción del flujo a través de un depósito no saturado de desechos de roca estéril sea de alta complejidad. Para definir la proporción relativa de las fracciones finas y gruesas en una matriz granular, se utiliza la distribución de tamaño de partículas, a través de curvas granulométricas. La granulometría puede ayudar a indicar la tendencia de ocurrencia de ciertos tipos de flujo a través de la roca estéril, considerando por ejemplo, que la retención de agua generalmente aumenta a medida que el tamaño de las partículas y la porosidad disminuyen (Fala et al., 2005).

El método de determinación granulométrico más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado, denominadas tamices, que actúen como filtros de los granos. Tomando en cuenta el peso total y los pesos retenidos, se realiza la curva granulométrica con los valores de porcentaje retenido que se obtiene para cada diámetro. Mientras que para una medición más exacta se utiliza un granulómetro láser, cuyo rayo difracta en las partículas para poder determinar su tamaño.

- **Textura**

La textura de residuos de roca es un control primario para la capacidad de infiltración, capacidad de absorción y la geometría de las vías de flujo (Bay, 2009). La textura se refiere al aspecto físico de la roca,

donde se relaciona el tamaño, forma y arreglo de los minerales, considerando la distribución de tamaño de partículas y el grado de cristalinidad. Típicamente los materiales de desechos mineros que constituyen los depósitos de estériles, presentan textura granular debido al proceso de tronadura.

En general los depósitos de estériles pueden presentar desde zonas matriz-soportada, donde se tiene una matriz de grano fino llenando los vacíos entre los clastos más grandes; hasta zonas clasto-soportadas, de material de grano grueso con poros que carecen de finos (Nichol et al., 2005; Azam et al., 2006).

Bay (2009) indica que si los desechos de roca estéril se componen de una proporción relativamente grande de material fino (más de 20% de finos de menos de 2 mm de diámetro), se crea una matriz fina con probable presencia de grandes bloques incrustados. Por el contrario, si la roca estéril se compone de una proporción relativamente pequeña de material fino (menor al 20%), el material de grano fino en combinación con una variedad de partículas más grandes pueden generar grandes vacíos y macroporos interconectados. Por lo tanto, el flujo de agua resulta más canalizado en este último tipo de material y en el otro caso domina el flujo mátrico, con implicaciones en la calidad y cantidad de la descarga.

2.3 Flujo de agua en sistemas no saturados

Es importante analizar el flujo de agua a través de depósitos de estériles por sus potenciales impactos medioambientales y su influencia en la estabilidad de taludes del propio depósito.

Los depósitos de estériles son sistemas no saturados, diseñados y construidos para prevenir la retención de agua. Estos depósitos pueden recibir agua de diversas fuentes, tales como precipitaciones de agua lluvia, derretimiento de nieve, etc.; donde la filtración no ocurre bajo condiciones estacionarias. Por lo tanto, para estudiar el movimiento de agua a través de un botadero, se debe considerar flujo no estacionario en sistema no saturado (Wilson, 2003). A continuación se realiza una revisión de las principales teorías, parámetros y procesos que gobiernan el flujo de agua a través de medios no saturados.

2.3.1 Propiedades de suelos no saturados

Un suelo no saturado está compuesto de cuatro fases: partículas sólidas, agua, aire y la interfase aire-agua o membrana contráctil (Figura 2.3; Fredlund y Rahardjo, 1993). En un análisis tensional, se considera que dos de las fases se equilibran bajo las presiones aplicadas (partículas sólidas y membrana contráctil) y las otras dos fases fluyen bajo las presiones aplicadas (aire y agua).

Según lo expuesto por Fredlund y Rahardjo (1993), la interfase aire-agua está formada por una película de escasas moléculas de espesor y tiene propiedades distintas a las del aire y agua que separa. La propiedad más importante de la interfase aire-agua es su capacidad de ejercer una fuerza de tensión, llamada tensión superficial.

La tensión superficial resulta de un desequilibrio entre las fuerzas intermoleculares que actúan en las moléculas de agua localizadas en la interfase aire-agua, en comparación con las fuerzas que actúan sobre las moléculas de agua al interior de la fase de agua. La tensión superficial provoca que la interfase aire-agua se comporte como una membrana elástica, formando un menisco cóncavo que se extiende entre las partículas sólidas a lo largo de la estructura de suelo (Fredlund y Rahardjo, 1993).

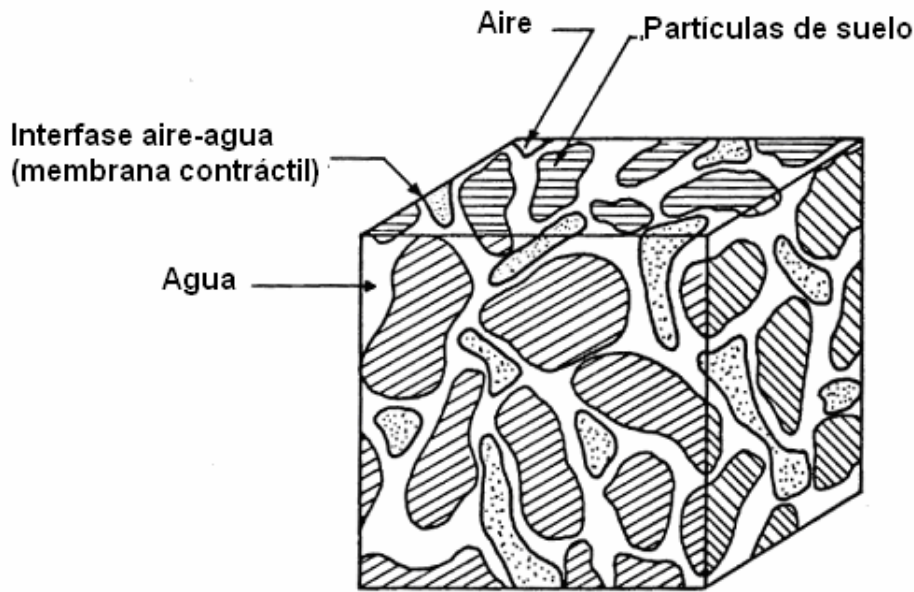


Figura 2.3: Elemento de suelo no saturado mostrando las cuatro fases que lo componen (Modificado de Fredlund y Rahardjo, 1993)

Los suelos no saturados presentan presiones intersticiales o de poro negativas, ya que están sujetos a una presión del aire (u_a) que es mayor a la presión del agua (u_w). La diferencia de presión a lo largo de la membrana contráctil ($u_a - u_w$) es denominada succión mátrica, la cual depende de la tensión superficial (T_s) y el radio de curvatura (R_s) del menisco, de acuerdo a la ecuación 2.1.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.1)$$

Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños donde el radio de curvatura del menisco se reduce y, de esta manera, la succión mátrica se incrementa. Debido al menor tamaño de los poros, en suelos arcillosos se desarrollan succiones mátricas más altas que en los suelos granulares (Fredlund y Rahardjo, 1993).

2.3.2 Flujo no saturado

El flujo de agua a través de un suelo no saturado ocurre como resultado de un gradiente potencial, conocido como carga hidráulica. La carga hidráulica considera tres componentes: carga de elevación, carga de presión y carga de velocidad. La altura de velocidad en un suelo se considera despreciable (Newman, 1999), por lo que la carga hidráulica en cualquier punto de un perfil de suelo queda determinada por la siguiente ecuación:

$$h = z + \frac{u_w}{\rho_w \cdot g} \quad (2.2)$$

Donde, h: carga hidráulica [L]

z: carga de elevación [L]

u_w : presión de poros del agua [M/L·T²]

ρ_w : densidad del agua [M/L³]

g: aceleración de la gravedad [L/T²]

Tanto para sistemas saturados como no saturados, el agua fluirá desde un punto de mayor carga hidráulica a un punto de menor carga hidráulica (Fredlund y Rahardjo, 1993). Es importante notar que el agua no necesariamente fluye desde zonas con alto contenido de agua a zonas de bajo contenido de agua, si no que es el gradiente de carga hidráulica el que controla el flujo al interior del sistema (Newman, 1999).

El flujo de agua a través de un suelo saturado se describe frecuentemente utilizando la ley de Darcy. Según la ley de Darcy, el flujo de agua a través de un suelo es proporcional al gradiente de carga hidráulica, en la ecuación 2.3 se presenta esta relación para flujo unidimensional.

$$q = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial l} \quad (2.3)$$

Donde, q : tasa de flujo de agua (descarga específica) [$L^3/T/L^2$]

K : conductividad hidráulica [L/T]

$\frac{\partial h}{\partial l}$: gradiente hidráulico [L/L]

La cantidad dh representa el cambio en cota piezométrica entre dos puntos situados muy cercanos, y dl es una distancia muy pequeña. El signo negativo indica que el flujo es en la dirección de cota piezométrica decreciente.

La ley de Darcy también se puede escribir como sigue:

$$Q = -K \cdot i \cdot A \quad (2.4)$$

Donde, Q : descarga [L^3/T]

K : conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad [L/T]

i : gradiente hidráulico [L/L]

A : área de la sección transversal [L^2]

La constante de proporcionalidad de Darcy (K) es una función de propiedades del medio poroso y el fluido que pasa a través de él (Espinoza, 2009).

La ley de Darcy también es válida para el flujo a través de suelo no saturado, aunque se debe considerar que la conductividad hidráulica no es constante. En un suelo saturado la conductividad hidráulica es aproximadamente constante. Mientras, bajo condiciones no saturadas, la conductividad hidráulica es una función de la succión mátrica y del contenido volumétrico de agua (Wilson, 2003).

2.3.3 Parámetros hidráulicos característicos

A continuación se describen los dos principales parámetros hidráulicos: la curva característica suelo-agua y la conductividad hidráulica. Los cuales son parámetros esenciales para el análisis hidrogeológico de depósitos de estériles.

- **Curva característica suelo-agua (SWCC)**

La curva característica suelo-agua (SWCC) relaciona el contenido volumétrico de agua de un suelo con la succión mátrica. Esta curva, también denominada curva de retención de agua, describe la capacidad de almacenamiento de un suelo y define la cantidad de agua que permanecerá en los poros bajo un incremento en la succión mátrica (Newman, 1999).

En la Figura 2.4 se muestra la forma típica de una SWCC, con los componentes principales de la curva descritos por diversos autores (Newman, 1999; Swanson et al., 1999). Cuando la succión mátrica es cero el contenido volumétrico de agua es máximo, es decir, los poros están llenos de agua, esto ocurre en suelos saturados (donde el contenido volumétrico de agua es igual a la porosidad del suelo). El valor de entrada de aire es el valor de succión mátrica que experimenta el suelo cuando los mayores poros comienzan a drenar y entra a aire al suelo. El grado residual de saturación o contenido de agua, es definido como el grado de saturación o contenido de agua al cual un incremento en la succión mátrica no produce un cambio significativo.

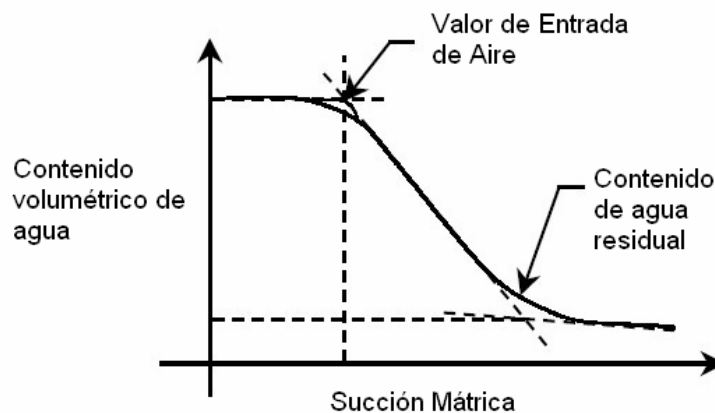


Figura 2.4: Componentes de una curva característica suelo-agua
(Modificado de Swanson et al., 1999)

En este tipo de curvas se pueden diferenciar, a grandes rasgos, tres regiones: 1) región de entrada de aire, que corresponde a la franja en que el suelo se encuentra saturado donde la succión varía pero el contenido de agua no. 2) región capilar, en la que pequeños incrementos de la succión provocan el drenaje de los poros más pequeños del suelo, y el contenido de agua en el suelo disminuye rápidamente, 3) región de adsorción, en la que únicamente queda el agua adsorbida a las partículas del suelo, debido a que el agua que estaba albergada en los poros ha sido drenada; en esta última región, importantes cambios de potencial se asocian con pequeños cambios de contenido de agua.

En una SWCC la relación entre el contenido de humedad del suelo y succión depende del tamaño de partículas. La geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica de la fracción fina son determinantes en la posición relativa, forma e inclinación de la curva (Bay, 2009).

La SWCC es un parámetro clave para predecir la infiltración a través de un botadero y la potencial percolación en la base. Las pruebas de laboratorio para determinar las SWCC de un suelo de residuos mineros pueden tomar desde varias semanas hasta meses. Por esto existen estudios, como Swanson et al. (1999), donde analizan métodos para estimar la SWCC utilizando mediciones del tamaño de partículas, con la ayuda de programas computacionales como SOLIVISION.

- **Conductividad hidráulica (K)**

La conductividad hidráulica, K , es una función de las características intrínsecas de la matriz del suelo y de las propiedades del fluido contenido en dicho suelo. En depósitos con condiciones no saturadas, las propiedades hidráulicas son muy dependientes de las propiedades físicas del depósito de estériles, que determinan la cantidad y conectividad de los poros llenos de agua (Fala et al., 2005). Según lo expuesto por Bay (2009), la conductividad hidráulica varía con la ubicación, debido a los procesos de depósito, y en el tiempo, debido a las variaciones en la saturación y precipitación/disolución de minerales. Al interior de un depósito de estériles el tamaño de partículas es muy variable, por lo que también lo es la conductividad hidráulica, que depende del tamaño de partículas y la orientación. Con esto, la capacidad de infiltración puede variar al interior del depósito en varios órdenes de magnitud. Para representar con precisión un depósito de estériles no se debe utilizar un único valor de conductividad, sino un intervalo de valores que den cuenta de las variaciones en el tamaño de partículas, características de las rocas y técnicas de construcción.

Las funciones de conductividad hidráulica expresan conductividad hidráulica versus succión o versus presión de poros de agua. Estas curvas generalmente se determinan a partir de las SWCC. Existen diversos métodos que permiten calcular las funciones de conductividad hidráulica (Wilson, 2003). Considerando que las técnicas para medir la conductividad hidráulica no saturada, tanto en terreno como en laboratorio, son costosas y requieren largos periodos de tiempo, existen estudios para estimar la conductividad hidráulica a partir de modelos numéricos. Un ejemplo es el modelo presentado por Mbonimpa et al. (2004) para estimar la conductividad hidráulica no saturada considerando propiedades geotécnicas básicas del suelo, como el diámetro efectivo de las partículas, el coeficiente de uniformidad y el índice de vacíos.

2.4 Procesos de flujo

En la mayoría de los depósitos de estériles no saturados, el flujo a través del depósito es en forma de flujo mátrico o flujo preferencial. La importancia relativa de estas dos formas de percolación depende del tipo de suelo y la intensidad de las precipitaciones.

En depósitos de roca estéril con una proporción significativa de partículas de grano fino, la matriz de grano fino generalmente es capaz de retener y transportar el agua bajo tensión o fuerzas capilares, esto se conoce como flujo mátrico. En cambio, en depósitos de roca estéril con una gran porción de material grueso, el mecanismo de flujo dominante puede ser a través de flujo preferencial por efectos no capilares e impulsado por la gravedad (Bay, 2009).

Yazdani et al. (2000) describen que la capilaridad se relaciona con el tamaño de las partículas dentro de una estructura. Las partículas con un diámetro $> 4,75$ mm muestran poca capilaridad, independiente de si su estructura es suelta o compacta. Materiales finos, de diámetro $< 4,75$ mm, típicamente presentan un lento y difuso flujo mátrico, mientras que materiales con una distribución de tamaño de grano que contiene menos del 35% de finos, pierden rápidamente su capacidad para retener el agua bajo tensión y por lo general se presentan flujo preferencial tipo macroporo.

2.4.1 Flujo Mátrico

El flujo mátrico es típicamente lento y difuso. Este flujo de tipo capilar es producto de la succión mátrica y, en menor medida, de la gravedad; tanto en períodos húmedos como secos. A diferencia del flujo preferencial (impulsado por la gravedad) que generalmente se activa bajo condiciones de alta humedad, siendo mucho más rápido. Por lo tanto, el flujo mátrico suele ser el mecanismo dominante para el flujo a través de botaderos en condiciones no saturadas. El material de la matriz de grano fino, tiene la capacidad de retener un mayor volumen de agua bajo las fuerzas mátricas mientras que los materiales de grano grueso retienen un menor volumen de agua (Bay, 2009).

Según lo expuesto por Bay (2009), cuando la matriz está completamente saturada, la descarga específica de agua a través del material puede ser descrita por la Ley de Darcy, que relaciona la conductividad hidráulica de un medio poroso saturado con el gradiente hidráulico, según lo descrito anteriormente con la ecuación 2.3. Esta ecuación describe la descarga específica de agua en una dimensión, asumiendo que el material está totalmente saturado y que el flujo es laminar. En condiciones no saturadas para el depósito

de residuos de roca, el flujo de infiltración vertical inducido por la gravedad a través de la zona no saturada es una función de succión mátrica ψ [kPa] o el contenido volumétrico de agua θ [sin unidades], y puede ser expresado como $K(\psi)$ o $K(\theta)$ tal como se resume en la ecuación de Richard:

$$q_z = -K(\psi) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial l} + 1 \right) \quad (2.5)$$

2.4.2 Flujo Preferencial

El término flujo preferencial se utiliza para describir una condición de flujo donde una región particular de un perfil llega a ser más conductiva que el material que la rodea (Newman, 1999). Bajo ciertas condiciones, regiones clasto-soportadas de un depósito de estériles pueden presentar grandes espacios vacíos, los que se llenan en fuertes eventos de infiltración provocando que el agua pase por la matriz bajo altas condiciones de saturación, esto puede generar un movimiento de masas de agua que penetra mucho más rápido que el flujo mátrico (Smith y Beckie, 2003).

Existen diversas características al interior de un suelo que contribuyen al desarrollo de vías de flujo preferencial a través de la zona vadosa. Estas incluyen cambios en la superficie topográfica, vegetación, pequeñas heterogeneidades dentro de un suelo de otro modo homogéneo, diferencias en las propiedades hidráulicas, bruscos contactos geológicos o la presencia de estructuras de macroporo (Newman, 1999). En el flujo preferencial, como el flujo se concentra en ciertas vías se pueden provocar grandes variaciones en el tiempo, magnitud y volumen de respuesta del flujo y percolación en la base del depósito de estériles (Corazao, 2007).

De acuerdo a diversos estudios (Fala et al., 2005; Smith y Beckie, 2003), el agua puede infiltrar en toda la profundidad de una pila experimental de residuos de roca en sólo unas pocas horas hasta varios años, lo que indica que la mayoría de las pilas de desechos estériles tienen propiedades hidráulicas espacialmente variables, debido a las variaciones en el contenido de humedad, granulometría y/o mineralogía.

Mientras que el flujo mátrico está sujeto a la Ley de Darcy, el flujo preferencial puede o no estarlo, dependiendo del tipo de flujo (Bay, 2009). Los principales tipos de flujo preferencial, descritos por Newman (1999), son: flujo “tipo dedos”, flujo concentrado (o tipo embudo) y flujo macroporo

- **Flujo macroporo**

El flujo macroporo corresponde al flujo de agua a través de grandes espacios vacíos conectados, que suele activarse en eventos de alta infiltración y es responsable de la canalización rápida de agua, mucho más rápida que las velocidades de flujo mátrico (hasta 5 m en pocas horas) (Newman, 1999; Smith y Beckie, 2003; Nichol et al., 2005).

La estructura de macroporos al interior del suelo puede ser resultado de grandes aberturas en la superficie tales como grietas de contracción o canales radiculares abandonados (Newman, 1999). Los macroporos y canales subsuperficiales, además de ser propios de ciertos tipos de estructura interna que presentan grandes poros entre las partículas rocosas, pueden ser resultado de actividad biológica (canales de raíces y agujeros de gusanos) y de procesos geológicos (erosión, fracturamiento, etc.)

Newman (1999) describe dos categorías de flujo macroporo. La primera incluye los procesos conocidos como “flujo desviado”, que se refiere al flujo de agua a través de grandes y continuas estructuras de macroporo que inicialmente estarían llenas de aire (Figura 2.5). La segunda categoría describe procesos que combinan el flujo a través de estructuras de macroporo con el flujo en los microporos; cuando el agua entra a los macroporos, puede ocurrir difusión y adsorción del agua desde los macroporos hacia la matriz circundante.

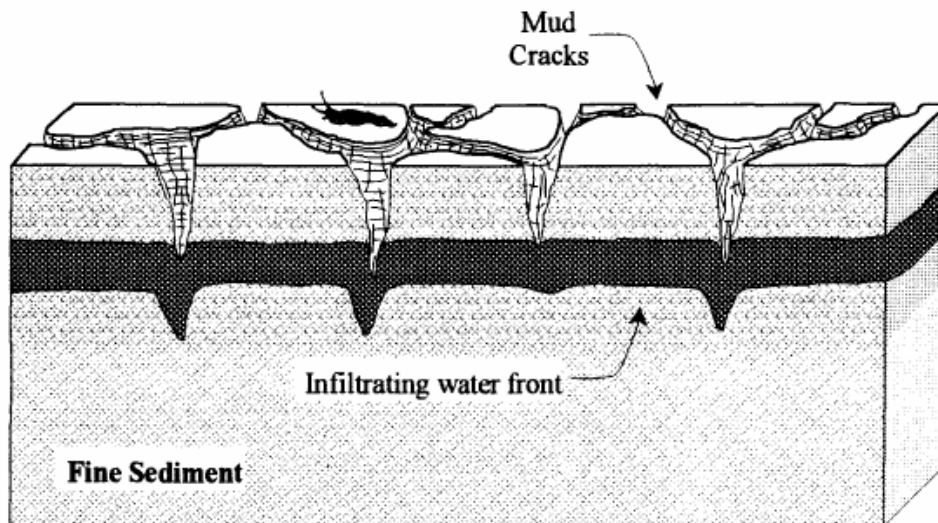


Figura 2.5: Flujo preferencial en un suelo no saturado debido a flujo macroporo (Newman, 1999)

El flujo macroporo también se conoce como flujo no capilar. Debido a las tasas más altas de infiltración y consecuente menor tiempo de residencia, este tipo de flujo genera una carga de disolución menor que el flujo mátrico, por lo que sus efectos en la calidad del agua son menores.

- **Flujo canalizado “tipo dedos” (Finger flow)**

Este tipo de flujo se produce como resultado de un frente de humedad inestable al interior de un perfil de suelo que exhibe una distribución de poros más o menos aleatoria, esto lleva a que el agua busque vías de flujo a través del suelo desarrollando canales en forma de dedos. La gravedad impulsa la inestabilidad y la tensión superficial genera un efecto contrario estabilizador.

Lo que ocurre en el perfil de suelo es análogo al goteo de agua de una esponja; la tensión superficial se opone a la fuerza de la gravedad, lo que produce el aumento en el tamaño de las gotas antes de caer. En el caso de los suelos, este equilibrio de fuerzas determina el diámetro de las canalizaciones o “dedos”.

El flujo “tipo dedos” puede ocurrir cuando suelos finos superponen horizontalmente a suelos gruesos; esta configuración normalmente se denomina barrera capilar. Cuando el frente de humedad se aproxima a la capa de grano grueso, el agua se concentra en ciertas zonas, ingresando a la capa de grano grueso en forma de dedos (Figura 2.6; Newman, 1999).

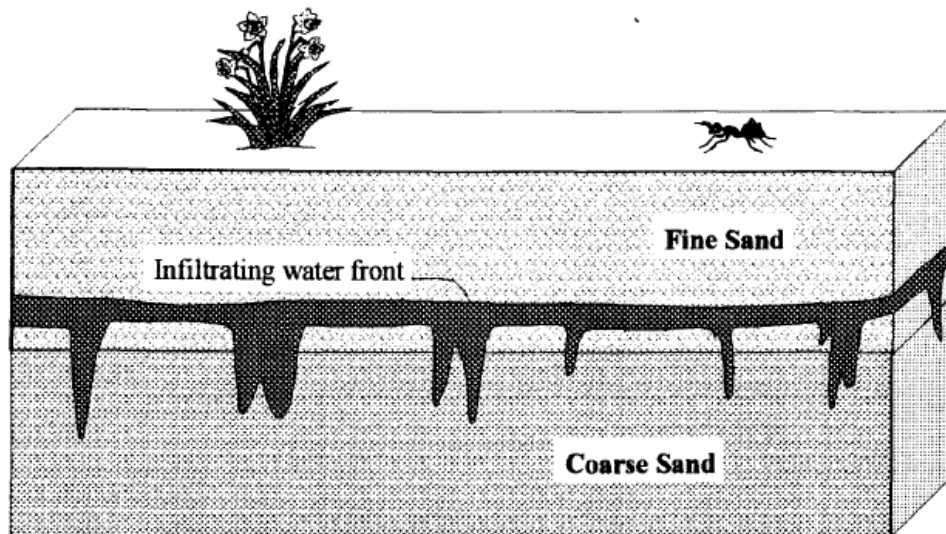


Figura 2.6: Flujo preferencial en un suelo no saturado debido a flujo “tipo dedos”
(Newman, 1999)

La evidencia del flujo preferencial a lo largo de lentes de grano fino o alrededor de grandes rocas a través del contacto capilar se ha observado en diversas investigaciones (Fala et al., 2005; Stockwell et al., 2006). Cuando se presentan intercalaciones de capas de grano fino y grueso (creadas a partir del vertido de los desechos rocosos para formar el depósito), se puede formar una barrera capilar en la que el agua puede ser retenida preferentemente en el material de grano fino debido a las fuerzas de capilaridad. Lo que puede resultar en el flujo preferencial de agua que se concentra en las otras regiones. El flujo de barrera capilar está sujeto a la Ley de Darcy, mientras que el flujo macroporo no lo está (Bay, 2009).

Según lo descrito por Newman (1999), el flujo “tipo dedos” también puede ocurrir cuando un frente de infiltración se mueve a través de un suelo sustentado por una capa relativamente impermeable. En este caso, el aire que esté al interior del suelo más permeable puede quedar temporalmente atrapado entre el frente de humedad y el estrato menos permeable. El flujo hacia abajo llega a ser impedido por el aire comprimido delante de él. Con el ingreso de más agua al suelo, la presión de poros al interior del frente de humedad llega a ser positiva. En respuesta al incremento de la presión de poros del agua, la presión del aire atrapado y comprimido también aumenta. Este proceso continúa hasta llegar a una condición denominada “contraflujo de aire” (air counter-flow), donde las burbujas de aire atrapadas encuentran vías de escape hacia arriba a través de espacios en los poros llenos de agua. Una vez que el aire comprimido empieza a subir hacia la superficie el agua puede descender por vías en forma de dedos.

En muchos casos el flujo preferencial “tipo dedos” ocupa sólo un pequeño porcentaje de la sección horizontal del medio poroso. Luego que cesa un evento de infiltración, un posterior evento seguiría las mismas vías de flujo que fueron desarrolladas anteriormente. Esto puede generar que la recarga de aguas subterráneas ocurra mucho antes que el suelo esté completamente húmedo. Para casos en que el nivel freático es muy profundo, las vías de flujo poco a poco pueden fusionarse en profundidad debido al efecto de difusión de la humedad (Stephens, 1994).

- **Flujo concentrado (Funnel flow)**

Este tipo de flujo se asocia a suelos estratificados. Newman (1999) indica que la presencia de capas inclinadas de grano grueso al interior de perfiles de grano fino puede impedir el descenso del agua. Por efecto de la barrera capilar generada entre las capas de grano grueso y grano fino, el agua permanece en el suelo fino y fluye a lo largo de la interfaz hasta el final de la capa de grano grueso, para posteriormente atravesar el material de grano fino en un volumen concentrado como un flujo en columna (Figura 2.7)

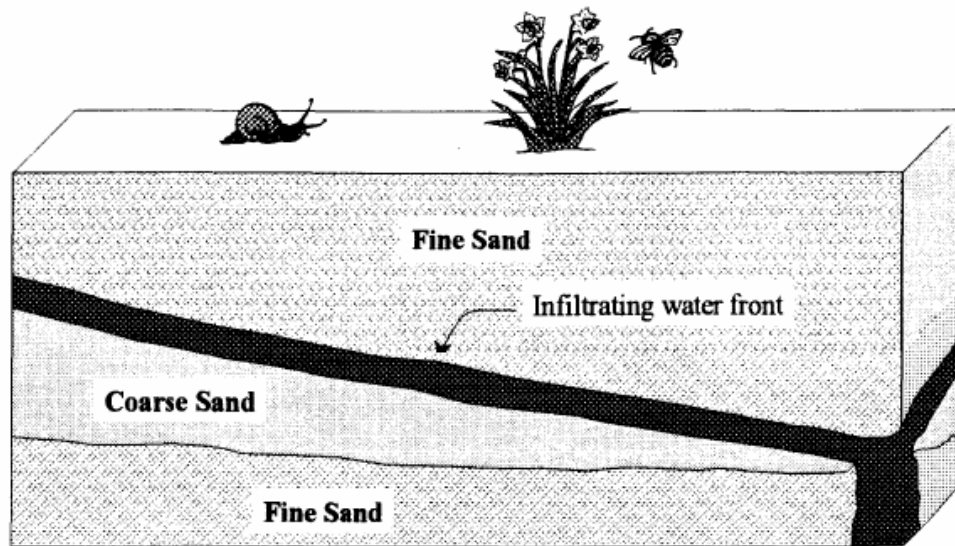


Figura 2.7: Flujo preferencial en un suelo no saturado debido a flujo concentrado
(Newman, 1999)

También se sugiere que el flujo concentrado puede ocurrir si existen lentes de arcilla u otros casos de capas de alta densidad y baja permeabilidad intercaladas en suelos no saturados, de mayor permeabilidad, que de otra manera serían uniformes. Este tipo de flujo no es causado por la formación de la barrera capilar sino más bien por la impedancia del flujo de agua a través de un material denso de baja conductividad hidráulica (Newman, 1999). Este caso es el más frecuente para flujo concentrado en depósitos de estériles, los cuales presentan estratificación generada al depositar el material rocoso. Como parte de las etapas de construcción del depósito se forman grandes capas con una zona superior de grano más fino y compactado debido al tránsito de maquinaria pesada, generando zonas de baja conductividad. Además de la existencia de capas o estratos inclinados, que se generan por la segregación por tamaño del material.

El flujo concentrado se produce cuando capas inclinadas provocan que el agua fluya lateralmente, acumulándose en una región más baja. Si la región subyacente es más gruesa también puede ocurrir flujo canalizado “tipo dedos”. Para tasas de flujo bajas las capas de grano grueso actúan como embudos, recogiendo agua de una zona amplia y canalizándola a través de un pequeño número de vías de drenaje. Para tasas de flujo más altas, estas capas gruesas empiezan a filtrar, con lo que el efecto de embudo se hace menos significativo (Figura 2.8: Flujo concentrado en un suelo arenoso, Figura 2.8)

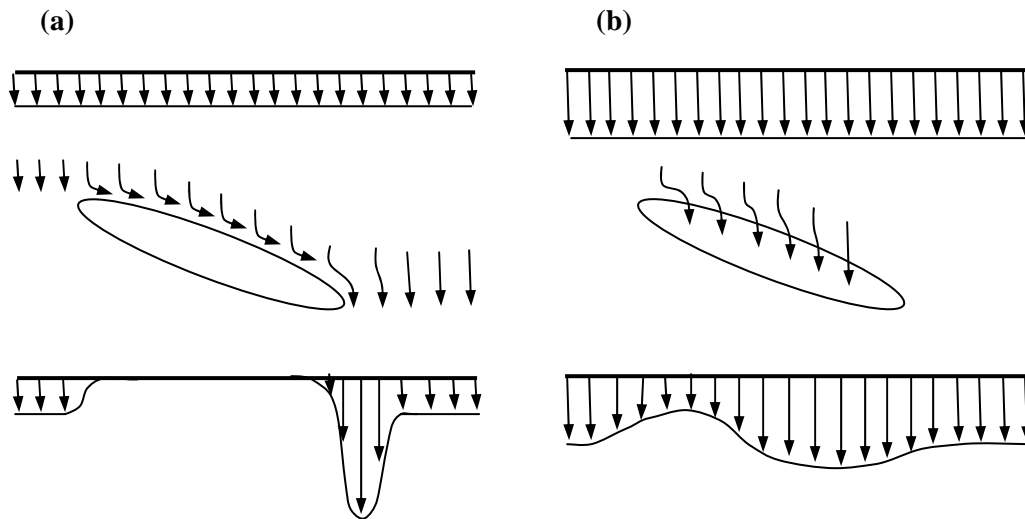


Figura 2.8: Flujo concentrado en un suelo arenoso,

(a) tasa de flujo relativamente baja, el flujo se concentra en el extremo inferior de la capa inclinada.

(b) mayor tasa de flujo, reduce las desigualdades en la penetración del agua en el suelo

(Elaboración Propia)

2.5 Revisión de instrumentación y técnicas de análisis hidrogeológico

Para el estudio y análisis hidrogeológico de depósitos de estériles existen diversas técnicas que permiten determinar las componentes de interés, como la construcción de pilas de prueba (depósitos a escala) que facilita la observación del comportamiento hidrogeológico de un botadero y la cuantificación de flujo y parámetros de interés.

Para ciertas componentes hidrológicas y meteorológicas de ingerencia en el estudio, como precipitación, evaporación, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, etc.; se utilizan conocidas técnicas de determinación e instrumentación. Además, muchas veces se consideran estadísticas meteorológicas e información hidrológica de la zona de estudio, disponibles en organismos estatales que poseen redes de estaciones de monitoreo.

A continuación se describen las principales técnicas de análisis e instrumentación necesaria para determinar los principales parámetros hidrogeológicos, tanto en sistemas reales como en pilas de prueba o columnas de estudio.

2.5.1 Pilas de prueba

Numerosas investigaciones de las condiciones de operación de botaderos en diversas minas demostraron que la caracterización física, hidrológica y química, usando métodos subsuperficiales es frecuentemente de alta complejidad y lleva a grandes incertidumbres en la estimación y predicción del comportamiento de la pila (Smith et al., 1995; Herasymuik et al., 1995; Lefebvre et al., 2001). La ubicación exacta de las vías de flujo y de los obstáculos encontrados en el camino, tales como grandes bloques de roca o capas de baja permeabilidad, son ampliamente desconocidas. Esto ha llevado a la construcción de varias pilas de prueba a escala de campo para diversos climas en todo el mundo (Bay, 2009).

Según Bay (2009), las pilas de residuos de roca a gran escala proveen una conexión intermedia entre experimentos de laboratorio y botaderos a escala real. No hay criterios bien establecidos para la construcción de pilas pruebas. En general, el diseño de cada pila está determinado por un equilibrio entre lo práctico y el costo. Idealmente cada pila debe ser lo suficientemente grande para capturar todos los procesos a gran escala, mientras que las restricciones de presupuesto sean razonables. Por ejemplo, mientras que las diferencias entre el flujo mátrico y el flujo preferencial puedan ser evidentes en una pila de ensayo pequeña (de 2 a 3 m de altura), la dinámica de transporte de gas, que normalmente se manifiesta en la operación de pilas de mayor escala, puede no serlo. En depósitos de gran tamaño el oxígeno puede no ser capaz de penetrar hasta su centro, mientras que una pila de prueba más pequeña puede ser bien aireada y no del todo representativa. Por lo tanto, todas estas consideraciones son necesarias en el diseño de pilas de prueba de residuos rocosos estériles.

2.5.2 Determinación de parámetros hidráulicos

- **Contenido de humedad**

Básicamente son tres los métodos para determinar la humedad del suelo: método gravimétrico, sonda de neutrones y sondas TDR (Time Domain Reflectometry). El método gravimétrico es operacionalmente sencillo pero destructivo, de manera que no es posible determinar la variación de la humedad en un mismo punto, mientras que la sonda de neutrones presenta algunos problemas de calibración y de manejo. Según Smith y Beckie (2003), el registro de densidad de neutrones es probablemente el método más común para estimar las variaciones espaciales y temporales en el contenido de agua al interior de un depósito de estériles. Por otra parte, las TDR (instrumento para la medición de la reflectancia en el dominio del tiempo) proporcionan medidas rápidas, estables y bastante confiables del grado de humedad en el suelo; siendo su mayor limitante la técnica de instalación de las sondas.

Con el método gravimétrico se determina el contenido de humedad por la diferencia de peso de un volumen dado de muestra intacta y el peso de la misma muestra luego secarla en una estufa a 105 °C durante un mínimo de 24 horas. El contenido en humedad se expresa en porcentaje de suelo seco (Bay, 2009).

La sonda de neutrones es una técnica basada en la interacción de los neutrones emitidos por una fuente radioactiva y los átomos de hidrógeno del agua intersticial contenida en el terreno (Bay, 2009). La sonda se introduce en el suelo a la profundidad deseada y emite neutrones. Los neutrones se reflejan más o menos dependiendo del contenido de agua del suelo. Un receptor cuenta los neutrones reflejados y transforma la señal en contenido de agua.

El contenido de humedad también se puede estimar basándose en el tiempo que le toma a un pulso electromagnético viajar a través de la porción expuesta de una sonda TDR (Bay, 2009). Las TDR constan de varillas metálicas que se introducen en el suelo y un emisor/receptor de impulsos electromagnéticos. Se genera un pulso electromagnético y se mide el tiempo que tarda en recorrer las varillas, que será mayor o menor según el contenido de humedad del suelo. La propagación del pulso depende de las propiedades dieléctricas del sistema aire/roca/agua que rodea la sonda.

- **Succión mátrica**

La succión mátrica puede ser determinada utilizando tensiómetros o sensores de conductividad térmica (Smith y Beckie, 2003). A medida que el suelo pierde agua la succión aumenta, es decir, el suelo ejerce más fuerza para retener agua. Por lo tanto, observando cómo varía el valor de la succión es posible saber la evolución del agua en el suelo.

Los tensiómetros proveen mediciones directas de la succión en un rango operacional de 0 a ~85 KPa. Con la instalación de varios tensiómetros a distintas profundidades es posible medir gradientes hidráulicos y por tanto conocer la dirección de los flujos de agua en el suelo. Estos equipos requieren un frecuente mantenimiento, sólo son útiles a poca profundidad y deben ser removidos con la aparición de condiciones de invierno por la congelación (Smith y Beckie, 2003).

Los sensores de conductividad térmica funcionan generando un pulso de calor al interior de una sonda de cerámica, la tasa de disipación del calor es proporcional al contenido de humedad al interior de la sonda. Algunas ventajas de los sensores de conductividad térmica son que las mediciones son automáticas, no requiere mantenimiento y los sensores soportan ciclos de congelamiento y descongelamiento. Algunas

desventajas es que necesitan un largo proceso de calibración que depende de la temperatura, y que su respuesta se ve afectada por la histéresis (Smith y Beckie, 2003).

- **Infiltración**

La infiltración puede ser medida directamente con lisímetros ubicados al interior de la pila de residuos rocosos, los que deben ser enterrados más abajo de la zona de evaporación (Smith y Beckie, 2003). En general estos instrumentos se utilizan en pilas de prueba o columnas de estudio, donde se tiene una representación a escala de un depósito de estériles para analizar su comportamiento hidrogeológico y en específico las tasas de flujo al interior de un botadero.

Los factores clave en la utilización de lisímetros para estimar la infiltración son el tamaño óptimo de un lisímetro individual y el número de instalaciones necesarias para obtener una estimación confiable de la tasa promedio de infiltración. En este sentido, es importante considerar la variabilidad espacial en la infiltración a través de la pila. Estas variaciones reflejan la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica de la matriz granular (material de desecho rocoso) y la presencia de vías de flujo preferencial al interior de la pila (Smith y Beckie, 2003).

2.6 Revisión de estado del arte y discusión bibliográfica.

A continuación se resumen los alcances y principales resultados de trabajos anteriores en torno al análisis de flujo en medio no saturado y a la evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles.

- ***“Hydrogeology of waste rock dumps”*. Leslie Smith, 1995.**

Realiza un análisis de las propiedades hidrogeológicas de depósitos de estériles, basándose en la síntesis de datos de cuatro minas de Canadá y USA. Con énfasis en el estudio de la hidroestratigrafía y propiedades texturales de los desechos rocosos, en la variación espacial y temporal de la humedad al interior del depósito, y en la respuesta de infiltración frente a eventos de precipitaciones.

Se observa la relación entre el grado de heterogeneidad del sistema (estratificación y segregación del material), las propiedades texturales de los desechos rocosos (granulometría) y el tipo de flujo que ocurre al interior de la pila de desechos rocosos.

Se identifica como mayor limitante en la caracterización del comportamiento hidrológico de depósitos de estériles la cantidad y calidad de información disponible (estadísticas meteorológicas, monitoreo de contenido de humedad al interior de la pila, toma y análisis de muestras, etc.).

- ***“Preferential flow in vertically oriented, unsaturated soil layers”*. Lori Newman, 1999.**

Newman trabaja con una columna de estudio para analizar el desarrollo de vías de flujo preferencial en capas verticales, en sistemas no saturados, utilizando dos materiales (de grano grueso y de grano fino). Este trabajo se desarrolla como parte de un programa de campo conducido durante la excavación del depósito de estériles de Golden Sunlight Mine en Montana, USA.

Además realiza una modelación numérica con el modelo SEEP/W. Los resultados obtenidos indican que existe una tendencia a que el flujo ocurra a través de las capas de grano fino cuando la tasa de flujo es baja (menor a la conductividad hidráulica), lo que se explica por el mayor potencial succión de los suelos finos.

- ***“Numerical modelling of unsaturated flow in vertical and inclined waste rock layers using the SEEP/W Model”*. Jaime Wilson, 2003.**

El autor evalúa el modelo conceptual de Herasymuik (1996) – modelo desarrollado durante la excavación de un depósito de estériles real (Golden Sunlight Mine, Montana, USA), que predice que el agua que infiltra tiende a fluir por los materiales más finos al interior del botadero – y considera el mecanismo de flujo preferencial estudiado por Newman (1999).

Utiliza el modelo de elementos finitos Seep/W para evaluar el flujo en capas verticales e inclinadas, el cual presenta dificultades con la convergencia. Se realiza un análisis de sensibilidad a los principales factores de simulación: criterio de convergencia, diseño de la malla y propiedades del material; resultando la conductividad hidráulica usada para el material de grano grueso el factor más importante.

Se concluye que el flujo es función de la inclinación, largo de contacto entre las capas y de las propiedades hidráulicas del material de desecho.

- ***"Modelación numérica de la recirculación de lixiviados en un relleno sanitario, aplicación al relleno sanitario Santiago Poniente". Eduardo Salfate, 2005.***

Analiza el proceso de recirculación de líquidos lixiviados al interior de un relleno sanitario para disminuir el volumen de líquido dispuesto fuera de la masa de desechos y con esto evitar la alternativa de tratamiento.

Realiza simulaciones numéricas para determinar los parámetros de mayor importancia en el flujo de lixiviados a través de los desechos, tales como la conductividad hidráulica, humedad inicial del sistema, condiciones de infiltración y presencia de estratos con diferentes condiciones de permeabilidad. Para esto utiliza el programa HYDRUS-2D, donde considera el sistema como un medio poroso no saturado.

De acuerdo a los resultados destaca la variabilidad espacial y temporal de las características sistema, que determinan diversos patrones de flujo al interior de la basura. Determina que la conductividad hidráulica es el parámetro de mayor importancia para determinar el flujo a través del relleno sanitario. Con respecto a las limitaciones de HYDRUS-2D, se recalca la importancia de una correcta determinación de las variables de ajuste del modelo y la necesidad de generar mallas irregulares para mejorar la precisión del modelo numérico.

- ***"Hydrological and hydrogeochemical characteristics of neutral drainage from a waste rock test pile". Daniel Bay, 2009.***

Bay analiza las características hidrológicas y geoquímicas de pilas de prueba de desechos rocosos. Trabaja con desechos rocosos de la Mina Antamina (Norte de Lima, Perú), a partir de los cuales se construyen pilas de prueba de dimensiones: 36 x 36 x 10 m (alto), las que cuentan con lisímetros en la base y sondas TDR al interior, que permiten observar el contenido de humedad y flujo en las pilas.

Realiza un análisis hidrogeológico de las pilas de prueba, que operan durante 21 meses, mediante balance de agua. Los resultados de descarga total en la pila (lisímetros) indican una velocidad de flujo peak diferente en cada lisímetro, donde se reflejan varios mecanismos de flujo (mátrico: para baja o moderada infiltración; macroporo: escala horaria; capilar: escala de días-semanas) y la existencia de flujo no vertical.

La principal conclusión es la variabilidad espacial y temporal del flujo y de los parámetros químicos, recalcando la dificultad para identificar las diferentes vías de flujo preferencial.

3 HERRAMIENTAS PARA LA EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITOS DE ESTÉRILES

3.1 Métodos para el balance de flujo en medio no saturado

Existen diversos métodos que permiten la modelación del flujo de agua en sistemas granulares como depósitos de estériles, que permiten cuantificar el flujo considerando las diversas etapas de análisis indicadas en el modelo conceptual.

A continuación se hace una revisión de métodos de simulación aplicados tanto a depósitos de estériles como a sistemas de comportamiento hidráulico similar como rellenos sanitarios, los cuales presentan un mayor nivel de estudio en nuestro país. La evaluación ambiental y modelación numérica de los líquidos percolados de un relleno sanitario han sido desarrolladas por diversos autores (Gonzalez, 2000; Merino, 2005; Olivares, 2003; Salfate, 2005), quienes estudiaron y aplicaron métodos de simulación de los lixiviados, que también pueden ser aplicados a la modelación del flujo de agua en depósitos de estériles.

3.1.1 Modelos de balance hídrico

El modelo EPA-1975, propuesto por Fenn et al. (1975), es un método de cálculo del balance hídrico que permite predecir la generación de lixiviados en vertederos mediante coeficientes de escorrentía y valores de almacenamiento de humedad de los residuos. Este método se basa en el modelo WBM (Water Balance Method) de Thornthwaite & Mather (1957). Las componentes del modelo EPA para el cálculo del flujo mensual de lixiviado se presentan en la Figura 3.1.

Este modelo requiere datos de precipitaciones e índice de calor mensuales. El índice de calor que utiliza para el cálculo de la evapotranspiración es una función de la temperatura, que entrega valores bajos para temperaturas bajas y aumenta exponencialmente con ésta. El cálculo del almacenamiento de humedad de los residuos considera factores como la capacidad de campo de la matriz, el punto de marchitez permanente, la precipitación y la evapotranspiración. El modelo entrega como resultado volúmenes de escorrentía y percolación a nivel mensual.

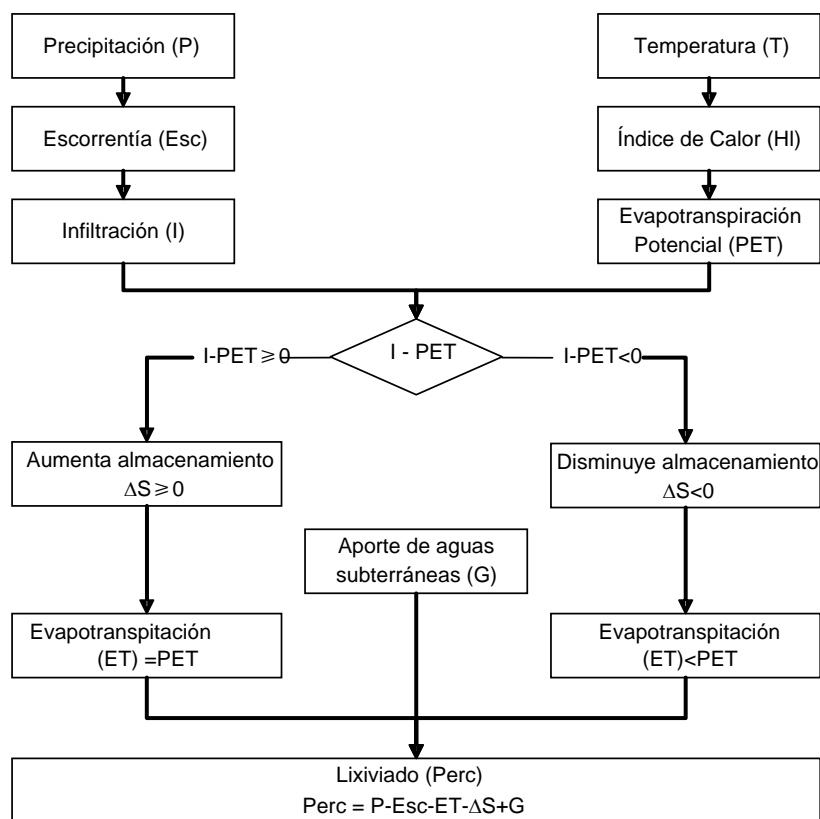


Figura 3.1: Componentes del modelo EPA-1975
(Fenn et al., 1975)

Otro modelo que utiliza un balance hídrico es el Hydrological Evaluation of Landfill Performance (HELP), desarrollado inicialmente por Schroeder (1983). HELP es un modelo cuasi- bidimensional que considera el movimiento vertical y lateral del agua en un relleno, realizando un balance por capas, basado en la escorrentía superficial, la evapotranspiración, el contenido de humedad de las diferentes capas y las características de cada una de ella. Utiliza la ley de Darcy para medio no saturado en el eje vertical y la ecuación de Boussinesq en la última capa de drenaje horizontal. La escorrentía superficial se obtiene mediante el método de la Curva Número del Soil Conservation Service (SCS, 1972) y la evapotranspiración por el método de Penman modificado (modificación de Ritchie (1972) a los trabajos de Penman (1963)).

El modelo requiere datos climatológicos, características del suelo y diseño del relleno. Los datos meteorológicos requeridos por el modelo son valores diarios de precipitación, temperatura, radiación solar, evapotranspiración, velocidad del viento y humedad relativa. Mientras que los parámetros de la matriz de suelo requeridos son: porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, contenido de humedad inicial y conductividad hidráulica saturada. Además de la cantidad y tipo de capas

(percolación vertical, drenaje lateral, tipo-barrera o geomembrana) a considerar en el balance. Los resultados entregados pueden ser valores a nivel diario, mensual o anual.

Los modelos basados en balances hídricos, ya sea en una o varias capas, presentan la ventaja de ser fáciles de utilizar, especialmente en el caso del modelo HELP que ha sido implementado comercialmente con una interfaz gráfica que facilita su uso y la obtención de resultados. Como desventaja, se tiene que para la estimación de las componentes del balance muchas veces se deben utilizar expresiones desarrolladas a partir de ajustes a datos empíricos, o que contienen parámetros que cambian de una localización a otra, haciendo depender el resultado de lo acertado que sean los valores utilizados.

3.1.2 Modelo de embalses lineales

Este modelo, muy usado en hidrología para la representación de relaciones precipitación-escorrentía en cuencas, fue utilizado por Olivares (2003) como base para un modelo de simulación de producción de lixiviado y calidad de éste, en cuanto a concentraciones de materia orgánica, en una columna experimental de residuos sólidos. Se utilizaron varias configuraciones de embalses lineales en serie. Éste modelo propone que el almacenamiento del sistema es proporcional al caudal de salida, mediante una constante de almacenamiento k , como muestra la ecuación 3.1.

$$V = k \cdot Q \quad (3.1)$$

Al combinar esta expresión con un balance volumétrico del sistema (ecuación 3.2) se obtiene la expresión para el flujo de salida (ecuación 3.3), suponiendo un caudal constante de entrada I .

$$\frac{\partial V}{\partial t} = I - Q(t) \quad (3.2)$$

$$Q = I - (1 - e^{-1/k}) \quad (3.3)$$

Donde, I : caudal de entrada al reactor [L^3/T]

Q : caudal de salida del reactor [L^3/T]

V : volumen de almacenamiento en reactor [L^3]

k : constante de embalse [T]

t : tiempo [T]

Olivares (2003) utilizó además una modificación en el método para poder representar la existencia de la capacidad de campo en los residuos sólidos, imponiendo un volumen mínimo de almacenamiento de humedad, bajo el cual no se produce salida de lixiviado.

3.1.3 Modelos de flujo en medio poroso

Según lo expuesto por Merino (2005), el movimiento de un fluido a través de un medio poroso se puede modelar como un flujo a través de pequeños capilares. Dentro del capilar existirá una distribución de velocidades, siendo ésta cero en la superficie de contacto y máxima en algún punto al interior del tubo. Este método de modelación es aplicable cuando los "capilares" o poros son los suficientemente pequeños en comparación al volumen que se está estudiando, y mientras el flujo sea laminar.

Es razonable entonces, modelar el movimiento de lixiviados a través de una matriz de residuos sólidos como flujo de agua a través de un medio poroso mientras que el lixiviado sea similar al agua y además se cumpla que los poros sean pequeños en comparación al volumen en estudio y las velocidades lo suficientemente bajas para no provocar flujo turbulento.

La ecuación del transporte de humedad en un medio poroso no saturado es conocida como la ecuación de Richards, y proviene de un balance de masas sobre un volumen de control infinitesimal y de la aplicación de la ley de Darcy para un medio no saturado. Se pueden identificar tres maneras de escribir la ecuación de Richards suponiendo un medio isotrópico: la forma basada en h (ecuación 3.4), la forma basada en θ (ecuación 3.5) y la forma mixta (ecuación 3.6).

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot K(h) \nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot D(\theta) \nabla \theta - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot K(h) \nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

La capacidad específica se define como:

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (3.7)$$

Por su parte, la difusividad es:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (3.8)$$

Donde, h: succión o carga hidráulica [L]

θ : contenido volumétrico de humedad [-]

C(h): capacidad específica de humedad [1/L]

K(h): Conductividad hidráulica no saturada [L/T]

D(h): Difusividad no saturada [L²/T]

z: Coordenada vertical, positiva hacia arriba [L]

Para determinar la conductividad hidráulica (3.9) y succión (3.10) en función de la humedad, se pueden utilizar las expresiones propuestas por Clapp y Hornberger (1978):

$$K(\theta) = K_{ref} \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^M \quad (3.9)$$

$$h(\theta) = h_{ref} \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{-b} \quad (3.10)$$

Donde, θ_{ref} : humedad de referencia [-]

K_{ref} : conductividad hidráulica para la humedad de referencia [L/T]

h_{ref} : succión para la humedad de referencia [L]

M y b: constantes positivas mayores a la unidad [-]

En el modelo numérico aplicado por Merino (2005) para evaluar los líquidos lixiviados de una columna de residuos sólidos, se utilizan las relaciones de saturación y conductividad propuestas por Van Genuchten (1980), debido a su amplia utilización y consiguiente validación. Con estas relaciones se obtienen las funciones que relacionan h con θ , K y C.

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & , h \geq 0 \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (-\alpha h)^n]^{-m} & , h < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$K = \begin{cases} K_s & , h \geq 0 \\ K_s \cdot Se^{1/2} \cdot [1 - (1 - Se^{1/m})^m]^2 & , h < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.13)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (3.14)$$

Donde, h: presión mátrica o succión [L]

θ , θ_r , θ_s : contenido de humedad actual, residual y saturado respectivamente [-]

K , K_s : conductividad hidráulica no saturada y saturada [L/T]

Se: grado de saturación [-]

α , m, n : Parámetros de ajuste del modelo [1/L], [-], [-]

3.2 Herramientas de modelación numérica

Como los problemas de modelación de flujo no saturado en medio poroso pueden conducir a ecuaciones en derivadas parciales que son difíciles de resolver por métodos analíticos, se han desarrollado diversos métodos numéricos y programas computacionales que los aplican, para facilitar su resolución. Dos métodos numéricos que han sido utilizados para resolver problemas de filtración en medios porosos son el método de elementos finitos (FEM) y el método de diferencias finitas (FDM) (Janssen et al., 2004; Hosseini, 1997). El FEM es ampliamente aceptado por su gran adaptación a condiciones de borde complejas. Es muy adecuado para enfrentar situaciones con propiedades del material variable y geometrías irregulares en 2D/3D. Por esto, muchas de las herramientas computacionales utilizadas para la modelación del flujo no saturado en medio poroso se basan en el FEM.

Boldt-Leppin et al. (1999) indica que las condiciones hidrológicas de una superficie horizontal de un sistema de cobertura de suelo puede ser bien descrita y modelada por los modelos numéricos en una dimensión (1D) disponibles. Lo mismo ocurre para evaluar la infiltración en la superficie de un depósito de estériles, ya que estos modelos permiten cuantificar este efecto considerando todas las variables hidrológicas de importancia incluyendo la evapotranspiración, que no se considera en los modelos en dos y tres dimensiones (2D/ 3D) físicamente basados.

Una vez determinada la tasa de infiltración neta, los programas de simulación en dos y tres dimensiones permiten modelar eficientemente el flujo a través de un botadero y determinar la tasa de percolación en la base del sistema, que más tarde puede alcanzar la napa subterránea. Sin embargo, estos modelos hidrogeológicos físicamente basados requieren un alto esfuerzo computacional. Es por esto que los modelos numéricos en 2D y 3D incorporan simplificaciones a la simulación para reducir los requerimientos computacionales y con esto disminuir el tiempo de análisis (Boldt-Leppin et al., 1999).

A continuación se hace una revisión de los principales programas de modelación numérica que pueden ser aplicados a la simulación del flujo en depósitos de estériles. Se entregan los principales antecedentes, ventajas y desventajas, que permitan realizar una buena elección de la metodología y software a aplicar en una modelación hidrogeológica de depósitos de estériles.

3.2.1 SoilCover

SoilCover (GeoAnalysis, 2000), es un modelo de elementos finitos en una dimensión, que permite estimar la tasa de infiltración de agua en la superficie de un suelo en condiciones saturadas y no saturadas.

Según lo expuesto por O’Kane et al. (1993), SoilCover es un programa que utiliza un método teórico para determinar el intercambio de agua entre la atmósfera y una superficie de suelo. Se basa en la ley de Darcy y la ley de Fick, para describir el flujo de agua líquida y vapor a través de un perfil de suelo en contacto con la atmósfera. Para determinar la tasa de evaporación utiliza el método Penman modificado.

Este método físicamente basado permite la predicción de la evapotranspiración y de las condiciones de borde para el flujo superficial en base a las condiciones atmosféricas, cobertura vegetal y propiedades del suelo (Boldt-Leppin et al., 1999). Además, realiza un balance de agua en base a la infiltración, evapotranspiración, escorrentía superficial, superficie de encharcamiento y las características del suelo. Y permite calcular el cambio en el contenido de agua, la succión, la presión de vapor, la temperatura y la conductividad hidráulica.

Este programa, que realiza análisis transitorio en 1D, puede ser utilizado con otros programas disponibles para la modelación del flujo de agua en depósitos de estériles. La tasa de infiltración determinada con SoilCover puede usarse como una condición de borde para el flujo en programas de modelación en 2D, empleados para el análisis de la percolación en depósitos de estériles.

La mayor desventaja de este programa es que al modelar el flujo sólo en una dimensión no se considera el flujo lateral en la predicción de la infiltración. Y tampoco es posible modelar situaciones de flujo preferencial.

3.2.2 Visual HELP

El programa computacional Visual HELP, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc., se basa en el modelo HELP (Schroeder et al, 1984) que permite simular de manera cuasi-bidimensional el movimiento del agua en un medio poroso, generando estimaciones de cantidad de lixiviado, sin predecir su calidad. La categoría cuasi-bidimensional del modelo se debe a que básicamente trabaja en la dirección vertical del flujo, salvo para ciertas capas donde se permite el movimiento lateral.

Visual HELP utiliza soluciones técnicas para contabilizar el efecto del almacenamiento superficial de agua, derretimiento de nieve, infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, almacenamiento de humedad en el suelo, drenaje lateral subsuperficial, recirculación de líquido percolado, drenaje no saturado vertical y percolación a través del suelo, geomembranas o membranas compuestas.

El modelo requiere datos climáticos, características del suelo y de diseño. Una de las ventajas del programa es que posee herramientas y bases de datos que permiten generar la información meteorológica, y contiene una base de datos con parámetros de suelo de 42 tipos de material.

El programa funciona mediante un balance masas que considera como entradas la precipitación, el derretimiento de nieves y la humedad inicial del material; como salidas considera la escorrentía superficial, la evapotranspiración, el drenaje lateral y el líquido percolado que atraviesa la última capa del diseño; y una acumulación de agua de un año para otro. Los resultados pueden ser obtenidos diariamente, mensualmente y anualmente. La precisión de los resultados estará limitada por la calidad de los datos con que se cuenta y que sean suministrados al programa.

Como indica González (2000), el modelo funciona con una serie de simplificaciones, que son razonables dentro de un diseño convencional de un depósito de material residual. Este asume que tanto la precipitación, la escorrentía superficial y el derretimiento de nieves ocurre sólo dentro del área del depósito o en una fracción de este, sin considerar una interrelación con el lugar donde se encuentra emplazado. Para la estimación de la Curva Número se considera el efecto de la pendiente y del largo de la superficie, que no están incluidos dentro del método SCS. Además el modelo asume un flujo a través de

un medio poroso siguiendo las ecuaciones de Darcy en un medio homogéneo, sin considerar la existencia de posibles vías de flujo preferencial.

Por otra parte, según lo expuesto por Savci y Williamson (2002), el modelo HELP es una herramienta útil para el análisis rápido de múltiples años de datos, para identificar años que exhiban condiciones climáticas medias y extremas. Sin embargo, el modelo no considera de manera implícita el flujo no saturado ascendente, que es un mecanismo de transporte de agua dominante en climas áridos, lo que puede resultar en una sobreestimación de la infiltración neta.

El modelo HELP es el más aceptado de los de su clase, superando las limitaciones de otros modelos al realizar un análisis cuasi-bidimensional, puesto que considera, tanto el flujo vertical unidimensional, como el drenaje lateral, que se unen en la parte superior de los niveles barrera o en la base de los niveles de drenaje lateral.

Diversos autores han utilizado este programa para modelar el flujo a través de rellenos sanitarios o depósitos de estériles (González, 2000; Savci y Williamson, 2002; U.S. E.P.A, 2003) y determinar la tasa de líquido lixiviado. Los resultados de este análisis (tasa de infiltración neta) se pueden utilizar como condición de borde para la simulación en 2D del flujo a través de un depósito de estériles.

3.2.3 HYDRUS-2D

HYDRUS-2D es un modelo de elementos finitos para la simulación en dos dimensiones del movimiento de agua, calor y solutos, en un medio de saturación variable. Fue desarrollado por el grupo Soil Physics (Simunek et al., 1999) del U.S. Salinity Laboratory, USADA-ARS, Riverside, California.

El modelo numérico resuelve la ecuación de Richards para flujo saturado/no saturado y la ecuación de advección-dispersión de Fick para el transporte de solutos y flujo de calor. Las ecuaciones de flujo son resueltas mediante el método Galerkin de elementos finitos aplicado a una malla de elementos triangulares con una integración en el tiempo realizada mediante un método implícito de diferencias finitas. Las mallas pueden ser rectangulares o generales si se adquiere el paquete MeshGen-2D.

HYDRUS-2D permite simular el flujo en regiones compuestas por suelos no uniformes, con un grado arbitrario de anisotropía local. El flujo y transporte se puede producir en un plano vertical, en un plano horizontal o en una región tridimensional que exhiba simetría radial en torno a un eje vertical (flujo vertical axisimétrico).

El modelo de flujo de agua puede considerar condiciones de borde de flujo y presión (constante o variable en el tiempo), así como controladas por las condiciones atmosféricas. En este sentido, dado que este modelo no es capaz de determinar la evapotranspiración para considerarla en la simulación, se recomienda utilizar una condición de borde de flujo (tasa infiltración neta) obtenida a partir de programas que realizan un balance de agua que si considera este parámetro (como Visual HELP o SoilCover).

Actualmente HYDRUS-2D ha sido reemplazado por HYDRUS 2D/3D que permite la simulación del flujo de agua, calor y solutos en dos y tres dimensiones, y trae incorporadas las herramientas para la generación automática de la malla. Sin embargo, en la bibliografía hay diversos estudios (algunos bastante recientes) que aplican el programa HYDRUS-2D a la modelación numérica del flujo no saturado en depósitos de estériles y, en general, a la evaluación del comportamiento hidrogeológico de estos sistemas (Fala et al., 2003, 2005, 2008; Molson et al., 2005; Aubertin et al., 2005, 2008). En estos estudios se comprueba la aplicabilidad y eficiencia de este software al problema de análisis de los flujos a través de un botadero.

3.2.4 SEEP/W

SEEP/W, desarrollado por Geo-Slope Internacinal, es un programa de simulación basado en el método de elementos finitos para el análisis de la filtración de aguas subterráneas y de problemas de disipación del exceso de presión de poros al interior de materiales porosos como suelo o roca. Este programa realiza análisis en dos dimensiones para flujo en condiciones saturadas o no saturadas.

Como indica O’Kane et al. (1993), este programa requiere la especificación de una condición de borde de flujo en la superficie (tasa neta de infiltración). Para esta condición de borde del flujo se puede utilizar los resultados obtenidos con programas como Visual Help o SoilCover (ambos programas realizan una evaluación del flujo de agua en la zona superficial).

SEEP/W es ampliamente utilizado en el análisis y diseño geotécnico, en proyectos de ingeniería civil, ingeniería en minas e hidrogeología. Diversos autores han aplicado este software para la modelación numérica del flujo no saturado en depósitos de estériles (Newman, 1999; Wilson, 2003; Martin et al., 2004).

Wilson (2003) modeló el flujo no saturado a través de botaderos, con capas inclinadas e intercaladas de grano grueso y grano fino, utilizando SEEP/W. Este modelo inicialmente fue pensado para un análisis con requerimientos de propiedades del material y condiciones de borde simples. Sin embargo, el modelo resultó difícil de resolver ya que presentó problemas de convergencia. La no convergencia se explica por

la no linealidad de la función de conductividad hidráulica con respecto a la succión mátrica. El autor concluye que SEEP/W es una herramienta útil y poderosa, pero puede no ser la más adecuada para analizar el flujo y percolación en depósitos no saturados.

3.2.5 HILLFLOW

HILLFLOW es un sistema de modelación, físicamente basado, desarrollado para simular el comportamiento hidrológico de laderas y micro-cuencas (Bronstert y Plate, 1997). Simula los procesos hidrológicos de interceptación, evapotranspiración, infiltración a la matriz de suelo, movimiento de la humedad del suelo, escorrentía superficial, flujo subsuperficial y sus interacciones. Sin embargo, no se considera el flujo de aguas subterráneas en el modelo.

Se desarrollaron tres versiones de HILLFLOW. La versión 1D está diseñada para simular el flujo vertical en una columna de suelo mediante balance de agua. En la versión 2D se considera el flujo lateral, permitiendo la simulación de situaciones típicas en hidrología de laderas, tales como escorrentía subsuperficial, movimiento lateral del agua en la matriz debido a la estratificación y anisotropía del suelo, y escorrentía superficial de la ladera. La versión 3D incluye la segunda dirección del flujo lateral, permitiendo la simulación de procesos hidrológicos en una cuenca o zona de captación completa (Boldt-Leppin et al., 1999).

Bronstert et al. (1998) indica que la calidad del modelo depende principalmente de la precisión de los datos de entrada y condiciones de borde, de la discretización espacial y temporal, y de la calibración del modelo. En el mismo trabajo se identifican ciertas limitaciones del modelo: falta de conocimientos sobre cómo formular y parametrizar determinados procesos que influyen en la respuesta hidrológica de una ladera, tales como la existencia de vías de flujo preferencial; en muchas aplicaciones prácticas, los datos disponibles no bastan para satisfacer las exigencias de un modelo detallado; y por último la aplicación de HILLFLOW enfrenta a dificultades similares a las que se enfrenta cualquier modelo computacional complejo, como las posibles limitaciones de potencia de los computadores, y la exigencia de un código libre de errores y una interfaz más o menos fácil de usar.

3.2.6 FEFLOW

El programa FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) es un sistema de simulación de flujos subterráneos basado en el método de elementos finitos (DHI-WASY GmbH, 2010). Este programa permite la modelación de los procesos del transporte de contaminantes y del flujo de aguas subterráneas en medios porosos, en condiciones saturadas o no saturadas. Con FEFLOW es posible resolver problemas en dos y tres dimensiones, en áreas y cortes (horizontales, verticales o de simetría radial), en condiciones transitorias o estacionarias. Además permite modelar el transporte de masa y de calor.

FEFLOW puede ser utilizado para describir la distribución espacial y temporal de contaminantes de aguas subterráneas, para modelar procesos geotérmicos, para estimar la duración y los tiempos de transporte de contaminantes en acuíferos, para planear y diseñar estrategias de remediación y técnicas de intercepción, y para apoyar el diseño de alternativas y esquemas efectivos de monitoreo. Además este programa puede ser aplicado al estudio de la variación del nivel en aguas subterráneas en áreas mineras y construcción de depósitos. Por lo tanto con el programa FEFLOW es posible modelar el flujo a través de botaderos y evaluar las repercusiones medioambientales de la construcción de estos depósitos de residuos mineros. Sin embargo, en la bibliografía no hay mayores estudios que apliquen este software a la modelación hidrogeológica de depósitos de estériles.

4 MODELO CONCEPTUAL Y METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE DEPÓSITOS DE ESTÉRILES

Herasymuik (1996) desarrolló un modelo conceptual que describe el comportamiento hidrogeológico de un depósito de estériles construido según el método *end-dumping*, el cual es utilizado en diversos estudios (Newman, 1999; Wilson et al., 2000; Wilson, 2003). El modelo muestra que los depósitos de estériles presentan capas estratificadas, inclinadas aproximadamente en el ángulo de reposo del material. Además se considera la existencia de un contenido de agua residual en las capas de desechos rocosos. La estratificación ocurre debido a la segregación del material luego del vertido y también se forma por las variaciones en el tipo de roca. Estas capas son a menudo relativamente uniformes en tamaño de grano, pero no son continuas. La presencia de capas adyacentes de grano grueso y grano más fino genera una variación de la conductividad hidráulica de varios órdenes de magnitud. Las diferencias en la textura entre las capas y en general la estratificación al interior del depósito generan la existencia de vías de flujo preferencial (Wilson et al., 2000).

La distribución del tamaño de partículas es utilizada como indicador de la tendencia de flujo preferencial: tamaño de grano grueso indica un potencial flujo bajo altas condiciones de humedad (macroporos), mientras que para tamaño de grano fino se tiene un potencial de flujo en condiciones de poca humedad (dominado por efectos capilares).

El modelo conceptual del comportamiento hidrogeológico de botaderos inicia con la infiltración de agua debido a la precipitación. El agua que infiltra en el material de grano grueso, tanto en la parte superior de la pila de roca estéril como en el material de la ladera, no puede ser retenida, con esto se genera un frente de humedad que fluye a través de las capas de grano grueso, por efecto de la gravedad (la ley de Darcy no describe este tipo de flujo). Cuando el frente de humedad ingresa a las capas de grano fino, el agua es almacenada y transportada en condiciones mayores de saturación (se aplica la ley de Darcy).

El modelo conceptual desarrollado por Herasymuik (1996), indica que el calor al interior del depósito de estériles aumenta la evaporación del agua, generando el flujo ascendente de vapor de agua. Las capas de material rocoso de grano grueso con presencias de vacíos interconectados proveen vías de flujo preferencial para el movimiento del vapor de agua y para el escape de otros gases (que se puedan generar por reacciones químicas al interior del depósito). El movimiento ascendente del vapor de agua puede redistribuir el agua en el frente de humedad, donde el vapor se puede condensar o escapar de la pila de desechos rocosos (Wilson, 2003).

A continuación se presenta un diagrama que muestra una simplificación en dos dimensiones de las componentes a considerar en el modelo conceptual (Figura 4.1). Donde se consideran los parámetros hidrológicos relevantes y las principales características físicas que afectan en el comportamiento del flujo de agua a través del depósito, específicamente la estratificación causada por diferentes etapas de construcción y la heterogeneidad del material por la agradación y compactación, que generan zonas con conductividad hidráulica diferenciada.

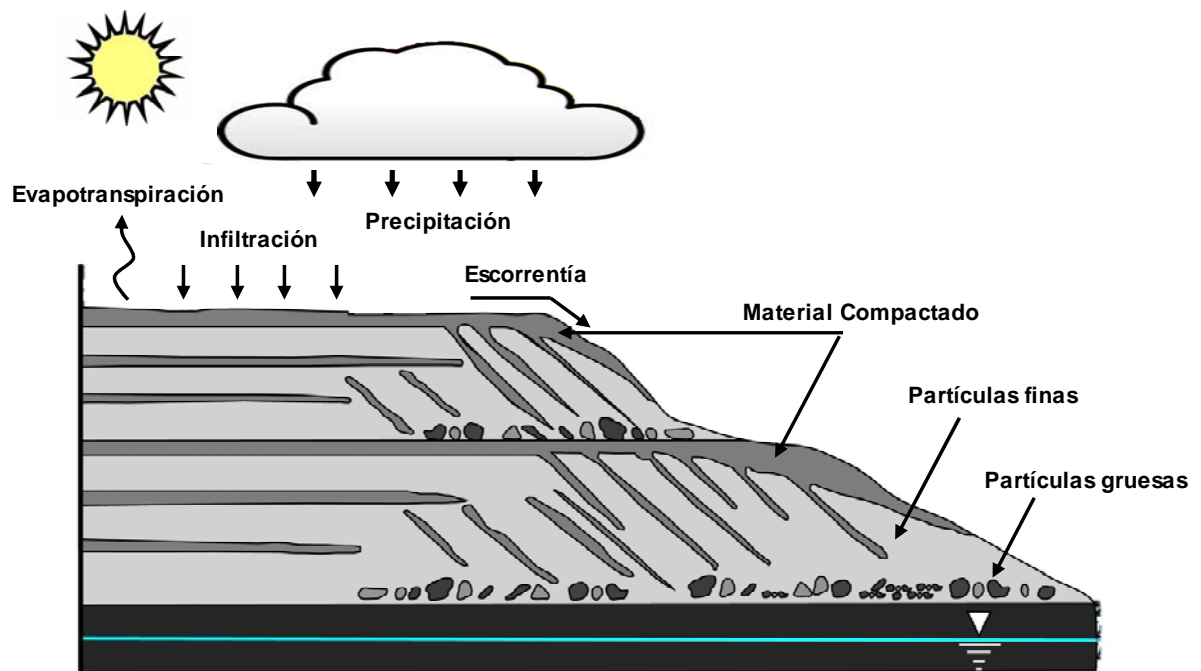


Figura 4.1: Perfil esquemático para el modelo conceptual de un depósito de estériles.
(Elaboración Propia)

4.1 Componentes del Modelo

Según lo expuesto por diversos autores (Savci y Williamson, 2002; Swanson et al. 1998), para realizar una evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles se requiere evaluar los siguientes parámetros (que se pueden observar en el esquema de la Figura 4.2):

- Tasa neta de infiltración.
- Tiempo requerido para consumir humedad disponible en el depósito.
- Percolación en la base

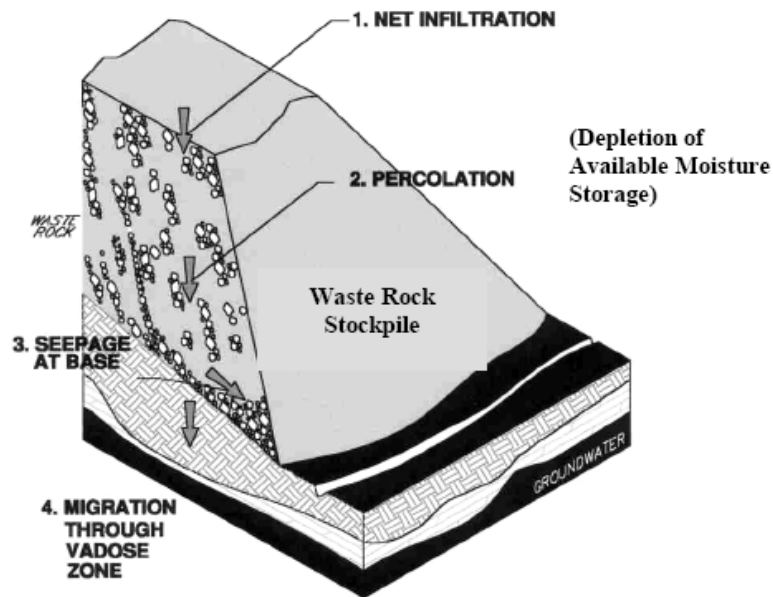
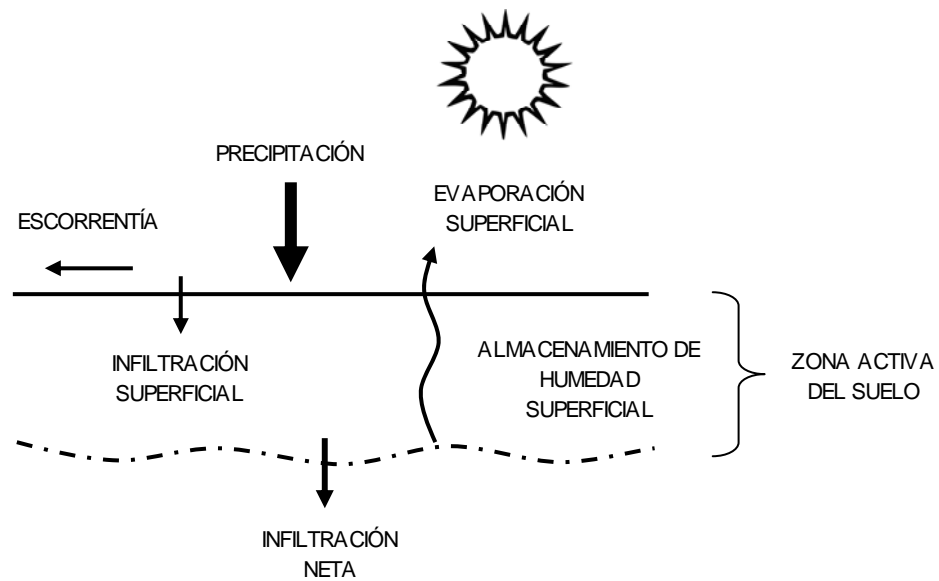


Figura 4.2: Componentes para el análisis hidrológico no saturado de depósitos de estériles (Savci y Williamson, 2002)

4.1.1 Infiltración neta.

La tasa neta de infiltración se estima realizando un balance hidrológico. Los parámetros necesarios para estimar la tasa de infiltración neta se indican en la Figura 4.3, donde se muestra que la precipitación puede infiltrar en la superficie del suelo o fluir lateralmente como escurrimiento superficial. El agua que infiltra se almacena en los poros de la zona superficial del suelo y puede ser removida por efecto de la evapotranspiración. La tasa de evapotranspiración es función de las condiciones climáticas y las propiedades del suelo (curva característica suelo-agua y conductividad hidráulica). El agua que no es afectada por la evapotranspiración se mueve a través de la zona activa del suelo e infiltra al interior del depósito de estériles, lo que comúnmente se denomina infiltración neta.

Es importante considerar que en ambientes áridos (con altos niveles de evaporación) las tasas netas de infiltración pueden ser significativamente sobreestimadas si los datos meteorológicos y métodos de simulación no son clima-específicos (Hutchinson y Elison, 1992).



**Figura 4.3: Componentes para el análisis de la infiltración neta
(Elaboración Propia)**

4.1.2 Consumo de la humedad disponible en el depósito

Para que el flujo de agua a través del depósito de estériles, posteriormente alimente la percolación en la base del depósito, se debe agotar la capacidad de almacenamiento de humedad del sistema.

Los desechos mineros típicamente se depositan en estado seco, con esto tienen un potencial de almacenamiento de humedad inherente que puede tardar decenas a cientos de años en agotar. El agua que infiltra a través de la zona activa del suelo se mueve a través del depósito de estériles, humedeciéndolo gradualmente. La percolación en el depósito ocurre a través de un sistema estratificado e interdigitado de capas de residuos rocosos de grano grueso y fino, que se inclinan en el ángulo de reposo del material (Herasymuik, 1996). Bajo condiciones áridas no saturadas, el agua tenderá a fluir principalmente a través de las zonas de desechos rocosos de grano fino. Por el contrario, para condiciones de alta humedad (bajo fuertes eventos de precipitaciones y altas tasas de infiltración) el agua fluirá principalmente a través de las zonas con material de grano grueso.

Para determinar este parámetro es posible aplicar relaciones sencillas basadas en la capacidad de almacenamiento de humedad del depósito o aplicar metodologías más detalladas, considerando modelos de flujo en medio poroso, que han sido implementados en programas de modelación numérica en dos y tres dimensiones.

4.1.3 Percolación en la base

La última etapa para el análisis cuantitativo de los flujos de agua a través de un depósito de estériles es determinar la tasa de percolación en la base. Para esto se considera un análisis de flujo en medio poroso no saturado, con la ayuda de herramientas de análisis numérico en dos dimensiones.

Dependiendo de la naturaleza del material de fundación y de la configuración topográfica del depósito, cuando el frente de humedad llegue a la base del sistema puede fluir lateralmente a lo largo de la base o percolar hacia el substrato (US EPA, 2003).

Con la estimación de la percolación en la base del botadero es posible identificar la perturbación que generan estos depósitos en términos de su influencia en los niveles de recarga al acuífero. Además permite estimar el tiempo de migración de potenciales contaminantes hacia el acuífero.

En climas áridos y semiáridos, el tiempo necesario para que la filtración procedente del depósito de estériles migre a las aguas subterráneas puede ser bastante largo. Este tiempo depende de la tasa de percolación en la base del depósito, del potencial de almacenamiento de humedad del material subyacente y de la profundidad del nivel freático. Además se debe considerar que la infiltración en la superficie del sistema previo al emplazamiento del botadero se altera con la construcción de éste, lo cual produce que el contenido de humedad en la zona no saturada disminuya y se genere una disponibilidad de almacenamiento de humedad adicional (Savci y Williamson, 2002).

4.2 Modelo Conceptual

Considerando las componentes de análisis descritas anteriormente, y las principales y más frecuentes características físicas de los depósitos de estériles, se define un modelo conceptual para la evaluación del flujo de agua a través de estos sistemas, que se esquematiza en la Figura 4.4.

Se debe considerar que como estos sistemas artificiales tiene características físicas altamente variables (según los métodos constructivos y características del material de desecho), el modelo conceptual propuesto se puede adecuar a las condiciones de cada caso en particular. Sin embargo, las etapas de análisis y parámetros hidrológicos a considerar son válidas para cualquier caso de depósito de estériles.

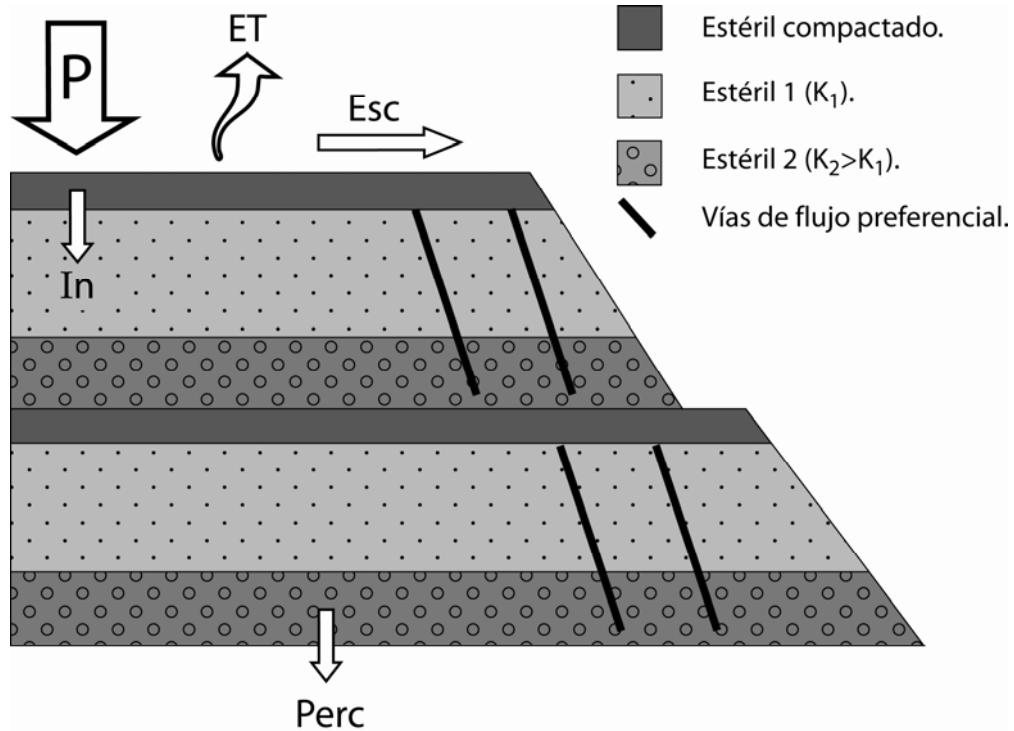


Figura 4.4: Modelo conceptual para la evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles.
(Elaboración Propia)

Según este modelo, las componentes hidrológicas a considerar para determinar el flujo de salida del sistema (percolación en la base del botadero) son:

- Precipitación (P)
- Evapotranspiración (ET)
- Escurrimiento superficial (Esc)
- Infiltración neta (In)
- Almacenamiento de humedad (ΔW)
- Percolación (Perc)

Estos parámetros se relacionan según la ecuación 4.1, que describe el balance hídrico del sistema:

$$Perc = P - Esc - ET - \Delta W \quad (4.1)$$

Sin embargo, en este caso se propone realizar una modelación por etapas según las componentes de análisis presentadas para el modelo conceptual. Con esto, el balance hídrico se puede dividir en dos etapas, representadas las siguientes Ecuaciones 4.2 y 4.3, donde una etapa intermedia sería determinar el almacenamiento de humedad del sistema (ΔW).

$$I_n = P - Esc - ET - \Delta W_{ZA} \quad (4.2)$$

$$Perc = I_n - \Delta W \quad (4.3)$$

Para determinar la infiltración neta es necesario considerar el almacenamiento de humedad de la zona activa de suelo (ΔW_{ZA}), que corresponde a la capa superficial del depósito que puede verse afectada por la evaporación.

La precipitación es información de entrada al modelo. Si no se dispone de estadísticas de precipitación registradas en estaciones pluviométricas de la zona de estudio, se deben generar a partir de información de estaciones cercanas, para lo cual existen diversos métodos hidrológicos. En zonas donde por las condiciones climáticas exista precipitación de agua nieve, se debe considerar la precipitación de aguas lluvia y el derretimiento de nieve, que en conjunto constituyen el agua líquida que puede ingresar al sistema.

La información de evapotranspiración puede estar disponible en registros de estaciones meteorológicas de la zona de estudio o puede ser generada por diversos métodos hidrológicos. Además existen programas computacionales y métodos de balance tipo HELP, que permiten la determinación de este parámetro (considerando estadísticas de temperatura, radiación solar, etc.), así como entregan resultados para la estimación de la escorrentía superficial y de la tasa de infiltración neta.

4.3 Metodología de modelación numérica para el flujo a través de un depósito de estériles.

Según el modelo conceptual definido, se desarrolla una metodología de modelación numérica para el flujo a través de un depósito de estériles, considerando algunos de los métodos y programas de modelación numérica descritos anteriormente.

Para analizar el comportamiento hidrogeológico de un depósito de estériles, se considera una metodología de modelación que consta de las etapas definidas anteriormente como componentes del modelo: 1) determinación de la infiltración neta, que puede estimarse utilizando modelos hidrológicos tipo HELP; 2) predicción del tiempo requerido para consumir la humedad disponible en el depósito y 3) estimación de la percolación en la base, en ambas etapas es posible utilizar métodos numéricos y herramientas computacionales basados en la teoría de flujo no saturado en medio poroso.

4.3.1 Determinación de Infiltración neta

Para la infiltración se puede utilizar un modelo semi-empírico de balance de agua tipo HELP o un modelo hidrológico físicamente basado como SoilCover, ambos programas permiten estimar de manera precisa la infiltración neta (Savci et al., 2002).

En este caso se trabajará el software Visual HELP 2.2. Se recomienda utilizar este programa por su capacidad de modelar de manera cuasi-bidimensional, lo que permite determinar la infiltración neta considerando flujo lateral (y no sólo vertical, como en el caso de SoilCover).

Con Visual HELP es posible calcular la tasa de infiltración neta o recarga neta potencial que ingresa al depósito, producto de las precipitaciones sobre un botadero con condiciones climáticas, de material y de vegetación específicas; utilizando el método de balance hídrico. La ecuación que describe este método y sus componentes se detallan a continuación:

$$R = P - D - ET - \Delta W \quad (4.4)$$

Donde, R: recarga neta potencial

P: precipitación

D: escorrentía superficial

ET: evapotranspiración

ΔW : cambio en el almacenamiento de humedad del suelo

A continuación se detalla la información necesaria para aplicar el modelo y los resultados que entrega el programa Visual HELP.

Información de entrada:

- **Datos climatológicos:** precipitación, temperatura, radiación solar y evapotranspiración. El programa permite tanto la entrada de datos históricos, los cuales se deben presentar como registros diarios; parámetros estadísticos de los mismos, que permiten al programa generar un escenario climático de la zona; o elegir dentro de su base de datos la estación meteorológica más cercana a la ubicación del proyecto (Visual HELP incluye información de más de 3000 estaciones meteorológicas en todo el mundo).
- **Datos sobre las características de los materiales de vertido:** porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, conductividad hidráulica y humedad inicial de suelo. En el caso de los datos del material, es posible utilizar tanto la opción de seleccionar dentro de la base de datos del programa el tipo de suelo o material deseado, así como la opción de generar una base de datos con las características de éstos.
- **Datos sobre el diseño del depósito:** se considera el número, espesor y tipo de capas (percolación vertical, drenaje lateral, tipo barrera o geomembrana); porcentaje en el que es posible la escorrentía en cada superficie en la que se haya dividido el vertedero, pendiente, máxima distancia de drenaje en las capas de drenaje lateral. El modelo puede ser ejecutado hasta con 20 capas de suelo, utilizando hasta 5 capas sintéticas en cada configuración.

Resultados:

La simulación puede ser realizada en un rango entre 1 y 100 años. Las respuestas se pueden producir de forma variada dependiendo de las especificaciones del usuario: en valores diarios, mensuales, anuales totales; medios de los valores mensuales y anuales para el período simulado, y máximos diarios para el período simulado.

4.3.2 Consumo de la humedad disponible en el depósito

Para esta etapa de modelación se consideran dos metodologías diferentes. Una sencilla, aplicando expresiones de cálculo simple desarrolladas considerando la capacidad de almacenamiento de humedad del sistema. Y otra con mayor nivel de detalle aplicando programas de modelación numérica tales como HYDRUS 2D o SEEP/W.

La metodología de cálculo presentada por Guymon (1994), ecuación 4.5, es una manera sencilla de estimar el tiempo requerido para agotar capacidad de almacenamiento de humedad en el depósito de estériles.

$$\Delta t = Z * \left(\frac{\theta_s - \theta}{I} \right) * (1 - CM) \quad (4.5)$$

Donde, Δt : tiempo requerido para agotar el almacenamiento de humedad disponible

Z: espesor del depósito de estériles

$(\theta_s - \theta)$: capacidad de almacenamiento de humedad

I: tasa de infiltración neta

CM: fracción del depósito que contiene material de textura gruesa que carece de suficientes finos en la matriz capaces de transmitir y almacenar humedad en condiciones no saturadas (porcentaje del material sin potencial de almacenamiento de humedad)

Una modelación más detallada incluye la aplicación de un modelo de flujo no saturado en medio poroso, utilizando HYDRUS-2D. Se propone usar este software por su amplia aplicación en estudios recientes donde se modela el comportamiento hidrogeológico de depósitos de estériles, presentando buenos resultados y menores limitaciones o fuentes de error que otros programas de simulación.

A continuación se detalla el método de modelación numérica aplicado por el programa. La forma en 2D de la ecuación de Richard's, utilizada por HYDRUS-2D para calcular el flujo en el medio poroso parcialmente saturado puede ser vista en la ecuación (4.6).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla [K(\Psi) \cdot \nabla \Psi] + \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad (4.6)$$

Donde, θ : contenido volumétrico de agua [-]

Ψ : succión [L]

K: conductividad hidráulica [L/T]

S: volumen de agua removido por la capa vegetal por unidad de tiempo [1/T]

t: tiempo [T]

Para resolver la ecuación de Richard es necesario conocer la curva de humedad característica del suelo, la cual puede ser obtenida de diversos modelos que simulan el comportamiento no saturado del material. HYDRUS-2D describe las propiedades hidráulicas no saturadas del suelo mediante los modelos de van Genuchten (1980), Brooks y Correy (1964) y el modelo de van Genuchten modificado. Además, incorpora el efecto de histéresis utilizando los modelos empíricos de Scott et al. (1983) y Kool y Parker (1987).

Para la modelación de la infiltración de agua a un depósito de estériles, se hace la analogía con el proceso de infiltración de lixiviado a un relleno sanitario (Merino, 2005; Salfate, 2005), donde se utiliza la ecuación de van Genuchten como aquella que describe el comportamiento no saturado de los residuos:

$$S_e = \left(1 - |\alpha \Psi|^n\right)^{-m} \quad (4.7)$$

Donde α , m , n son parámetros de ajuste de la curva, Ψ es la succión y S_e es el contenido volumétrico de agua normalizado o grado de saturación efectivo, dado por la ecuación (4.8).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.8)$$

Donde, θ : contenido de humedad

θ_r : contenido de humedad residual

θ_s : contenido de humedad de saturación

De ambas expresiones es posible despejar el contenido de humedad (contenido volumétrico de agua) en función de la succión (carga hidráulica), con lo que se define la curva de retención de agua (ecuación 4.9). Además, el programa utiliza la ecuación 4.10 para calcular la conductividad hidráulica en función de la succión.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \Psi|^n\right]^m} \quad (4.9)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{l/m}\right)^m\right]^2 \quad (4.10)$$

Donde, θ : contenido de humedad actual

θ_r : contenido de humedad residual

θ_s : contenido de humedad saturado

Ψ, h : succión o carga hidráulica

K : conductividad hidráulica

K_s : conductividad hidráulica saturada

S_e : grado de saturación efectivo

l : conectividad de los poros

α, m, n : parámetros del modelo, con $m = 1-1/n$

A continuación se detalla la información necesaria para aplicar el modelo y los resultados que entrega el programa HYDRUS-2D.

Información de entrada:

Se debe especificar la información geométrica del modelo: tipo de flujo que se modelará (vertical, horizontal o asimétrico), número de materiales (con sus respectivos parámetros hidráulicos), número de capas, inclinación de las capas y distribución de los materiales. Información sobre características no saturadas del material (conductividad hidráulica y curva característica suelo-agua). Los parámetros pedidos por el programa para generar las curvas características del suelo son $\theta_s, \theta_r, \alpha, n, K_s$ y l . Además se debe indicar la discretización de tiempo y las condiciones de borde (que pueden ser constantes o variables).

Resultados:

Los resultados entregados por el programa HYDRUS-2D son: distribución de humedad y presión, flujo de agua y flujo acumulado en las condiciones de borde, curvas características del suelo y balances de masa (que entrega información del contenido de agua). El programa entrega además una visualización gráfica de los resultados.

4.3.3 Percolación en la base y tiempo de migración al acuífero de potenciales contaminantes

En esta etapa se puede realizar una evaluación simple con expresiones de cálculo de flujo en medio poroso no saturados, o un modelación numérica con la ayuda de herramientas computacionales (en este caso, al igual que en la etapa anterior se propone la aplicación del programa HYDRUS-2D)

El tiempo medio necesario para que la percolación proveniente de la base del botadero pueda llegar a las aguas subterráneas se puede estimar mediante un simple cálculo descrito por Guymon (1994) y Maidment (1993). Como se muestra a continuación, este método utiliza la tasa de infiltración neta estimada y el contenido de humedad de la zona no saturada para predecir la velocidad media del agua que migra hacia la zona saturada.

$$v = \frac{q}{\theta_v} \quad (4.11)$$

Donde, v : velocidad media del agua que migra hacia la zona saturada

q : tasa de percolación en la base del depósito de estériles

θ_v : contenido de humedad de la zona vadosa

Cabe destacar que la tasa de percolación en la base (q) corresponde a la tasa de infiltración neta luego de que el almacenamiento de humedad disponible ha sido agotado.

4.4 Resumen Metodología

A modo de resumen, en la Figura 4.5 se presenta un esquema que muestra las etapas de evaluación de la metodología de modelación numérica propuesta con el objetivo analizar el comportamiento hidrogeológico de un depósito de estériles y de determinar el flujo de salida (percolación) en la base.

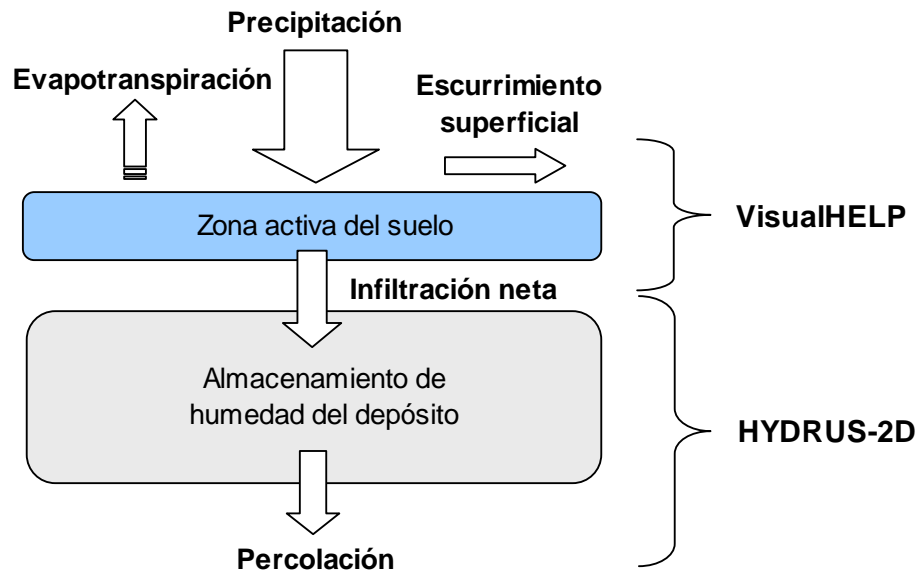


Figura 4.5: Esquema de la metodología de modelación numérica propuesta para la evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles (Elaboración Propia).

5 APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Para evaluar la aplicabilidad y correcto funcionamiento de la metodología de modelación hidrogeológica propuesta, se realiza una aplicación a un caso real de depósito de estériles de la minería chilena. Específicamente se trabaja con el proyecto de desarrollo minero El Morro, el cual pertenece mayoritariamente a Xstrata Copper y es operado por Sociedad Contractual Minera El Morro. Este proyecto actualmente se encuentra en proceso de evaluación del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), organismo del cual se obtuvo la información necesaria para el desarrollo de esta etapa del trabajo.

5.1 Antecedentes generales Proyecto El Morro

El proyecto El Morro consiste en la explotación a rajo abierto del yacimiento de cobre La Fortuna, donde el mineral extraído se procesa mediante flotación a razón de 90 mil toneladas diarias para obtener unas 2.200 toneladas al día de concentrado de cobre. De acuerdo a las reservas mineras actualmente establecidas para el yacimiento La Fortuna y el ritmo promedio de explotación que contempla el plan minero, el Proyecto considera un horizonte de 14 años de explotación (etapa de operación). Mientras la etapa de construcción se extendería por tres años, la de cierre dos y la de post cierre cinco años.

5.1.1 Ubicación del proyecto

Las obras e instalaciones del Proyecto El Morro se ubican en la III Región de Atacama, en las Comunas de Alto del Carmen, Vallenar y Copiapó (Figura 5.1). La localización del Proyecto y el emplazamiento de las obras están fundamentalmente determinados por la ubicación del yacimiento minero La Fortuna, las condiciones geográficas del área y los aspectos ambientales de cada uno de los componentes del Proyecto.

La zona de interés para este estudio es el Área Mina-Planta, que corresponde al área de emplazamiento de las obras de Mina, Planta Concentradora y sectores de depósito de Estéril y depósito de Relaves. Esta área se ubica en el sector El Morro, en la parte alta de las cuencas de Quebrada Larga y Quebrada Piuquenes (Figura 5.2), ambas tributarias de la cuenca del río Cazadero. Este sector se ubica aproximadamente a 72 km al nororiente del poblado de Chancoquín, y a 144 km de la ciudad de Vallenar. En la Figura 5.2 se muestra la ubicación general de las principales obras que se proyectan en el Área Mina-Planta.

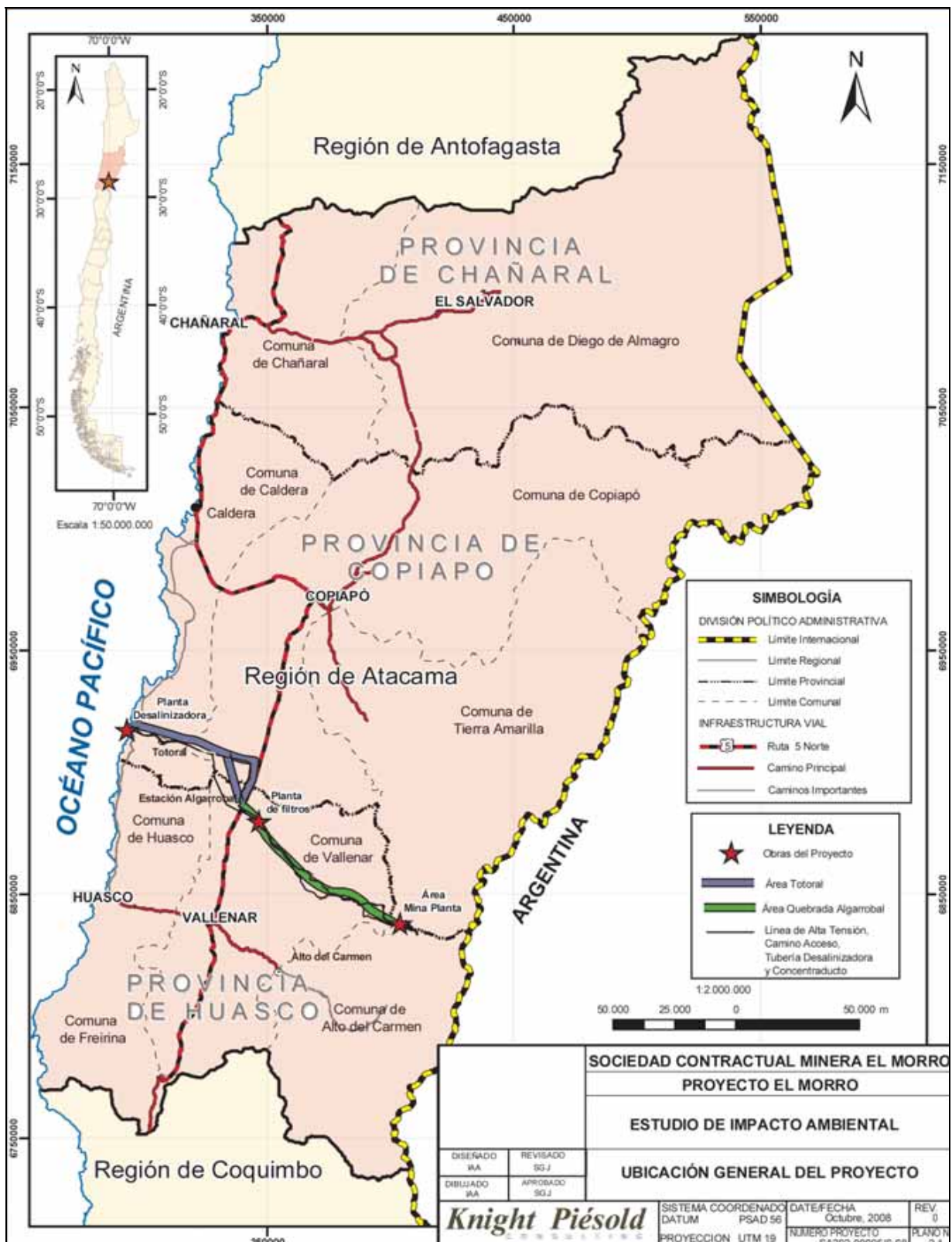


Figura 5.1: Plano de ubicación general del Proyecto El Morro
(Knight Piésold, 2008)

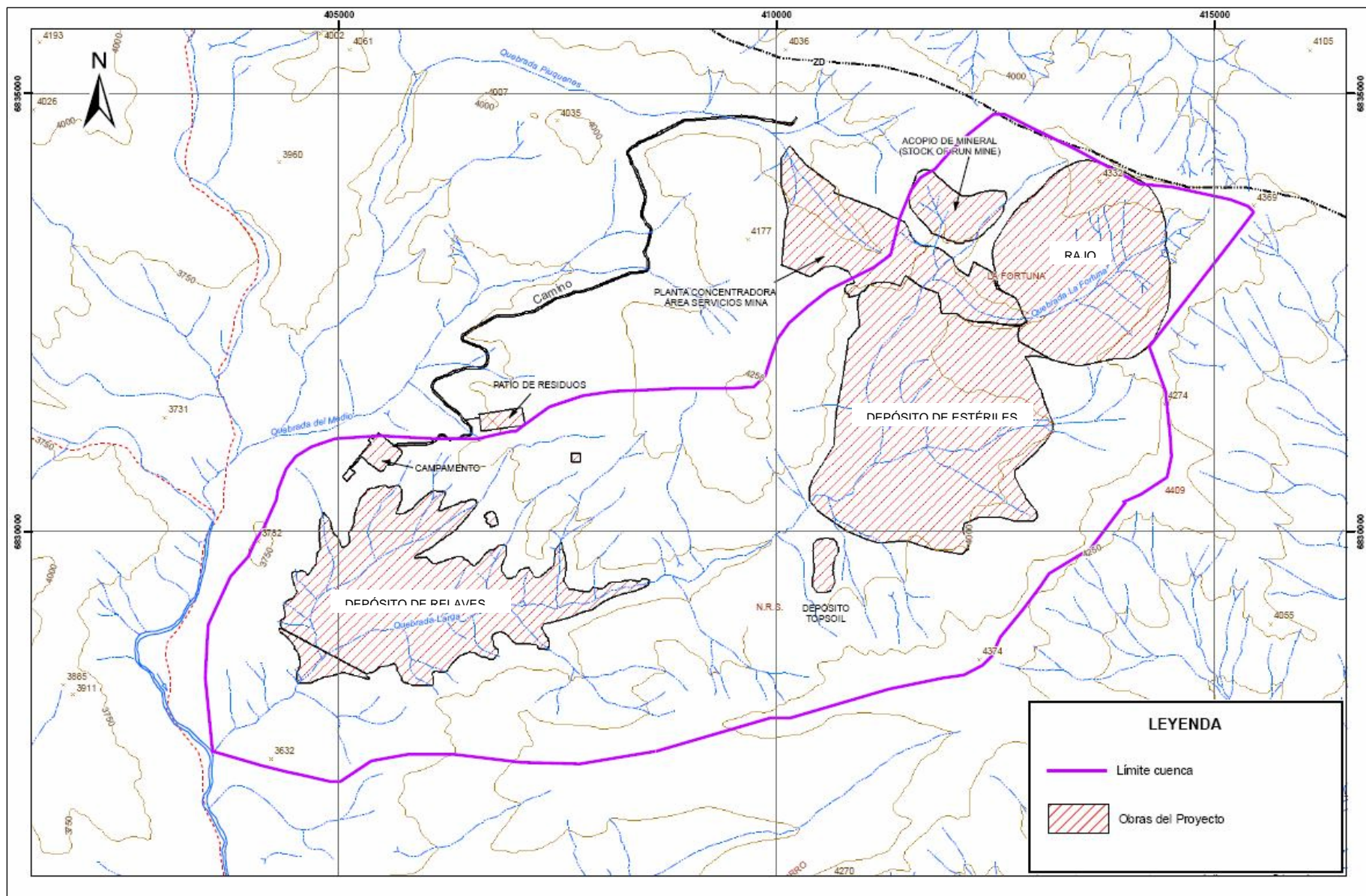


Figura 5.2: Ubicación general Área Mina-Planta
(Modificado de Knight Piésold, 2008)

5.1.2 Clima y Meteorología

La unidad geográfica en la cual se inserta el área del Proyecto se caracteriza por ser la transición entre el clima desértico de las regiones de Arica, Tarapacá y Antofagasta, con un aumento sostenido de las precipitaciones hacia el sur, que representa el denominado Norte Chico (Atacama y Coquimbo). Específicamente para el Área Mina-Planta, donde se emplazaría el depósito de estériles, se distinguen dos tipos de clima: Desértico Frío de Montaña y Clima Tundra de Alta Montaña.

- **Desértico Frío de Montaña:** Este tipo de clima se sitúa entre los 1.500 y los 4.000 m s.n.m., siendo el comportamiento de las temperaturas regulado por la altitud. Las temperaturas medias anuales están por debajo de los 12°C, descendiendo a mayor altura. La principal característica de la zona es la gran sequedad atmosférica, las precipitaciones en forma de nieve y un marcado gradiente térmico entre las temperaturas diurnas y las nocturnas. Las precipitaciones son escasas, con un total anual que varía entre 50 y 150 mm aproximadamente, dependiendo de la altitud.

- **Tundra de Alta Montaña:** Se manifiesta siempre en ambientes de altitud sobre los 3.000 m s.n.m. y está asociado a bajas temperaturas durante todo el año, con variaciones en torno a los 0°C y temperaturas menores a 10°C durante el verano. Las precipitaciones se presentan en forma de nieve, inclusive aquellas que se producen en verano.

La información meteorológica de la zona de interés se obtiene de la estación Campamento El Morro, periodo 2003 - junio 2008 (ANEXO A). Según estos registros la temperatura promedio es de 3,0°C, con extremas máximas y mínimas de 14,0 °C y -6,8°C, respectivamente. Los valores medios mensuales de temperatura registrados en El Morro se indican en la Tabla 5.1: Serie mensual de temperatura estación Campamento El Morro, cuyo comportamiento se observa de mejor manera en la Figura 5.3.

Tabla 5.1: Serie mensual de temperatura estación Campamento El Morro

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura Media [°C]	7,3	6,4	6,1	4,1	1,7	1,1	0,4	0,8	2,2	3,3	4,4	6,6	3,7
Temperatura Mínima [°C]	-2,9	-2,9	-4,7	-8,2	-13,4	-10,4	-18,6	-15,3	-15,4	-9,8	-6,4	-4,0	-18,6
Temperatura Máxima [°C]	19,2	19,4	18,2	18,2	12,5	12,2	15,2	15,0	13,5	15,8	16,2	17,8	19,4

Fuente: Knight Piésold, 2008

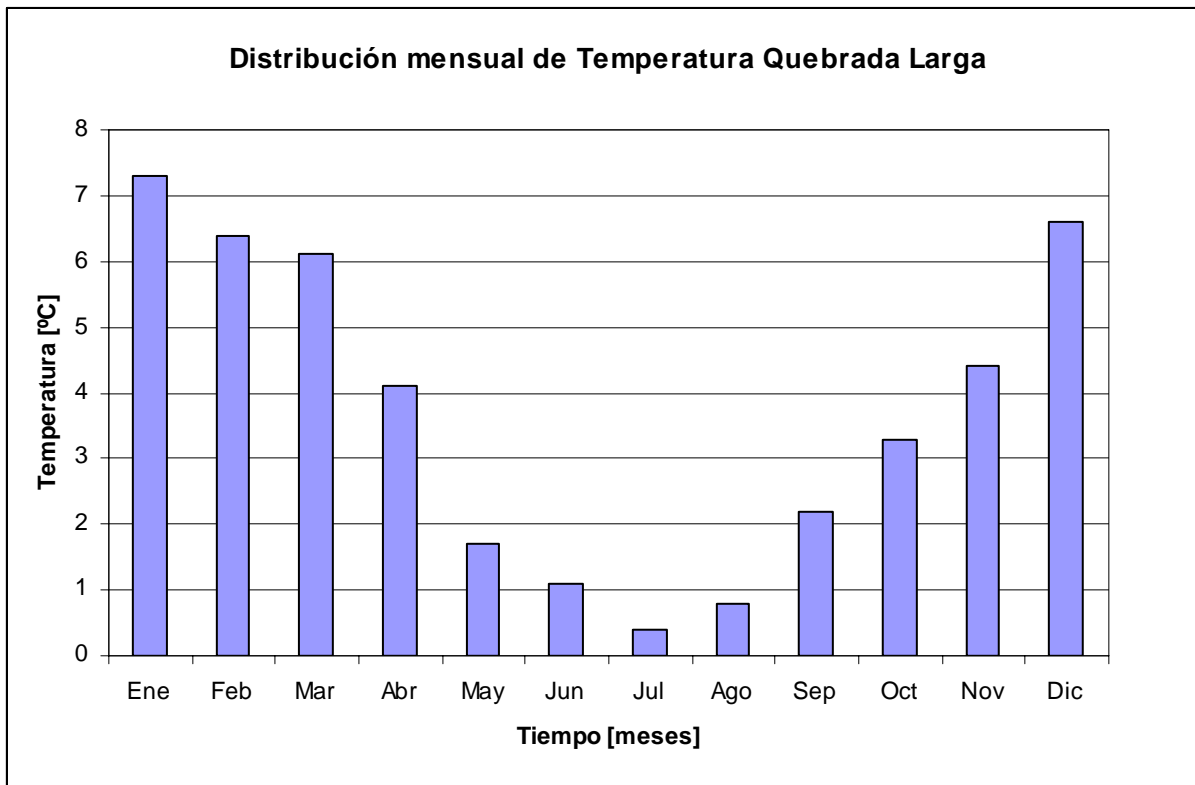


Figura 5.3: Distribución mensual de temperatura promedio Campamento El Morro
(Elaboración Propia, a partir de datos de la Tabla 5.1)

En general, el clima Desierto Frío de Montaña presenta en promedio valores bajos de humedad relativa, específicamente la estación Campamento El Morro presenta valores mensuales que fluctúan entre un 19% y 40%, con un promedio anual de un 27,1%. Además, según las estadísticas de la estación campamento El Morro, la radiación solar media horaria es de 265,3 W/m² y la presión atmosférica promedio es de 637 milibares. La rosa de vientos muestra que la dirección reinante presenta un régimen con bastante influencia local, con vientos provenientes principalmente del norte (N) y la cordillera (NNE); siendo la velocidad del viento promedio de 5,5 m/s y su máximo es de 18,2 m/s.

5.1.3 Hidrología

Las áreas de influencia regional del Proyecto El Morro corresponden a: 1) las cuencas definidas por el río Huasco, desde su nacimiento en el río Cazadero hasta la zona de Las Juntas en el sector de Alto del Carmen; 2) la subcuenca delimitada por el río Manflas que se ubica en sentido nororiente al área del Proyecto; y 3) a la cuenca de la quebrada Algarrobal, ubicada en sentido norponiente a la zona de explotación misma, comprendida entre la zona de ejecución del Proyecto y la ruta 5, Panamericana Norte.

El sector de emplazamiento de las obras mineras, y en particular del depósito de estériles, se ubica en la parte alta de la quebrada Larga (Figura 5.2), cuenca con un área aproximada de 50 km² y con una altitud promedio de 4000 m s.n.m. Posee un régimen hidrológico marcadamente nival, con máximos en primavera y caudales superficiales casi nulos el resto del año debido al congelamiento de los cauces.

En el sector de Quebrada Larga se dispone de limitada información histórica para determinar el comportamiento de las precipitaciones a nivel mensual y anual. A pesar de esto, la precipitación media anual en la zona de Quebrada Larga ha sido estimada por DICTUC (2008) en 214 mm, con una distribución mensual que se indica en la Tabla 5.2 y se muestra en la Figura 5.4.

Tabla 5.2: Distribución mensual de Precipitación Quebrada Larga

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación [mm]	0,3	0,6	7,1	13,2	24,1	46,7	81,4	37,7	0,6	1,0	0,6	0,6	214,0

Fuente: Knight Piésold, 2008

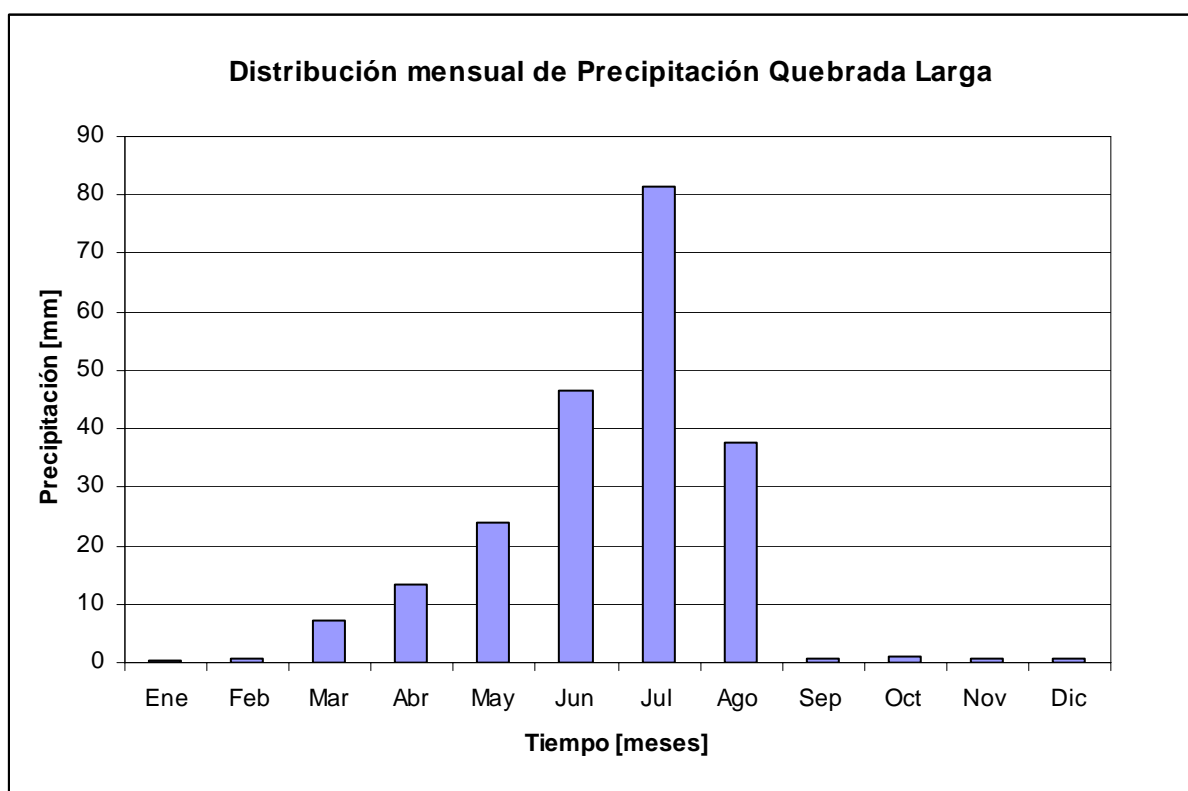


Figura 5.4: Distribución mensual de precipitación generada para Quebrada Larga
(Elaboración Propia, a partir de datos de la Tabla 5.2)

La precipitación media anual se extrapoló desde la Estación El Tránsito (1.200 m s.n.m.) a través de un gradiente de altura que se determinó a partir de las estaciones pluviométricas del sector del valle del río Huasco (1.000 a 1.500 m s.n.m.) y la Estación Embalse La Laguna (3.140 m s.n.m.) ubicada en la cuenca del río Elqui, inmediatamente al sur de la cuenca del Huasco.

Sin embargo, para efectos de la modelación, debido al régimen nival que predomina en la zona de estudio, se considera una serie de precipitaciones equivalentes (Knight Piésold, 2008) que representan las aguas de deshielo. Esta distribución de precipitaciones se puede observar en la Figura 5.5. El valor máximo de las precipitaciones indicadas en la Tabla 5.3, se genera durante los meses de octubre y noviembre, en los cuales se produce el mayor aporte de los derretimientos nivales. Estas estadísticas se estimaron a través de un gradiente de altura para una precipitación nival media anual de 214 mm (equivalente de agua).

Tabla 5.3: Distribución mensual de precipitación Campamento El Morro

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación [mm]	16,4	12,8	10,2	13,4	11,3	8,9	5,8	9,0	19,8	44,7	44,1	17,3	213,7

Fuente: Knight Piésold, 2008

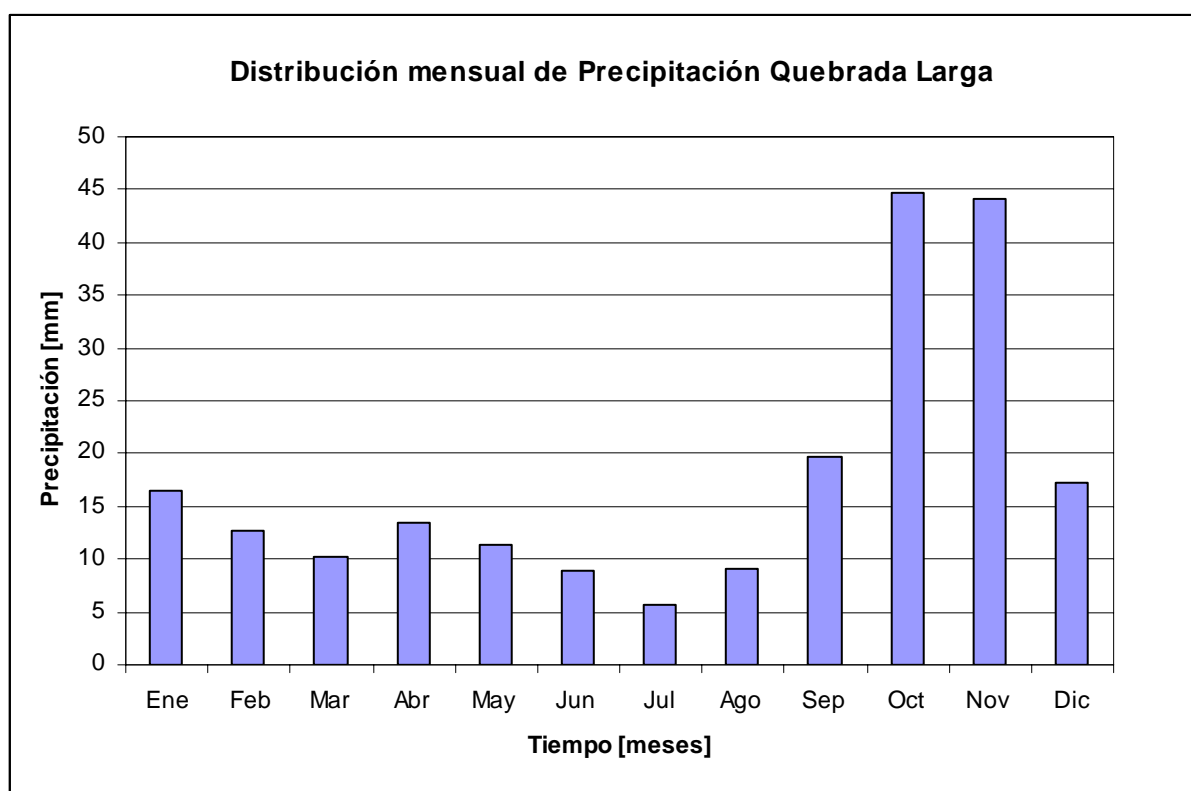


Figura 5.5: Distribución mensual de precipitación generada para Campamento El Morro
(Elaboración Propia, a partir de datos de la Tabla 5.3)

5.1.4 Hidrogeología

La descripción de línea base de aguas subterráneas se enfoca en la caracterización hidrogeológica de las zonas del Proyecto que tienen directa relación con algún tipo de posible impacto sobre las aguas subterráneas. En el área Mina-Planta, en quebrada Larga, se han identificado dos sistemas de aguas subterráneas principales: una unidad de flujo poroso primario en los depósitos o rellenos sedimentarios, localizada en la base y márgenes de las quebradas que forman parte de quebrada Larga; y una unidad de flujo fracturado asociado a rocas basales intrusivas y volcánicas que se ubican por debajo de los depósitos sedimentarios. En esta zona la permeabilidad varía desde 10^{-3} m/d a 10^{-1} m/d en el sector de roca fracturada y permeabilidades ubicadas en el rango 10^{-1} m/d a 1 m/d en el sector relleno sedimentario.

Knight Piésold (2008) realizó una caracterización hidrogeológica de la zona de estudio, de acuerdo con la información recopilada y procesada sobre la geología del área de interés, la información estratigráfica extraída de los sondeos perforados en el sector, así como la información de prospecciones geofísicas.

Para la zona de interés (Área Mina-Planta), se reconocen tres unidades hidrogeológicas principales, las que se apoyan sobre un nivel de roca sana. Las unidades hidrogeológicas identificadas en el área de estudio son las que se indican en la Tabla 5.4, donde se ha incluido la roca basal como una cuarta unidad hidrogeológica.

Tabla 5.4: Discretización vertical Hidrogeología de la zona

Estrato	Descripción	Espesor	Conductividad Hidráulica [cm/s]
1	Depósitos fluviales, aluviales y coluviales	Aproximadamente 15 m	$K_H = 10^{-3}$ $K_V = 10^{-4}$
2	Roca basal muy fracturada, Gravas de Atacama	Espesor de 25 a 35 m cercanos a los lechos de quebradas principales, y hasta 70 m como máximo en sectores lejanos de éstas	K entre 10^{-5} y 10^{-4}
3	Roca basal medianamente fracturada y/o semipermeable	Espesor de 50 a 100 m	K entre 10^{-6} y 10^{-5}
4	Roca basal sana y/o poco fracturada	Espesor de 1.200 m.	K entre 10^{-9} y 10^{-7}

Fuente: Knight Piésold, 2008

Las características hidrogeológicas especificadas en la Tabla 5.4 corresponden a la zona donde se ubicaría el rajo y, por lo tanto, de donde se generarían los desechos rocosos ha disponer en el depósito de estériles.

5.1.5 Características Depósito de Estériles

El depósito de estériles del Proyecto El Morro se ubica en la quebrada Larga (Figura 5.2). El método de construcción a utilizar será tipo Push-dumping, por volteo simple desde la tolva de camiones, con el apoyo de maquinaria pesada tipo *buldózer* para el esparcido del material. El ritmo promedio de generación de desechos es de 385.000 ton/d.

El diseño considera la construcción del depósito en cuatro capas de 75 m de altura máxima, cada una con bermas de 53 m de ancho mínimo. Se estima que al final de la vida útil del Proyecto el depósito de estériles ocupará una superficie de 595 ha y una altura de unos 300 m, con una capacidad aproximada de 1.600 millones de toneladas de material estéril. En la Tabla 5.5 se resumen las principales características del depósito de estériles.

Tabla 5.5: Características de diseño del Depósito de Estériles

Características	Depósito Estéril
Capacidad	1.600 Mt
Área	595 ha
Altura de módulos	75 m
Ancho de la berma	53 m
Ángulo de talud de reposo	37,5°
Ángulo global	26,5°
Altura final prevista	300 m

Fuente: Knight Piésold, 2008

Nota: Mt (miles de toneladas)

Para el manejo de aguas en el depósito de estériles se considera un sistema de intercepción y derivación de aguas "no contactadas", constituido por canales interceptores que impiden el contacto de aguas superficiales con el depósito de estériles, y un sistema de colección y manejo de aguas "contactadas" del depósito, que considera un muro cortafugas ubicado aguas abajo del depósito de estériles y una piscina de acumulación de los flujos subterráneos drenados hacia la base del depósito.

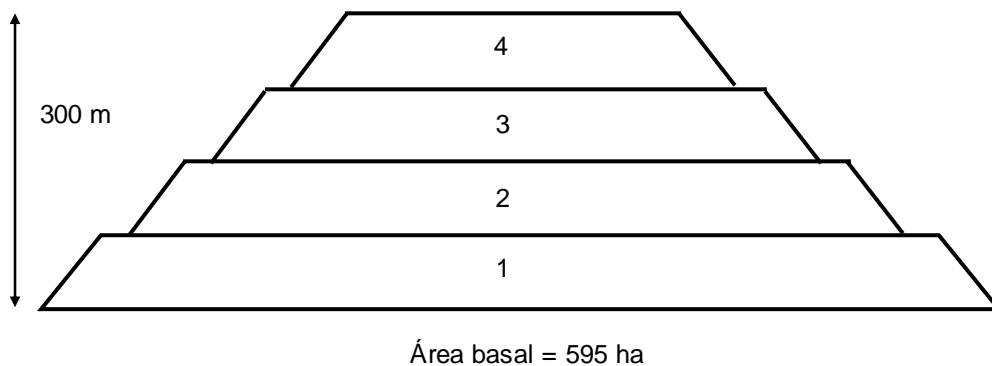
5.2 Modelo conceptual del depósito de estériles Proyecto El Morro

La evaluación de flujo a través del depósito de estériles se realizará sobre el tamaño final del depósito y para un periodo de simulación de 20 y 50 años, posteriores al cierre de la mina. Es decir, no se analiza el comportamiento hidrológico del depósito de estériles en periodos intermedios (durante la operación de la mina y construcción del depósito), sino que se modela sólo para el abandono de la mina.

El área de modelación corresponde a la hoya hidrográfica de la quebrada Larga y cuencas aledañas, aguas arriba de la confluencia con el río Cazadero. La zona de interés correspondiente a la ubicación general del depósito de estériles, está comprendida entre las coordenadas UTM 19S PSAD56: 410.000 – 415.000 E; 6.830.300 – 6.832.000 N (Figura 5.2), a una altitud media de 4.000 m s.n.m.

Las características físicas del depósito de estériles y los parámetros característicos del material de desecho considerados, son consistentes con la información expuesta en el Estudio de Impacto Ambiental de el Proyecto El Morro y utilizada por Knight Piésold (2008) en la simulación hidrogeológica del depósito de estériles. El contenido de humedad inicial considerado para las simulaciones es de un 6%. La información de los materiales considerados en cada perfil de simulación se especifica en cada etapa del análisis.

Según las características físicas del depósito de estériles presentadas anteriormente, el sistema se puede representar por el esquema de la Figura 5.6. Sin embargo, considerando que el software a utilizar en la primera etapa (VisualHELP) realiza una simulación en 1-D, y que HYDRUS-2D no permite la generación de geometrías irregulares (ya que no se cuenta con el paquete MeshGen-2D), se define una geometría representativa de tipo cilíndrica, con igual volumen y un área equivalente (Figura 5.7).



**Figura 5.6: Esquema depósito de estériles Proyecto El Morro
(Elaboración Propia)**

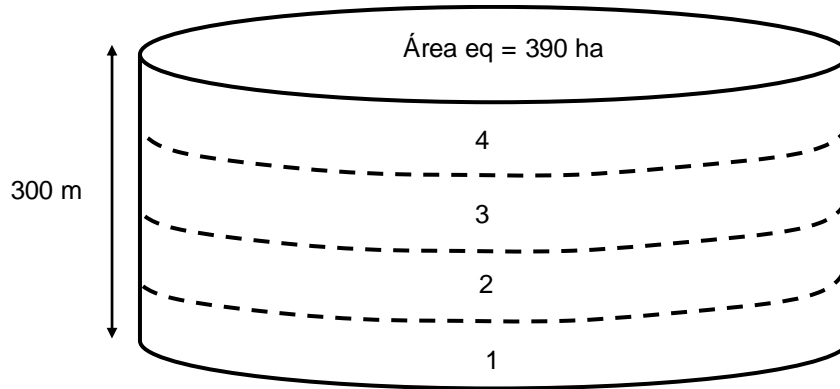


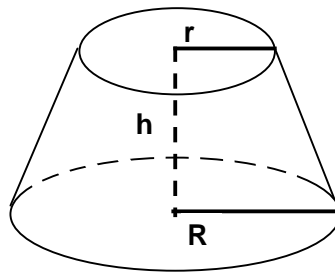
Figura 5.7: Esquema representativo depósito de estériles con geometría cilíndrica equivalente (Elaboración Propia)

En la Tabla 5.6: Determinación dimensiones geometría cilíndrica representativa del depósito de estériles se entregan las dimensiones de la geometría cilíndrica representativa para el depósito de estériles. La cual se determinó calculando el volumen total del depósito como la suma de los volúmenes de cada capa, las que se consideran con forma de cono truncado (Figura 5.8).

Tabla 5.6: Determinación dimensiones geometría cilíndrica representativa del depósito de estériles

Área basal	[ha]	595
Radio basal	R1 [m]	1376,2
radio sup capa 1	r1 [m]	1278,5
radio basal capa 2	R2 [m]	1225,5
radio sup capa 2	r2 [m]	1127,7
radio basal capa 3	R3 [m]	1074,7
radio sup capa 3	r3 [m]	977,0
radio basal capa 4	R4 [m]	924,0
radio sup capa 4	r4 [m]	826,2
Volumen Capa 1	[m ³]	415306444
Volumen Capa 2	[m ³]	326372591
Volumen Capa 3	[m ³]	248146756
Volumen Capa 4	[m ³]	180628940
Volumen Total	[m³]	1170454731
Área equivalente	[m²]	3901516
Área equivalente	[ha]	390
Radio cilindro eq.	[m]	1114

Fuente: Elaboración Propia



$$V = \pi(R^2 + r^2 + Rr) \cdot h/3$$

Figura 5.8: Cálculo de volumen tronco de cono
(Elaboración Propia)

El radio mayor de la capa basal (capa 1) se determina a partir del área total del depósito (595 ha), y los radios de las capas superiores según las siguientes expresiones:

$$r_i = R_i - h_{capa} \cdot tg(\phi) \quad (5.1)$$

$$R_i = r_{i-1} - ancho\ berma \quad (5.2)$$

Donde: R_i : radio mayor capa i

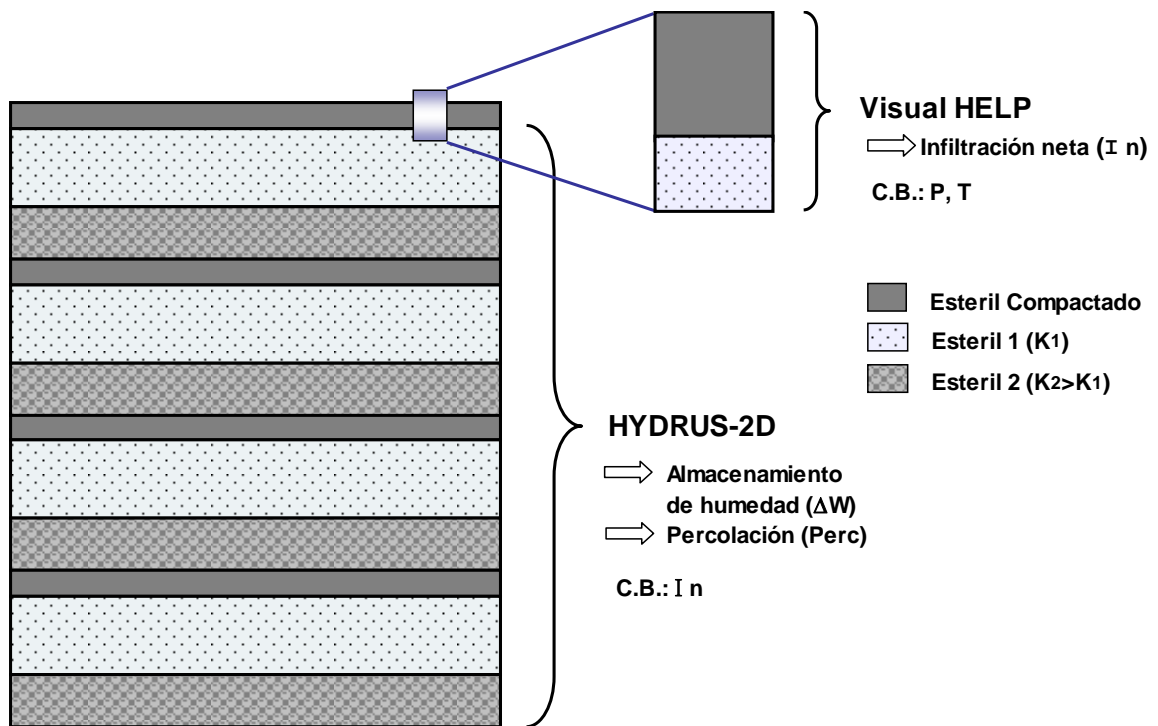
r_i : radio menor capa i

h_{capa} : altura de la capa

ϕ : ángulo de reposo del talud

De acuerdo al modelo conceptual y la metodología de modelación numérica propuestos en el capítulo anterior, y según las características físicas particulares del depósito de estériles del Proyecto El Morro, se define el modelo conceptual a utilizar en esta aplicación (Figura 5.9). La Figura 5.9 representa un corte transversal de la geometría cilíndrica equivalente definida anteriormente, con las cuatro capas definidas por las etapas de construcción del depósito, donde el material compactado es el límite superior de cada capa.

El modelo conceptual considera la posible heterogeneidad espacial al interior del depósito (en términos de estratificación, agradación, etc.), que genera una heterogeneidad en sus características hidráulicas, pudiendo afectar en el comportamiento del flujo de humedad a través del botadero.



**Figura 5.9: Modelo conceptual para la evaluación hidrogeológica
 Depósito de estériles Proyecto El Morro (Elaboración Propia)**

5.3 Evaluación numérica del modelo de simulación

5.3.1 Determinación de la tasa de infiltración neta

Para la determinación de la tasa de infiltración hacia el depósito de estériles se ha utilizado la herramienta de modelación Visual HELP 2.2. El modelo de simulación Visual HELP, se basa en un balance de aguas desarrollado por Schroeder (1984), para el estudio de la infiltración de aguas a través de un relleno sanitario. Corresponde a un modelo cuasi bidimensional, que considera normalmente las componentes verticales del flujo, y en algunas circunstancias el flujo horizontal en ciertos estratos (donde se define previamente la existencia de un escurrimiento lateral).

La información básica necesaria para operar el modelo de simulación corresponde a datos meteorológicos como la precipitación media mensual y la temperatura del aire en este mismo período de la zona donde se realizara el Proyecto, los que se indican en la Tabla 5.7. La precipitación media mensual es la generada por Knight Piésold (2008) que incluye el agua disponible por derretimiento de nieve.

Tabla 5.7: Información meteorológica de entrada para el modelo Visual HELP

Mes	Precipitación Media Mensual [mm]	Temperatura Media Mensual [°C]
Enero	16,4	7,3
Febrero	12,8	6,4
Marzo	10,2	6,1
Abril	13,4	4,1
Mayo	11,3	1,7
Junio	8,9	1,1
Julio	5,8	0,4
Agosto	9,0	0,8
Septiembre	19,8	2,2
Octubre	44,7	3,3
Noviembre	44,1	4,4
Diciembre	17,3	6,6

Fuente: Knight Piésold, 2008

Visual HELP posee un módulo de cálculo interno, que permite utilizar los datos anteriores para generar series estadísticas de las variables meteorológicas de precipitación, temperatura y radiación solar, que son utilizadas para la simulación. Weather Generator genera condiciones meteorológicas estadísticamente confiables para prácticamente cualquier lugar del mundo, para periodos de hasta 100 años. Esta herramienta utiliza una base de datos de más de 3.000 estaciones meteorológicas internacionales con datos climatológicos históricos para cada lugar. Además, esta base de datos permite al usuario modificar los datos existentes o crear nuevos registros para adaptarse a las condiciones meteorológicas específicas del sitio. En el ANEXO B1, se presentan series de precipitaciones, temperatura y radiación solar (a nivel mensual y anual) generadas por el programa Weather Generator de Visual HELP, las que corresponden a los datos de entrada al sistema para el cálculo de la infiltración neta al sistema botadero.

Además, el modelo de simulación debe ser alimentado con la información de diseño del depósito de estériles, en términos de un perfil del relleno, su estratificación y los materiales que lo conforman. Para cada material se deben ingresar los siguientes parámetros:

- Capacidad de campo.
- Porosidad.
- Punto de marchitez.
- Conductividad hidráulica.
- Porcentaje de humedad inicial.

Si bien se considera que un espesor de 2 m es suficiente para la simulación de la zona superficial del depósito, porque en general la evaporación no afecta a mayor profundidad, en la simulación se consideran tres perfiles con distintas profundidades de 2, 5 y 10 m (Figura 5.10), para analizar el efecto de la profundidad del perfil en la tasa de evaporación estimada por el programa.

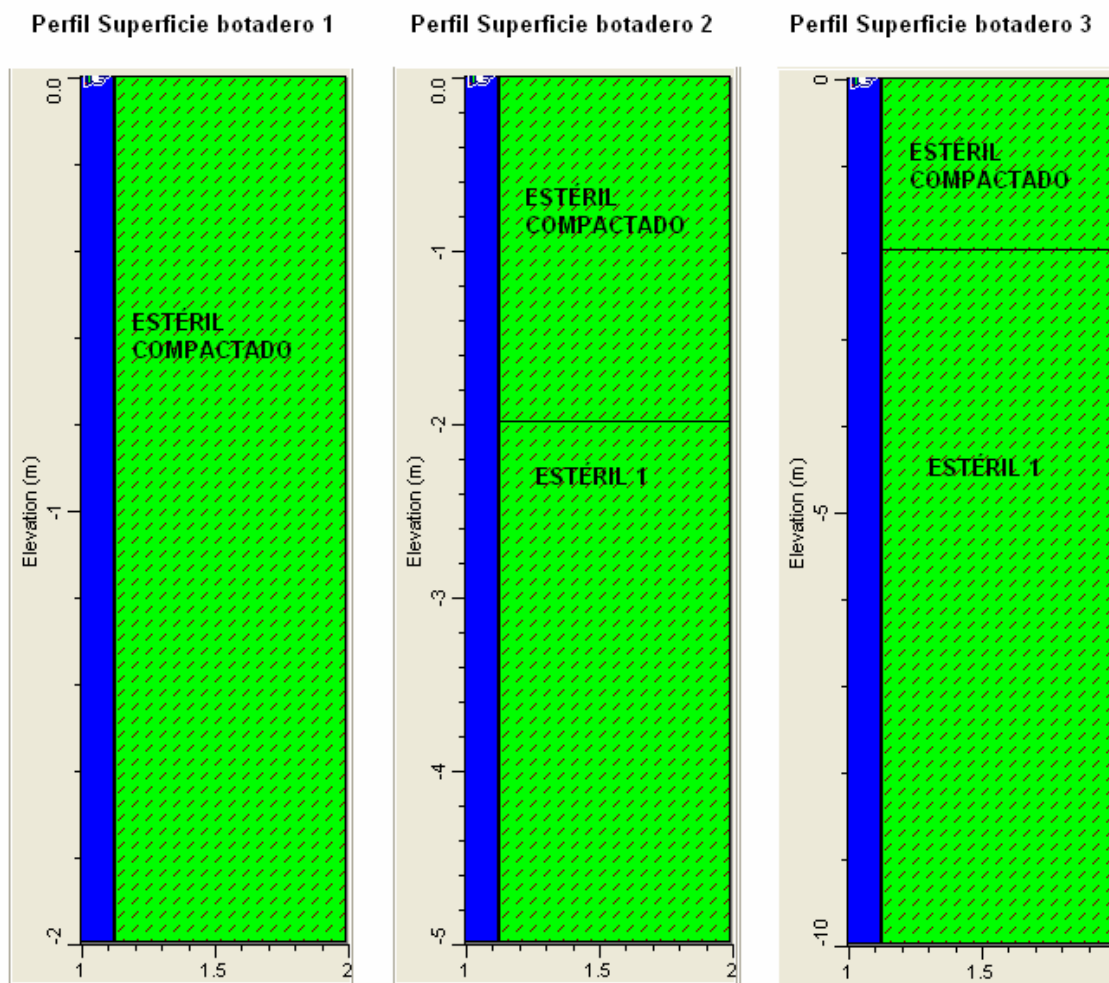


Figura 5.10: Perfiles simulados en Visual HELP de 2, 5 y 10 m de profundidad, zona superficial del depósito de estériles

Para los tres perfiles se consideró una capa superficial de 2 m de espesor de material compactado, según lo dispuesto en el modelo conceptual. La Tabla 5.8 muestra los parámetros característicos de cada material. Además, en el ANEXO B2 se presenta el reporte generado por el programa, que indica los parámetros de entrada de cada perfil.

Tabla 5.8: Parámetros característicos de los materiales

Parámetro	Unidad	Estéril 1	Estéril 2 (compactado)
Porosidad total	(vol/vol)	0,37	0,37
Capacidad de campo	(vol/vol)	0,08	0,08
Punto de marchitez	(vol/vol)	0,02	0,02
Conductividad hidráulica saturada	(cm/seg)	1,00E-02	1,00E-03
Contenido de humedad inicial	(vol/vol)	0,05	0,06

Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al método para determinar la escorrentía, el programa utiliza el método de Curva Numero del USDA Soil Conservation Service. De acuerdo a este método el programa entrega tres opciones para el cálculo: calculado por el modelo, especificado por el usuario y modificado por el usuario. En este caso se utiliza la opción “calculado por el modelo”, donde el programa ajusta el valor de la CN según la inclinación de la superficie, la textura del suelo y el tipo de vegetación. Los parámetros a ingresar son el área de escorrentía (considerando un 100%) y la clase de vegetación (suelo desnudo).

En las otras opciones para la determinación de la escorrentía, es posible especificar el valor de la CN. El máximo valor para CN es 100, ocurre cuando no hay infiltración (suelo impermeable). El menor valor ocurre cuando infiltra la mayor cantidad posible de precipitación al suelo. Un valor mínimo realista para la CN puede ser asumido en aprox. 50.

5.3.2 Evaluación del almacenamiento de humedad y percolación en la base del depósito de estériles.

Esta etapa del análisis y simulación del flujo a través del depósito se realiza con la herramienta de modelación numérica bidimensional HYDRUS 2-D versión 2.0, que permite modelar flujo en medio poroso no saturado utilizando la ecuación de Richards.

La información geométrica del modelo considera una malla rectangular (ya que no se dispone del paquete MeshGen2D) y flujo de tipo axisimétrico vertical. Un sistema axisimétrico asume que es radialmente simétrico en torno al eje vertical z (Figura 5.11). Las dimensiones del perfil son aprox. 1100 m de ancho y 300 m de alto.

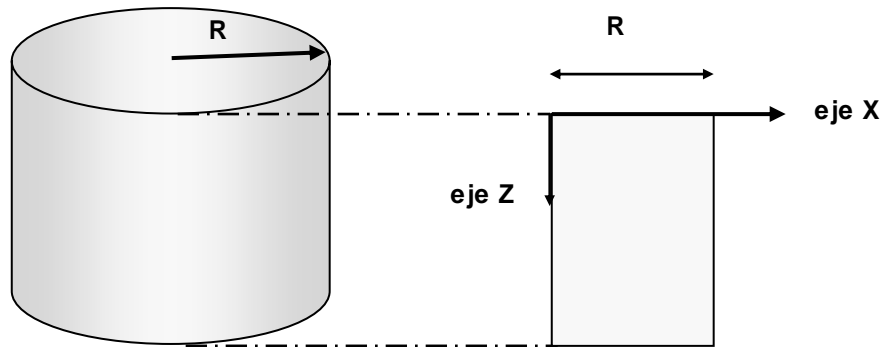


Figura 5.11: Geometría de modelación para flujo axisimétrico.
(Elaboración Propia)

Se analizan diferentes casos de perfil, los que se componen de hasta tres tipos de material. Según el modelo conceptual adoptado, estos representan un material fino y compactado, de baja conductividad hidráulica (Estéril 2), y dos estériles, uno de mayor conductividad hidráulica que el otro (ambos con mayor conductividad que el Estéril 2), que permitan representar los efectos de la agradación y estratificación al interior del depósito. Además se incluye un cuarto material, de mayor conductividad, que permita representar las vías de flujo preferencial, las que también pueden ser representadas aplicando un factor de escala a la conductividad hidráulica.

Los parámetros característicos de cada material se indican en la Tabla 5.9. La conductividad hidráulica asignada a cada material es consistente con la utilizada en la simulación con Visual HELP. Para los otros parámetros relacionados con el modelo de van Genuchten no se tiene información, por lo que se utilizan los parámetros aplicados en otros trabajos de modelación numérica de depósitos de estériles (Aubertin et al., 2005, 2008; Fala et al., 2003, 2005), los que fueron estudiados y determinados mediante ensayos.

Tabla 5.9: Propiedades hidráulicas de los materiales

	Material	Ks [cm/s]	Ks [m/día]	θ_r	θ_s	alfa [m ⁻¹]	n _v	l
1	Estéril	1,00E-02	8,64	0	0,39	14960	1,45	0,5
2	Estéril compactado	1,00E-03	0,864	0,01	0,29	3	3,72	0,5
3	Estéril más grueso	2,00E-02	17,28	0	0,39	14960	1,45	0,5
4	Vías de flujo preferencial	1,00E-01	406,08	0	0,39	14960	1,45	0,5

Fuente: Elaboración Propia

Los distintos escenarios de simulación se resumen en la Tabla 5.10. Éstos permiten comparar los efectos de la heterogeneidad espacial (y en términos de características hidráulicas) en el comportamiento del flujo a través del depósito. HYDRUS-2D permite ingresar las condiciones de distribución del material y factores de escala a la conductividad hidráulica, con lo que se representa la heterogeneidad al interior del perfil. Además, permite definir subregiones, que definen zonas donde se puede observar los resultados del balance hídrico.

Tabla 5.10: Escenarios de simulación

Simulación	Descripción perfil	n° materiales	n° capas	materiales
S1	perfil homogéneo	1	1	1
S2	perfil heterogéneo	2	1	1; 2
S3	perfil heterogéneo	2	4	1; 2
S4	perfil heterogéneo	2 + factor	1	1; 2
S5	perfil heterogéneo	2 + factor	4	1; 2
S6	perfil heterogéneo	3	1	1; 2; 3
S7	perfil heterogéneo	3	4	1; 2; 3
S8	vías de flujo preferencial	1 + factor	1	1
S9	vías de flujo preferencial	2	1	1; 4
S10	vías de flujo preferencial	2 + factor	4	1; 2; 4
S11	heterogéneo + vías de flujo	3 + factor	4	1; 2; 3; 4

Fuente: Elaboración Propia

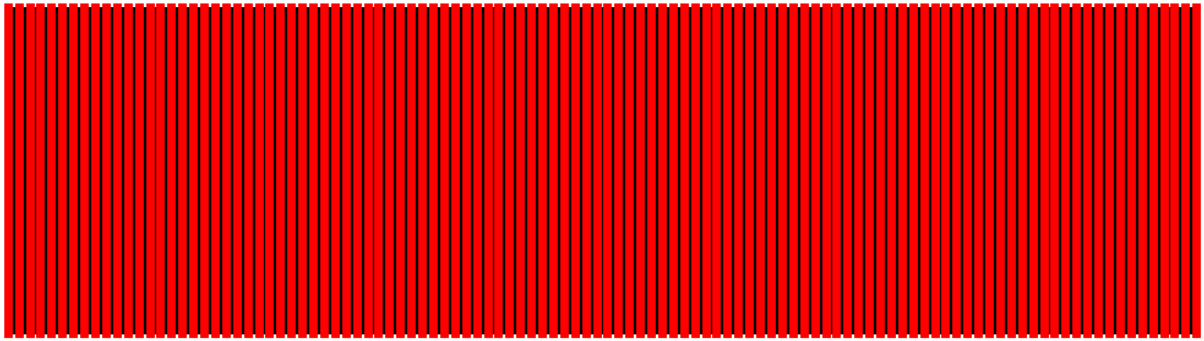
Factor: se aplica factor de escala a la conductividad hidráulica.

La simulación se realiza a 20 y 50 años. Por otra parte, para analizar los efectos de la discretización espacial, se consideran dos tipos de mallas, una de 10 x 10 m y otra más fina de 10 x 2 m (H x V).

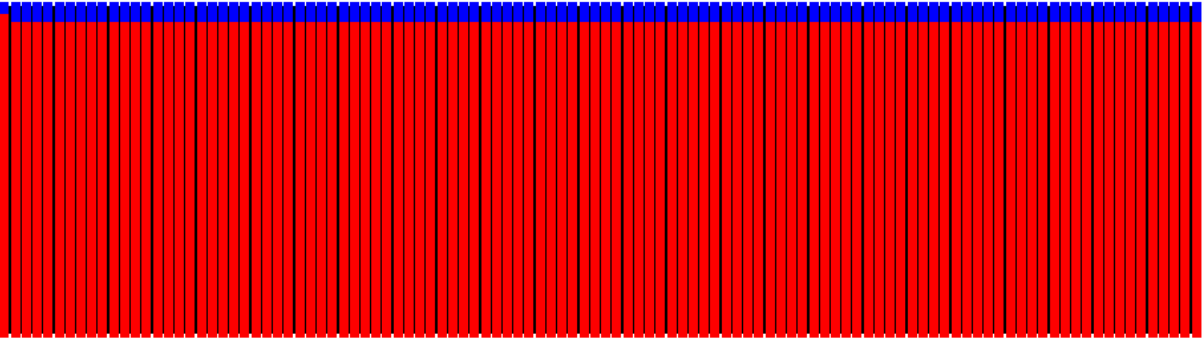
Se establece una condición inicial definida por el contenido de humedad del 6%. Se considera una condición de borde de flujo variable dada por la tasa de infiltración neta a nivel mensual obtenida con Visual HELP, en la zona superior del perfil, y una condición de drenaje libre en la base del perfil, la que indica que el agua puede salir libremente en la base del depósito.

En las Figuras 5.12, 5.13, y 5.14 se entregan los perfiles de simulación para cada escenario. Éstas se obtienen del editor de condiciones de borde de HYDRUS-2D. En el ANEXO C se detalla la distribución de los materiales en cada tipo de perfil.

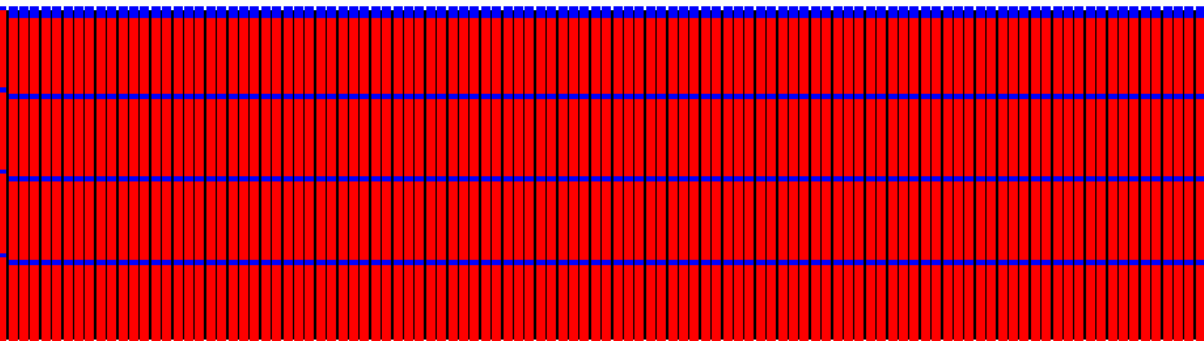
(a)



(b)



(c)



(d)

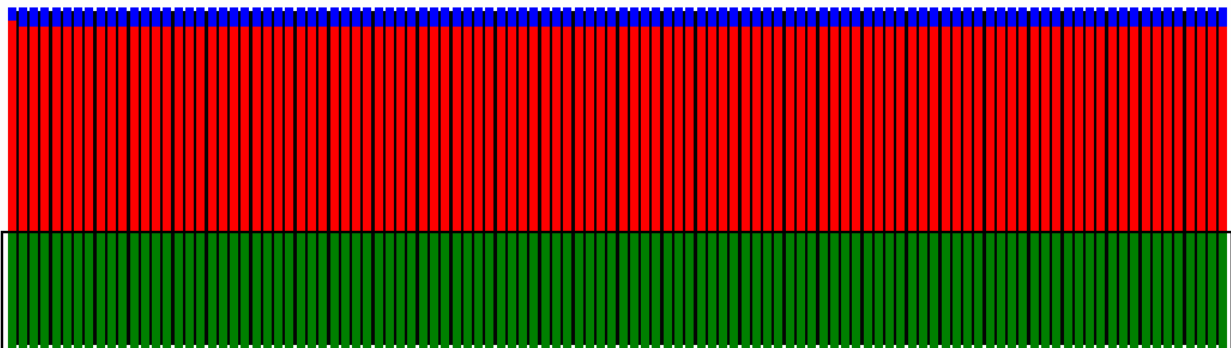


Figura 5.12: Perfiles de distribución de materiales

(a) Escenario S1, perfil homogéneo (1 capa, 1 material)

(b) Escenario S2, perfil con zona superior compactada (1 capa, 2 materiales)

(c) Escenario S3, perfil con estratificación por etapas de construcción (4 capas, 2 materiales)

(d) Escenario S4, perfil heterogéneo por agradación del material (1 capa, 2 materiales + factor)

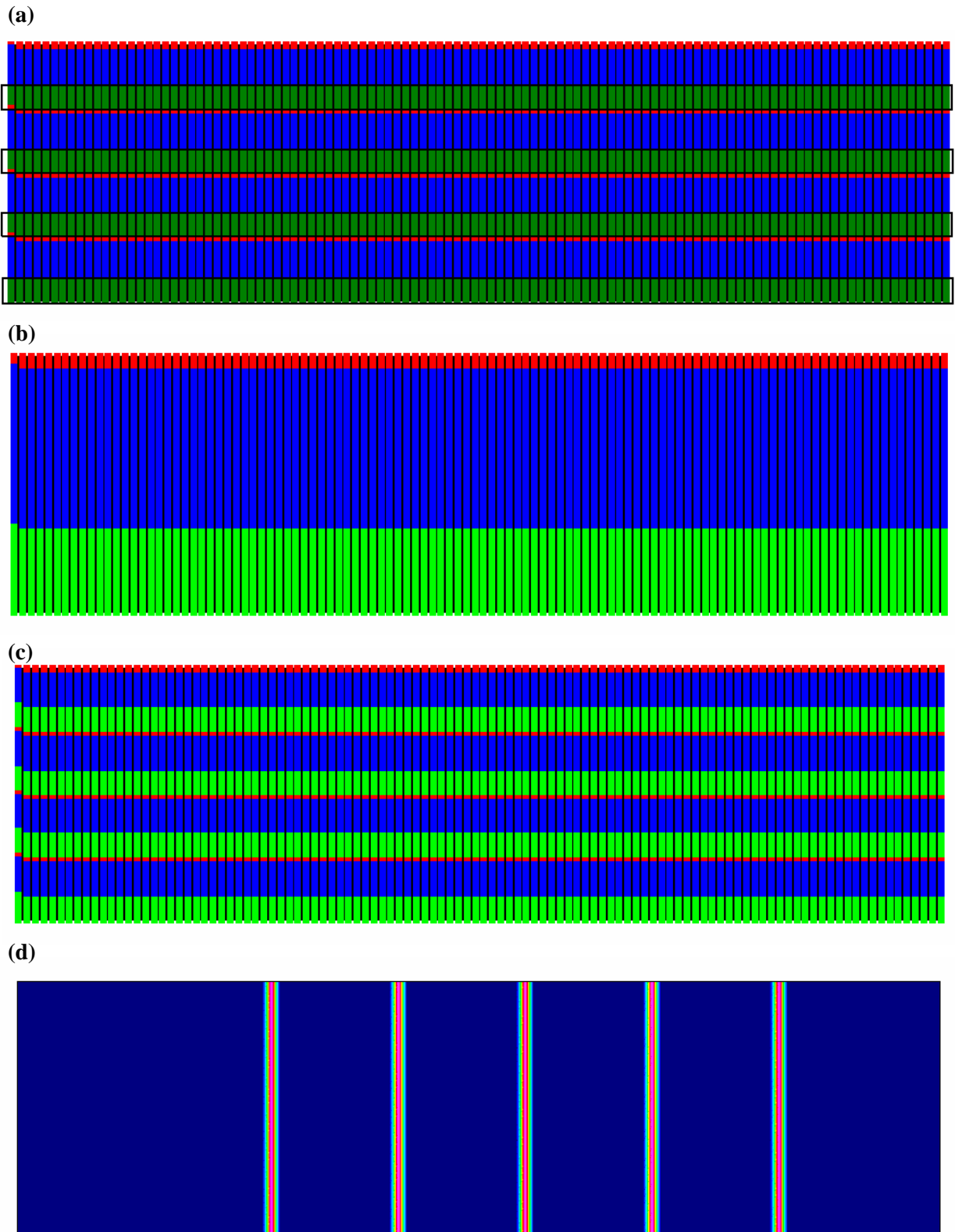


Figura 5.13: Perfiles de distribución de materiales

(a) Escenario S5, perfil con estratificación por etapas de construcción (4 capas, 2 materiales + factor)

(b) Escenario S6, perfil heterogéneo por agradación del material (1 capa, 3 materiales)

(c) Escenario S7, perfil con estratificación por etapas de construcción (4 capas, 3 materiales)

(d) Escenario S8, perfil con vías de flujo preferencial (1 capa, 1 material + factor)

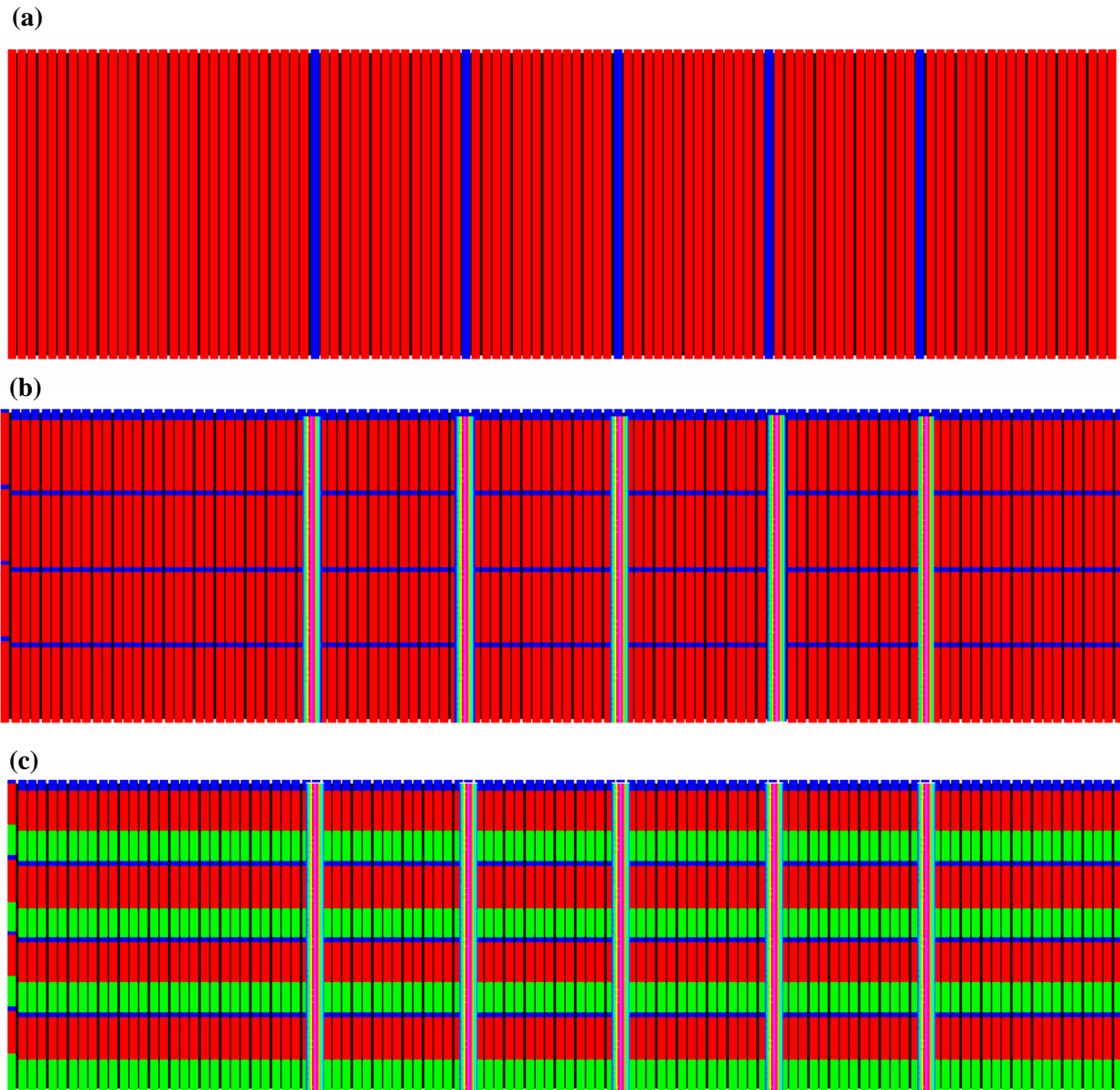


Figura 5.14: Perfiles de distribución de materiales

(a) Escenario S9, perfil con vías de flujo preferencial (1 capa, 2 materiales)

(b) Escenario S10, perfil con estratificación y vías de flujo preferencial (4 capas, 2 materiales + factor)

(c) Escenario S11, perfil con estratificación y vías de flujo preferencial (4 capas, 3 materiales)

En la Figura 5.12 el color rojo corresponde al estéril del material 1, el azul al material compactado y la zona verde es donde se aplicó un factor de escala a la conductividad hidráulica para representar una zona de mayor conductividad por efecto de la agradación. En la Figura 5.13 el color rojo corresponde al material compactado, el azul al estéril del material 1 y el verde al estéril más grueso (definido por el material 3 o por un factor de escala a la conductividad). En la Figura 5.14 las franjas verticales representan las vías de flujo preferencial, dadas por el material 4 o por la aplicación de un factor de escala a la conductividad hidráulica, el color rojo al material 1, el azul al material 2 (estéril compactado) y el verde al material 3 (estéril grueso).

5.4 Resultados

5.4.1 Determinación de la tasa de infiltración neta

En la simulación, los tres perfiles definidos presentan los mismos resultados para las tasas de evaporación y escurrentía superficial. Por lo tanto, para la evaluación del comportamiento hidrogeológico del depósito de estériles del Proyecto El Morro se utilizan los resultados entregados por el perfil de menor espesor (perfil Superficie botadero 1), donde la tasa mensual de infiltración neta constituye una condición de borde para la siguiente etapa de modelación (Figura 5.15).

A continuación se presentan los resultados del balance hídrico realizado con el modelo HELP, para la zona superficial del depósito de estériles. Además de la tasa de infiltración neta a nivel mensual, se entregan los resultados de tasa total anual y volumen acumulado de agua para el perfil “Simulación botadero 1” (Figura 5.16 y Figura 5.17, respectivamente). El detalle de los resultados para cada perfil se entrega en el ANEXO B3.

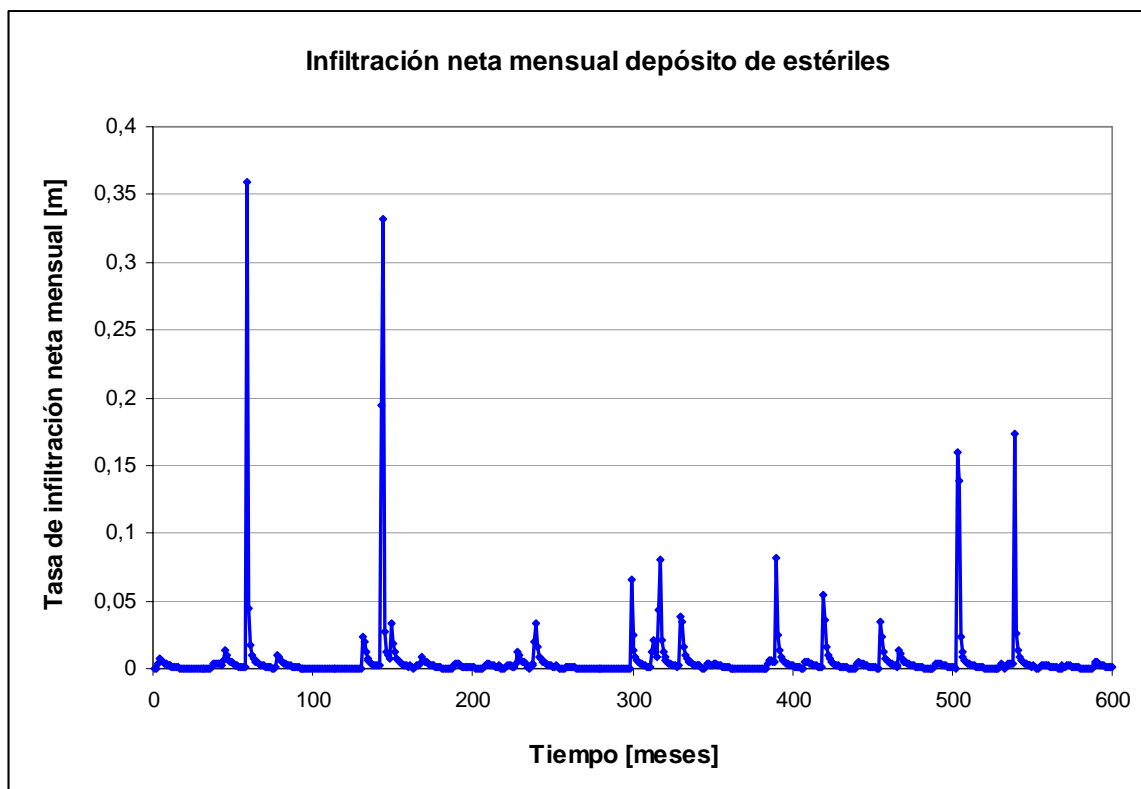


Figura 5.15: Tasa neta de infiltración al depósito de estériles, a nivel mensual
(Elaboración Propia)

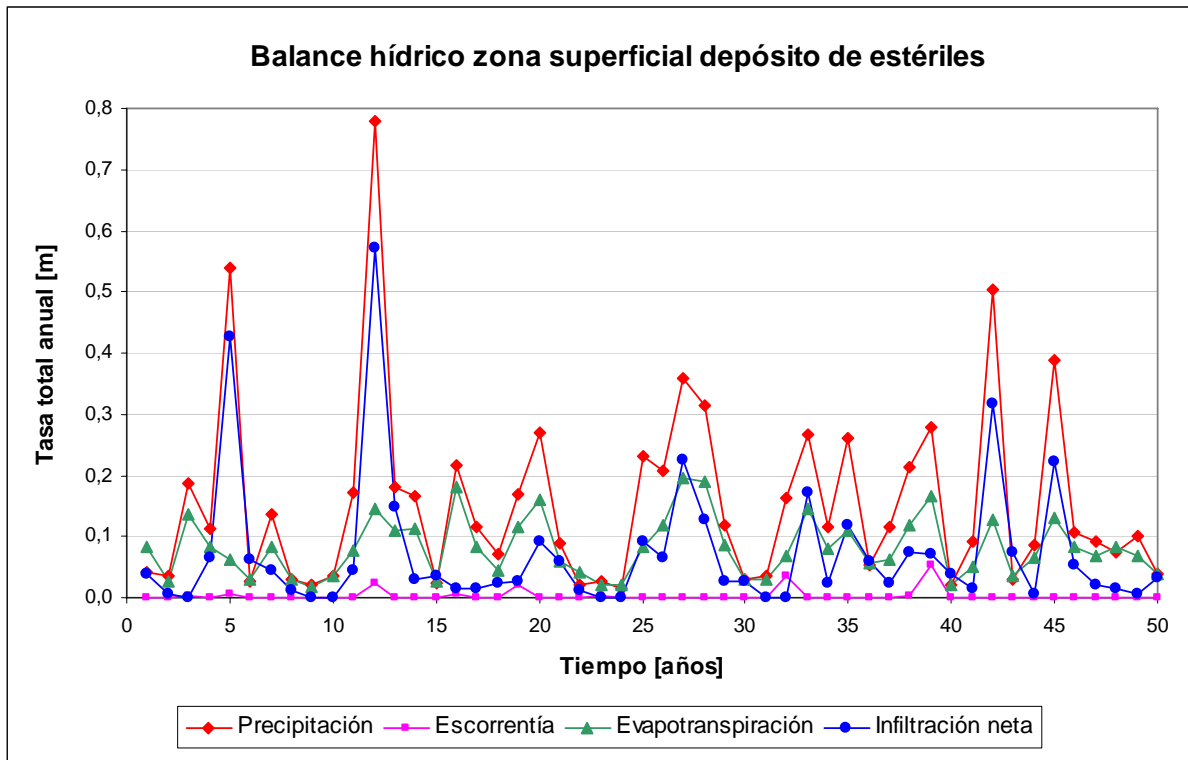


Figura 5.16: Balance hídrico perfil Superficie botadero 1 (espesor 2 m). Tasa total anual de agua. (Elaboración Propia)

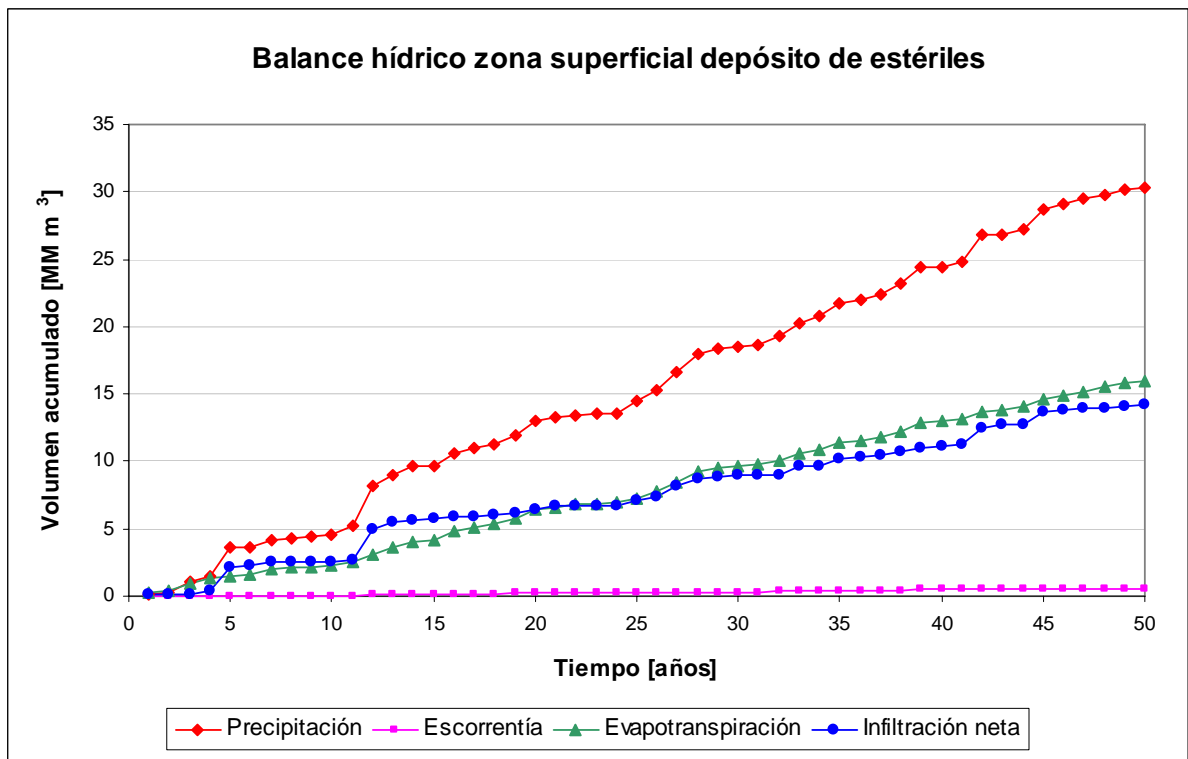


Figura 5.17: Balance hídrico perfil Superficie botadero 1 (espesor 2 m). Volumen de agua acumulado. (Elaboración Propia)

A continuación se presentan los resultados del balance hídrico (Tabla 5.11), considerando tasas acumuladas cada 10 años. De esta forma se puede apreciar de mejor manera la proporción entre las tasas de evaporación, escorrentía e infiltración, en relación con las precipitaciones.

Tabla 5.11: Parámetros balance hídrico superficial, tasa acumulada

Años	10		20		30		40		50	
	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]
Precipitación	1,163	100,0	3,327	100,0	4,742	100,0	6,265	100,0	7,777	100,0
Escorrentía	0,008	0,7	0,057	1,7	0,059	1,2	0,151	2,4	0,151	1,9
Evapotranspiración	0,587	50,5	1,636	49,2	2,478	52,3	3,330	53,1	4,081	52,5
Infiltración neta	0,654	56,2	1,657	49,8	2,290	48,3	2,870	45,8	3,630	46,7

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos indican que la tasa de evaporación estimada es alrededor de un 50-53% de la precipitación sobre el depósito y la tasa de infiltración neta es cercana al 50%. Con una tendencia inicial de mayor infiltración, durante los primeros 15 años, y posteriormente la evaporación tiende a ser superior, excepto para periodos que presentan mayores niveles de precipitaciones.

Por otra parte, se puede observar que la escorrentía simulada es despreciable. De acuerdo a estos resultados, se debe tomar en cuenta que el modelo HELP es un modelo unidimensional para flujo vertical y que el modelo propuesto para simular el depósito de estériles del Proyecto El Morro no considera inclinación en la superficie del depósito. Para determinar la escorrentía el programa trabaja con el método de Curva Número y en este caso se utilizó la opción de CN calculada por el modelo, donde el valor de la CN es definido por el programa según las características de inclinación de la superficie, textura del suelo y clase de vegetación. Por lo que estos parámetros definen los resultados de escorrentía y con esto afectan también en los demás parámetros del balance hídrico.

Para evaluar la diferencia en los resultados de escorrentía al variar el valor de la CN, se realiza un análisis de sensibilidad utilizando la opción de CN especificada por el usuario, para valores entre 50 (considerado el mínimo valor realista para la CN) y 90 (que corresponde a un sistema con bajo grado de permeabilidad). Los resultados obtenidos se entregan en la Tabla 5.12, donde se comparan los parámetros en términos de tasa acumulada en el periodo de evaluación de 50 años.

Tabla 5.12: Análisis de sensibilidad método CN para la determinación de la escorrentía.

Parámetros balance hídrico superficial, tasa acumulada en 50 años.

	CN calculada por el modelo		CN = 50		CN = 60		CN = 70		CN = 80		CN = 90	
	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]	[m]	[%]
Precipitación	7,78	100,0	7,78	100,0	7,78	100,0	7,78	100,0	7,78	100,0	7,78	100,0
Escorrentía	0,15	1,9	0,17	2,2	0,20	2,5	0,25	3,3	0,51	6,5	1,04	13,3
Evapotranspiración	4,08	52,5	4,08	52,5	4,08	52,5	4,08	52,5	3,98	51,2	3,94	50,7
Infiltración neta	3,63	46,7	3,61	46,5	3,59	46,1	3,53	45,4	3,38	43,4	2,88	37,1

Fuente: Elaboración Propia

De los resultados se puede ver que el valor de CN determinado por el programa al utilizar la opción de CN calculada por el modelo es cercano a 50, considerado el mínimo valor realista para la CN. Este valor depende de las condiciones asignadas al modelo como la clase de vegetación, donde se considera suelo desnudo, y la inclinación nula de la superficie; parámetros que inducen a un alto grado de infiltración.

Al utilizar la opción de CN especificada por el usuario, para valores de CN menores a 70 los resultados para las componentes del balance hídrico no presentan diferencias significativas, donde la escorrentía es alrededor de un 2% de las precipitaciones y la infiltración neta está en torno al 46%. Mientras para valores de CN mayores se obtienen cambios considerables en los resultados, con un aumento de entre 3 y 10% en la escorrentía y la consecuente disminución en la tasa de infiltración neta al depósito. Estos resultados concuerdan con lo indicado por el método de determinación de la escorrentía, donde un mayor valor de la CN indica un menor grado de permeabilidad del suelo, con lo que disminuye la tasa de infiltración neta al sistema.

5.4.2 Evaluación del almacenamiento de humedad y percolación en la base del depósito de estériles.

La simulación de los distintos escenarios permite analizar las consideraciones que se deben tener al momento de realizar la modelación del flujo a través de un depósito de estériles con HYDRUS-2D.

- **Discretización espacial**

Este es un parámetro de importancia, relevante para la convergencia del modelo y para la precisión de los resultados. Para perfiles con varias capas y materiales, se hace necesario afinar la malla, es decir, considerar una mayor cantidad de nodos, para que la simulación entregue resultados.

Para esta aplicación se consideraron dos casos de malla: de 10 x 10 m y de 10 x 2 m (H x V); donde la segunda opción considera un mayor número de nodos y una discretización más fina en la vertical. Las simulaciones con más de un material y mayor número de capas no arrojaron resultados completos con la malla más gruesa, mientras la otra opción, en general, arrojó buenos resultados. En la Figura 5.18 se muestran los resultados de la simulación con ambas mallas para el escenario S1 (perfil homogéneo), en un periodo de 50 años. Se puede ver que la precisión de los resultados es bastante mayor con la discretización más fina, ya que entrega información más detallada del contenido de humedad al interior del perfil y una transición más suave entre los diferentes niveles de humedad.

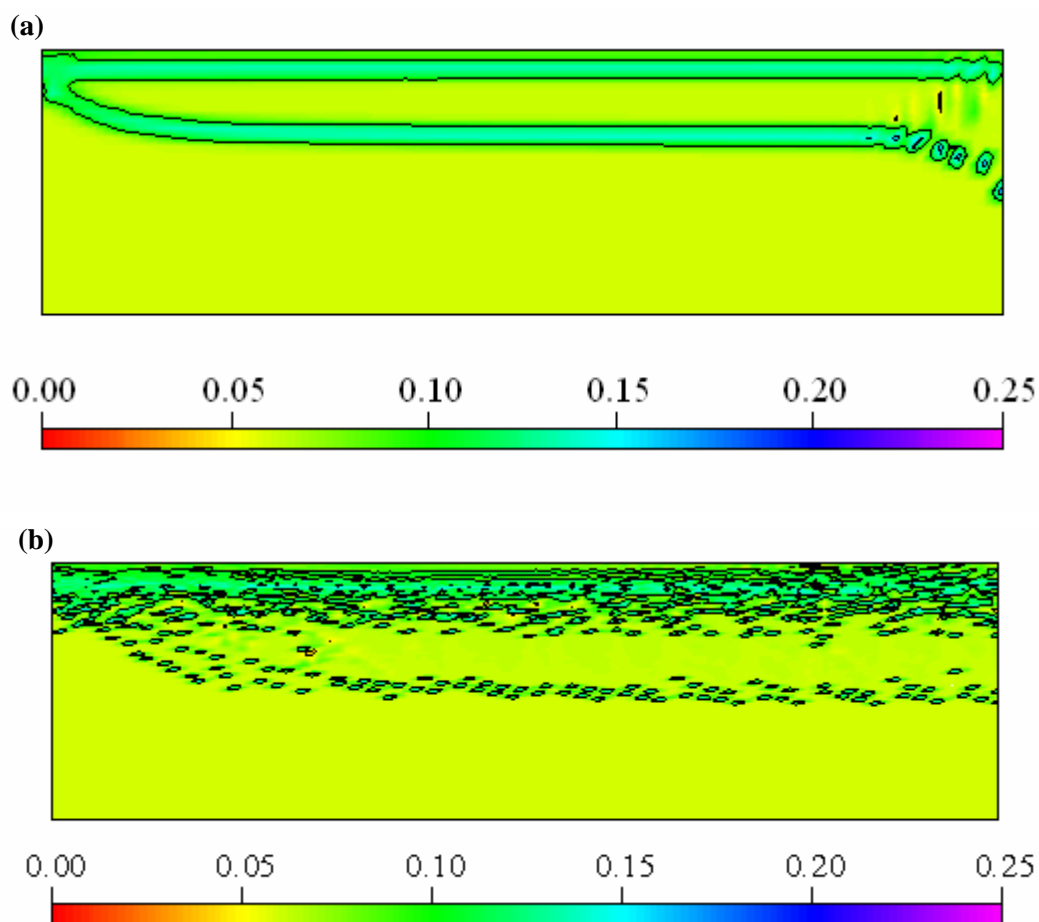


Figura 5.18: Comparación resultados para distintos niveles de discretización, escenario S1 (50 años)

(a) Simulación con discretización 10 x 10 m (H x V)

(b) Simulación con discretización 10 x 2 m

Por otra parte, al intentar afinar aún más la discretización la simulación demora mucho tiempo o se presentan problemas computacionales, que impiden el correcto desarrollo de la simulación.

Según estos resultados, para la evaluación del flujo de agua a través del depósito de estériles, se considera la discretización de 10 x 2 m.

- **Discretización temporal**

Con respecto al tiempo de simulación, inicialmente se consideran 50 años. Pero, debido principalmente a lenta ejecución de la simulación (que depende directamente de la capacidad del computador) y en algunos casos a problemas computacionales en los escenarios de modelación con mayor nivel de detalle, se considera un periodo de evaluación de 20 años que permite obtener resultados de manera relativamente rápida. Sin embargo, el escenario S6 que considera un perfil de una capa con 3 materiales, entrega resultados sólo para 1 año de simulación. Es por esto que para evaluar el flujo en un medio con mayor heterogeneidad, para los perfiles de 1 capa, se opta por utilizar la condición de factor de escala para la conductividad hidráulica.

- **Resultados de almacenamiento de humedad por escenario**

Para analizar los resultados, los escenarios de simulación se dividen en dos grupos. Primero los perfiles más simplificados que consideran el depósito de estériles como sólo una capa, pero que permiten evaluar los efectos de la heterogeneidad en su interior (dada por compactación, segregación del material o presencia de vías de flujo preferencial). Y segundo, los escenarios que consideran las 4 capas definidas por las etapas de construcción del depósito, y que por esto mismo representan de mejor manera las condiciones reales del depósito de estériles del Proyecto El Morro.

Las Figuras Figura 5.19 y Figura 5.20 corresponden a la simulación resultante al cabo de 20 años, para los escenarios compuestos por una capa (escenarios S1, S2, S4, S8 y S9), donde se muestra el contenido de humedad al interior del perfil para ese periodo de tiempo. En el ANEXO C se entregan información más detallada, específicamente gráficos de variación del contenido de humedad con la profundidad, para un corte transversal de cada perfil.

A partir de estos resultados se puede ver que el frente de humedad generado a partir del ingreso de la infiltración neta al sistema (la que a su vez es alimentada por las precipitaciones sobre la zona de estudio), no llega a la base del perfil en el periodo de evaluación de 20 años en ninguno de los escenarios de simulación. Estos resultados se respaldan con los gráficos de contenido de humedad en la sección transversal incluidos en el ANEXO C, donde se ve que en la zona inferior de cada perfil, el contenido de humedad no supera al asignado como condición inicial del sistema (contenido de humedad inicial = 0.06).

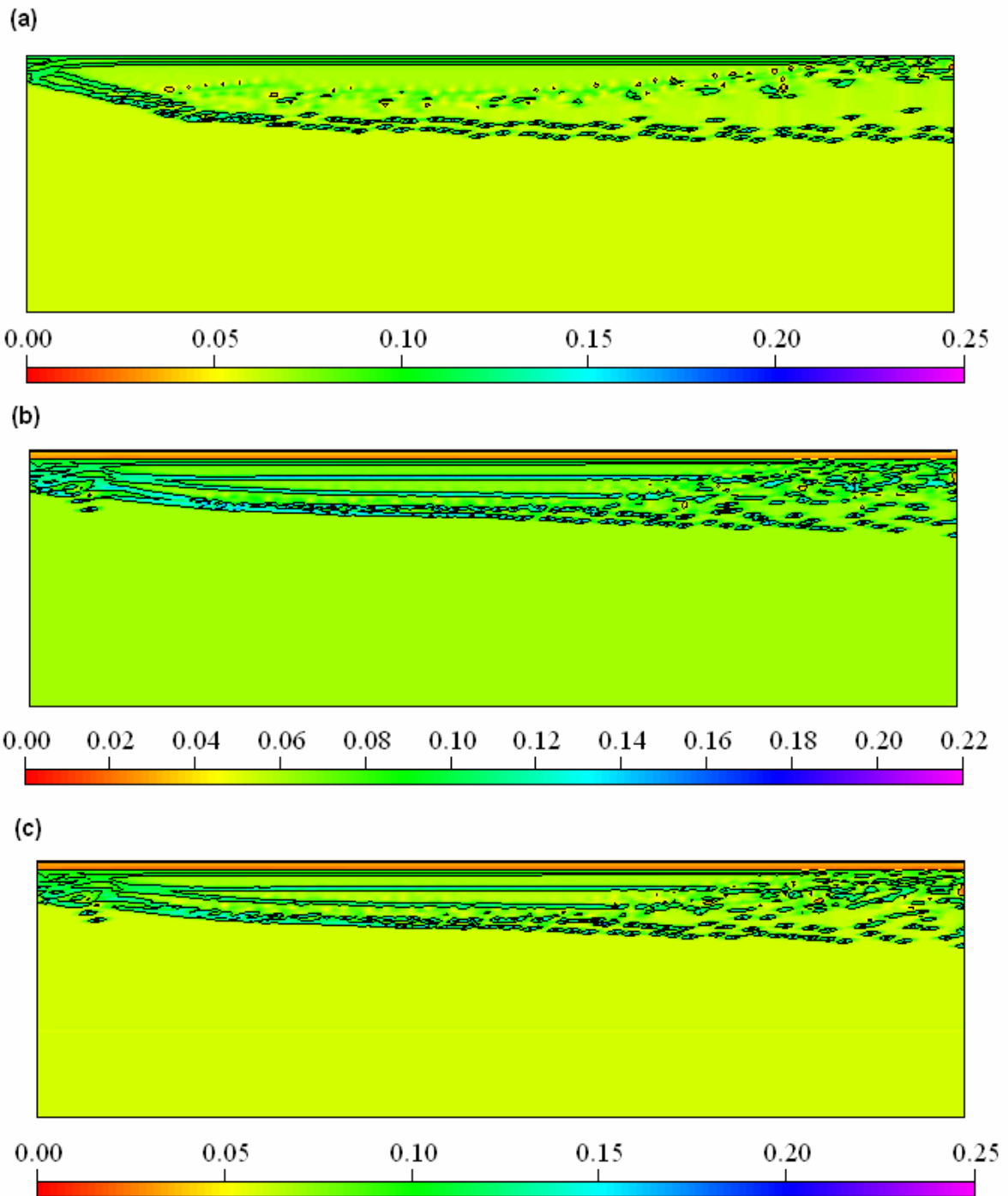


Figura 5.19: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años

(a) escenario S1, perfil homogéneo

(b) escenario S2, perfil heterogéneo por segregación del material (2 materiales)

(c) escenario S4, perfil heterogéneo por segregación del material (2 materiales+ factor de escala a K)

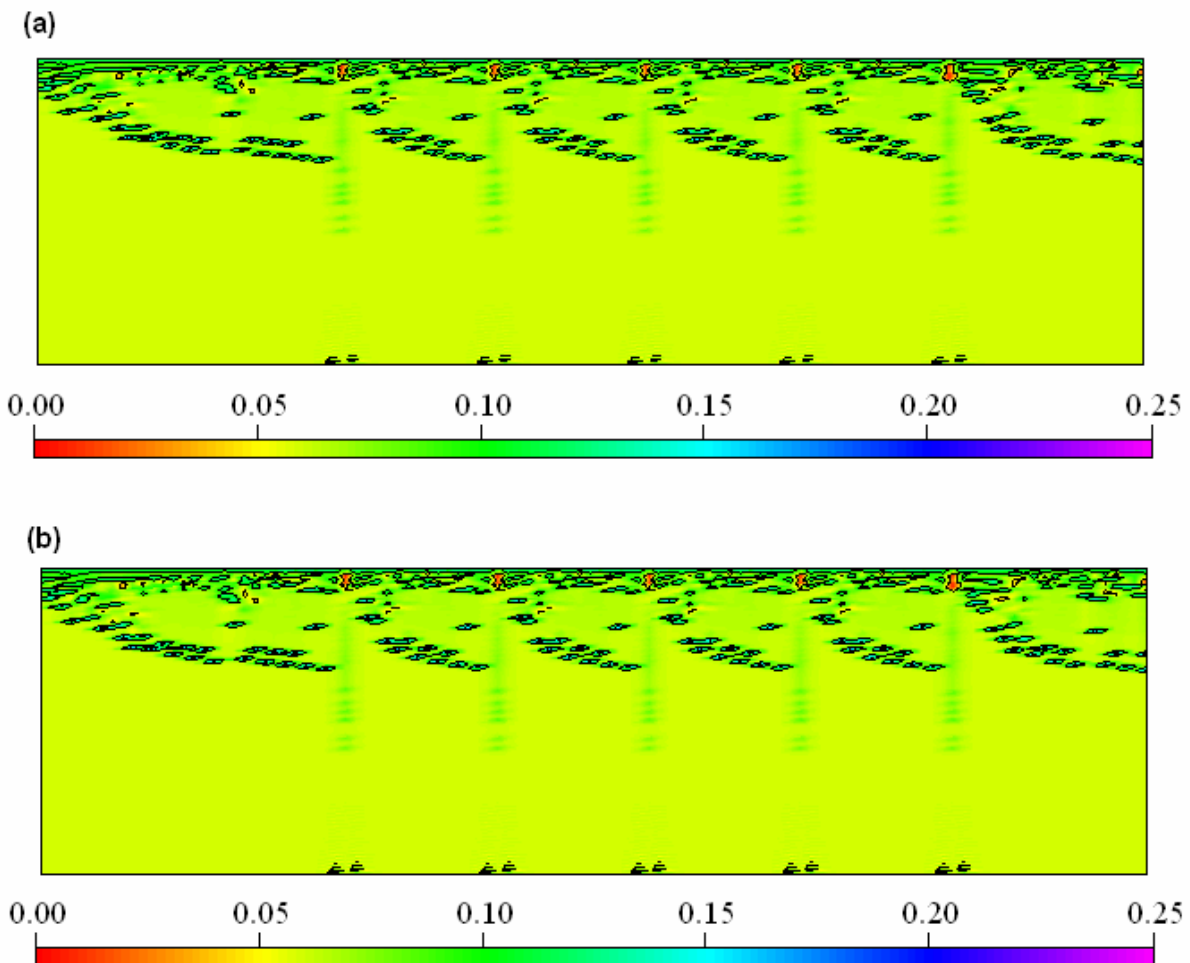


Figura 5.20: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años

(a) escenario S8, perfil heterogéneo por vías de flujo preferencial (1 material + factor de escala a K)

(b) escenario S9, perfil heterogéneo por vías de flujo preferencial (2 materiales)

Con respecto a la incorporación de elementos que dan heterogeneidad al sistema, en la Figura 5.19 se puede ver la diferencia entre la respuesta de un perfil homogéneo (a) y la respuesta de los perfiles que incluyen una capa superior de material compactado (b) y (c). Las zonas compactadas presentan mayor succión, lo que para tasas de flujo bajas genera mayor posibilidad de flujo del frente de humedad, ya que este material al tener mayor capacidad de retención acumula agua hasta que hay suficiente para generar un flujo descendente algo más estable través del depósito.

El efecto del factor de escala a la conductividad hidráulica del perfil (c) de la Figura 5.19, que tiene la finalidad de representar la acumulación de estériles de mayor tamaño hacia el fondo del depósito (agradación), no se puede analizar para el periodo de simulación de 20 años, ya que el frente de humedad no alcanza la profundidad a la que se encuentra esta zona de mayor conductividad.

En los escenarios S8 y S9, cuyos resultados se muestran en la Figura 5.20, se puede ver el efecto de canalización del flujo producto de la presencia de vías de flujo preferencial al interior del depósito. Estas vías de flujo preferencial pueden estar dadas por fracturas o zonas con acumulación de material de mayor conductividad hidráulica. De todos modos, aun con la presencia de zona con mayor canalización del flujo, tampoco ocurre percolación en la base del sistema.

Para el caso de los escenarios compuestos por perfiles con cuatro capas (dadas por las etapas de construcción del depósito de estériles), en las Figuras Figura 5.21, Figura 5.22 y Figura 5.23, se entregan los resultados del contenido de humedad al interior del perfil para el periodo de 20 años (escenarios S3, S5, S7, S10 y S11). En el ANEXO C se entregan los gráficos de contenido de humedad según la profundidad, para un corte transversal de cada perfil.

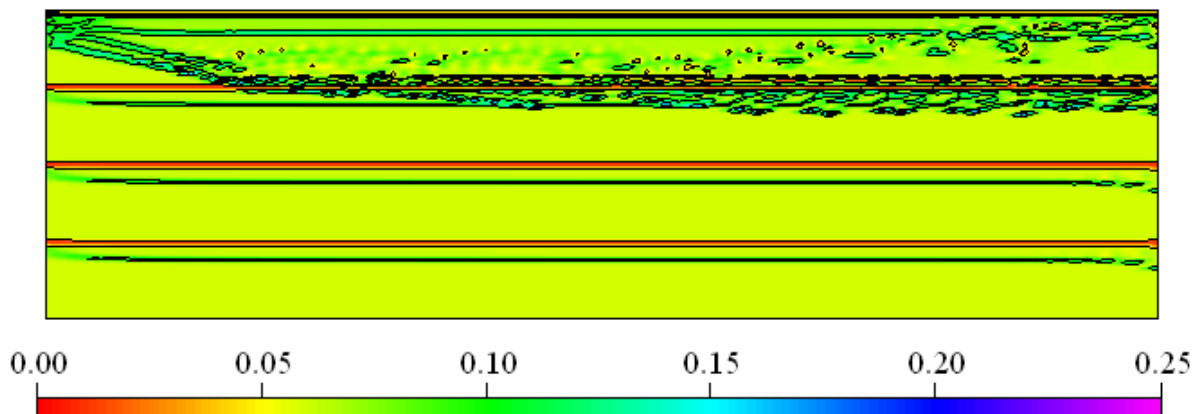


Figura 5.21: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años

Escenario S3, perfil heterogéneo por estratificación, dada por la presencia de 4 capas (etapas de construcción del depósito) y la compactación en la zona superior de cada capa (2 materiales)

En la Figura 5.21 se puede ver el efecto de retención de humedad que genera la zona de material compactado. En comparación con los resultados de los escenarios donde no se considera estratificación (capas generadas por las etapas de construcción), en este caso el frente de humedad es menos disperso, lo que se explica por la capacidad de retención de agua que tiene el material de baja conductividad hidráulica.

Con respecto a los perfiles de la Figura 5.22, ambos representan una situación con estratificación y segregación del material, donde en la zona inferior de cada capa hay una acumulación de partículas de mayor tamaño. La diferencia entre estos perfiles es el modo de representar la zona con material de mayor tamaño de grano y, por lo tanto, mayor conductividad hidráulica. Para el perfil (a), escenario S5, la zona

de mayor conductividad se define aplicando un factor de escala, mientras para el perfil (b) , escenario S7, se define asignado un material diferente, cuyas propiedades hidráulicas son equivalente a las de la zona con el factor de escala ya aplicado en el otro perfil. El factor de escala aplicado en el escenario S5 duplica la conductividad hidráulica del material, lo que es consistente con la relación entre las conductividades del Estéril 1 y del Estéril 3, que corresponde al material con tamaño de grano mayor (ver Tabla 5.9).

En ambos casos, la simulación entrega resultados muy similares, lo que indica que cualquiera de los dos métodos para representar la heterogeneidad por segregación del material, en términos de conductividad hidráulica, es válido.

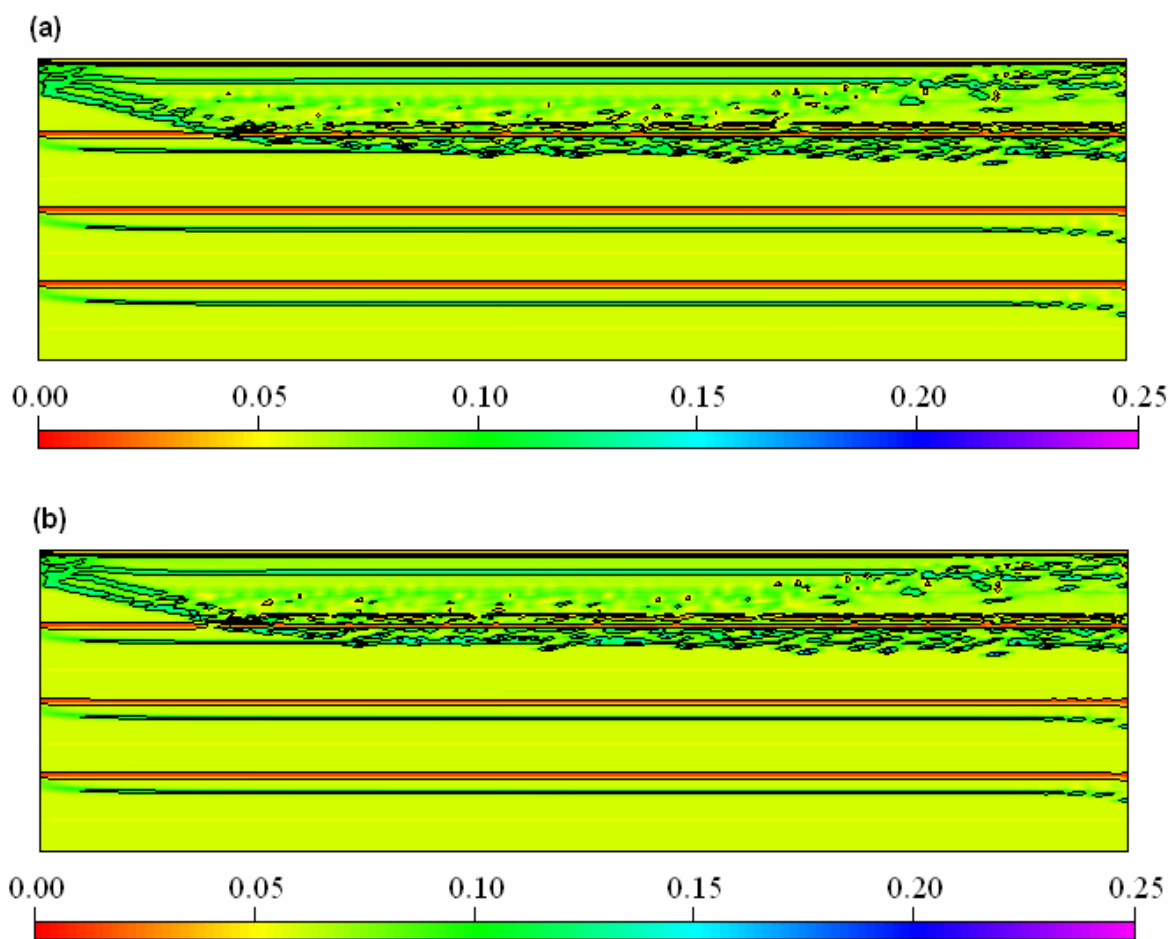


Figura 5.22: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años

(a) escenario S5, perfil heterogéneo por estratificación (4 capas), compactación de la zona superior de cada capa y segregación del material (2 materiales+ factor de escala a K)

(b) escenario S7, perfil heterogéneo por estratificación (4 capas), compactación de la zona superior de cada capa y segregación del material (3 materiales)

Por otra parte, los resultados de la simulación del escenario S3 (Figura 5.21) en comparación con los resultados de los escenarios S5 y S7 (Figura 5.22), no presentan mayores diferencias. Esto implica que el efecto de la zona con mayor conductividad hidráulica, representativa de la acumulación de desechos rocosos de mayor tamaño, no genera mayor efecto. Más aún si se considera que esta zona está justo sobre la zona compactada, que presenta una mayor capacidad de retención de agua, lo que contrarresta el posible efecto de drenaje más rápido de la zona de mayor conductividad.

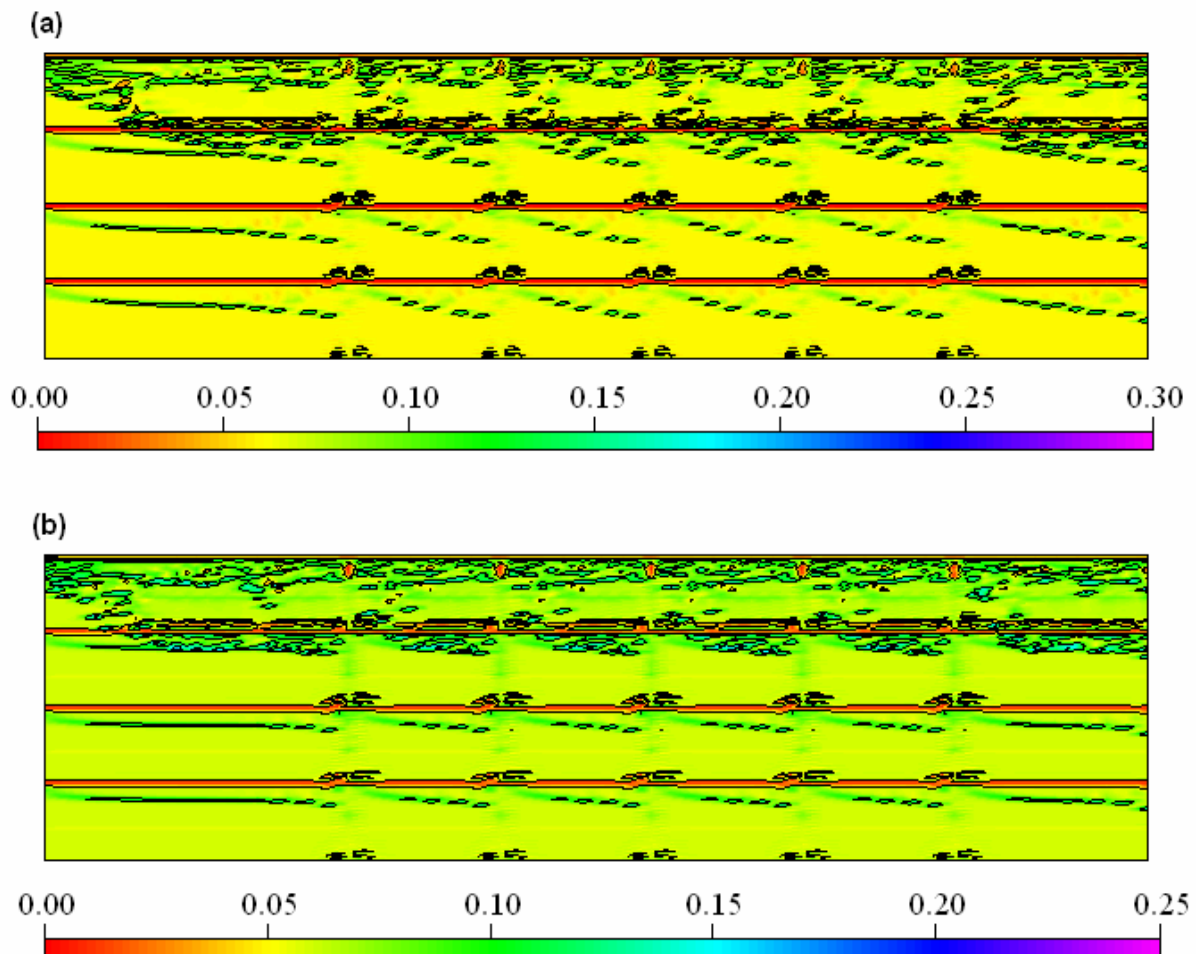


Figura 5.23: Perfil de contenido de humedad simulado para 20 años

- (a) escenario S10, perfil heterogéneo por estratificación (4 capas), compactación de la zona superior de cada capa y segregación del material (2 materiales+ factor de escala a K)**
- (b) escenario S11, perfil heterogéneo por estratificación (4 capas), compactación de la zona superior de cada capa y segregación del material (3 materiales)**

En estos últimos escenarios de simulación se puede ver el efecto de la presencia de vías de flujo preferencial en perfiles estratificados. La Figura 5.23 (a) corresponde a un perfil estratificado (con 4 capas), con una zona superior compactada de menor conductividad hidráulica en cada capa y la presencia

de vías de flujo preferencial. En el escenario S11, Figura 5.23 (b), se considera además la segregación del material, donde los estériles de mayor tamaño se acumulan al fondo de cada capa. Se puede ver que en ambos casos las diferencias en los resultados no son muy grandes. Pero al comparar con los escenarios de simulación presentados anteriormente la diferencia es notoria, debido a la presencia de vías de flujo preferencial, que tienden a canalizar el flujo y producen un avance más rápido del frente de humedad. Sin embargo, en estos casos el frente de humedad producido por la infiltración neta de agua al botadero, tampoco genera respuesta de percolación en la base del depósito para el periodo de simulación de 20 años.

5.4.3 Tiempo para el consumo de la humedad disponible en el depósito, método de Guymon.

De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 4, como parte de la metodología de modelación para evaluar el comportamiento del flujo a través del depósito de estériles, también es posible utilizar una metodología de cálculo sencilla, que permita estimar el tiempo requerido para agotar capacidad de almacenamiento de humedad en el depósito de estériles. Esta metodología fue desarrollada por Guymon (1994) y necesita información de los siguientes parámetros:

- espesor del depósito de estériles (Z)
- capacidad de almacenamiento de humedad ($\theta_s - \theta$)
- tasa de infiltración neta
- porcentaje del material sin potencial de almacenamiento de humedad (CM)

Los valores que toman los parámetros mencionados se indican en la Tabla 5.13, donde se considera que el material estéril posee un 30% de finos, por lo tanto la fracción sin potencial de almacenamiento de humedad es de un 70%. Además se consideran un contenido de humedad inicial del 5%.

Tabla 5.13: Parámetros método de Guymon

θ inicial	0,05
θ sat	0,39
CM	0,7
Z [m]	300

Fuente: Elaboración Propia

La tasa de infiltración neta es la determinada anteriormente con el software Visual HELP. En este caso se consideran los resultados de tasa de infiltración a nivel anual (considerando la tasa acumulada dividida por el número de años), y el periodo de evaluación es de 50 años.

De este modo, el tiempo requerido para agotar el almacenamiento de humedad disponible en el depósito de estériles del Proyecto El Morro queda determinado según lo que indica la Tabla 5.14. Una vez que se agota la capacidad de almacenamiento de humedad, toda la precipitación que ingresa al sistema (infiltración neta) saldría como percolación en la base.

Tabla 5.14: Tiempo para agotar el almacenamiento de humedad disponible en el botadero

Año	Infiltración acumulada [m]	Δt [años]
1	0,037	816,8
2	0,043	1412,3
3	0,044	2074,8
4	0,109	1125,6
5	0,536	284,2
6	0,597	305,6
7	0,642	331,7
8	0,653	372,3
9	0,654	418,5
10	0,654	464,9
11	0,698	479,2
12	1,270	285,5
13	1,418	276,6
14	1,448	291,6
15	1,484	304,8
16	1,500	321,6
17	1,514	338,5
18	1,538	352,8
19	1,566	365,6
20	1,657	363,3
21	1,716	368,2
22	1,729	382,8
23	1,729	400,1
24	1,730	417,4
25	1,821	412,6

Año	Infiltración acumulada [m]	Δt [años]
26	1,885	414,2
27	2,111	383,3
28	2,238	374,5
29	2,264	383,3
30	2,290	391,9
31	2,290	404,9
32	2,290	417,9
33	2,461	400,4
34	2,484	408,6
35	2,603	400,9
36	2,662	403,0
37	2,686	410,4
38	2,759	410,1
39	2,831	409,9
40	2,870	414,5
41	2,884	422,7
42	3,201	389,0
43	3,275	388,9
44	3,279	397,4
45	3,503	379,6
46	3,556	382,1
47	3,577	388,0
48	3,592	394,5
49	3,598	402,0
50	3,630	406,5

Fuente: Elaboración Propia

Según estos resultados, dentro de los 50 años que comprenden el periodo de evaluación, no se alcanzaría a agotar la capacidad de almacenamiento de agua del sistema. Lo que implica que no existiría percolación en la base del depósito. Esto es consistente con los resultados obtenidos con HYDRUS-2D.

5.5 Comentarios y Conclusiones

A partir de la metodología de modelación propuesta para evaluar el comportamiento hidrogeológico de depósitos de estériles, se ha determinado el comportamiento del flujo de agua al interior del depósito del Proyecto El Morro. En general se puede decir que se obtienen resultados concretos y coherentes con lo esperado según el conocimiento teórico en torno al flujo en medio no saturado y en particular en estos depósitos de desechos rocosos hechos por el hombre.

Con respecto a la determinación de la tasa de infiltración neta, ésta es cercana al 50% de las precipitaciones sobre el depósito. Lo mismo ocurre con la tasa de evapotranspiración. Mientras la escorrentía es prácticamente despreciable. Estos resultados tienen relación con el método utilizado por el programa para determinar la escorrentía superficial (método de Curva Número), donde se utilizó la opción de CN calculada por el modelo, la cual depende de ciertos factores que se ingresan al modelo: la inclinación de la superficie del terreno, que en este caso es nula, lo que puede no ser representativo de la estructura real de un depósito de estériles; la clase de vegetación (suelo desnudo) y la textura del material, estos parámetros, al igual que la información meteorológica, se obtienen del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto, desarrollado por Knight Piésold (2008).

Para evaluar el efecto de la variación del parámetro de CN en la simulación, se realizó un análisis de sensibilidad, el cual indica que para valores de curva número menores a 70, la variación en los resultados para el balance hídrico es despreciable. Mientras, para valores mayores (que representarían un sistema de permeabilidad bastante más baja) empieza a existir una mayor diferencia, aumentando la escorrentía superficial y disminuyendo la infiltración neta al depósito.

También en esta etapa de la modelación, se comprobó que basta con un perfil de poco espesor (alrededor de 2 m) para evaluar correctamente la tasa de infiltración al sistema. En este sentido, el método de Curva Número para determinar la escorrentía y el método de Penman para determinar la evapotranspiración no dependen de la profundidad.

Se puede decir que el programa Visual HELP es una herramienta adecuada y de fácil aplicación para la obtención de la tasa de infiltración neta que ingresa al sistema en evaluación. Además presenta la ventaja, frente a otros programas, de tener un generador de datos meteorológicos (precipitación, temperatura y radiación solar) necesarios para la realización del balance hídrico en la zona superficial del depósito de estériles.

Una vez definida la tasa neta de infiltración, se utilizan estos resultados como condición de borde para evaluar el flujo al interior del depósito de estériles. En esta etapa de la modelación se utiliza el modelo numérico de elementos finitos HYDRUS-2D y el método de Guymon, una metodología mucho más sencilla pero muy útil para estimar el periodo de tiempo en que el depósito de estériles puede comenzar a drenar al acuífero. Sin embargo, se debe notar que el método de Guymon no entrega mayor información del almacenamiento de humedad al interior del depósito, ni el monto de la percolación en la base.

A modelar el sistema desde el cierre de la mina, los resultados con el método de Guymon indican que el depósito de estériles no presentará percolación en la base al menos durante los primeros 50 años. Si bien con HYDRUS-2D se modeló para un periodo menor (20 años), tampoco se obtiene un flujo de percolación en respuesta a la infiltración de agua al sistema. En los casos en que fue posible realizar la simulación en HYDRUS-2D para 50 años, se corroboran estos resultados (ausencia de percolación en la base).

La simulación en HYDRUS-2D se realizó para un periodo de tiempo menor principalmente por problemas de capacidad del computador disponible para el desarrollo de la aplicación, ya que para escenarios con mayor nivel de detalle los tiempos de ejecución del modelo se extendían mucho. Además, en ciertos casos se presentaron problemas de convergencia del modelo, que pueden estar relacionados con la información de entrada al modelo y con la discretización espacial y temporal utilizada.

Los resultados obtenidos son consistentes con los obtenidos por Knight Piésold (2008) en la simulación hidrogeológica del EIA del Proyecto El Morro, la cual se realizó con el programa VisualHELP, cuyos resultados indican que no hay percolación dentro del horizonte de evaluación de 50 años.

HYDRUS-2D es un programa de gran utilidad para el análisis del flujo de agua al interior de un medio poroso no saturado, que permite evaluar el flujo en dos dimensiones. Para el depósito de estériles del Proyecto El Morro se considero una geometría cilíndrica equivalente, que se modela de manera eficiente con la opción de flujo axisimétrico que entrega el programa. Además, este programa permite representar condiciones de heterogeneidad del sistema a modelar de manera fácil y gráfica, tales como variabilidad en la cantidad y características de los materiales, número de capas, variabilidad en las condiciones de conductividad hidráulica, etc.

Los resultados analizados son los obtenidos con una malla definida de 10 x 2 m (H x V), las cual en general entregó buenos resultados. Sin embargo, en algunos casos no se logró la convergencia o sencillamente no se pudo definir por completo los modelos a simular, lo que se podría atribuir a problemas con la discretización espacial y temporal, o con la información ingresada al modelo en general.

Respecto de los resultados obtenidos con el software HYDRUS-2D, en general muestran claramente los efectos de agregar condiciones de heterogeneidad al perfil de simulación. Diversos factores que intervienen en las condiciones de heterogeneidad del material y con esto, de las propiedades hidráulicas del sistema, fueron representados en diferentes escenarios de simulación, tanto en forma independiente como integrados en un solo escenario. Las características modeladas son las que se consideran más frecuentes en estos depósitos artificiales de desechos mineros estériles: estratificación, dada por el número de módulos o capas construidas; presencia de zonas compactadas en la superficie de las capas construidas (por efecto del tráfico de maquinaria pesada); segregación del material según tamaño de partículas; y la existencia de vías de flujo preferencial.

Los efectos de la estratificación y la compactación de la zona superior de las capas son muy claros en los resultados obtenidos, donde el material compactado trabaja reteniendo y acumulando el agua, con lo que se pueden generar frentes de humedad que avanzan de manera más localizada o menos dispersa. Los escenarios con vías de flujo preferencial también respondieron según lo esperado, ya que el agua tiende a moverse por estas zonas.

Sólo para el caso de la segregación por tamaño de grano, no fue posible distinguir de manera clara los efectos. Esto puede haber ocurrido porque la diferencia en la conductividad hidráulica asignada a esa zona no es muy grande (donde se duplicó la conductividad). Para observar el efecto de la segregación interna del material, posiblemente se tendría que considerar valores de conductividad mayores, que se diferencien a lo menos en un orden de magnitud con los del otro material. Sin duda lo más recomendable es disponer de información más completa del sistema a modelar, con parámetros específicos del material.

En el mismo sentido, con los resultados obtenidos se observó que para asignar heterogeneidad se puede asignar un tipo diferente de material o utilizar la condición de factor de escala a la conductividad hidráulica, y se representaría la misma condición (basándose en los resultados obtenidos en la aplicación, que son casi iguales para ambos casos). Pero esa alternativa es correcta sólo si los parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten son equivalentes tanto para el material al que se le aplica factor de escala como para el material que se asignaría a esa zona esperando obtener los mismos resultados en términos de flujo y capacidad de almacenamiento. Lo correcto sería determinar mediante ensayos y técnicas de ajuste los parámetros específicos de cada material, o al menos realizar un análisis de sensibilidad de estos parámetros. En esta aplicación no se dispone de información para determinar estos parámetros, por lo que se asumieron los que se han utilizado en una serie de trabajos en torno al análisis hidrogeológico de depósitos de estériles. Por lo que se debe tomar en cuenta que ésta podría ser una fuente de error en los resultados obtenidos.

6 CONCLUSIONES

6.1 Síntesis de resultados y Conclusiones

La predicción del flujo a través de un depósito de estériles es una etapa fundamental si se quiere evaluar y minimizar los efectos medioambientales que estos sistemas artificiales puedan generar. Por una parte responde directamente a la pregunta de cómo afecta en la disponibilidad del recurso, además de ser esencial para una evaluación en términos de calidad, considerando que en estos sistemas existe la posibilidad de generar drenaje ácido, el cual está directamente relacionado con las características del flujo de agua a través del botadero.

El objetivo de esta memoria es recopilar los antecedentes necesarios para el análisis del flujo de agua a través de depósitos de estériles, siendo estos potenciales fuentes de alteración de los flujos naturales del recurso hídrico. Además, se propone una metodología de modelación que permita estimar los flujos a la entrada (infiltración neta), salida (percolación en la base) y al interior del depósito (almacenamiento de humedad) de manera cuantitativa. Esta metodología ha sido probada en un caso real de la minería chilena: el depósito de estériles del Proyecto El Morro; arrojando resultados bastante satisfactorios.

Primero se presentan todos los antecedentes básicos para el análisis de un sistema definido como medio poroso no saturado. Además se describen las características físicas e hidrológicas que influyen en el movimiento del agua a través de estos enormes depósitos de residuos mineros estériles. Para poder realizar una evaluación hidrogeológica es necesario conocer ciertos parámetros hidráulicos y características físicas de los materiales en estudio, tales como: la conductividad hidráulica, curva de retención de agua, porosidad, granulometría, etc. Es por esto que se entrega una breve revisión de las principales técnicas de determinación de estos parámetros e instrumentación necesaria

Además se detallan los procesos de flujo que pueden ocurrir al interior de un depósito de estériles, como el flujo mátrico, que es característico de suelos finos, actúa impulsado por la fuerza de succión y es el mecanismo predominante para casos con una baja tasa de infiltración. Y el flujo preferencial, característico de suelos gruesos o con presencia de estructuras tales como grietas, fracturas, o vías de flujo preferencial en general; este flujo es predominante bajo condiciones de altas tasas de infiltración.

Con esto se tiene un primer acercamiento a estos sistemas que no poseen mayor nivel de estudio en Chile.

Es relevante considerar que estos sistemas son altamente variables, sus características físicas e hidráulicas se pueden tratar de inferir, pero lo más recomendable es realizar los ensayos y análisis que permitan acercarse un poco más a la real configuración del depósito de estériles en estudio. Es por esto también, que ningún modelo de simulación puede ser considerado totalmente correcto, ya que cada depósito de estériles tiene condiciones climáticas, técnicas constructivas y una geología original que lo define.

En el modelo conceptual y la metodología de modelación propuestos en este trabajo, consideran ciertas características de la estructura interna de un botadero que puedan ser más frecuentes, de acuerdo a la revisión bibliográfica, en estos depósitos artificiales de desechos mineros estériles:

- Estratificación: producida por el método constructivo, en términos de las capas o módulos que se construyen.
- Compactación de la zona superior de las capas o estratos por el tránsito de maquinaria pesada.
- Segregación del material: también por efecto de los métodos constructivos, en general las partículas rocosas de mayor tamaño se acumulan en el fondo del depósito o de las capas que lo constituyen (agradación).
- Presencia de vías de flujo preferencial: zonas que tienden a captar el flujo y conducirlo en forma más rápida que el material circundante. Se pueden generar por el método constructivo, pero también por otros efectos, como el caso de fracturas o agujeros realizados por las raíces de plantas.

Luego, apuntando a la modelación propiamente tal, según la revisión de las principales técnicas, modelos y herramientas computacionales que facilitan esta tarea, se define la metodología a utilizar. Las herramientas escogidas para este trabajo son el modelo de balance hídrico Visual HELP, para determinar la tasa de infiltración neta al sistema, y el programa de elementos finitos HYDRUS-2D, que permite realizar simulaciones en dos dimensiones para el flujo en medio poroso parcialmente saturado, con el cual es posible determinar el almacenamiento de humedad al interior del depósito y la percolación en la base.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la aplicación del modelo, Visual HELP resultó ser una muy buena herramienta. Es un modelo fácil de aplicar, que no presenta mayores problemas en su operación, y arroja buenos resultados en forma rápida. Además, tiene la ventaja frente a programas similares, de poseer el módulo Weather Generator que permite generar condiciones meteorológicas de precipitación, temperatura y radiación solar, que son necesarias para la simulación y estimaciones de las tasas de evapotranspiración e infiltración neta. También incluye una base de datos con información meteorológica de diversas locaciones alrededor del planeta.

Por otra parte, el programa HYDRUS-2D presentó algunos problemas al definir los perfiles de simulación y de convergencia. De todas formas, en general resulta una buena herramienta, de fácil uso, con una interfaz gráfica que permite definir el problema de manera sencilla y entrega resultados claros.

La aplicación realizada al depósito de estériles del Proyecto El Morro, permitió evaluar de manera real la funcionalidad de la metodología de modelación hidrogeológica de depósitos de estériles propuesta. La que sin estar exenta de errores o imprecisiones, resulta muy útil como un primer acercamiento, y podría ser mejorada disponiendo de ciertas herramientas computacionales complementarias, que permitirían diseñar perfiles y modelos de simulación más cercanos a la realidad. Además de la importancia de contar con datos de entrada confiables, principalmente lo relacionado con estadísticas meteorológicas y características físicas e hidráulicas del depósito a modelar.

6.2 Recomendaciones para la modelación hidrogeológica de depósitos de estériles y desarrollos de estudios posteriores.

Se debe considerar que debido a la alta variabilidad física de estos sistemas artificiales, el modelo conceptual definido para la evaluación hidrogeológica de depósitos de estériles no entrega una solución única y correcta para cualquier depósito de estériles. Es importante analizar y adecuar el modelo para las características de cada depósito en particular, que definen el nivel de heterogeneidad del sistema. Según esto es importante considerar la existencia de diferentes etapas de construcción que puedan generar estratificación (número de capas a considerar en el modelo), el método empleado para depositar el material de desecho que puede provocar la segregación del material, la compactación de la zona superior de las capas (en caso de existir tránsito de maquinaria pesada) y la posible existencia de vías de flujo preferencial.

Con respecto a las herramientas de modelación numérica, Visual HELP es una herramienta sencilla pero muy eficiente para la determinación de la infiltración neta. Por su parte HYDRUS-2D por lo general entrega buenos resultados, pero es recomendable disponer de la extensión MeshGen2D o de una versión más actualizada del programa que permita generar geometrías irregulares, con lo que se representaría de mejor manera las características físicas del sistema en estudio. Con esto se ampliaría el nivel de detalle en el modelo y se obtendrían resultados más cercanos a la realidad. Por ejemplo, sería interesante evaluar el efecto de los taludes e inclinación en la superficie del depósito, lo que probablemente induciría un escape del flujo por los taludes.

Un requisito esencial para el uso responsable de un modelo de simulación es su validación para cada sistema o problema en particular al que será aplicado.

Se destaca la importancia de disponer de información de entrada al modelo confiable (registros meteorológicos, características del material de desecho, parámetros hidráulicos, etc.). Para una buena evaluación hidrogeológica de un depósitos de estériles, el monitoreo de campo, los ensayos en laboratorio y trabajos con depósitos a escala o pilas de prueba, entregan grandes ventajas, apuntando a la precisión del modelo.

Si el interés es aumentar el nivel de conocimiento en torno al comportamiento hidrogeológico de depósitos de estériles, es importante realizar estudios que estén acompañados por experiencias en laboratorio y mediciones in-situ que avalen los resultados. Algunos estudios de interés son los relacionados con la distribución espacial del flujo de agua en un sistema a gran escala, con especial enfoque en el estudio de los mecanismos de flujo preferencial; estudios en botaderos artificiales (de pequeña escala) para examinar los mecanismos físicos por los cuales el agua se mueve a través del material del desecho; estudios respecto del efecto de la variabilidad climática en el comportamiento hidrogeológico de botaderos; estudios geofísicos que ayuden a predecir la estructura interna de estos depósitos altamente variables; etc.

Finalmente, queda pendiente el análisis de los efectos que producen los depósitos de estériles en la calidad del recurso hídrico, para lo cual es necesario incorporar la hidrogeoquímica, para analizar la posibilidad de que exista transporte de solutos y drenaje ácido, cuantificar sus efectos en la calidad del agua y determinar posibles medidas de prevención y mitigación. Siempre considerando que el comportamiento del flujo a través del depósito está directamente relacionado con la posibilidad de que ocurra drenaje ácido.

Chile es un país cuya principal actividad económica es la minería, por lo que es realmente importante prevenir y controlar los impactos ambientales que pueda generar la actividad minera. En particular lo relacionado con el impacto producido por los depósitos de estériles de minería, que constituye uno de los temas más desconocidos y menos estudiados del rubro, requiere mayor atención, aun más si se considera que sus efectos se verán sobre un recurso tan vital como el agua.

7 REFERENCIAS

Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette¹, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R.P., Chouteau, M., Wilson, G.W. 2005. Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes a stériles. Symposium Rouyn-Noranda: L'Environnement et les Mines, Canada.

Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Chouteau, M., Anterrieu, O., Hernandez, M.A., Chapuis, R., Bussière, B., Lahmira, B., Lefebvre, R. 2008. Caractérisation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles, Symposium Rouyn-Noranda: L'Environnement et les Mines.

Azam S., Wilson G.W., Herasymuik G., Nichol C., Barbour L.S. 2006. Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 66: 259-268.

Bay, D. 2009. Hydrological and hydrogeochemical characteristics of neutral drainage from a waste rock test pile. M.A.Sc. thesis. Faculty of Graduate Studies, Geological Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Boldt-Leppin, B., O'Kane, M., Haug, M.D. 1999. Soil covers for sloped surfaces of mine waste rock and tailings. Tailings and Mine Waste Conference, Fort Collins, CO, pp. 393-403.

Bronstert, A. y Plate, E. J. 1997 Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. Journal of Hydrology 198: 177-195.

Bronstert, A., Glüsing, B., Plate, E. 1998. Physically-based hydrological modelling on the hillslope and micro-catchment scale: examples of capabilities and limitations. Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters, IAHS Publ. n° 248, pp 207-215.

Brooks, R.H. y Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No.3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Campos, D., Chouteau, M., Aubertin, M., Bussière, B. 2003. Using geophysical methods to image the internalstructure of mine waste rock piles. 9th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.

Campos, D. 2004. Un étude de caractérisation de la structure interne d'une halde à stériles par méthodes géophysiques. Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montreal, Canada.

Clapp, R.B. y Hornberger, G.M. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research* 14 : 601-604.

Corzaao Gallegos, J.C. 2007. The design, construction, instrumentation, and initial response of a field-scale waste rock test pile. M.A.Sc. thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada.

DHI-WASY GmbH. 2010. DHI-WASY Software: FEFLOW 6, Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System, User Manual. Berlín, Alemania.

DICTUC. 2008. Estudio Hidrológico Quebrada Larga. División Ingeniería Hidráulica y Ambiental área Aguas Subterráneas, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Espinoza, C. 2009. Apuntes curso CI51J: Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento. Departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile.

Fala O., Aubertin M., Molson J.W., Bussière B., Wilson G.W., Chapuis R., Martin V. 2003. Numerical modeling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia, Publication Series 3/2003, pp 895-902.

Fala, O., Molson, J.W., Aubertin, M., Bussière, B. 2005. Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water & Environment* 24: 172-185.

Fala, O., Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R., Molson, J. 2008. Stochastic numerical simulations of long term unsaturated flow in waste rock piles. *GeoEdmonton 2008: 61st Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Sept. 21-24, 2008, Edmonton, Alberta, Canada, pp. 1492–1498.

Fenn, D.G., Hanley, K.J., Degeare, T.V. 1975. Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-530/SW-168.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.

GeoAnalysis. 2000. SoilCover Software User's Manual. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

González, A. 2000. Bases conceptuales para la evaluación ambiental de los líquidos percolados de un relleno sanitario de una localidad pequeña. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Guymon, G.L. 1994. Unsaturated Zone Hydrology. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. pp 95-96.

Herasymuik, G., Wilson, G., Barbour, S., Smith, T. 1995. The characterization of hydrologic properties and moisture migration pathways of a waste rock pile. 19th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium in Dawson Creek, BC.

Herasymuik, G. 1996. Hydrogeology of a sulphide waste rock dump. M.A.Sc. thesis. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Hosseini, S.M. 1997. Thesis: Development of an unsteady non-linear model for flow through coarse porous media. The University of Guelph.

Hutchison, I.P.G, y Ellison, R.D. 1992. Mine Waste Management, Chapter 6: Climatic Considerations. Lewis Publishers Inc. Chelsea, Michigan.

Janssen, G., Hemker, K. 2004. Groundwater models as civil engineering tools. International conference on Finite-element models, Modflow and more 2004 solving groundwater problems. Czech Republic.

Knight Piésold. 2008. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto El Morro. Sociedad contractual Minera El Morro. Disponible en Servicio de Evaluación Ambiental, Gobierno de Chile. [en línea] < <https://www.e-seia.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3344443> >

Kool, J.B. and Parker, J.C. 1987. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. Water Resources Research 23: 105-114.

Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J., Gélinas, P. 2001. Multiphase transfer process in waste rock piles producing acid mine drainage 1: Conceptual model and system characterization. *Journal of Contaminant Hydrology* 52: 137-164.

Maidment, D.R. 1993. *Handbook of Hydrology*, Ch. 5: Infiltration and soil water movement. McGraw-Hill Inc.

Martin, V. 2003. Étude des méthodes d'entreposage des roches stériles pour prévenir la génération d'eaux de drainage minier acides. Mémoire de maîtrise, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montreal, Canada.

Martin, V., Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, P.R. 2004. Evaluation of unsaturated flow in mine waste rock. 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th joint CGS-IAH Conference, Canadian Geotechnical Society, 24–27 October 2004, Quebec. Session 7D, pp. 14-21.

Mbonimpa, M., Bédard, C., Aubertin, M., Bussière, B. 2004. A model to predict the unsaturated hydraulic conductivity from basic soil properties. 57th Canadian Geotechnical Conference and 5th joint CGS-IAH Conference, Canadian Geotechnical Society, 24-27 October 2004, Quebec.

Merino, M. 2005. Modelación numérica de la generación de líquidos lixiviados en una columna de residuos sólidos domésticos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Molson, J.W., Fala, O., Aubertin, M., Bussière, B. 2005. Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology* 78: 343–371

Morin, K., Jones, C., van Dyk, R.P. 1994. Internal hydrogeologic monitoring of an acidic waste rock dump. Westmin Resources' Myra Falls operations, BC. 3rd international conference on the abatement of acid drainage, Pittsburgh, USA. 1: 355–364.

Newman, L. 1999. Preferential flow in vertically oriented, unsaturated soil layers. M.A.Sc. thesis. Department of Civil Engineering. Saskatoon, University of Saskatchewan, Canada.

Nichol, C., Smith, L., Beckie, R. 2005. Field-scale experiments of unsaturated flow and solute transport in a heterogeneous porous medium. *Water Resources Research*, 41: 1-11.

O’Kane, M., Wilson, G.W., Barbour, S.L. 1993. SoilCover, a new computer model to aid in the design of soil cover systems for acid generating waste rock and tailings. 17th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium in Port Hardy, BC.

Olivares, C. 2003. Generación de líquidos percolados de residuos domésticos. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil y Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Penman, H.L. 1963. Vegetation and hydrology. Comentario técnico N° 53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Gran Bretaña.

Poisson, J., Chouteau, M., Aubertin, M., Campos, D. 2008. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *Journal of Applied Geophysics* 67: 179–192.

Rassam D., Simunek J., y van Genuchten M. Th. 2003. Modelling variably saturated flow with HYDRUS-2D. ND Consult, Brisbane, Australia.

Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5): 1204-1213.

Salfate, E. 2005. Modelación numérica de la recirculación de lixiviados en un relleno sanitario, aplicación al relleno sanitario Santiago Poniente. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Savci, G. y Williamson A. 2002. Hydrologic assessment of waste rock stockpiles: a case study from Ajo Mine, Arizona. SME Annual Meeting. Feb.25-27, Phoenix, Arizona.

Schroeder, P.R. 1983. Hydrologic evaluation of landfill performance. Report of Water Resources Engineering Group, Environmental Laboratory, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MO.

Schroeder, P.R., Morgan, J.M., Walski, T.M., Gibson, A.C. 1984. Hydrological Evaluation of Landfill Performance (HELP) model, Volume I. User’s guide for version I. International Ground Water Modelling Center.

Scott, P.S., Farquhar, G.J., Kouwen, N. 1983. Hysteretic effects on net infiltration. *Advances in Infiltration*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, pp. 163-170.

SCS (Soil Conservation Service). 1972. *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology. USDA, U. S. Government printing Office, Washington, DC.

Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M.Th. 1999. The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 2.0. US Salinity Laboratory, ARS, USDA, Riverside, CA.

Smith, L., Lopez, D., Beckie, R., Dawson, R., Price, W. 1995. Hydrogeology of waste rock dumps. Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario. Contract Report 23440-4-1317/01-SQ

Smith, L. y Beckie, R. 2003. Hydrologic and geochemical transport processes in mine waste rock. En: Jambor, J., Blowes, D., y Ritchie, A.I.M. (Eds.) *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Short Course Series Vol. 31, Mineralogical Association of Canada. pp. 51-72.

Stephens, D.B. 1994. A perspective on diffuse natural recharge mechanisms in areas of low precipitation. *Soil Science Society of America journal* 58: 44-48.

Stockwell, J., Smith, L., Jambor, J.L., and R. Beckie. 2006. The relationship between fluid flow and mineral weathering in heterogeneous unsaturated porous media: a physical and geochemical characterization of a waste rock pile. *Applied Geochemistry* 21: 1347-1361.

Swanson, D.A., Kempton, J.H., Travers, C., and Atkins, D.A. 1998. Predicting long-term seepage from waste-rock facilities in dry climates. *Proceedings Annual Meeting of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, Inc, Orlando, Florida.

Swanson, D.A., Savci, G., Danziger, G., Mohr, R.N., Weiskopf, T. 1999. Predicting the soil-water characteristics of mine soils. *Sixth International Conference on Tailings and Mine Waste Conference*, Ft. Collins, Colorado. pp. 345-349.

Thornthwaite, C.W., y Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, Drexel Institute of Technology, Centerton, NJ.

U.S. Environmental Protection Agency. 2003. EPA and Hardrock Mining: A Source Book for Industry in the Northwest and Alaska.

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.

Webb, G., Tyler, S.W., Collard, J., Van Zyl, D., Halihan, T., Turrentine, J., Fenstemaker, T. 2008. Field scale analysis of flow mechanism in highly heterogeneous mining media. Vadose Zone Journal. 7(2): 899-908.

Wilson, J.A., Wilson, G.W., Fredlund, D.G. 2000. Numerical modelling of vertical and inclined waste rock layers. Proceedings Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton.. pp. 257-266.

Wilson, J. 2003. Numerical modeling of unsaturated flow in vertical and inclined waste rock layers. M.A.Sc. thesis. Department of Civil Engineering. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Yazadani, J., Barbour, L., Wilson, G.W. 2000. Soil water characteristic curves for mine waste rock containing coarse material. Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineers (CSCE), Annual Conference, London, Ontario. pp. 198 - 202.