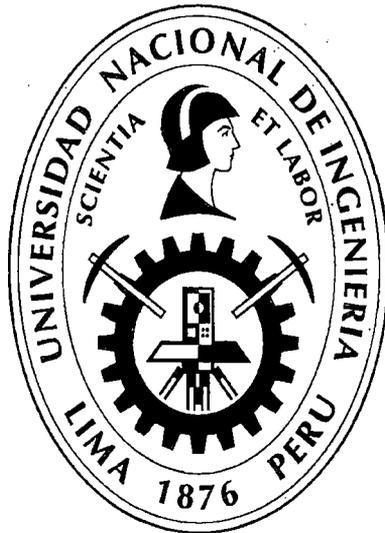


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**APLICACIÓN NUMÉRICA PARA LAS COBERTURAS DE LOS  
DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**PAÚL ALONSO DURAND PACHECO**

**Lima- Perú**

**2014**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

## **DEDICATORIA**

A Dios todopoderoso, mis padres Hugo y Noemí, porque me dieron la vida, porque me dieron un hogar, la oportunidad de estudiar y creer en mí, a mi hermano Víctor y a la Universidad Nacional de Ingeniería que me pudo brindar todos los conocimientos necesarios para ayudar a mi país.

## **AGRADECIMIENTOS**

Fueron muchas las personas que me brindaron parte de su tiempo, para poder desarrollar esta investigación.

Debo brindar mis agradecimientos a mi asesor de tesis el ing. Alfredo Mansen Valderrama, quien fue parte fundamental para realizar este estudio y al ing. Juan Cabrera por su instrucción, atención, apoyo y tiempo.

A la Empresa JMF Ingeniería & Construcción, en especial al ing. Freddy Guevara, quien dedicó parte de su tiempo, constante apoyo e intereses en la realización de este trabajo, a los ingenieros: Julio Bizarreta, Juan Cabrera, Manuel Ferrer y Antony Moreno.

Al Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería (LNH-UNI), al Dr. Julio Kuroiwa por permitirme utilizar sus instalaciones y equipos para el desarrollo de la investigación y a los técnicos del laboratorio.

A mis familiares y compañeros, por su apoyo, palabras de aliento y por su preocupación en el avance de la investigación.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XX</b>
<b>CAPÍTULO I: CONCEPTOS TEÓRICOS DE LOS SUELOS NO SATURADOS</b>	
1.1 PROPIEDADES GENERALES DEL SUELO NO SATURADO	1
1.1.1 Fases constituyentes del suelo	2
1.1.2 Fundamentos de capilaridad del agua en el suelo	2
1.1.3 Potencial total del agua en el suelo	2
1.1.3.1 <i>Potencial osmótico</i>	3
1.1.3.2 <i>Potencial matricial</i>	3
1.1.3.3 <i>Potencial gravitacional</i>	4
1.1.3.4 <i>Potencial de presión</i>	4
1.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS	4
1.2.1 Propiedades de los suelos	4
1.2.2 Curva característica o curva de retención	6
1.2.2.1 <i>Método de Kovacs modificado – tamaño de grano</i>	7
1.2.2.2 <i>Método de van Genuchten, 1980</i>	10
1.2.2.3 <i>Método de Fredlund y Xing, 1994</i>	11
1.2.2.4 <i>Coefficiente de compresión volumétrica (mv)</i>	12
1.2.3 Factores que influyen en la curva de retención	13
1.2.4 Conductividad hidráulica	16
1.2.5 Factores que influyen en la conductividad hidráulica	17

---

1.2.5.1 Grado de saturación (S)	17
1.2.5.2 Índice o relación de vacíos (e)	18
1.2.5.3 Estructura de los suelos	18
1.2.5.4 Peso específico y viscosidad del líquido percolante	18
1.2.5.5 Textura y forma de la partícula	18
1.2.5.6 Composición mineralógica	19
1.3 FUNCIÓN DE PERMEABILIDAD	19
1.3.1 Modelos para el cálculo de la función de permeabilidad	19
1.3.1.1 Mualem et al., 1976	19
1.3.1.2 van Genuchten et al., 1980	21
1.3.1.3 Fredlund et al., 1994	23
1.4 CARÁCTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS SUELOS NO SATURADOS	24
1.4.1 Función del contenido de agua congelada	25
1.4.2 Conductividad térmica	26
1.4.3 Capacidad de calor volumétrica	28
1.5 COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE GAS	29
1.5.1 Transferencia de oxígeno	29
1.6 FLUJO SATURADO Y LA ECUACIÓN DE DARCY	31
1.7 FLUJO NO SATURADO Y LA ECUACIÓN DE RICHARDS	31
1.8 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	34
1.8.1 Evaporación actual	34
1.8.2 Temperatura de la superficie del suelo	36
1.8.3 Infiltración	36
<b>CAPÍTULO II: COBERTURAS PARA LA CONTENCIÓN DE RESIDUOS</b>	
2.1 INTRODUCCIÓN	37
2.2 MARCO LEGAL	37

---

2.3 MARCO CONCEPTUAL	37
2.4 DRENAJE ÁCIDO	38
2.5 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE COBERTURA	39
2.5.1 Capa superficial	40
2.5.2 Capa de protección	41
2.5.3 Capa de drenaje	41
2.5.4 Capa de retención de humedad	41
2.5.5 Capa de soporte	42
2.6 TIPOS DE SISTEMAS DE COBERTURA	43
2.6.1 Cobertura convencional o monolítica	43
2.6.2 Cobertura capilar simple	43
2.6.3 Cobertura capilar doble	44
2.6.4 Coberturas evapotranspirativas	45
2.7 FACTORES QUE CONTROLAN LA FUNCIONABILIDAD DE LA COBERTURA	45
2.7.1 Impacto de las propiedades del suelo no saturado	46
2.7.2 Impacto del espesor de la capa	46
2.7.3 Impacto de las condiciones climáticas	47
<b>CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO SOFTWARE VADOSE/W</b>	
3.1 INTRODUCCIÓN	48
3.2 FUNDAMENTO Y DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE VADOSE/W	48
3.3 GEOMETRÍA Y MALLA DE ELEMENTOS FINITOS	49
3.3.1 Regiones de suelo, líneas y puntos	49
3.3.2 Generación de la malla	49
3.3.3 Capas de superficie	50
3.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	51

3.4.1 Función del contenido de agua	52
3.4.2 Función de conductividad hidráulica	53
3.4.3 Función térmica	54
3.4.4 Difusión de gas	56
3.5 CONDICIONES DE BORDE	57
3.5.1 Clima y condiciones de borde	58
3.6 TIPOS DE ANÁLISIS	59
3.6.1 Análisis Estacionario	59
3.6.2 Análisis Transitorio	59
3.7 ELEMENTOS FINITOS PARA LAS ECUACIONES DE FLUJO	60
3.7.1 Ecuación diferencial parcial de flujo de agua y calor	60
3.7.2 Integración temporal	63
3.7.3 Integración numérica	65
<b>CAPÍTULO IV: CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y FÍSICO DEL SISTEMA DE COBERTURA</b>	
4.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MINA EQUITY SILVER	68
4.1.1 Breve resumen de la mina Equity Silver	68
4.1.2 Descripción del modelo	70
4.1.3 Procedimiento de diseño	70
4.1.3.1 <i>Parámetros geotécnicos</i>	70
4.1.3.2 <i>Parámetros climáticos</i>	72
4.1.4 Análisis numérico de la cobertura existente de la mina Equity Silver	75
4.1.4.1 <i>Modelamiento de las capas de la cobertura existente y resultados</i>	75
4.1.4.2 <i>Conclusiones y comentarios</i>	78

4.2 MODELO FÍSICO DE LA BARRERA CAPILAR	80
4.2.1 Descripción del modelo	80
4.2.2 Ensayo e interpretación de los resultados	82
<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE COBERTURA CON EL SOTWARE VADOSE/W</b>	
5.1 BREVE RESUMEN DE LOS SISTEMAS DE COBERTURAS	84
5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS O SISTEMAS DE COBERTURA	86
5.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	86
5.3.1 Parámetros geotécnicos	86
5.3.2 Parámetros climáticos	89
5.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO LA CAPA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD	92
5.4.1 Modelos de cobertura 1: Capa de retención de humedad de 0.25 m	92
5.4.2 Modelos de cobertura 2: Capa de retención de humedad de 0.40 m	96
5.4.3 Modelos de cobertura 3: Capa de retención de humedad de 0.60 m	100
5.4.4 Modelos de cobertura 4: Capa de retención de humedad de 0.80 m	104
5.4.5 Resultados y comentarios	108
5.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO LA CAPA DE ALMACENAMIENTO	110
5.5.1 Modelos de cobertura 5: Capa de almacenamiento de 0.60 m	110
5.5.2 Modelos de cobertura 6: Capa de almacenamiento de 0.80 m	114
5.5.3 Resultados y comentarios	118
5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PWP	120
5.6.1 Modelos de cobertura 7: Presión de poros (PWP) de -20 KPa	120
5.6.2 Modelos de cobertura 8: Presión de poros (PWP) de -10 KPa	124
5.6.3 Resultados y comentarios	128
5.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL MODELO MATEMÁTICO	129

---

5.7.1 Modelos de cobertura 9: Curva de conductividad hidráulica de van Genuchten (1980)	130
5.7.2 Modelos de cobertura 10: Curva de conductividad hidráulica de Fredlund (1994)	134
5.7.3 Resultados y comentarios	138
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1 CONCLUSIONES	140
6.2 RECOMENDACIONES	141
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## RESUMEN

Este trabajo de investigación se realizó con el software VADOSE/W, con un modelo físico y con la guía para el diseño de coberturas del MINEM; que tuvo como finalidad la evaluación del desempeño de los sistemas de coberturas, para evitar la percolación del agua de lluvia y así generar el drenaje ácido de mina.

Fueron 10 los modelos de sistemas de coberturas que se formularon y modelaron con el software VADOSE/W, luego se realizó la calibración de sus resultados mediante una constante, que fue hallada mediante el modelamiento de un caso real documentado y el monitoreo de el mismo, presentado en la guía para el diseño de coberturas del MINEM; asimismo se generó un modelo físico en el cual se pudo apreciar la formación de la barrera capilar y el flujo de agua entre los suelos no saturados de diferente textura.

El modelo de calibración, permitió determinar un mejor resultado en los análisis de sensibilidad. Las características y propiedades climáticas permitieron generar las condiciones de borde del modelo y los resultados finales de los modelos.

Se utilizaron los resultados de los ensayos de permeabilidad de los materiales utilizados en los modelos de cobertura, a los que se les asignó las funciones de curva de retención de agua, que se encuentran incluidas en el software VADOSE/W. Posteriormente fueron generadas las curvas de conductividad hidráulica con los modelos matemáticos incluidos en el software.

Fueron las variaciones de las capas de arcilla los mejores resultados para controlar la percolación y la reducir la formación del drenaje ácido.

**LISTA DE CUADROS**

Cuadro 2.1:	Principales características de las capas de cobertura (Aubertin et al. 1995).	42
Cuadro 3.1:	Peso unitario y conductividad térmica de diferentes materiales.	55
Cuadro 3.2:	Calor específico y capacidad de calor volumétrica de diferentes materiales.	56
Cuadro 4.1:	Propiedades de los materiales para el diseño de la cobertura.	71
Cuadro 4.2:	Parámetros climáticos.	73
Cuadro 4.3:	Espesores de capas del modelo de cobertura Equity Silver.	75
Cuadro 4.4:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura Equity Silver.	77
Cuadro 4.5:	Balance hídrico del modelo de cobertura Equity Silver.	77
Cuadro 4.6:	Espesores de las capas del modelo físico.	81
Cuadro 5.1:	Propiedades de los materiales para el diseño de la cobertura.	87
Cuadro 5.2:	Parámetros climáticos.	90
Cuadro 5.3:	Espesores de capas del modelo de cobertura 1.	92
Cuadro 5.4:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 1.	94
Cuadro 5.5:	Balance hídrico del modelo de cobertura 1.	94
Cuadro 5.6:	Espesores de capas del modelo de cobertura 2.	96
Cuadro 5.7:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 2.	98
Cuadro 5.8:	Balance hídrico del modelo de cobertura 2.	98
Cuadro 5.9:	Espesores de capas del modelo de cobertura 3.	100

---

Cuadro 5.10:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 3.	102
Cuadro 5.11:	Balance hídrico del modelo de cobertura 3.	102
Cuadro 5.12:	Espesores de capas del modelo de cobertura 4.	104
Cuadro 5.13:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 4.	106
Cuadro 5.14:	Balance hídrico del modelo de cobertura 4.	106
Cuadro 5.15:	Resumen de resultados de la variación de la capa de retención de humedad.	108
Cuadro 5.16:	Espesores de capas del modelo de cobertura 5.	110
Cuadro 5.17:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 5.	112
Cuadro 5.18:	Balance hídrico del modelo de cobertura 5.	112
Cuadro 5.19:	Espesores de capas del modelo de cobertura 6.	114
Cuadro 5.20:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 6.	116
Cuadro 5.21:	Balance hídrico del modelo de cobertura 6.	116
Cuadro 5.22:	Resumen de resultados de la variación de la capa de almacenamiento.	118
Cuadro 5.23:	Espesores de capas del modelo de cobertura 7.	120
Cuadro 5.24:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 7.	122
Cuadro 5.25:	Balance hídrico del modelo de cobertura 7.	122
Cuadro 5.26:	Espesores de capas del modelo de cobertura 8.	124
Cuadro 5.27:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 8.	126
Cuadro 5.28:	Balance hídrico del modelo de cobertura 8.	126

---

Cuadro 5.29:	Resumen de resultados de la variación de la presión de poros.	128
Cuadro 5.30:	Espesores de capas del modelo de cobertura 9.	130
Cuadro 5.31:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 9.	132
Cuadro 5.32:	Balance hídrico del modelo de cobertura 9.	132
Cuadro 5.33:	Espesores de capas del modelo de cobertura 10.	134
Cuadro 5.34:	Parámetros numéricos del modelo de cobertura 10.	136
Cuadro 5.35:	Balance hídrico del modelo de cobertura 10.	136
Cuadro 5.36:	Resumen de resultados de la variación del Modelo Matemático.	138

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Fases del suelo a) Las tres fases principales del suelo, b) la membrana contráctil, ubicada entre las fases de aire y agua.	2
Figura 1.2:	Potencial matricial del suelo (Hillel, 1971), el efecto capilar entre las partículas del suelo.	3
Figura 1.3:	Modelo conceptual del comportamiento de la curva de retención.	6
Figura 1.4:	Descripción de la curva de retención, variación del contenido de humedad vs la succión en el suelo.	13
Figura 1.5:	Comportamiento de la curva de retención según el tipo de suelo.	14
Figura 1.6:	Perfil del suelo saturado y no saturado, a) perfil suelo Saturado, b) perfil suelo no saturado.	16
Figura 1.7:	Variación de la función de permeabilidad con la succión.	17
Figura 1.8:	Función de energía de almacenamiento.	25
Figura 1.9:	Zonas de humedecimiento de un suelo no saturado.	32
Figura 1.10:	Discontinuidades de $\theta$ y $\Psi_m$ mediante dos tipos de suelos de diferentes texturas.	33
Figura 2.1:	Esquema del funcionamiento de una cobertura.	40
Figura 2.2:	Componentes de un sistema de cobertura.	40
Figura 2.3:	Propiedades Hidráulicas no saturadas de los	46

materiales.

Figura 4.1:	Característica de las curvas de retención de agua.	71
Figura 4.2:	Característica de las curvas de conductividad hidráulica.	72
Figura 4.3:	Características climáticas de la mina Equity Silver, a) precipitación total mensual, b) temperatura mensual, c) humedad relativa mensual y d) velocidad del viento mensual.	74
Figura 4.4:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura de la mina Equity Silver, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura, c) materiales que conforman el sistema de cobertura.	76
Figura 4.5:	Percolación total hacia el desmonte de mina, acumulada durante un año.	78
Figura: 4.6:	Perfil de saturación del sistema de cobertura para diferentes periodos de tiempo.	78
Figura 4.7:	Cuba de acrílico con ángulos de acero.	80
Figura 4.8:	Sistema de cobertura de barrera capilar doble.	81
Figura 4.9:	Saturación del sistema de cobertura de barrera capilar doble.	82
Figura 4.10:	Formación de la barrera capilar.	82
Figura 4.11:	Percolación de agua a través del sistema de cobertura.	83

---

Figura 4.12:	Retención de agua del sistema de cobertura.	83
Figura 5.1:	Característica de las curvas de retención de agua.	88
Figura 5.2:	Característica de las curvas de conductividad hidráulica.	89
Figura 5.3:	Características climáticas de los sistemas o modelos de cobertura, a) precipitación total mensual, b) temperatura mensual, c) humedad relativa mensual y d) velocidad del viento mensual.	91
Figura 5.4:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 1, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura, c) materiales que conforman el sistema de cobertura.	93
Figura 5.5:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 1 para 90 días.	95
Figura: 5.6:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 1 para 90 días.	95
Figura 5.7:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 2, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	97
Figura 5.8:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 2 para 90 días.	99
Figura: 5.9:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 2 para 90 días.	99
Figura 5.10:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 3, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	101

---

Figura 5.11:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 3 para 90 días.	103
Figura 5.12:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 3 para 90 días.	103
Figura 5.13:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 4, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	105
Figura 5.14:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 4 para 90 días.	107
Figura 5.15:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 4 para 90 días.	107
Figura 5.16:	Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación de la capa de retención de humedad	109
Figura 5.17:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 5, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	111
Figura 5.18:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 5 para 90 días.	113
Figura 5.19:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 5 para 90 días.	113
Figura 5.20:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 6, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	115
Figura 5.21:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 6 para 90 días.	117

---

Figura 5.22:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 6 para 90 días.	117
Figura 5.23:	Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación de la capa de retención de almacenamiento.	119
Figura 5.24:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 7, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	121
Figura 5.25:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 7 para 90 días.	123
Figura 5.26:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 7 para 90 días.	123
Figura 5.27:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 8, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	125
Figura 5.28:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 8 para 90 días.	127
Figura 5.29:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 8 para 90 días.	127
Figura 5.30:	Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación de la presión de poros.	129
Figura 5.31:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 9, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	131
Figura 5.32:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 9 para 90 días.	133

---

Figura 5.33:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 9 para 90 días.	133
Figura 5.34:	Modelo geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura 10, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.	135
Figura 5.35:	Percolación total hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 10 para 90 días.	137
Figura 5.36:	Perfil de saturación del sistema de cobertura 10 para 90 días.	137
Figura 5.37:	Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación del modelo matemático.	139

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	:	Parámetro de ajuste de curva
ABA	:	Ensayos ácido base.
AE	:	Evaporación actual vertical.
ARD o DAR	:	Drenaje ácido de roca.
$C_{\psi}$	:	Función de corrección.
C	:	Capacidad de calor volumétrica del suelo.
c	:	Capacidad específica de calor del suelo.
$c_s$	:	Capacidad de calor específica de las partículas del suelo.
$c_w$	:	Capacidad de calor específica del agua.
$C_u$	:	Coefficiente de uniformidad
$D_{10}$	:	Diámetro de la partícula (cm) correspondiente al 10% que pasa en la curva de tamaño de grano.
$D_a$	:	Coefficiente de difusión de oxígeno en el aire.
$D_v$	:	Coefficiente de difusión de gas descrito por Wilson (1990).
$D_w$	:	Coefficiente de difusión de oxígeno en el agua.
DAM	:	Drenaje ácido de mina.
e	:	Relación de vacíos.
$e_o$	:	Relación de vacíos inicial.
g	:	Aceleración de la gravedad.
$G_s$	:	Gravedad específica del suelo.
GCL	:	Geosynthetic clay liner.
H	:	Solubilidad constante del oxígeno en el aire y el agua.
$\Delta H$	:	Entalpía de disolución de gas.
k	:	Conductividad hidráulica.
$k_r$	:	Permeabilidad relativa.
$k_{sat}$	:	Permeabilidad saturada.
$k_w$	:	Conductividad calculada para un contenido de agua específico o presión de poros de agua negativo (m/s).
M	:	Masa.
m	:	Parámetro de ajuste que tiene en cuenta la distribución del

---

	tamaño de poros.
$n$	: Porosidad.
$V$	: Volumen.
$\Theta$	: Contenido volumétrico de agua.
$\Theta_r$	: Contenido volumétrico de agua residual.
$\Theta_{sat}$	: Contenido volumétrico de agua saturado.
$P$	: Presión.
$P_n$	: Potencial de presión.
$P_v$	: Presión de vapor del suelo húmedo.
$PE$	: Potencial de Evaporación.
$pH$	: Potencial de hidrógeno.
$q$	: Flujo unitario a través del lado de un elemento.
$Q$	: Energía de radiación neta disponible en la superficie.
$R$	: Constante universal de los gases.
$S$	: Saturación.
$S_c$	: Grado de saturación debido a las fuerzas capilares.
$SP, GP, SM,$ $ML, CL, etc$	: Clasificación SUCS de los suelos.
$SUCS$	: Sistema unificado de clasificación de suelos.
$SWCC$	: Soil water characteristic curve, curva característica suelo – agua.
$t$	: Tiempo.
$T$	: Temperatura.
$T_s$	: Temperatura en la superficie del suelo (°C).
$T_a$	: Temperatura del aire sobre la superficie del suelo (°C).
$\mu$	: Viscosidad del líquido percolante
$\psi$	: Succión, presión de poros de agua negativa.
$\psi_r$	: Succión correspondiente al contenido de agua residual.
$VADOSE/W$	: Software para describir la hidrodinámica del suelo utilizando elementos finitos.
$VEA$	: Valor de entrada de aire (KPa).
$VEW$	: Valor de entrada de agua (KPa).
$w_L$	: Límite líquido.

- $w_u$  : Contenido de agua no congelada expresada en porcentaje del peso seco del suelo.
- $w_f$  : Contenido de agua congelada expresada en porcentaje del peso seco del suelo.
- $\gamma$  : Peso específico.
- $y$  : Elevación de carga hidráulica.

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación se inició para dar una alternativa de solución al constante problema que se origina en el cierre de los depósitos de desmontes de mina, como es el drenaje ácido.

Por tal motivo se decidió formular y desarrollar modelos de coberturas de residuos mineros, bajo la guía peruana de diseño de coberturas y documentos elaborados por diversos países, con la finalidad de evaluar el desempeño para la reducción del drenaje ácido, con la ayuda de un software de elementos finitos llamado VADOSE/W. A continuación se describe los capítulos de la tesis.

En el capítulo I, II y III se desarrolla el tema de los suelos no saturados, el drenaje ácido y sistemas de cobertura, y la descripción del modelo numérico respectivamente. Para ello se utilizó diversas tesis de maestrías brasileñas y libros de suelos no saturados en inglés, la guía peruana de diseño de coberturas para residuos mineros y el libro del software VADOSE/W.

En el capítulo IV se desarrolla la calibración numérica, es decir se determina un factor de calibración, debido a que se presenta limitaciones en la información de data climática y curvas características de los suelos. Esta calibración se hizo con un caso de la mina Equity Silver la cual monitorea sus percolaciones y modelo una cobertura. También se desarrolló un sistema de cobertura en el Laboratorio Nacional de Hidráulica, que sirvió para estudiar la formación de la barrera capilar y la trayectoria del flujo de agua entre suelos no saturados de diferente tamaño de grano.

En el capítulo V se desarrolló 10 modelos de cobertura, con la finalidad de estudiar la sensibilidad de la percolación del agua, debido a la variación de las capas de los materiales que la conforman, la presión de poros y el modelo matemático. Estos modelos fueron desarrollados con el software VADOSE/W y calibrados con el factor hallado en el capítulo IV.

Finalmente en el capítulo VI se presenta las conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO I.

### CONCEPTOS TEÓRICOS SOBRE LOS SUELOS NO SATURADOS

Los suelos no saturados tienen en común la presión de agua negativa en sus poros, ello provoca un comportamiento difícil de predecir en los términos que se requiere en la ingeniería geotécnica.

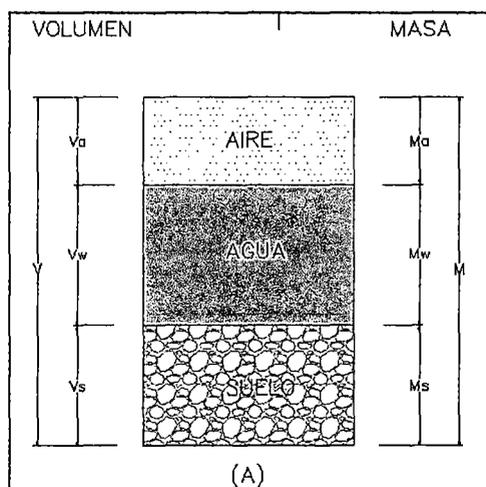
Los suelos saturados pueden considerarse como una de las fronteras del rango de variabilidad posible de los suelos no saturados, es decir, como un caso particular (Zepeda et al., 2004).

#### 1.1. PROPIEDADES GENERALES DEL SUELO NO SATURADO

##### 1.1.1. Fases constituyentes del suelo

Un suelo es un material multifásico constituido por tres fases principales: fase sólida (partículas de los minerales), fase líquida (en general agua), fase gaseosa (aire) y una cuarta fase independiente (ver figura 1.1 (A) y (B)), referente a la interfase aire-agua, denominada membrana contráctil (Fredlund & Morgenstern et al., 1977).

El comportamiento del suelo dependerá de la cantidad relativa de cada una de estas fases.



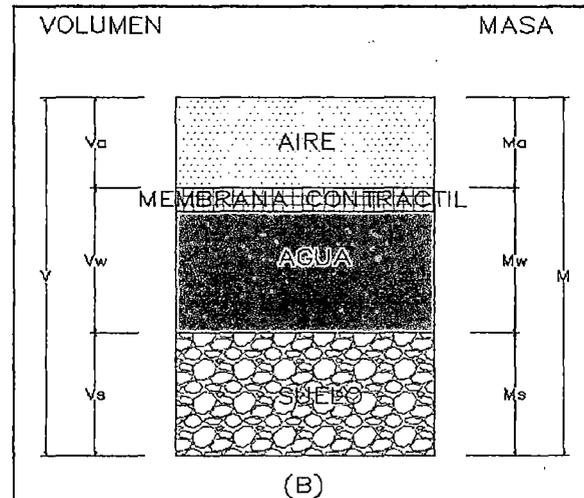


Figura 1.1. Fases del suelo A) Las tres fases principales del suelo, B) La membrana contráctil, ubicada entre las fases de aire y agua.

Fuente : Fredlund e Rahardjo et al., 1993

La membrana contráctil posee una propiedad llamada tensión superficial y tiene la capacidad de ejercer una tensión debido a las fuerzas intermoleculares dentro de la membrana. La tensión superficial hace que la membrana contráctil se comporte como una membrana elástica (Lopes dos Santos et al., 2009).

### 1.1.2. Fundamento de la capilaridad del agua en el suelo

Cuando el agua es colocada en un tubo capilar, se puede notar el movimiento ascendente del agua en el tubo. Este fenómeno es conocido como capilaridad, que es mayor en suelos con textura fina que en los suelos gruesos. Dos formas son responsables para la capilaridad: atracción del agua por la superficie sólida y tensión superficial del agua, que es en gran parte debida a la atracción entre las moléculas de agua.

### 1.1.3. Potencial total del agua en el suelo

El estado de energía del agua en un suelo puede ser expresado como la suma de la energía potencial y la energía cinética. Como la velocidad del agua en el suelo es mínima, la energía cinética puede ser considerada como nula mientras que la energía potencial representa el estado de energía en el suelo.

### 1.1.3.1. Potencial osmótico

El potencial osmótico es atribuido a la presencia de solutos en una solución del suelo, es decir, surge debido a la diferencia entre el agua del suelo (presencia de sales minerales y sustancias orgánicas) y el agua pura. La presencia de estos solutos, reduce la energía potencial del agua, principalmente por reducir la libertad de movimiento de las moléculas de agua. Esa reducción en la energía potencial es llamada potencial osmótico.

### 1.1.3.2. Potencial matricial

El potencial matricial es un potencial de presión y es el resultado del efecto capilar y de la absorción que surge de la interacción entre las partículas sólidas y el agua que comprende el suelo. A medida que el suelo se vuelve no saturado, el efecto de capilaridad comienza a actuar y el potencial matricial se torna negativo (ver figura 1.2).

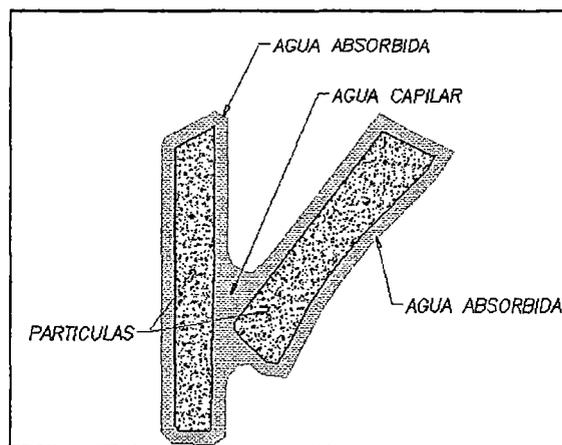


Figura 1.2. Potencial matricial del suelo, el efecto capilar entre las partículas del suelo

Fuente: Hillel et al., 1971.

Para altos valores de humedad, la capilaridad es el principal fenómeno que determina el potencial matricial. En estas condiciones, la distribución de poros determinado por la estructura, textura y composición de las partículas, es de enorme importancia. Para valores bajos de humedad, el fenómeno de capilaridad deja de tener importancia y la absorción pasa a regir los valores de potencial matricial (Reichardt et al., 1987).

### 1.1.3.3. *Potencial gravitacional*

El potencial gravitacional describe la posición del componente, es decir, cuando se considera solamente el campo gravitacional, el agua tiene una energía potencial gravitacional que depende de la posición en la que se encuentra en un plano referencial, que es el estado estándar para la gravedad y el plano comúnmente más usado es la superficie del suelo (Reichardt et al., 1987).

### 1.1.3.4. *Potencial de presión*

La presión hidrostática o también llamado potencial de presión ( $P_p$ ), es un componente que solo se considera en áreas saturadas.

El potencial de presión es medido en condiciones estándar, como el agua es sometida a la presión atmosférica local y bajo estas condiciones, se supone que el potencial de presión es cero. La presión manométrica potencial considera únicamente presiones positivas (por encima de la presión atmosférica), por lo tanto, este componente sólo existirá si hay agua libre de carga hidráulica que actúa sobre el suelo saturado. Cuando el suelo está en la condición no saturada, el potencial matricial pasará a actuar en lugar de la presión potencial (Ferreira Lopes dos Santos et al., 2009).

## 1.2. CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DE LOS SUELOS

### 1.2.1. Propiedades de los suelos

El contenido volumétrico de agua es definido como la relación de la masa del agua de los poros, o agua libre, en una masa dada de material respecto a la masa de los sólidos que lo constituyen, es decir, es la cantidad de agua contenida en un material.

En un suelo saturado, todos los poros se llenan con agua y el contenido volumétrico de agua de la tierra es igual a la porosidad del suelo de acuerdo con:

$$\Theta_w = nS \quad \text{(Ecuación 1.1)}$$

Donde:

$\Theta_w$ : Contenido volumétrico de agua  
 $n$  : Porosidad del suelo, y  
 $S$  : El grado de saturación del suelo.

La porosidad,  $n$ , es relativo a la relación de vacíos,  $e$ , mediante:

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{wG_s}{S} \quad \text{(Ecuación 1.2)}$$

Donde:

$w$ : Contenido de humedad del suelo, y  
 $G_s$ : Gravedad específica del suelo.

En un suelo no saturado, el volumen de agua almacenada dentro de los huecos variará dependiendo de la succión matricial dentro del poro de agua, donde la succión matricial se define como la diferencia de presiones de poro entre el aire y agua, de la siguiente manera:

$$\text{Succión Matricial} = U_a - U_w \quad \text{(Ecuación 1.3)}$$

Donde:

$U_a$  : Presión de poro de aire  
 $U_w$  : Presión de poro de agua

No hay contenido de agua fijo en el tiempo y en el espacio, por lo tanto se requiere una función para describir cómo cambian los contenidos de agua con diferentes presiones en el suelo.

Otra característica clave de la función de contenido volumétrico de agua es el contenido volumétrico de agua residual, que representa el contenido volumétrico

de agua de un suelo donde un incremento adicional en la presión de poro-negativo de agua no produce cambios significativos en el contenido de agua. Este punto también se puede expresar en términos del grado de saturación dividiendo el contenido volumétrico de agua residual por la porosidad del suelo.

Es posible eliminar el agua a un estado menos que el valor residual contenido en agua, pero este proceso es controlado por evaporación y/o las fuerzas osmóticas.

### 1.2.2. Curva característica o curva de retención

La curva característica suelo-agua (SWCC, *soil-water characteristic curve*) describe la relación constitutiva entre succión y contenido de humedad en el suelo (ver figura 1.3). La forma de la SWCC refleja la influencia de propiedades del material, tales como distribución de tamaño de poro, granulometría, peso unitario, contenido de arcilla y mineralogía, sobre el comportamiento de retención de agua en los poros.

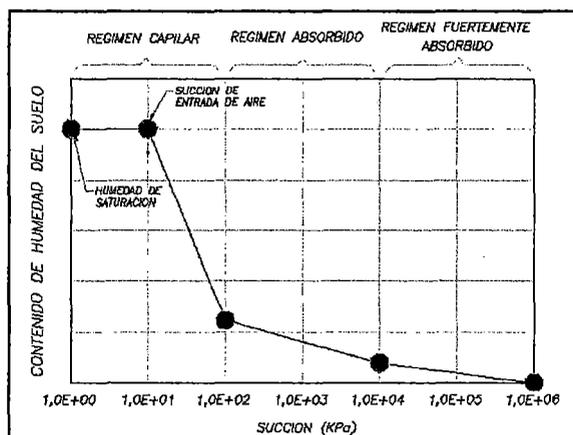


Figura: 1.3. Modelo conceptual del comportamiento de la curva de retención

Fuente: Vanapalli et al., 1996.

Curva de retención de humedad, está conformada por el contenido de humedad o también la porosidad contra la succión en escala logarítmica.

Las mediciones directas de la curva característica, por medio de técnicas experimentales, permiten obtener puntos discretos que definen la relación entre

succión y humedad. No obstante, las aplicaciones de la curva característica en modelos de infiltración, requiere que las relaciones entre succión y humedad sean descritas mediante funciones matemáticas continuas (Aiassa et al., 2008).

#### 1.2.2.1. Método Kovacs modificado - Tamaño de grano

Aubertin presentó un método en el 2003, para predecir la función volumétrica del contenido de agua, la cual está modificada a partir del método compuesto por Kovacs (1981). Las modificaciones se realizaron con el método de Kovacs para representar mejor los materiales tales como relaves provenientes de la industria minera.

El método de Aubertin predice la función de contenido volumétrico de agua con propiedades de los materiales básicos que pueden ser útiles, sobre todo para el análisis preliminar.

La función se determina inicialmente como una función de grado de saturación y luego se convierte en una función de contenido volumétrico de agua. La función se desarrolla mediante la definición del grado de saturación de dos componentes principales. El primer componente contribuye a la cantidad de agua que se almacena en un suelo por las fuerzas capilares que exigen en relativamente pequeñas presiones de poros negativos de agua. El segundo componente contribuye a la función de contenido volumétrico de agua a grandes presiones de poros negativos de agua, donde la cantidad de agua que existe en el suelo es principalmente una función de adhesión. Estos componentes se pueden evaluar a partir de la presión de poros negativa y la información de las propiedades del material, tales como: tamaño de partícula, la forma de las partículas y la porosidad.

$$S_r = \Theta_w/n = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Donde:

$S_c$ : Grado de saturación debido a las fuerzas capilares

$S_a^*$ : Grado limitado de saturación debido a la adhesión

Donde:

$$S_a^* = \langle 1 - S_a \rangle + 1$$

El componente adhesivo es un valor limitado y delimita para un valor  $S_a$  mayor o igual a 1,  $S_a^* = 1$  y si  $S_a$  es menor que 1,  $S_a^* = S_a$ .

El componente de adhesión se asocia con la fina película de agua que cubre la superficie de los granos del suelo y depende de las propiedades de los materiales básicos tales como: la presión negativa del agua intersticial en el suelo y el tamaño de las partículas, coeficiente de forma y la porosidad del suelo. Está determinada por la siguiente ecuación:

$$S_a = aC_\psi \frac{\left(\frac{h_{co}}{\Psi_n}\right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\Psi}{\Psi_n}\right)^{1/6}} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Donde:

a : parámetro de ajuste de curva

$\Psi$  : Succión

$\Psi_n$  : un término de succión que se introduce para garantizar un componente adimensional

e : relación de vacíos

$h_{co}$  : el ascenso capilar medio (cm) determinado para suelos capilares a través de la siguiente ecuación:

$$h_{co} = \frac{\xi W_L^{1.75}}{e} \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

Para tipos de suelos cohesivos donde:

$D_{10}$  : el diámetro de partícula (cm) correspondiente al 10% que pasa en la curva de tamaño de grano.

$b(\text{cm}^2)$ : es dado por:

$$b(\text{cm}^2) = \frac{0.75}{1.17 \log C_u + 1} \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

Donde:

$C_u$ : coeficiente de uniformidad,

$w_L$ : límite líquido,

$\xi$ : una constante aproximadamente igual a  $402.2 \text{ cm}^2$

$C_\psi$ : un coeficiente de corrección que permite una disminución progresiva en el contenido de agua, como fue propuesto por Fredlund y Xing (1994), y descrito por:

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_o}{\psi_r}\right)} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

Donde:

$\psi_r$ : la succión correspondiente al contenido de agua residual, en el momento que un aumento de la succión no eliminará más agua del suelo y dada por la ecuación:

$$\psi_r = 0.86 \left(\frac{\xi}{e}\right)^{1.2} w_L^{1.74} \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

La saturación capilar, depende esencialmente del diámetro del poro y la distribución del tamaño de poro, se da por:

$$S_c = 1 - \left[ \left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 + 1 \right]^m \exp\left[ -m \left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 \right] \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

Donde:

$m$  : un parámetro de ajuste que tiene en cuenta la distribución del tamaño de poros, controla la forma y posición de la función de contenido volumétrico de agua en la zona capilar.

Para suelos cohesivos plásticos que se consideran, el valor de los parámetros  $m$  puede ser tomado como constantes con valores de  $m= 3 \times 10^{-5}$  y  $a = 7 \times 10^{-4}$  en las aplicaciones predictivas. Para los suelos capilares,  $m$  y  $a$  pueden ser tomados como 1 y 0.01, respectivamente.

#### 1.2.2.2. Método de Van Genuchten, 1980.

En 1980, Van Genuchten propuso una ecuación de cuatro parámetros como una solución de forma cerrada para la predicción de la función de contenido volumétrico de agua. La ecuación que gobierna es como sigue:

$$\Theta_w = \Theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (\text{Ecuación 1.11})$$

Donde:

- $\Theta_w$  : Contenido volumétrico de agua
- $\Theta_s$  : Contenido volumétrico saturado de agua
- $\Psi$  : Presión de poros de agua negativa, y
- $a, n, m$  : parámetros de ajuste de la curva ( $a$  tiene unidades de presión).

Aunque la terminología de los parámetros  $a, n$  y  $m$  son similares a los de Fredlund y Xing (1994), las definiciones son ligeramente diferentes. El parámetro  $a$  en particular no puede ser estimado por el valor de entrada de aire, pero en su lugar es un punto pivote alrededor del cual el parámetro  $n$  cambia la pendiente de la función. El parámetro  $m$  afecta a la parte inclinada de la curva

### 1.2.2.3. Método de Fredlund y Xing, 1994.

El método Fredlund y Xing (1994) se puede utilizar para desarrollar la función de contenido volumétrico de agua para todas las posibles presiones negativas entre cero y menos de un millón KPa basado en un grupo de tres parámetros. La ecuación que gobierna es como sigue:

$$\Theta_w = C_\psi \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

Donde:

- $\Theta_w$  : Contenido volumétrico de agua
- $C_\psi$  : Función de corrección
- $\Theta_s$  : Contenido volumétrico saturado de agua
- $e$  : número natural (2.71828)
- $\psi$  : Presión de poros de agua negativa, y
- $a, n, m$  : parámetros de ajuste de la curva.

El parámetro "a", que tiene unidades de KPa, es el punto de inflexión de la función de contenido volumétrico de agua. Por lo general, es ligeramente más grande que el valor de entrada de aire. El parámetro  $m$  controla el contenido de agua residual. Los tres parámetros  $a, n, m$  se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = \psi_i \quad (\text{Ecuación 1.13})$$

$$m = 3.67 \ln \left( \frac{\Theta_s}{\Theta_i} \right) \quad (\text{Ecuación 1.14})$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m \Theta_s} 3.72 s \psi_i \quad (\text{Ecuación 1.15})$$

Donde:

- $\Psi_i$  : la presión de succión correspondiente a la curva de retención ocurrido en el punto de inflexión de la curva, y
- s : la pendiente de la línea tangente de la función que pasa a través del punto de inflexión

El método de Fredlund y Xing, es un método funcional si se conoce los valores de a, n y m. En general, estos valores pueden determinarse usando un algoritmo de ajuste y su aplicación a los puntos de datos medidos.

#### 1.2.2.4. Coeficiente de compresión volumétrica ( $m_v$ )

El coeficiente de compresibilidad de volumen es la pendiente de la función del contenido volumétrico de agua en el rango positivo de poro y en términos físicos que describe la cantidad de un volumen de suelo saturado, que se incrementará o reducirá para un cambio dado en la presión de poros. Este coeficiente se puede volver a calcular a partir de los datos de prueba de consolidación de acuerdo con:

$$m_v = 1/M \quad \text{(Ecuación 1.16)}$$

Donde:

M : el módulo de elasticidad en compresión. También está dado por:

$$m_v = \frac{\alpha_v}{1+e_0} \quad \text{(Ecuación 1.17)}$$

Donde:

$\alpha_v$  : el coeficiente de compresibilidad, y

$e_0$  : la relación de vacíos inicial,

No es necesario ser definida con precisión para problemas de suelos no saturados, a menos que se espere una cantidad significativa de agua pueda ser generada o se pierda a través de cambio de volumen de la matriz del suelo. En la

mayoría de los casos se puede especificar un valor pequeño como 1.0E-05 1/KPa (o su equivalente en otras unidades).

### 1.2.3. Factores que influyen en la curva de retención

Entre los principales factores que intervienen se destacan: tipo de suelo (Miller et al, 2002), textura, composición mineralógica (Williams et al, 1993) y, en particular para suelos compactados, las diferentes condiciones de compactación (Tinjum et al, 1997; Vanapalli et al, 1996b; Miller et al, 2002).

El contenido de humedad, definido como la cantidad de agua en los poros del suelo, puede indicarse mediante la humedad gravimétrica ( $w$ ), el grado de saturación, o el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ). Por otro lado, la succión puede corresponder a la succión matricial o a la succión total. La figura 1.4 identifica las principales características que presenta una típica curva de retención (SWCC), tales como los parámetros correspondientes a succión o presión de entrada de aire ( $\psi_b$ ) humedad volumétrica residual ( $\theta_r$ ) y humedad volumétrica de saturación ( $\theta_s$ ) (Hoyos Patiño, 2004).

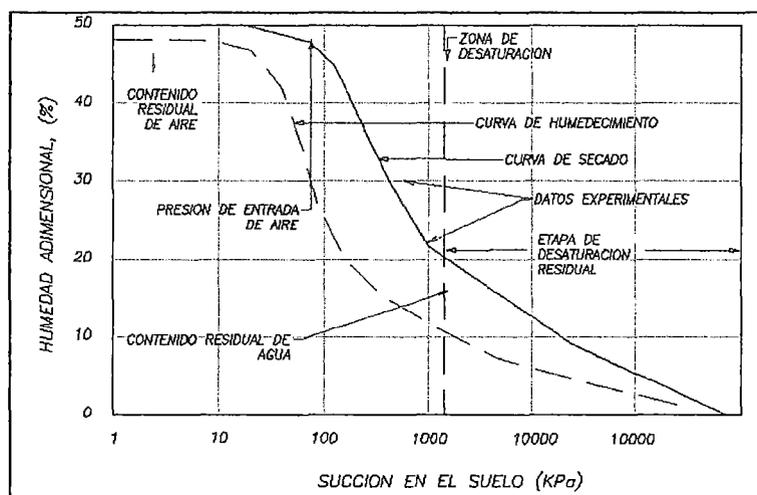


Figura 1.4. Descripción de la curva de retención, variación del contenido de humedad vs la succión en el suelo.

Fuente: Fredlund e Rahardjo et al., 1993.

El comportamiento general de la SWCC depende del tipo de suelo (Figura 1.5). En arenas, la absorción para succiones elevadas resulta muy limitada debido a que, tanto la superficie específica como la carga superficial, son relativamente pequeñas. En estos suelos, la capilaridad resulta el mecanismo dominante, y la

presión de entrada de aire es relativamente baja debido al gran tamaño de poros formado por las partículas de arena. Los suelos limosos pueden absorber mayores presiones de entrada de aire dependiendo de la granulometría y estructura que posean.

Los suelos con granulometrías uniformes, se caracterizan por SWCC marcadas y planas en la zona de régimen capilar, debido a que la mayoría de los poros se drenan dentro de un rango estrecho de succiones, presentando así presiones de entrada de aire definidas.

Los suelos arcillosos y limo arcillosos presentan la mayor capacidad de absorción de agua en succiones elevadas debido a su elevada superficie específica y carga superficial. Adicionalmente presentan presiones de entrada de aire mayores en el caso de suelos limosos o arenosos (Fredlund y Xing, 1994; Vanapalli et al, (1998).

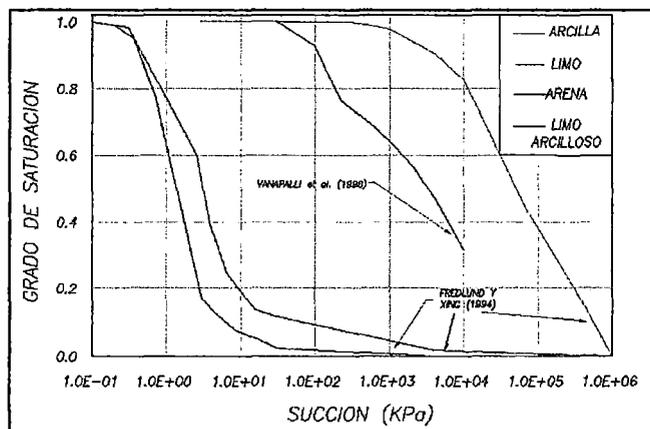


Figura 1.5. Comportamiento de la curva de retención según el tipo de suelo

Fuente: Aiassa Martínez ,2008.

De la figura anterior se aprecia que la arcilla es la que conserva el mayor grado de saturación con respecto a la succión.

Otra característica que interesa en la curva de retención (SWCC) corresponde a la pendiente del tramo central de la curva, la cual en general, resulta más pronunciada (o vertical) en suelos con distribución de tamaños de poros uniformes. Los suelos con rangos amplios de distribución de tamaños de poros presentan pendientes más suaves (u horizontales).

En relación con la pendiente del tramo central, se encuentra el índice de distribución de tamaños de poros ( $\lambda$ ). Esta variable, hace referencia a la distribución y variedad de los vacíos dentro de la masa de suelo. Fredlund y Rahardjo (1993), definen el índice de distribución de poros como el negativo de pendiente de la curva característica suelo-agua. Su valor tiende a aumentar a medida en que los vacíos de la estructura alcanzan distribución uniforme, y disminuye en suelos con amplio rango de tamaños de poros. De esta forma, incrementos de  $\lambda$  se asocia con incrementos de la pendiente del tramo central de la SWCC, mientras que reducciones  $\lambda$  se asocia con pendientes menores o más suaves.

La succión de entrada de aire, frecuentemente designada como presión de entrada de aire, corresponde al valor de succión matricial para la cual comienzan a ingresar gases en los poros de mayor tamaño del suelo. La humedad residual, es el contenido de humedad para el cual se requieren grandes cambios en la succión para provocar una disminución adicional de humedad. El valor de succión matricial correspondiente al contenido de humedad nulo, puede considerarse igual para todos los tipos de suelo y próximo a un valor de  $10^6$  KPa (Croney y Coleman et al., 1961). La humedad volumétrica de saturación representa el punto en donde todos los espacios disponibles en los poros de la matriz del suelo fueron llenados con agua.

La temperatura es un factor que también debe ser considerado, debido a que el aumento de su valor puede causar una disminución en la tensión superficial en la fase suelo-agua, disminuyendo la succión. En caso que exista aire atrapado en la masa del suelo, el aumento de temperatura forzaría un aumento del diámetro de poros debido a la expansión de aire (Huse et al., 2007). Ese comportamiento provocaría una alteración de la estructura del suelo, cambiando el aspecto de la curva característica (Aissa et al., 2008).

#### 1.2.4. Conductividad hidráulica

Para los suelos saturados, se puede admitir el coeficiente de permeabilidad constante durante o después el flujo. Para un suelo no saturado el coeficiente de

permeabilidad está en función de la unidad volumétrica de la succión presente en un suelo  $k(\theta)$ . El flujo de agua en una masa de suelo es directamente proporcional al área transversal de los poros llenos con agua. En el medio no saturado, el aire sustituye el volumen de agua en los poros, creando trayectorias más largas y tortuosas, dificultando el flujo de agua.

La Figura 1.6 tiene la diferencia de una masa de suelo totalmente lleno de agua (Figura 1.6, a) y una masa de suelo no saturado (Figura 1.6, b). En la masa saturada, la sección transversal de los vacíos está totalmente llena de agua. A partir del momento en que el suelo se torna no saturado, el aire sustituye al agua (Figura 1.6, b). Con el aumento del valor de succión, los vacíos ocupados por el agua disminuyen, y consecuentemente el coeficiente de permeabilidad del agua disminuye.

La Figura 1.6 (b) representa una posición de interface aire-agua para los valores crecientes de succión y, como resultado, una reducción de la unidad volumétrica del coeficiente de permeabilidad del suelo.

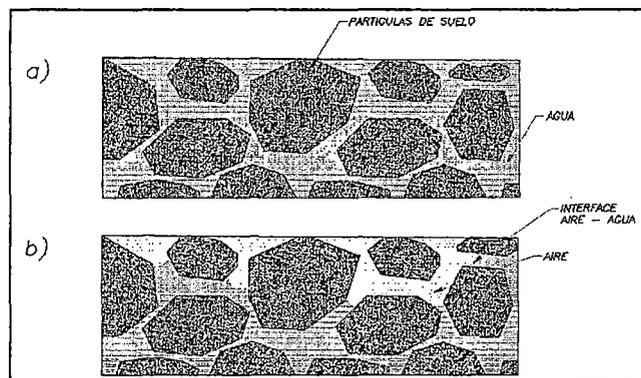


Figura 1.6. Perfil del suelo saturado y no saturado  
a. Perfil Suelo Saturado.  
b. Perfil Suelo No Saturado.

Fuente: Fredlund e Rahardjo et al., 1993.

La Figura 1.7, ilustra la variación de la permeabilidad en dos estados de flujo para una misma razón de variación de succión. En la Etapa 1, el suelo se encuentra con un valor de succión menor que el valor de entrada de aire, permaneciendo el coeficiente de permeabilidad inalterado. Para la Etapa 2, inicialmente, el suelo se encuentra con una succión mayor que el valor de entrada de aire y, por tanto con un valor de permeabilidad menor que la

condición saturada. Durante el flujo, la succión disminuye aumentando de esa manera el grado de saturación y el coeficiente de permeabilidad (Cardoso et al., 2006).

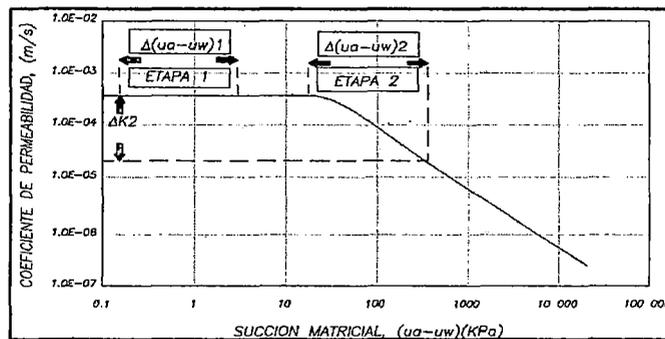


Figura 1.7. Variación de la función permeabilidad con la succión. Características de la curva de conductividad hidráulica vs Succión

Fuente: Cardoso Júnior et al., 2006.

### 1.2.5. Factores que influyen en la conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica depende de varios factores, como el índice de vacíos ( $e$ ), el grado de saturación ( $S$ ), la estructura, la textura y la composición mineralógica del suelo, el peso específico y la viscosidad del líquido percolante.

#### 1.2.5.1. Grado de saturación ( $S$ )

El grado de saturación de un suelo ejerce una gran influencia en la conductividad hidráulica, porque la cantidad de vacíos llenos de agua tiene influencia en forma directa sobre conductividad. Si los vacíos estuvieran llenos de aire, éstos bloquearían los conductos de percolación entre las partículas, reduciendo significativamente la conductividad hidráulica

#### 1.2.5.2. Índice o relación de vacíos ( $e$ )

La permeabilidad varía proporcionalmente con el índice de vacíos del suelo, es decir, cuanto mayor es el índice de vacíos del suelo mayor es la permeabilidad del mismo. De esta forma, la preparación de la muestra del suelo para ser ensayado tiene un efecto considerable en el tamaño y la disposición de los vacíos entre sus partículas, y consecuentemente la conductividad hidráulica.

### 1.2.5.3. *Estructura de los suelos*

La estructura de los suelos y la disposición relativa de los granos también influyen en la conductividad hidráulica de los suelos. Se debe observar también la compactación y/o consistencia del suelo, considerando que el suelo compactado presenta una menor conductividad hidráulica que en su estado natural.

### 1.2.5.4. *Peso específico y viscosidad del líquido percolante*

Taylor (1948) dedujo una ecuación para el coeficiente de permeabilidad, asociándose a la ley de Darcy. Concluyendo que el coeficiente de permeabilidad depende del peso específico ( $\gamma_w$ ) y la viscosidad del líquido ( $\mu$ ), que son dos propiedades del agua que varían con la temperatura. Como el efecto de la viscosidad es inversamente proporcional a la variación de la temperatura, fue adoptado por convención el coeficiente referido al agua a la temperatura de 20°C a fin de obtener una uniformidad.

### 1.2.5.5. *Textura y forma de la partícula*

Las partículas alargadas o irregulares crean trayectorias de flujos más tortuosos que las partículas esféricas, y las partículas de superficie de textura áspera presentan una mayor resistencia por fricción al flujo de partículas de superficie lisa. Siendo así, los efectos de partículas alargadas, irregulares y de textura áspera, causan una reducción en la conductividad hidráulica, pues la velocidad del flujo de agua es reducida.

### 1.2.5.6. *Composición mineralógica*

En suelos finos la composición mineralógica es un factor adicional, ya que los diferentes tipos de minerales conservan diferentes espesores de agua absorbida y, consecuentemente, el diámetro efectivo de los poros varía. En suelos más granulares (con excepción de mica y de materia orgánica), la influencia de la composición de los suelos sobre la conductividad hidráulica puede ser de pequeña importancia.

### 1.3. FUNCION DE PERMEABILIDAD

La permeabilidad de un suelo no saturado está en función de la variación de la cantidad de agua que el suelo presenta en sus poros. Esa cantidad es reflejada por su grado de saturación (S) o el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) y relacionados con la succión por medio de la curva de retención de agua del suelo. La función que describe la variación del coeficiente de permeabilidad con el contenido volumétrico del suelo es llamada función de permeabilidad. Esta función depende de cómo el suelo retiene agua.

La obtención de la función de permeabilidad de materiales no saturados es compleja y tediosa, demandando de mucho tiempo, costo y personal especializado. En la actualidad el uso de modelos para la obtención de la función de permeabilidad para simular el flujo en medios no saturados es bastante común, debido a la simplicidad, rapidez y economía de los proyectos.

A continuación se describe los modelos para el cálculo de la función de permeabilidad.

#### 1.3.1. Modelos para el cálculo de la función de permeabilidad.

##### 1.3.1.1. *Mualem et al., 1976*

Mualem (1976) distingue dos grupos principales de modelos para explicar la permeabilidad no saturada:

El primero está basado en la ecuación de Kozeny para medios porosos saturados y no saturados en donde la permeabilidad relativa ( $k_r$ ) está en relación entre el coeficiente de permeabilidad efectivo ( $k$ ) y el coeficiente de permeabilidad saturado ( $k_{sat}$ ), y está dada por:

$$k_r = k/k_{sat} = \Theta^{\lambda} \quad \text{(Ecuación 1.18)}$$

En el que  $\lambda$  depende del suelo y  $\theta$  es el contenido de volumétrico de agua efectivo o normalizado, dada por la diferencia entre el contenido de volumétrico de agua  $\theta$  actual del suelo y el contenido volumétrico residual ( $\theta_r$ ) dividido por la diferencia entre el contenido de volumétrico del suelo saturado ( $\theta_{sat}$ ) y el contenido de volumétrico residual, entonces:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (\text{Ecuación 1.19})$$

El segundo grupo está basado en las medidas de la curva de retención de agua. Mualem propuso una ecuación simplificada para la predicción de la variación de la permeabilidad del suelo con respecto a la succión, dada por:

$$k_r(\theta) = \Theta^{n^*} \left[ \frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\Psi}}{\int_0^{\theta_{sat}} \frac{d\theta}{\Psi}} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 1.20})$$

En el que  $\Theta^{n^*}$  es un parámetro que tiene en cuenta aspectos relacionados con el grado de saturación y el factor de correlación parcial entre poros adyacentes. La relación de la succión ( $\Psi$ ) como también el contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) está dado por medio de la formula semiempírica de la curva de retención de agua del suelo. Haverkamp et al. (1997) propusieron la siguiente relación  $\Psi$ - $\theta$ :

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{\Psi}{\alpha'}\right)^\beta} \right] \quad (\text{Ecuación 1.21})$$

En el que  $\alpha'$  es la carga de presión para el punto  $\theta=0.5$ ; y  $\beta$  la inclinación de la curva log-log de  $(1/\theta-1)$  por la  $\Psi$ . La ecuación para el cálculo de la permeabilidad de Haverkamp et al. (1977) es de la forma de la ecuación 1.7, en el que  $\lambda$  tiene valor unitario. Asimismo sustituyendo en 1.10 y 1.9, se tiene:

$$k_r = \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{\Psi}{A}\right)^B} \right] \quad \text{(Ecuación 1.22)}$$

En la ecuación 1.11, los símbolos A y B son parámetros de ajuste.

### 1.3.1.2. Van Genuchten et al., 1980

Van Genuchten (1980) propone la siguiente ecuación de forma cerrada para describir la conductividad hidráulica de un suelo como una función de succión matricial:

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\Psi^{(n-1)})(1 + a\Psi^n)^{-m}]^2}{\left( (1 + a\Psi^n)^{\frac{m}{2}} \right)} \quad \text{(Ecuación 1.23)}$$

A partir de las ecuaciones anteriores, la función de la conductividad hidráulica de un suelo puede ser estimada una vez que la conductividad saturada y los dos parámetros de la curva de ajuste, a y m son conocidos.

Van Genuchten (1980) mostró que los parámetros de la curva de ajuste se pueden estimar gráficamente sobre la base de la función de contenido volumétrico de agua del suelo. Según Van Genuchten, el mejor punto para evaluar los parámetros de ajuste de curvas es el punto medio entre el contenido de agua residual y saturada de la función de contenido volumétrico de agua.

La pendiente de la función puede ser calculada como:

$$S_p = \frac{1}{(\Theta_s - \Theta_r)} \left| \frac{d\Theta_p}{d(\log\Psi_p)} \right| \quad \text{(Ecuación 1.24)}$$

Donde:

- $\Theta_{s,r}$  : el contenido volumétrico de agua saturado y residual, respectivamente,
- $\Theta_p$  : el contenido volumétrico de agua en el punto medio de la función del contenido volumétrico de agua, y

$\Psi_p$ : la matriz de succión en el mismo punto.

Van Genuchten (1980) propuso la siguiente fórmula para estimar los parámetros  $m$  y  $a$  cuando  $S_p$  es calculado:

$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \quad (\text{Ecuación 1.25})$$

$$m = 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \quad (\text{Ecuación 1.26})$$

Para  $S_p > 1$ ; y

$$a = \frac{1}{\Psi} \left( 2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (\text{Ecuación 1.27})$$

Van Genuchten (1980), basado en Haverkamp et al. (1977) y en otros autores, propuso una ecuación generalizada para ajustar la curva de retención de agua del suelo. La ecuación de Van Genuchten que correlaciona la succión ( $\Psi$ ) con el contenido volumétrico del suelo está dado por:

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m \quad (\text{Ecuación 1.28})$$

Van Genuchten implementó la ecuación 1.27 al modelo de Mualem (1976) (Ecuación 1.29), para la determinación de la variación de la permeabilidad con la saturación del suelo, resultando la siguiente ecuación:

$$k_r(\Theta) = \Theta^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad \text{ó}$$

$$k_r(\Psi) = \frac{\left\{ 1 - (\alpha\Psi)^{n-1} [1 + (\alpha\Psi)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^{m/2}} \quad (\text{Ecuación 1.29})$$

Donde:

$\Psi$ : es un valor positivo; n es un parámetro relacionado con la inclinación de la curva de retención de agua del suelo;  $\alpha$  es un parámetro correlacionado con la inversa de la succión correspondiente al valor de  $\theta=0.5$ , dado por  $\alpha=1/(2^{1/m}-1)^{1-m}$ ; y el parámetro m depende de n, dado por  $m=1-1/n$  (Vieira et al., 2005).

### 1.3.1.3. Fredlund et al., 1994

Este método consiste en el desarrollo de la función no saturado de conductividad hidráulica mediante la integración a lo largo de toda la curva de la función de contenido volumétrico de agua. La ecuación de gobierno de este método es:

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (\text{Ecuación 1.30})$$

Donde:

- $K_w$ : La conductividad calculada para un contenido de agua especificada o presión de poro de agua negativo (m/s),
- $K_s$ : la medida de la conductividad saturada (m/s),
- $\Theta_s$ : contenido volumétrico de agua,
- e: el número natural 2.71828,
- y: una variable ficticia de la integración que representa el logaritmo de la presión del agua intersticial negativa,
- i: el intervalo entre el rango de j a N
- j: la mínima presión de agua intersticial negativa que debe ser descrito por la función final,
- N: la máxima presión de agua intersticial negativa que debe ser descrito por la función final,
- $\Psi$ : la succión correspondiente al  $j^{\text{th}}$  intervalo, y
- $\Theta'$ : la primera derivada de la ecuación

$$\Theta = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (\text{Ecuación 1.31})$$

Donde:

- a : aproximadamente el valor de entrada de aire del suelo,
- n : un parámetro que controla la pendiente en el punto de inflexión de la curva del contenido de agua,
- m : un parámetro que es relativo al contenido residual de agua, y
- C( $\Psi$ ) : Función de corrección definido como:

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{C_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1,000,000}{C_r} \right)} \quad (\text{Ecuación 1.32})$$

Donde:

- $C_r$  : Constante relativa a la matriz de succión correspondiente al contenido de agua residual.

#### 1.4. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS SUELOS NO SATURADOS

Para la formulación de un análisis térmico de congelación-descongelación general de los sistemas de suelo es necesaria la comprensión de cómo la energía almacenada en el suelo varía cuando cambia la temperatura del suelo.

Un ejemplo de esta relación se muestra en la figura 1.8. La función representa la energía relativa del suelo para una cierta temperatura. La parte empinada de la función de congelación-descongelación representa el calor latente absorbido o liberado por un suelo debido a los cambios de fase del agua del suelo. La pendiente de la función de distancia de la zona de congelación-descongelación representa la capacidad volumétrica de calor de las zonas congeladas y descongeladas.

No toda el agua dentro del suelo experimenta un cambio de fase a una sola temperatura. El porcentaje del volumen de agua del suelo que permanece sin congelar a una temperatura determinada se conoce como el contenido de agua no congelada.

El contenido de agua no congelada de un suelo puede ser expresado como una función de la temperatura.

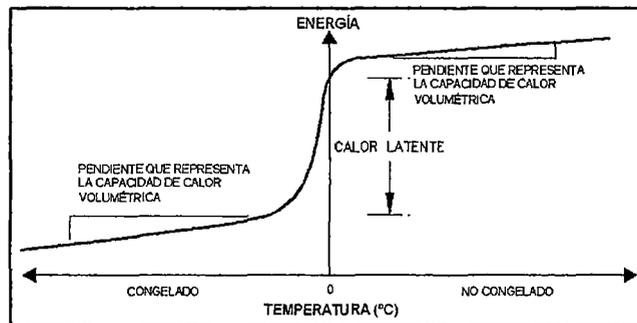


Figura 1.8. Ejemplo de una función de energía de almacenamiento.

Fuente: Vadose Zone Modeling (2007).

#### 1.4.1. Función del contenido de agua congelada.

La conductividad térmica  $k$ , que caracteriza la capacidad de un medio de suelo para transmitir el calor por conducción, se define como la cantidad de calor que fluirá a través de una unidad de área de un medio de suelo de unidad de espesor por unidad de tiempo bajo un gradiente de temperatura. Unidades de conductividad térmica son comúnmente  $J / (\text{sec.m. } ^\circ C)$ ,  $\text{kJ} / (\text{day.m. } ^\circ C)$  o  $\text{Btu} / (\text{hr.ft. } ^\circ F)$ .

Una vez que se conoce la conductividad completamente congelado, se supone que la conductividad térmica parcialmente congelado de la planta para ser linealmente se repartió entre los estados no congeladas y congelados por la relación de contenido de hielo de agua.

$$K_f = (K_{\text{ice}})^{w_c} (K_{\text{soil}})^{1-w_c}$$

(Ecuación 1.33)

Esta relación fue propuesta por Johansen et al., 1975.

### 1.4.2. Conductividad Térmica

Varios métodos empíricos o semi-empíricos se han desarrollado para estimar la conductividad térmica de los suelos. Estos métodos fueron evaluados en detalle por Farouki, (1981), que llegaron a la conclusión de que diferentes tipos de suelos pueden requerir diferentes métodos de estimación. El método desarrollado por Johansen, (1975), sin embargo parece ser el método más general. Solo el método de Johansen se presenta en esta sección.

Para suelos secos y naturales, la conductividad térmica  $k_{dry}$ , se puede estimar en base a su densidad en seco usando la siguiente ecuación:

$$K_{dry} = \frac{0.135\gamma_d + 64.7}{2700 - 0.947\gamma_d} \pm 20\% \quad \text{(Ecuación 1.34)}$$

Para los materiales de roca triturados secos, la conductividad térmica  $k_{dry}$ , se puede estimar sobre la base de su porosidad  $n$  usando la siguiente ecuación:

$$K_{dry} = 0.039n^{-2.2} \pm 25\% \quad \text{(Ecuación 1.35)}$$

Para un suelo no congelada saturada, se estima que la conductividad térmica  $k_{sat}$ , sobre la base de las conductividades térmicas de sus componentes y sus respectivas fracciones de volumen.

$$K_{sat} = (K_s)^{1-n} (K_w)^n \quad \text{(Ecuación 1.36)}$$

Donde,  $k_s$  es la conductividad térmica de las partículas del suelo, y  $k_w$  es la conductividad térmica del agua de los poros.

Para un suelo congelado saturado que contiene algún contenido de agua no congelada,  $w_u$ , la conductividad térmica  $k_{sat}$ , se convierte en:

$$K_{sat} = (K_s)^{1-n} (K_i)^{n-w_u} (K_w)^{w_u} \quad \text{(Ecuación 1.37)}$$

Donde:

$K_i$  : es la conductividad térmica del hielo.

Para un suelo no saturado, se estima que el  $K_{unsat}$  conductividad térmica sobre la base de su conductividad saturada, conductividad seca y el grado de saturación  $S$ , utilizando la siguiente ecuación:

$$K_{usant} = (K_{sat} - K_{dry})K_e + K_{dry} \quad \text{(Ecuación 1.38)}$$

Donde:

$$K_e = 0.7\text{Log}S + 1.0 \text{ para suelo no congelado de grano grueso,} \quad \text{(Ecuación 1.39)}$$

$$K_e = \text{Log}S + 1.0 \text{ para suelo no congelado de grano fino, y} \quad \text{(Ecuación 1.40)}$$

$$K_e = S \text{ para un suelo congelado.} \quad \text{(Ecuación 1.41)}$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser utilizadas para una aproximación de la estimación general de la conductividad térmica de un suelo.

### 1.4.3. Capacidad de calor volumétrica

La capacidad térmica de un material se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del material por unidad de un grado.

Cuando se expresa sobre una unidad de peso, esta cantidad de calor se conoce como la capacidad de calor específico, cuando se expresa sobre una unidad de volumen, la cantidad se conoce como la capacidad de calor volumétrica. Las unidades para especificar la capacidad de calor son  $J / (kg.^{\circ}C)$  o  $KJ / (kg.^{\circ} C)$  y  $Btu / (ft^3.^{\circ} F)$ .

La capacidad volumétrica de calor de un suelo puede ser aproximada por la densidad seca del suelo y la suma de las capacidades caloríficas específicas de

los distintos componentes (el suelo, las partículas, agua, hielo y aire). Una ecuación general para la estimación de la capacidad de calor volumétrica descongelado y congelado es (Johnston, Ladanyi, Morgenstern and Penner, 1981):

$$C = \gamma = \gamma_d [c_s + c_w w_u + c_i w_f] \quad (\text{Ecuación 1.42})$$

Donde:

C : capacidad de calor volumétrica del suelo.

c : capacidad específica de calor del suelo,

$\gamma$  : densidad aparente del suelo,

$\gamma_d$  : densidad seca del suelo,

$c_s$  : capacidad de calor específico de las partículas del suelo,

$c_w$  : capacidad de calor específico del agua,

$c_i$  : capacidad de calor específico del hielo

$w_u$  : contenido de agua no congelada expresada en porcentaje del peso seco del suelo, y

$w_f$  : contenido de agua congelada expresada en porcentaje del peso seco del suelo.

## 1.5. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE GAS

Las ecuaciones para el oxígeno en suelos saturados de forma variable son ligeramente diferentes con respecto a cómo se disuelve el gas del aire en la fase de agua. Para el oxígeno, la disolución es algo dependiente de la temperatura, pero sobre todo en la propiedad de solubilidad que es una función de la concentración de gas oxígeno en la fase de aire.

El modelo hace la suposición de que en la fase de aire en el suelo, el movimiento del gas es por difusión. El gas puede ser disuelto en la fase acuosa, pero no se transporta.

Por último, las unidades de concentración y flujo varían en función del tipo de análisis de transferencia de gas. El oxígeno es rastreado por su masa por lo que tiene unidades de concentración de masa por volumen y unidades de flujo de masa por tiempo.

### 1.5.1. Transferencia de oxígeno

La ecuación diferencial que se presenta incorpora efectos de la pérdida de oxígeno de la fase de aire en la fase acuosa debido a la disolución, así como la descomposición y está escrito por dos dimensiones como:

$$\frac{\partial(\Theta_{eff}C)}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \lambda \Theta_{eff} C \quad (\text{Ecuación 1.43})$$

Donde:

- C : concentración de oxígeno en el aire (Mass/Volume)
- $\Theta_{eff}$ : coeficiente de porosidad efectiva definido por Aubertin et al. (2000) como  $\Theta_a + H\Theta_w$ ,
- $\Theta_a$  : Contenido volumétrico de agua
- $\Theta_w$  : Contenido volumétrico de aire
- H : la solubilidad constante del oxígeno en el aire y el agua (2.8 hasta 25 grados Celsius)
- $D_{eff}$ : el coeficiente de difusión efectivo
- $\lambda$  : el coeficiente de decaimiento constante

La solubilidad S, es la masa de oxígeno disuelto en el agua dividido por la masa de agua. El cambio en la solubilidad por el cambio en la concentración de oxígeno en los poros de aire es una relación lineal que varía dependiendo de la temperatura (es decir, pendiente de la función).

A 25 grados Celsius, la solubilidad del oxígeno en agua,  $S_1$ , es aproximadamente 8.32mg por litro de agua para el caso en el que el aire está saturado con oxígeno (aproximadamente el 20,9% de oxígeno en masa). La solubilidad a diferentes temperaturas puede ser calculada utilizando el valor conocido en la temperatura de referencia de 25°C y la relación de equilibrio de fase de Clausius-Clapeyron de la siguiente manera:

$$\log \frac{S_1}{S_2} = \frac{\Delta H}{2.303} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (\text{Ecuación 1.44})$$

Donde:

- $\Delta H$  : entalpía de disolución de gas ( -3500 cal para el oxígeno),
- $R$  : Constante universal de los gases,
- $T_{1,2}$  : Temperaturas de referencia y desconocida respectivamente (K), y
- $S_{1,2}$  : Solubilidad del oxígeno de referencia y desconocida respectivamente (mg/L).

El coeficiente de difusión eficaz,  $D_{eff}$  se obtiene utilizando el método propuesto por Colin y Rasmuson (1988), se calcula de la siguiente manera:

$$D_{eff} = D_a(1-S)^2[n(1-S)]^{2X_a} + HD_wS^2(nS)^{2X_w} \quad (\text{Ecuación 1.45})$$

Donde:

- $D_a$  : Coeficiente de difusión de oxígeno en el aire ( $1.8e-5 \text{ m}^2/\text{s}$ ),
- $S$  : grado de saturación,
- $n$  : porosidad del suelo,
- $X_a$  : un parámetro empírico,
- $D_w$  : Coeficiente de difusión del oxígeno en el agua ( $2.2e-9 \text{ m}^2/\text{s}$ ), y
- $X_w$  : un parámetro empírico

## 1.6. FLUJO SATURADO Y LA ECUACION DE DARCY

Los primeros estudios para la cuantificación del flujo laminar de agua en un medio poroso saturado, fueron realizados por Darcy en 1856, estableciendo que la cantidad de agua que pasa por unidad de tiempo y de área es proporcional al producto de las propiedades hidráulicas del medio poroso: el gradiente de potencial total y la conductividad hidráulica ( $k$ ), (Marcelo Biassusi et al. 2001).

$$q = -K \frac{\Delta\Psi_t}{\Delta z} \quad (\text{Ecuación 1.46})$$

### 1.7. FLUJO NO SATURADO Y LA ECUACION DE RICHARDS

En medios porosos no saturados la fórmula convencional necesita ser adaptada, ya que en esos medios hay variación del flujo de agua y del contenido de humedad del suelo. Así que  $k$  no será más una constante sino una función del contenido de humedad del suelo  $k(\theta)$ , consecuentemente de la succión. Por lo tanto la ecuación de Darcy para el flujo vertical unidimensional se presenta de la siguiente forma:

$$q = -K(\theta) \left(1 - \frac{\partial\Psi_t}{\partial z}\right) \quad (\text{Ecuación 1.47})$$

Donde  $\delta\Psi/\delta z$ , es la variación de la succión con la profundidad; y  $k(\theta)$ , el coeficiente de permeabilidad no saturado (función del contenido de humedad). Asumiendo  $\Psi$  como una función que asocia para cada valor de  $\theta$  un único valor de succión que se obtiene por la regla de la cadena:

$$\frac{\partial\Psi}{\partial z} = \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (\text{Ecuación 1.48})$$

Sustituyendo en la ecuación 1.47, se tiene:

$$q = -K(\theta) \left(1 - \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \frac{\partial\theta}{\partial z}\right) \quad (\text{Ecuación 1.49})$$

Para describir adecuadamente el flujo de agua en medios porosos no saturados, es necesaria la ecuación de la continuidad, dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad \text{(Ecuación 1.50)}$$

Las ecuaciones (1.49) y (1.50) son dos ecuaciones básicas para la descripción de flujo en medios porosos no saturados, y la combinación de estas resulta la ecuación de Richard:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad \text{(Ecuación 1.51)}$$

La ecuación 1.51 está sujeta a las mismas hipótesis adoptadas en la obtención de la ecuación de Darcy.

Esta ecuación conocida como la ecuación de Richards, describe el flujo de agua en suelos no saturados, donde muestra que la variación del contenido volumétrico de agua con respecto al tiempo ( $\partial \theta / \partial t$ ) es igual a la variación del flujo de agua a lo largo de una distancia ( $-\partial q / \partial z$ ), (Biassusi et al., 2001).

La siguiente figura 1.9 representa el humedecimiento vs profundidad en un suelo no saturado

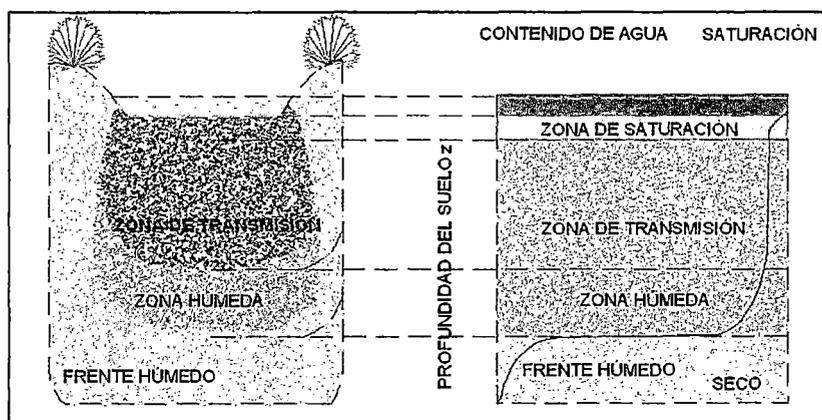


Figura 1.9. Zonas de humedecimiento de un suelo.

Fuente: Green Ampt et al 1911

Se aprecia que en la superficie la saturación será mayor y a medida que se aumenta la profundidad el suelo va secándose.

La siguiente figura 1.10 representa el cambio de contenido de humedad y de succión matricial debido a la profundidad y al cambio de textura del suelo.

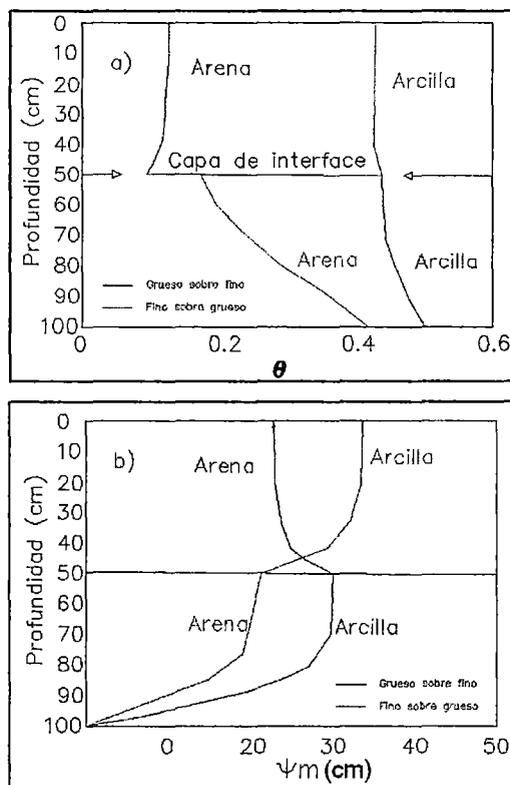


Figura 1.10. Discontinuidades de  $\theta$  y  $\Psi_m$  mediante dos tipos de suelos de diferentes texturas.

Fuente: Tindall & Kunkelet al.,2006

Se aprecia la zona de interface como si fuera un espejo, es decir que la arcilla refleja todo lo contrario de la arena, en la figura 1.10 a, la arcilla tendrá mayor contenido de humedad que la arena, mientras que en la figura 1.10 b, la arcilla tendrá succión matricial negativa que es lo contrario de la arena con succión matricial positiva.

Esto quiere decir que la arcilla tendrá mayor retención de agua que la arena, mayor humedad y mayor saturación; las cuales serán difíciles de secar por su alto contenido de succión matricial.

## 1.8. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La importancia de las características climáticas para los suelos no saturados radica en que pueden modificar sus propiedades, como las curvas características, debido a la temperatura o las precipitaciones que existan en su entorno.

Para este caso no se consideró el efecto de las plantas en la evaporación, es decir no se consideró la evapotranspiración.

### 1.8.1. Evaporación actual

El acoplamiento atmosférico se logra mediante el cálculo de la evaporación del suelo basado en la formulación de Penman-Wilson (1990) como sigue:

$$AE = \frac{\Gamma Q + uE_a}{uA + \Gamma} \quad (\text{Ecuación 1.52})$$

Donde:

AE : Evaporación actual vertical (mm/día)

$\Gamma$  : pendiente de presión de vapor de la saturación versus la curva de temperatura a la temperatura media del aire (KPa/°C),

Q : energía de radiación neta disponible en la superficie (mm/día),

u : constante psicométrica,

$E_a$  :  $f(u)P_a(B-A)$ ,  $f(u)$ : función que depende de la velocidad del viento y rugosidad de la superficie =  $0.35(1+0.15U_a)$ ,

$U_a$  : velocidad del viento (km/h),

$P_a$  : Presión de vapor en el aire sobre la evaporación de la superficie (KPa),

B : Inversa de la humedad relativa del aire =  $1/hA$

A : Inversa de la humedad relativa en la superficie del suelo =  $1/hr$

La fórmula de Penman-Wilson involucra la radiación neta, velocidad del viento, y la humedad relativa de ambos aire y superficie del suelo mientras que la

evaporación proviene de la superficie del suelo no saturado. La fórmula de Penman-Wilson reduce el método convencional de Penman, (Penman et al.,1948). Cuando la superficie está saturada el suelo puede tener humedad relativa igual a 100% y "A" en la ecuación anterior será igual a la unidad.

La evaporación actual se determina basándose en el momento actual del valor de potencial de evaporación de acuerdo con la relación:

$$AE = PE \left( \frac{h_r - \frac{V_{p.sat.air}}{V_{p.sat.soil}} h_A}{1 - \frac{V_{p.sat.air}}{V_{p.sat.soil}} h_A} \right) \quad \text{(Ecuación 1.53)}$$

Donde:

PE : Potencial de Evaporación (mm/día).

$V_{psat.air}$  : presión de vapor en el aire

$V_{psat.soil}$  : presión de vapor en el suelo

### 1.8.2. Temperatura de la superficie del suelo

Las temperaturas dentro del perfil del suelo son necesarias para la solución de las ecuaciones de humedad y flujo de calor. La temperatura de la superficie puede ser estimada con la siguiente relación (Wilson et al., 1990):

$$T_s = T_a + \frac{1}{vf(u)} (Q - E) \quad \text{(Ecuación 1.54)}$$

Donde:

$T_s$  : temperatura en la superficie del suelo (°C)

$T_a$  : temperatura del aire sobre la superficie del suelo (°C)

$v$  : constante psicométrica,

$Q$  : energía radiante neta (menos la energía de transpiración) disponible en la superficie (mm/día), y

AE: Flujo de la evaporación actual vertical (mm/día)

Esta ecuación indica que la temperatura del suelo se incrementa con la energía que no se consume en el proceso de evaporación o transpiración.

### 1.8.3. Infiltración

Proceso natural en el que el agua de lluvia se introduce en el terreno y viaja a través de él. Parte del agua infiltrada llega hasta los depósitos de agua subterránea y parte viaja a través de las partes horizontales y sale nuevamente a la superficie.

Mediante las precipitaciones existen varios escenarios posibles.

Si la precipitación sobre el próximo paso del tiempo a resolver es menor que la evaporación anticipada real sobre el próximo paso del tiempo, entonces el flujo aplicado superficie condición limite será igual al valor de precipitación menos la evaporación real y un flujo negativo se aplicara voluntad se aplica al nodo.

Si la precipitación menos cualquier evaporación real es un valor positivo, entonces una positiva (infiltrante) flujo de superficie se aplica como una condición de contorno.

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{AE} - \text{Escorrentía} \quad (\text{Ecuación 1.55})$$

Una clase importante de eventos de flujo está relacionada con la entrada de agua a través de una superficie del suelo conocida como infiltración.

La tasa de infiltración con respecto a la tasa de suministro de agua en la superficie (lluvia, irrigación) determina la cantidad de agua que entra en el suelo.

## CAPÍTULO II.

### COBERTURAS PARA LA CONTENCIÓN DE RESIDUOS

#### 2.1. INTRODUCCION

El agua superficial y subterránea alrededor de una operación minera puede resultar afectada significativamente por infiltraciones contaminadas, provenientes de los depósitos de desmontes de mina, los cuales son materiales con alto potencial de generación de drenaje ácido (por ejemplo los materiales con pirita), no obstante existen otros materiales como la caliza que no genera ácido. Para minimizar los impactos ambientales generados por estos materiales es necesario realizar una prevención y mitigación de los mismos mediante la conformación de coberturas que reduzcan el ingreso de agua y aire.

#### 2.2. MARCO LEGAL

En el Perú, las principales disposiciones de protección ambiental aplicables al diseño de coberturas para botaderos mineros se encuentran en la Ley N° 28090, ley que regula el cierre de minas, el cual a su vez cumple con la normativa dispuesta en el Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería, aprobado por Decreto Supremo N°014-92-EM, y la Ley N° 28271, ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera.

También se encuentra la "Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros", Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, publicado por el Ministerio de Energía y Minas (setiembre, 2007). En la presente investigación se usará el término "cobertura" como una abreviación del término "coberturas de residuos mineros".

#### 2.3. MARCO CONCEPTUAL

Toda compañía minera posee dentro de sus operaciones de depósito de desmonte de mina donde se almacenan rocas o material de desecho de la extracción del mineral. Estas rocas contienen por naturaleza sulfuros que al estar

en contacto con el agua procedentes de precipitaciones podría generar drenaje ácido que se vierte al suelo provocando su contaminación.

Los conceptos básicos para la prevención del drenaje ácido de roca son la reducción del ingreso de oxígeno y la prevención del contacto con agua que pueda actuar como un medio de transporte para productos oxidados. Los enfoques principales de mitigación de drenaje ácido de roca es aplicar métodos para:

- Reducir al mínimo el suministro de oxígeno.
- Reducir al mínimo la infiltración de agua.
- Permitir la revegetación

#### 2.4. DRENAJE ÁCIDO

El Drenaje Ácido de Rocas (*Acid Rock Drainage*– ARD o DAR en español) puede generarse dentro de muchos componentes mineros como roca de desmonte, relaves, paredes del tajoabierto y labores mineras.

El drenaje de roca ácida (DAR) es un proceso natural a través del cual el ácido sulfúrico es generado de los sulfatos de las rocas que son expuestas al aire libre o al agua. El drenaje de la minería ácida (DAM) es esencialmente el mismo proceso, solo que magnificado. Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas en tajo abierto o en vetas de minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico.

Los minerales sulfurosos como la pirita (que es el mineral sulfuroso más abundante) se oxidan cuando está expuesto lo cual genera DAR. Esto se realiza a través de diversas posibles vías químicas y bioquímicas.

El agua de drenaje contaminada es ácida ( $\text{pH} < 4$  ó 5), rica en sulfatos y metales (Cd, Cu, Fe, Pb); y resulta de la oxidación y lixiviación de roca con contenido de sulfuros expuesta al aire y al agua ( $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ).

El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inservible.

## 2.5. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE COBERTURA

Un modo de limitar la generación de DAR consiste en controlar la infiltración del agua mediante la construcción de sistemas de cobertura en los sitios de disposición de residuos de mina. Para el diseño y la construcción de coberturas se emplean diversos materiales y configuraciones. Al respecto, existe una solución que consiste en utilizar los efectos de barrera capilar para controlar la infiltración del agua en la superficie de los sitios de disposición de residuos y que es el tema de interés de la presente tesis.

Las ventajas principales de una cobertura del tipo barrera capilar radican en su relativa simplicidad, estabilidad a largo plazo y sus costos de construcción potencialmente más bajos en comparación con las coberturas más tradicionales basadas en materiales (suelos naturales y/o geosintéticos) con una baja conductividad hidráulica saturada.

En el caso de una cobertura construida en un área plana, el efecto de la barrera capilar en la interfaz entre los materiales finos y gruesos permite que la capa de suelo más fino almacene el agua de ingreso. El objetivo de la cobertura es tener suficiente escorrentía, evaporación, almacenamiento y filtración lateral (ver figura 2.1) para evitar la infiltración de agua en los residuos de la mina (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

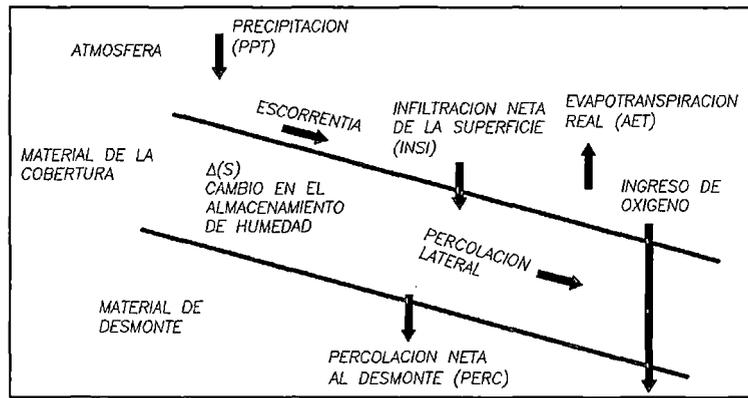


Figura 2.1. Esquema del funcionamiento de una cobertura

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2007

Un sistema de cobertura de cierre final de un depósito puede estar compuesto por seis componentes: capa superficial, capa de protección, capa de drenaje, capa de barrera hidráulica y/o retención de humedad y capa de base o de soporte. Este sistema puede variar y va a depender de la condición climática y del balance hídrico total. (ver figura 2.2), (Ministerio de Energía y Minas, 2007). A continuación se hace una breve descripción de cada una de estas capas.

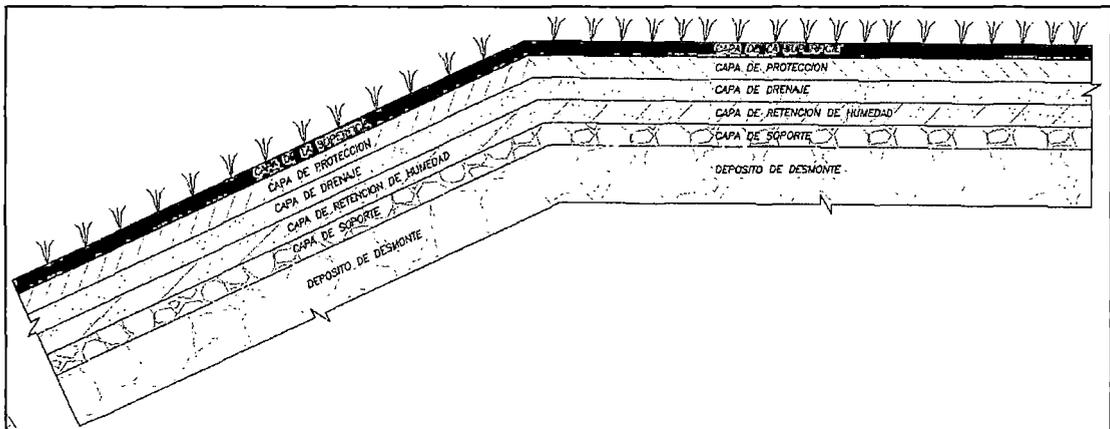


Figura 2.2. Componentes de un sistema de cobertura

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2007

### 2.5.1. Capa Superficial

Esta capa es indispensable para el sistema de cobertura final, su función es de separar los componentes que se encuentran debajo de la cobertura superficial con el medio ambiente y también de prevenir la erosión, favorecer la evapotranspiración y el crecimiento de la vegetación.

Cuando es utilizado el suelo natural, se puede plantar vegetación oriunda de la zona, con el fin de generar la evapotranspiración, mejorar el impacto visual de la zona y disminuir la erosión, disminuyendo la velocidad de escorrentía superficial del agua (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

#### 2.5.2. Capa de Protección

Esta capa está situada debajo de la capa superficial, es utilizada para almacenar el agua que percola a través de la capa superficial a fin de proteger las capas del sistema de cobertura, contra el resecaimiento y contra la penetración de raíces y animales, (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

#### 2.5.3. Capa de Drenaje

Formada por materiales granulares que posean elevada transmisividad y tienen el objetivo de reducir la carga hidráulica, drenar lateralmente el agua del suelo de encima y eliminar la presión en la interface de la barrera subyacente. Esta capa es necesaria cuando excesivas cantidades de agua pasan por las capas superiores o cuando las fuerzas de percolación son elevadas.

En la interface entre la capa de drenaje y las capas de encima es aconsejable el uso de filtros de suelos y geotextiles para evitar la migración de partículas finas que obstruyan el sistema (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

#### 2.5.4. Capa de Retención de Humedad

Tiene la función de desviar la dirección y/o impedir la percolación de cualquier forma de movimiento de líquidos y/o gases que entren en contacto con esta capa.

Para la construcción de esta capa generalmente son utilizados los siguientes materiales sintéticos: geomembranas, *Geosynthetic Clay Liner* (GCL), que consiste en una fina capa de arcilla expansiva de baja permeabilidad entre dos geotextiles “colada” a una geomembrana.

### 2.5.5. Capa de Soporte

La capa de fundación o de soporte está construida directamente sobre el material de desmonte, sirviendo de base para otras capas que componen el sistema de cobertura final, y tiene la función de impedir daños químicos y físicos que la masa de residuos pueda provocar a la barrera hidráulica (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

Cuadro 2.1. Principales Características de las Capas de Cobertura (Aubertin et al. 1995)

Capa	Objetivos	Materiales Típicos	$K_{sat}$ típico	Espesor típico
Soporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear efectos de barrera capilar.</li> <li>• Evitar el incremento capilar del DAM de los residuos de la mina.</li> <li>• Capa de soporte para equipos pesados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena.</li> <li>• Arena y Grava.</li> </ul>	$10^{-1}$ $<k_{sat}<10^{-3}$	30-50 cm
Retención de Humedad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barrera contra oxígeno.</li> <li>• Reducción de la infiltración del agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos limoníticos y arcillosos.</li> <li>• Revestimiento geosintético de arcilla.</li> </ul>	$k_{sat}<10^{-5}$	50-100cm
Drenaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear efectos de barrera capilar.</li> <li>• Reduce la acumulación de agua.</li> <li>• Reduce la presión intersticial en la cobertura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena.</li> <li>• Arena y Grava.</li> </ul>	$10^{-1}$ $<k_{sat}<10^{-3}$	30-50 cm
Protección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barrera contra la biointrusión.</li> <li>• Protege las capas subyacentes contra los efectos climáticos (ciclos de congelación, descongelación y desecación).</li> <li>• Almacenamiento temporal de agua.</li> </ul>	Arena y grava con alto porcentaje de cantos rodados (cuando la limitación de la biointrusión es crítica).	$10^0$ $<k_{sat}<10^{-4}$	<1
Superficie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de transición entre la cobertura y la naturaleza.</li> <li>• Reduce la fluctuación de la temperatura, la humedad y</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos orgánicos.</li> <li>• También pueden</li> </ul>	----	15-20 cm

	<p>la erosión.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crea condiciones adecuadas para la vegetación</li> </ul>	<p>contener geosintéticos (Geogrid)</p>		
--	--	---	--	--

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2007.

El cuadro anterior resume los valores típicos de espesores y permeabilidades para conformar una cobertura de barrera capilar.

## 2.6. TIPOS DE SISTEMAS DE COBERTURAS

### 2.6.1. Cobertura convencional o monolítica

El sistema de cobertura usualmente utilizado es la compactación de una capa de suelo arcilloso, con baja permeabilidad, directamente sobre la masa de residuos. Esta capa compactada tiene como objetivo evitar la penetración excesiva de precipitación, pudiendo presentar algunos problemas como, el resecamiento y la formación de fisuras y grietas cuando se utilizan en algunos tipos de climas.

Para que la capa de suelo arcilloso tenga un funcionamiento como barrera capilar, es ideal que la conductividad hidráulica saturada se igual o inferior a  $1 \cdot 10^{-7}$  cm/s (Shackelford et al., 1997).

### 2.6.2. Cobertura capilar simple

El sistema de cobertura por barrera capilar simple consiste en una capa de suelo de granulometría fina colocada sobre una capa de material de granulometría gruesa (arena). Estas deben seguir una inclinación para que el suelo de granulometría gruesa drene lateralmente el agua.

La barrera capilar debe actuar como barrera hidráulica para controlar la infiltración del agua de la superficie, almacenar toda el agua infiltrada y reducir la entrada de oxígeno, que puedan generar el drenaje ácido (Viera et al., 2005). El suelo que servirá como base para la vegetación nativa debe ser compatible con la misma a ser cultivada en la superficie.

La capacidad de impedir el flujo de agua ocurre debido a la gran diferencia entre los tamaños de poros entre las capas de materiales finos y gruesos, esta diferencia de tamaños eleva la intensificación del fenómeno de barrera capilar.

Las barreras capilares tienen la finalidad de aumentar la capacidad de almacenar agua en la capa de material más fino, debido al contraste de los valores de permeabilidad entre los suelos de materiales finos y granulares y mejoran la capacidad del suelo fino de retener la humedad.

En la condición no saturada, la capa de material fino tiende a retener agua en su interior, debido al efecto de succión. La capa granular, presenta baja permeabilidad en la condición no saturada, debido a la presencia de poros del material granular que reducen la interrelación de los vacíos llenos de agua. No obstante, la capa superior de arcilla, puede tener pérdida por evaporación, este efecto puede ser eliminado a través del uso de barrera capilar doble.

El funcionamiento de la barrera capilar solo es garantizado cuando los materiales de formen parte de la composición se encuentren en condición no saturada (Ferreira Lopes dos Santos et al., 2009).

### 2.6.3. Cobertura capilar doble

Para evitar la pérdida de agua por evaporación en la capa arcillosa superior de la barrera capilar simple, puede ser utilizada una barrera capilar doble. Este tipo de barrera es mucho más usada en minería para evitar el drenaje ácido.

En este tipo de barrera, la capa de material granular superior ejerce dos funciones importantes: en la época de estiaje impide que el agua almacenada en la capa de material fino migre por capilaridad hacia la capa de material granular y en la época de lluvia, esta capa funciona como un dren, conduciendo lateralmente el agua que infiltra en la cobertura (Ferreira Lopes dos Santos et al., 2009).

#### 2.6.4. Coberturas Evapotranspirativas

Las coberturas evapotranspirativas son sistemas alternativos vegetados con plantas nativas capaces de resistir y sobrevivir a las condiciones locales. La capa evapotranspirativa actúa como una esponja o un reservorio que almacena humedad durante la precipitación y la devuelve a la atmosfera a través de la evapotranspiración o drenaje lateral (Zornberg et al., 2003).

Proyectos de sistemas de cobertura evapotranspirativas están basados en el balance hídrico, el cual incluye capacidad de almacenamiento de agua del suelo, precipitación, escurrimiento superficial, evapotranspiración e infiltración. De esta manera, limos y arcillas de baja plasticidad son muy usados en coberturas evapotranspirativas, porque son capaces de almacenar agua al mismo tiempo que minimizan la ocurrencia de potenciales rajaduras debido al resecaimiento del suelo (Zornberg et al., 2003). En este sentido, evaluar las condiciones de humedad y de succión de la capa de cobertura es de gran importancia (Ferreira Lopes dos Santos et al., 2009).

#### 2.7. FACTORES QUE CONTROLAN LA FUNCIONABILIDAD DE LA COBERTURA

Los principales parámetros que controlan el desempeño de las coberturas son las propiedades no saturadas de los materiales (la curva de retención de agua y la función de permeabilidad), el espesor de las capas, las condiciones climáticas (especialmente los eventos de precipitación extrema) y la inclinación de la cobertura. Otros factores tales como la erosión, vegetación y agrietamiento por desecación podrían afectar también el desempeño de una cobertura, pero estos aspectos no serán tratados en esta tesis (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

##### 2.7.1. Impacto de las Propiedades del Suelo No Saturado

Las propiedades del suelo no saturado de los cuatro materiales de grano fino (CL, SM, SM-ML y ML) y de los dos materiales de grano grueso (SP y GP), se presentan en la Figura 2.3.

El material ML y SM-ML disminuye la infiltración. El material CL reduce la infiltración a valores insignificantes, pero debido a que los materiales arcillosos son altamente susceptibles a la desecación, la cual produce grietas e incrementa significativamente el flujo de agua a través del material.

Para la retención de humedad se suelen preferir los suelos SM, SM-ML y ML en lugar de los suelos arcillosos, ya que poseen las cualidades mencionadas anteriormente (ver figura 2.3), (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

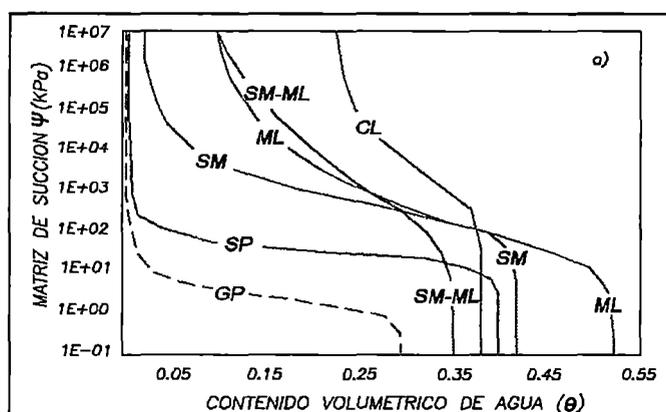


Figura 2.3. Propiedades Hidráulicas No Saturadas de los Materiales

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2007

### 2.7.2. Impacto del Espesor de la Capa

Estudios realizados muestran que la filtración disminuye a medida que el espesor de la capa de grano fino se incrementa; este efecto se atribuye principalmente a la mayor capacidad de agua de las capas más gruesas. El impacto del incremento del espesor de la capa de grano fino es más acentuado en los espesores menores.

Para el material de grano grueso el impacto es menor comparado con el impacto del espesor de la capa de retención de humedad (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

### 2.7.3. Impacto de las Condiciones Climáticas

Las condiciones meteorológicas críticas para una cobertura dependen del sitio y no solo están en función de la precipitación anual sino también de su distribución en tiempo e intensidad. Las condiciones más críticas se producen cuando las precipitaciones son frecuentes y cuando la evaporación es baja. Para finalizar se debe identificar las condiciones extremas que se pueden producir en un periodo corto y se debe evaluar la capacidad de la cobertura para hacer frente a estas condiciones (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

## CAPÍTULO III.

### DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO SOFTWARE VADOSEW

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

VADOSE/W es un software del grupo GeoStudio (2007), diseñado para describir la hidrodinámica a través del suelo, considerando procesos físicos como la evaporación originada por la radiación solar. VADOSE/W utiliza una solución numérica mediante el método de elementos finitos.

Para obtener un resultado numérico, se utilizan diferentes condiciones iniciales y de frontera o contorno, éstas involucran datos de los materiales del suelo que conformarán las capas, estos datos son: la conductividad hidráulica y porosidad de los mismos, datos climatológicos como la precipitación pluvial, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

VADOSE/W utiliza el método de Penman-Wilson (1990) para calcular la Evaporación Actual (AE) en la superficie del suelo, la cual está en función del Potencial de Evaporación (PE) o radiación solar neta para todas las condiciones de humedad independiente del tipo de suelo. Las ecuaciones acopladas de masa y calor en VADOSE/W permiten obtener parámetros necesarios en la superficie del suelo para su uso en el método de Penman-Wilson.

#### 3.2. FUNDAMENTO DEL SOFTWARE VADOSE/W

VADOSE/W es un software bidimensional, que simultáneamente acopla el transporte de calor y el flujo de fluido mediante el proceso de elementos finitos en la zona de estudio, los cuales están sujetos al comportamiento hidráulico del suelo con las condiciones climáticas. La ecuación de flujo se basa en la ecuación de Richards (1931), pero está adaptado para incluir el flujo de vapor de acuerdo con el método de Wilson (1990) y con una modificación de acuerdo al método de Milly (1982). La ecuación de transferencia térmica se basa en la ecuación estándar de Fourier para la transferencia de calor por conducción, con

modificaciones para la inclusión de vapor y transferencia de calor por convección (debido al flujo de agua).

VADOSEW fue desarrollado principalmente para ayudar en el diseño de los sistemas de ingeniería de cobertura del suelo. El alcance de la validación está limitado a:

(i) Evaporación en una sola dimensión; (ii) revisión del balance hídrico de un modelo de cobertura asociado al modelo de cobertura bidimensional con la condición de borde del modelo climático transitorio.

Se considera adecuada para la validación de los procesos relevantes de ingeniería de coberturas de suelo de la mayoría de sitios (GEO-SLOPE, 2008).

### 3.3. GEOMETRÍA Y MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

#### 3.3.1. Regiones de suelo, líneas y puntos

GeoStudio utiliza el concepto de regiones y puntos para definir la geometría de un problema y facilitar la discretización del mismo.

El uso de regiones ofrece la ventaja de dividir en pequeñas piezas, trabajar, analizar y luego conectarlas para obtener el comportamiento de la región en estudio, como el concepto de elementos finitos.

Las regiones pueden ser de lados rectos simples como cuadriláteros, triángulos o un polígono de lados múltiples.

Los puntos también son requeridos con el fin de unirse a regiones de diferentes tamaños y para controlar el mallado para fines específicos.

#### 3.3.2. Generación de la malla

El método de elementos finitos está basado en el concepto de subdivisión de un elemento continuo en pequeñas piezas, que describen el comportamiento de las

piezas individuales y luego se vuelve a conectar para representar el comportamiento de la serie continua en su totalidad. Este proceso de subdivisión de la serie continua en trozos más pequeños se conoce como discretización o mallado.

Una malla se genera por defecto para las regiones de suelos. Es posible alterar el tamaño de los elementos en un nivel global para toda la malla, dentro de una o más regiones, o a lo largo de una línea o alrededor de un punto. Se puede especificar la densidad de la malla como una unidad de longitud real, como una relación entre el tamaño global de malla, o como el número de divisiones a lo largo de un borde de la línea (GEO-SLOPE, 2008).

### 3.3.3. Capas de superficie

Las condiciones de la superficie de tierra cambian en respuesta al clima, y las condiciones climáticas pueden cambiar dramáticamente durante los períodos cortos de tiempo. Para tratar numéricamente con cambios rápidos y dramáticos de contorno, es necesario disponer de una discretización cercana a la superficie del suelo. GeoStudio tiene un procedimiento especial para la construcción de una capa de superficie que puede ser finamente discretizada.

Una vez que el perfil del suelo ha sido generado, el comando de dibujar capa superficial se puede utilizar para dibujar la región de una sola capa o de múltiples a lo largo de la totalidad o parte de una superficie del suelo. Los parámetros tales como el tipo de suelo y la geometría de capa individual se definen y una malla de elementos cuadrilátero con nodos orientados verticalmente se construye de forma automática en la parte superior de la región de tierra existente. La estructura de la malla asegurará la estabilidad numérica óptima durante la solución.

Los elementos cuadriláteros aplican bastante bien para los procesos de la superficie y su uso reduce en gran medida el número de elementos requeridos, una consideración importante cuando se trata de situaciones que demandan de mayor esfuerzo computacional (GEO-SLOPE, 2008).

### 3.4. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

En este capítulo se describen los diferentes modelos de materiales del suelo y las propiedades de estos que son necesarios en la solución de las ecuaciones diferenciales del VADOSE/W. Es importante tener una comprensión clara de lo que significan las propiedades del suelo y de la influencia que se tienen sobre el tipo de los resultados generados, esta teoría se especifica en el Capítulo I, sección 1.2 de la tesis.

Existen tres modelos de materiales para elegir cuando se utiliza VADOSE/W, la principal diferencia entre ellos está relacionada con la simplificación de las propiedades térmicas. Un resumen de estos modelos y las propiedades de los suelos necesarios se indican a continuación:

#### Modelos de materiales en VADOSE/W

- Ninguno (usado para remover parte del modelo en un análisis)
- Modelo térmico completo, contiene:

Función de Conductividad Hidráulica, radio y dirección

Función de contenido de agua

Función de Conductividad térmica - contenido de agua

Función de calor específico volumétrico

Decaimiento de gas (vida media)

- Modelo térmico simplificado, contiene:

Función de Conductividad Hidráulica, radio y dirección

Función de contenido de agua

Capacidades caloríficas volumétricas congeladas y no congeladas

Conductividad térmica congelada y descongelada

Decaimiento de gas (vida media)

El modelo de suelo térmico simplificado es muy útil para definir rápidamente las propiedades térmicas de un modelo, en el que no es muy relevante la influencia de la temperatura en el flujo de agua y la evaporación. Si hay alguna duda

acerca de cuál es el modelo a elegir para una región de suelo, hay que seleccionar el modelo térmico completo (GEO-SLOPE, 2008).

#### 3.4.1. Función del Contenido de Agua

Tal como fue descrito en el capítulo I, el contenido de agua no es fijo en el tiempo ni en el espacio y por lo tanto se requiere una función para describir cómo cambian los contenidos de agua con diferentes presiones en el suelo.

La función de contenido volumétrico de agua relaciona la presión de agua, la presión de poros de aire y el contenido de agua los cuales son parámetros de entrada importante en un análisis VADOSE/W.

##### *Tipos de Funciones de Almacenamiento y métodos de estimación.*

Algunos laboratorios geotécnicos a nivel mundial cuentan con equipos de que realizan la medición de las curvas características de los suelos no saturados. Debido a esto dificulta la medición de los mismos, por lo cual VADOSE/W dispone de una librería para la función del contenido volumétrico de agua. Uno de ellos es un método de predicción basados en el tamaño de grano, se trata de basar su función de una muestra del conjunto de funciones incorporadas en el software, y dos ecuaciones de forma basadas en conocidos parámetros de ajuste de curvas.

##### *Estimación método 1 (Tamaño de grano-Kovacs Modificado)*

Aubetin et al (2003) presenta un método para predecir la función volumétrica del contenido de agua, que está modificado a partir del método compuesto por Kovac (1981), (GEO-SLOPE, 2008).

##### *Estimación método 2 (Funciones predeterminadas)*

En base en a investigaciones desarrolladas por GeoStudio, se ha desarrollado varias funciones de contenido "típicos" de agua para los diferentes tipos de suelo.

Estas funciones se proporcionan como un medio lo que le permite configurar algunos modelos de prueba rápida, cambiar las funciones con facilidad, sensibilidad de los resultados y en última instancia tener que decidir si es necesario gastar más tiempo y dinero para obtener datos más precisos (GEO-SLOPE, 2008).

#### *Estimación mediante el método Van Genuchten, 1980*

En 1980, Van Genuchten propuso una ecuación de cuatro parámetros como una solución para la predicción de la función de contenido volumétrico de agua. La ecuación se detalla en el capítulo I.

#### *Estimación mediante el método Fredlund y Xing, 1994.*

El método Fredlund y Xing (1994) presenta una solución que se puede utilizar para desarrollar la función de contenido volumétrico de agua para todas las posibles presiones negativas entre cero y menos de un millón KPa, basado en un grupo de tres parámetros (GEO-SLOPE, 2008). La ecuación que gobierna se detalla en el Capítulo I.

### 3.4.2. Función de Conductividad Hidráulica

En un suelo saturado, todos los espacios de los poros entre las partículas sólidas se llenan con agua. Una vez que se supera el valor de entrada de aire, éste entra en los poros más grandes, los poros llenos de aire y aumentan la tortuosidad de la trayectoria de flujo, como resultado la capacidad del suelo para el transporte de agua (la conductividad hidráulica) disminuye.

Por esta descripción, está claro que la capacidad del agua para fluir a través de un perfil del suelo depende de la cantidad de agua presente en el suelo, que se representa por la función de contenido volumétrico de agua.

VADOSE/W ha incorporado métodos para estimar la función de la conductividad hidráulica, una vez que se ha especificado la función de contenido volumétrico de agua y un valor  $K_{sat}$ .

#### *Método 1 (Fredlund et al, 1994)*

Este método consiste en el desarrollo de la función no saturada de conductividad hidráulica mediante la integración a lo largo de toda la curva de la función de contenido volumétrico de agua (GEO-SLOPE, 2008). La ecuación se detalla en el Capítulo I.

#### *Método 2 (Van Genuchten, 1980)*

Van Genuchten (1980) propuso una ecuación de forma cerrada para describir la conductividad hidráulica de un suelo como una función de succión matricial (GEO-SLOPE, 2008), que se detalla en el Capítulo I.

### 3.4.3. Función Térmica

En VADOSE/W, el contenido de agua no congelada se estima a partir de la función de contenido de agua de acuerdo con un planteamiento sugerido por Black and Tice (1989).

#### *Función del contenido de agua congelado.*

VADOSE/W solo necesita especificar la función para la zona no congelada y, basado en esto, la conductividad térmica en la zona congelada se calcula internamente por el programa. Esta relación fue propuesta por Johansen (1975), y se detalla en el Capítulo I.

#### *Valores típicos de conductividad térmica.*

La data en el Cuadro 3.1 a continuación proporciona valores típicos de conductividad térmica para varios materiales, (Johnston, Ladanyi, Morgenstern & Penner et al., 1981).

Cuadro 3.1. Peso unitario y conductividad térmica de diferentes materiales

Material	Peso	Conductividad		
	Unitario			
	Lb/(ft <sup>3</sup> )	Btu/(hr*ft*°F)	J/(seg*m*°C)	KJ/(d*m*°C)
Agua	62.4	0.35	0.605	52.27
Hielo	57	1.29	2.23	192.7
Aire	0	0.014	0.024	2.07
<b>Suelo y minerales de roca</b>				
Pizarra	-	0.9	1.5	129.6
Evaporitas	-	3.1	5.4	466.6
Caliza	168	0.75-2.9	1.3-5.0	112-432
Dolomita	178	2.9	5.0	432
Arenisca	-	1.1-2.4	1.8-4.2	155-86.4
Esquisto	-	0.90	1.6	138.24
Gneis	-	1.4	2.5	216
Diorita	-	1.9	3.3	285.12
Pizarra	-	2.2	3.8	328.3
Cuarcita	-	2.6-4.1	4.5-7.1	388.8-613
Granito	-	1.0-2.3	1.7-4.0	146.9-345.6

Fuente: GEO-SLOPE, 2008.

*Capacidad de calor volumétrica.*

VADOSE/W solo necesita especificar la función para la zona no congelada y, basado en esto, el calor específico volumétrico en la zona congelada se calcula internamente por el programa, las relaciones se describen en el Capítulo I.

*Valores típicos de capacidad volumétrica de calor*

El cuadro 3.2 a continuación proporciona información de los valores típicos de la capacidad de calor específico y volumétrico de diversos materiales.

Cuadro 3.2. Calor específico y capacidad de calor volumétrica de diferentes materiales

Material	Calor específico de masa		Capacidad de calor volumétrica	
	Btu/(lb*°F)	kJ/(kg*°C)	Btu/(ft <sup>3</sup> *°F)	kJ/(m <sup>3</sup> *°C)
Agua	1.00	4.187	62.4	4187
Hielo	0.50	2.094	28.1	1880
Aire	0.24	1.0	0.0187	1.25
Minerales del suelo	0.17	0.71	28.0	1875
Minerales del suelo orgánico	0.40	1.674	37.5	2520
Poliestireno extruido	0.24	1.0	0.65	43.5
Concreto	0.21	0.895	30.0	2010
Asfalto	0.40	1.674	37.5	2520
Granito	-	-	37.1	2490
Caliza	0.29	1.2	48.9	3285
Dolomita	0.21	0.88	37.4	2510
Arenisca	-	-	37.4	2510
Esquisto	-	-	27.4	1840
Vidrio	-	-	26.2	1760
Acero	0.11	0.46	56.0	3890
Madera	0.19	0.8	7.79	523

Fuente: GEO-SLOPE, 2008.

#### 3.4.4. Difusión de Gas

La difusión de gas, decadencia y la disolución juegan un papel importante en muchos problemas físicos geotécnicos. La transferencia de gas se refiere al transporte de productos químicos en respuesta a gradientes de concentración en la fase de aire. La transferencia de vapor ya está incluida en la formulación del VADOSE/W.

VADOSE/W está formulado para analizar rigurosamente las influencias del clima, la masa y el fenómeno de transferencia de vapor en todos los tipos de sistemas de suelos naturales y artificiales expuestos a la atmósfera. La adición de difusión de gas, y el análisis de la decadencia es otro componente clave a considerar en muchos de estos diseños y está incorporado la solución del programa VADOSE/W (GEO-SLOPE, 2008). En el Capítulo 1 se describe las fórmulas que se utiliza.

### 3.5. CONDICIONES DE BORDE

#### *Fundamentos.*

Todas las ecuaciones de elementos finitos de la resolución de las incógnitas se reducen a:

$$[K]\{X\} = \{A\} \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Donde:

[K]: Matriz de coeficientes relativos a la geometría y propiedades de los materiales,

{X}: un vector desconocido el cual es llamado variables de campo.

{A}: un vector de medidas en los nodos.

Para un análisis de filtración la ecuación es:

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

Donde:

{H}: un vector de las cargas hidráulicas en los nodos, y

{Q}: un vector de las cantidades de flujo en el nodo.

El objetivo principal es resolver las incógnitas principales, que en un análisis de las filtraciones son la carga hidráulica totales en cada nodo. Las incógnitas son calculadas con relación a los valores de H especificados en algunos nodos

y/o los valores de Q especificados en algunos otros nodos. En un análisis de estado estacionario, al menos un nodo en toda la malla debe tener una condición H especificado. Los valores de H o Q especificados son las condiciones de contorno (GEO-SLOPE, 2008).

### 3.5.1. Clima y Condiciones de Borde

VADOSE/W está formulado específicamente para permitir el acoplamiento riguroso de las condiciones climáticas a la superficie del suelo. Mientras que se calculan las condiciones de contorno reales sobre la base de un complejo conjunto de condiciones.

La condición de frontera climática, sólo se puede aplicar en el borde de una malla creada como parte de una región especial de malla de la superficie. Además se puede incluir en el análisis la transpiración de las plantas, esta condición se especifica como parte de la condición de contorno climático.

Si en una condición de contorno climático se elige la opción de análisis de transferencia de gas entonces, la condición de frontera tipo de concentración en la superficie del suelo dependerá, de qué tipo de gas se utiliza en el análisis. Si el gas es oxígeno, entonces la concentración en los nodos del clima de la superficie de tierra se establece en el equivalente de  $280 \text{ g/m}^3$ , que es una concentración típica de oxígeno en el aire.

VADOSE / W permitirá conjuntos diferentes de datos climáticos para ser aplicado a diferentes partes de la malla de la superficie. Esta es una característica útil cuando se sabe que las partes de la superficie del suelo están orientadas de manera diferente para el sol o los vientos predominantes, o donde la precipitación o la acumulación de nieve varían a través de una región modelada.

Si vegetación se aplica en el análisis, cualquier combinación de un índice de área, profundidad de las raíces hoja de la planta y función de limitación de la humedad se puede utilizar en cualquier elemento de borde externo, ya sea con un único o múltiples conjunto de datos climáticos (GEO-SLOPE, 2008).

### 3.6. TIPOS DE ANÁLISIS

Hay dos tipos fundamentales de análisis de infiltración de elementos finitos, el estado estacionario y transitorio. Numerosas restricciones y condiciones adicionales se pueden aplicar dentro de cada tipo fundamental.

#### 3.6.1. Análisis Estacionario

Describe una situación en la que el estado del modelo es constante y no cambia.

Las condiciones de contorno son constantes en el tiempo, el modelo puede calcular las condiciones del suelo a largo plazo.

La ecuación de infiltración estado estacionario deja de lado la variable "tiempo real" y omite toda la función de contenido volumétrico de agua. No son necesarios en la solución (GEO-SLOPE, 2008).

#### *Condiciones de contorno para el estado estacionario*

En un análisis de estado estacionario hay dos opciones de las condiciones de contorno: una presión constante (o cabeza) y una tasa de flujo constante. No hay condición climática. Por conveniencia, la velocidad de flujo se puede especificar como un una unidad de flujo aplicado a un elemento de borde. Es ya sea una presión conocida en este punto, o hay un flujo continuo o flujo de salida de agua.

#### 3.6.2. Análisis Transitorio

Un análisis de transitorio, significa que siempre está cambiando, ya que considera el tiempo que tarda el modelo para responder a las condiciones de contorno. En los ejemplos de análisis transitorios, está el predecir el tiempo que demora el núcleo de una presa en "humedecerse" cuando el depósito se llena rápidamente; o predecir donde saldrá la filtración de la cara de una presa si un evento de lluvia intensa se aplica sobre la superficie del terreno.

Al elegir un análisis de clima controlado que es necesario disponer de una solución transitoria, con el fin de capturar la naturaleza transitoria de los datos climáticos a lo largo de cualquier día dado y también durante el cambio de estaciones y años.

Se debe proporcionar las condiciones iniciales, así como condiciones de contorno actual o futuro.

### *Condiciones iniciales*

Para un análisis transitorio es esencial definir la condición inicial, la altura total, la temperatura y la concentración de gas en todos los nodos. Si no se especifica una concentración de gas o de la temperatura, un valor de cero se asume para cada nodo.

VADOSEW permite especificar las condiciones hidráulicas iniciales, ya sea la lectura de los datos de un archivo de condiciones inicial creada en un análisis separado, o aprovechando la posición inicial de la capa freática o especificando el valor como una propiedad del material.

Es importante reconocer que las condiciones iniciales para un análisis transitorio pueden tener un efecto significativo en la solución.

La magnitud de la presión negativa máxima de poros de agua depende de la forma de la función de la conductividad hidráulica y, en menor medida, de la tasa de infiltración (GEO-SLOPE, 2008).

## 3.7. ELEMENTOS FINITOS PARA LAS ECUACIONES DE FLUJO

### 3.7.1. Ecuación diferencial parcial del flujo de agua y calor

La ecuación diferencial general que gobierna la filtración en dos dimensiones puede ser expresado como:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \left( \frac{P}{\rho g} + y \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \left( \frac{P}{\rho g} + y \right)}{\partial y} \right) + Q = \lambda \frac{\partial P}{\partial t}$$

(Ecuación 3.3)

Donde:

P : presión,

P<sub>v</sub> : presión de vapor del suelo húmedo,

m<sub>v</sub> : pendiente de la función de contenido volumétrico de agua

K<sub>x</sub> : conductividad hidráulica en la dirección x

K<sub>y</sub> : conductividad hidráulica en la dirección y

Q : límite de flujo aplicado

D<sub>v</sub> : coeficiente de difusión de gas descrito por Wilson (1990)

y : elevación de carga hidráulica

ρ : densidad del agua

g : aceleración de la gravedad

t : tiempo

Aplicando el método de Galerkin a la ecuación diferencial que gobierna el elemento finito para la ecuación de filtración de dos dimensiones puede expresarse como:

$$\int_V ([B]^T [C] [B]) dv \{P\} + \int_V ([B]^T [D_2] [B]) dv \{T\} + \int_V ([B]^T [K] [B]) dv \{y\} + \int_V (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle dv \{P\}, t = q \int_A (\langle N \rangle^T) dA$$

(Ecuación 3.4)

Donde:

- [B] : gradiente de la matriz,  
 [C] : elemento de la matriz de rigidez=  $[K/\rho g + D_1]$ ,  
  
 D1 :  $Dvd_1/\rho$ ,  
 [D<sub>2</sub>] :  $[Dvd_2/\rho]$   
 {P} : Vector de presiones de nodo,  
 {y} : Vector de elevación de cabeza,  
 [K] : elemento de la matriz de conductividad hidráulica  
 $\lambda$  :  $m_w \lambda_w$ ,  
 <N>T<N> : [M], la masa de la matriz (storage)  
 {P},t : cambio en la presión con el tiempo,  
 q : flujo unitario a través del lado de un elemento, y  
 <N> : vector de la interpolación de la función,

Para el análisis bidimensional en VADOSE/W, el espesor del elemento se considera que es constante durante todo el elemento. La ecuación de elementos finitos por consiguiente se puede escribir como:

$$t \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{P\} + t \int_A ([B]^T [D_2] [B]) dA \{T\} +$$

$$t \int_A ([B]^T [K] [B]) dA \{y\} + t \int_A (\lambda <N>^T <N>) dA \{P\}, t$$

$$= qt \int_L (<N>^T) dL$$

(Ecuación 3.5)

Donde  $t$  es el espesor del elemento.

Abreviando la forma, la ecuación de los elementos finitos para la transferencia de masa es:

$$[Kw]\{P\} + [Kwt]\{T\} + [M]\{P\}, t = \{Q\}$$

(Ecuación 3.6)

La correspondiente transferencia de calor bidimensional del elemento finito puede ser escrita como:

$$t \int_A ([B]^T [C_t] [B]) dA \{T\} + t \int_A ([B]^T [L_v D_1] [B]) dA \{P\} + t \int_A (\lambda_t \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \{T\}, t = qt \int_L (\langle N \rangle^T) dL \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Donde:

[C<sub>t</sub>] : elemento de la matriz de rigidez térmica= [K<sub>t</sub>+L<sub>v</sub>D<sub>2</sub>],

{T} : vector de los nodos de temperatura,

{T},t: cambio de temperatura en el tiempo, y

qt : unidad de flujo de calor a través de un lado de un elemento

En forma abreviada, la ecuación del elemento finito para la transferencia de calor es:

$$[K_t] \{T\} + [K_{tw}] \{P\} + [M_t] \{T\}, t = \{Q_t\} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Finalmente, la combinación de las ecuaciones acopladas puede ser abreviada a la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} K_w K_{wt} \\ K_{tw} K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{time} \\ T_{time} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ Q_t \end{Bmatrix} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

### 3.7.2. Integración temporal

La solución del elemento finito para una análisis transitorio es una función del tiempo como indica el termino {P},t, en la ecuación del elemento finito. La integración en el tiempo puede ser realizado mediante un esquema de diferencia finita.

Escribiendo la ecuación de transferencia de masa de elementos finitos (dejando el flujo de vapor fuera por un momento) en términos de diferencias finitas lleva a la siguiente ecuación (Segerlind et al., 1984):

$$\left( w\Delta t \left[ \frac{K}{\rho g} \right] + \left[ \frac{M}{\rho g} \right] \right) \{P_1\} = \Delta t((1-w)\{Q_0\} + w\{Q_1\}) + \left( \left[ \frac{M}{\rho g} \right] - (1-w)\Delta t \left[ \frac{K}{\rho g} \right] \right) \{P_0\} - [K]\{Y\}\Delta t \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Donde:

$\Delta t$  : incremento del tiempo

$w$  : radio entre 0 y 1,

$\{P_1\}$ : altura (presión) al final del incremento del tiempo

$\{P_0\}$ : altura (presión) al inicio del incremento del tiempo

$\{Q_1\}$ : flujo en el nodo al final del incremento del tiempo

$\{Q_0\}$ : flujo en el nodo al inicio del incremento del tiempo

$[K]$  : elemento característico de la matriz, y

$[M]$  : elemento característico del cuerpo de la matriz

La ecuación del elemento finito es simplificado como:

$$\left( \Delta t \left[ \frac{k}{\rho g} \right] + \left[ \frac{M}{\rho g} \right] \right) \{P_1\} + \Delta t[D_2]\{T_1\} = \Delta t Q_1 + \left[ \frac{M}{\rho g} \right] \{P_0\} - [K]\{Y\}\Delta t \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

La ecuación de transferencia de calor para  $\theta$  igual a 1 y la transferencia de calor convectivo omitido es:

$$(\Delta t[K_t] + [M_t])\{T_1\} + \Delta t[L_v D_1]\{P_1\} = \Delta t Q_1 + [M_t]\{T_0\} \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

Las condiciones iniciales deben ser conocidas con el fin de realizar un análisis transitorio (según GEO-SLOPE, 2008).

### 3.7.3. Integración Numérica

VADOSE/W usa integración numérica para evaluar el elemento característico de la matriz [K] y de la matriz Masa [M]. Las integrales son evaluadas mediante el muestreo de las propiedades y después se suman juntos como un solo elemento.

Usando las características de la matriz [K] como un ejemplo, la integral es:

$$[K] = \tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

Puede reemplazarse como:

$$[K] = \tau \sum_{j=1}^n [B_j]^T [C_j] \det |J_j| W_{1j} W_{2j} \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

Donde:

- j : integración en un punto,
- n : número de integración de puntos,
- [C<sub>j</sub>] : elemento de la matriz de conductividad hidráulica en el punto,
- [B<sub>j</sub>] : elemento de matriz en la integración del punto,
- det|J<sub>j</sub>| : determinante de la matriz Jacobiana, y
- W<sub>1j</sub> W<sub>2j</sub>: factores de ponderación.

El número de muestra (integración) puntos necesarios en un elemento depende del número de nodos y la forma de los elementos.

#### *Matriz de conductividad hidráulica*

La forma general de VADOSE/W el elemento de conductividad de la matriz es:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

Donde:

$$C_{11} = k_x \cos^2 \alpha + k_y \sin^2 \alpha \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

$$C_{22} = k_x \sin^2 \alpha + k_y \cos^2 \alpha \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

$$C_{12} = k_x \sin \alpha \cos \alpha + k_y \sin \alpha \cos \alpha \quad (\text{Ecuación 3.18})$$

$$C_{21} = C_{12} \quad (\text{Ecuación 3.19})$$

Cuando  $\alpha$  es cero, [C] es reducido a:

$$[C] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 3.20})$$

El parámetro  $k_x$  es siempre determinado de la función de conductividad hidráulica. El parámetro  $k_y$  es  $k_x \cdot k_{\text{ratio}}$ .

#### Masa de la Matriz

Como se presenta, el elemento masa de la matriz (o almacenamiento) para el análisis en dos dimensiones es definido como:

$$[M] = \tau \int_A (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

También se puede escribir de la siguiente forma:

$$[M] = \tau \sum_{j=1}^n \lambda_j \langle N \rangle^T \langle N \rangle \det|J_j| W_{2j} \quad (\text{Ecuación 3.22})$$

Para evaluar  $\lambda$ , VADOSE/W obtiene  $m_w$  de la función de almacenamiento para cada punto de integración en una o dos maneras.

### Vector de flujo

El vector de flujo nodal de borde  $\{Q\}$  para el análisis bidimensional se define como:

$$\{Q\} = q\tau \int_L (\langle N \rangle^T) dL \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

Donde:

- q: el flujo unitario a través de la cara del elemento,
- $\zeta$ : espesor del elemento,
- A: área del elemento en planta,
- R: la distancia radial del eje de simetría para los elementos de nodos en las esquinas (GEO-SLOPE, 2008).

## **CAPÍTULO IV.**

### **CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y FÍSICO DEL SISTEMA DE COBERTURA.**

Debido a la limitación de información tanto climática como también de las curvas características de los suelos no saturados, el resultado final tendrá un margen de error; por lo cual se modelará un caso real para obtener la variación de los resultados teóricos de percolación que se obtienen con el software y compararlos con los resultados de percolación del monitoreo en campo del caso real.

También se realizará un ensayo físico con la finalidad de comprobar la capilaridad entre los suelos de granos gruesos y finos.

Finalmente los resultados hallados serán aplicados en el capítulo siguiente, debido a que se tendrán las mismas limitaciones y el factor de ajuste será el mismo.

#### **4.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MINA EQUITY SILVER**

##### **4.1.1. Breve resumen de la mina Equity Silver**

La mina Equity Silver está ubicada en la parte central de Columbia Británica, en la meseta alpina en un entorno húmedo y tiene una altitud de 1 300 m, aproximadamente a 575 km al norte-noroeste de Vancouver, Canadá. Durante su operación, la mina extrajo cobre, plata y oro desde una fundación de rocas volcánicas y sedimentarias.

A fines de 1981, el depósito de desmonte produjo drenaje ácido de roca (DAR). La calidad de agua promedio mostró un pH de 2.62. Este DAR fue el problema ambiental principal durante la explotación de la mina, y la tomaron en cuenta para el cierre final.

Por ello realizaron diferentes investigaciones para determinar el mejor esquema de cierre para las pilas de desmonte. La opción de rehabilitación que escogieron consistió en la construcción de una capa de morrena compacta de 0.5 m colocada directamente sobre las pilas de desmonte y otra capa de morrena no compacta de 0.3 m de espesor encima de la capa compacta. Esta última la usaron como protección contra la erosión, evaporación y como un medio para el crecimiento de la vegetación. Estimaron que el sistema de cobertura de dos capas permitiría solo el 5% de precipitación total acumulada.

La morrena tiene un valor de permeabilidad saturada estimada en  $5 \times 10^{-10}$  m/s, mientras que el mismo material no compacto tiene un valor de permeabilidad saturada que oscila entre  $1 \times 10^{-8}$  y  $5 \times 10^{-8}$  m/s. Se determinaron valores de entrada de aire ( $\Psi_a$ ) entre 5 y 10 KPa para la morrena no compacta, mientras que para la morrena compacta un valor entre 10 y 100 KPa (ver cuadro 4.1).

Para la evaluación del rendimiento de la cobertura de Equity Silver instalaron distintos equipos, además una estación meteorológica en la parte superior del Botadero para medir la precipitación, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y radiación neta.

Luego de 10 años de monitoreo de la cobertura, los resultados mostraron que la morrena compacta por lo general mantiene un alto grado de saturación (usualmente mayor que el criterio de diseño 85%), lo cual limita la migración del oxígeno desde la atmósfera hasta el desmonte. En términos de limitación de percolación de agua, los lisímetros midieron un índice de percolación con un promedio de alrededor de 5% de la precipitación.

Los resultados demostraron que después del procedimiento de calibración fue posible predecir el comportamiento hidráulico de la cobertura. De los 710 mm de precipitación, 285-350 mm constituyen evaporación real, alrededor de 20 mm (3% de la precipitación total) percola a través de la cobertura y alrededor de 180 mm se considera escorrentía (Ministerio de Energía y Minas, 2007).

#### 4.1.2. Descripción del modelo

Para el modelamiento se consideró las siguientes opciones del software VADOSE/W, que se explicaron en el capítulo 3:

- Se trabajó con la licencia estudiantil, quiere decir que existe una limitación en la cantidad de elementos finitos y modelos térmicos; por lo cual tiene un mayor margen de error
- Se trabajó con el modelo transitorio "Transient Coupled".
- No se consideró nivel freático.
- Todos los materiales trabajaron con el modelo térmico simple.
- Para todos los materiales se consideraron las siguientes propiedades térmicas:

##### Conductividad Térmica

Congelado: 150 kJ/days/m/°C

No Congelado: 125 kJ/days/m/°C

##### Capacidad volumétrica de calor

Congelado: 2300 kJ/m<sup>3</sup>/°C

No Congelado: 2500 kJ/m<sup>3</sup>/°C

- Propiedades del Gas: 0 g/m<sup>3</sup>
- Para las condiciones de Borde solo se consideró Clima.

#### 4.1.3. Procedimiento de diseño

El diseño de cobertura y su importancia fue explicado en el capítulo 2, a continuación se presenta el diseño de cobertura capilar simple mediante el software VADOSE/W.

##### 4.1.3.1. Parámetros Geotécnicos

Los parámetros de cada material usado en el diseño de la cobertura y la conductividad hidráulica saturada fueron obtenidos de los datos de la mina

Equity Silver (ver cuadro 4.1). Además los parámetros de valor de entrada de aire y valor de entrada de agua fueron estimados en base a las propiedades de cada material, utilizando las funciones de contenido de agua existentes en el software. Para finalizar la función de permeabilidad fue determinada utilizando el modelo de Fredlund.

Cuadro 4.1. Propiedades de los materiales para el diseño de la cobertura

Material	Símbolo	n	VEA	VEW	Ks (cm/s)
Capa superior suelta	Morrena	0.38	5	100	1x10E-05
Capa inferior compacta	Morrena	0.33	20	2000	1x10E-08
Depósito de desmante	GP-GC	0.12	1	20	1.0x10E-03

n: Porosidad efectiva (vol/vol) VEA: Valor de Entrada de Aire (kPa)  
VEW: Valor de Entrada de Agua (kPa) Ks: Conductividad Hidráulica Saturada (cm/s)

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2007 y elaboración propia

Las funciones de las curvas de retención de agua de los materiales que conforman el sistema de cobertura (contenido volumétrico vs matriz de succión en escala logarítmica), muestran que el material no compactado tiene mayor contenido de agua y el material de desmante de mina tiene el contenido de agua menor a todos los materiales de sistema de cobertura (ver figura 4.1).

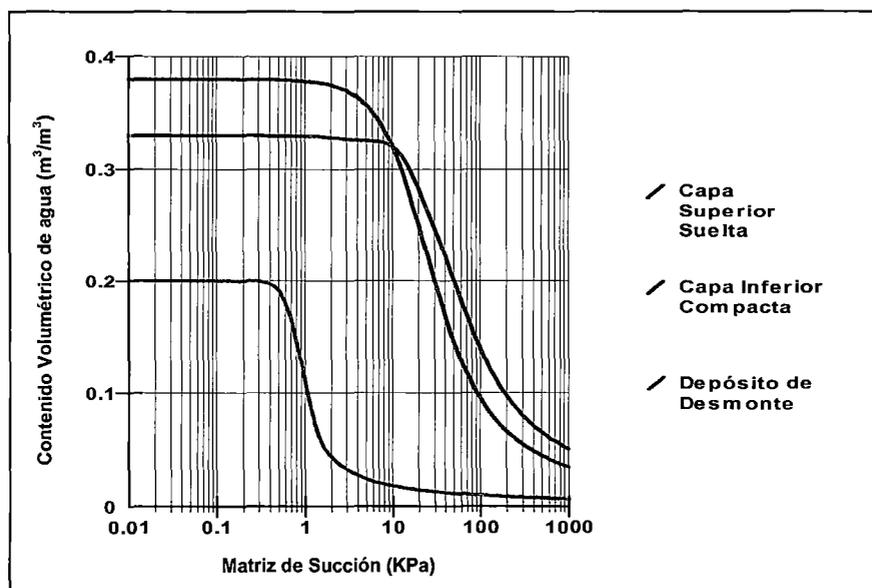


Figura 4.1. Características de las Curvas de Retención de Agua

Fuente: Elaboración propia y datos del Ministerio de Energía y minas

Las curvas de conductividad hidráulica de los materiales que conforman el sistema de cobertura (contenido volumétrico vs matriz de succión, ambas en escala logarítmica), muestran que la curva del desmonte es la que tiene mayor permeabilidad, mientras que la curva de la capa inferior es la que tiene menor permeabilidad (ver Figura 4.2).

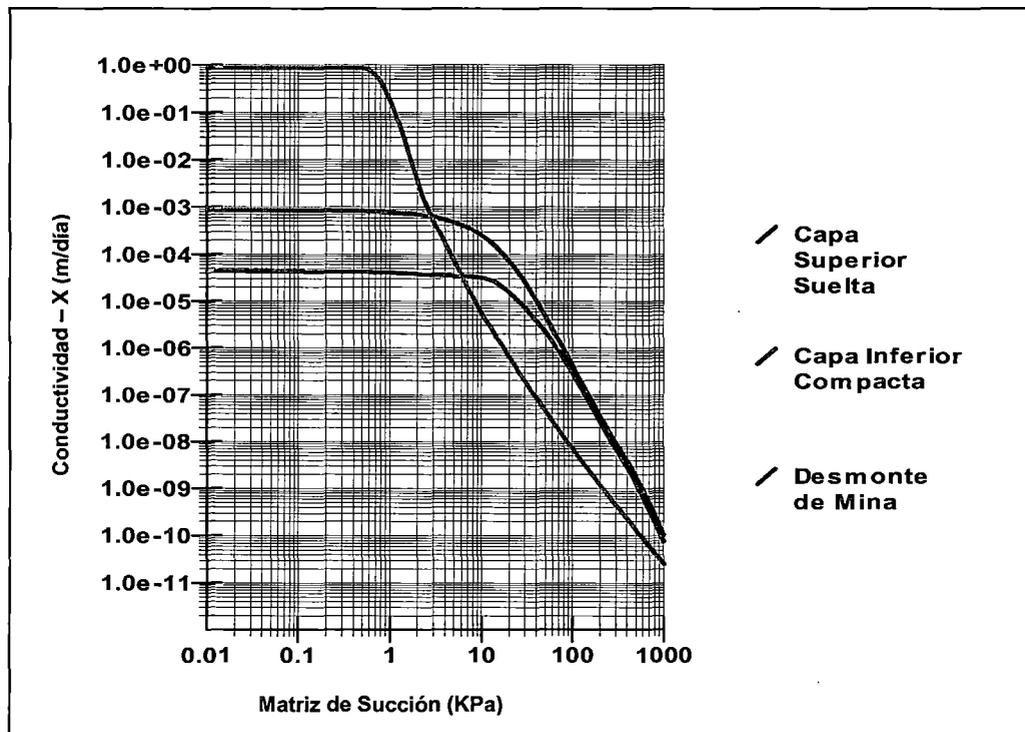


Figura 4.2. Características de las Curvas de Conductividad Hidráulica

Fuente: Elaboración propia y datos del Ministerio de Energía y minas

#### 4.1.3.2. *Parámetros Climáticos*

El modelo climático utilizado para evaluar las condiciones de flujo de la cobertura existente es de 1 año. La precipitación total para un año se obtuvo del apartado 4.1, pero la distribución diaria de precipitación fue obtenida de la página <http://climate.weather.gc.ca/> y luego escalada a la precipitación de la mina Equity Silver; así como también los otros datos climáticos como: temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

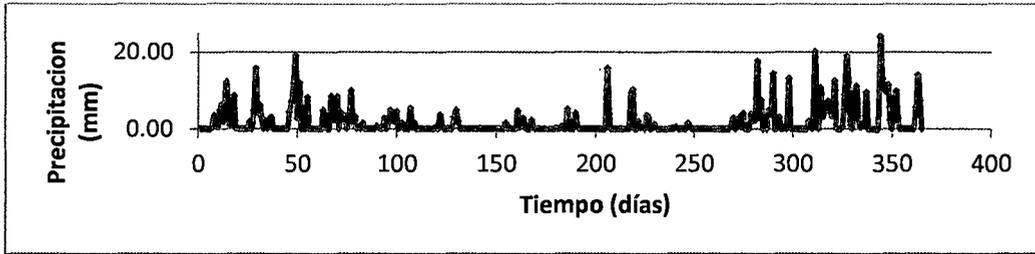
La evaporación actual fue estimada por el programa VADOSE/W (GEO-SLOPE, 2007), considerando 04°00' de latitud norte, con datos promedios de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento.

Cuadro 4.2. Parámetros climáticos

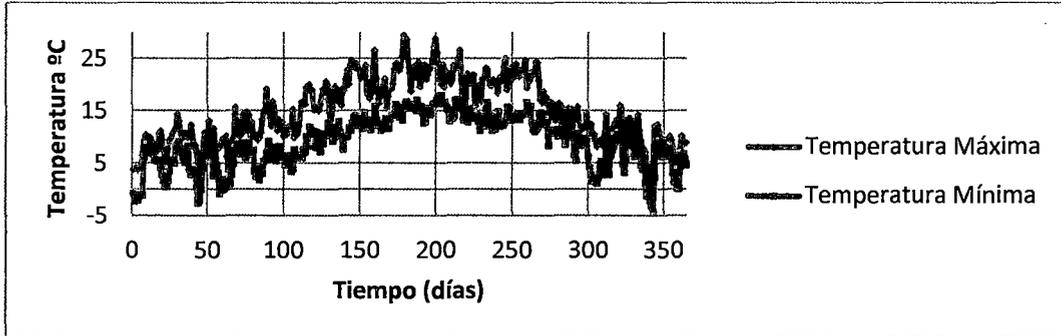
Parámetros climáticos	MESES											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Precipitación (mm)	86.4	76.1	58.2	29.4	14.2	14.1	30.0	30.7	11.1	84.3	149.7	125.8
Temperatura (°)	6	7	8	11	15	18	19	17	17	11	9	6
Humedad relativa (%)	85.5	92.9	90.4	87.4	82.9	76.1	71.7	71.7	77.1	80.6	77.5	88.1
Velocidad del viento (m/s)	5	4.1	4.3	4.0	4.2	4.4	4.3	4.2	4.7	4.5	4.8	4.6

Fuente: <http://climate.weather.gc.ca/>

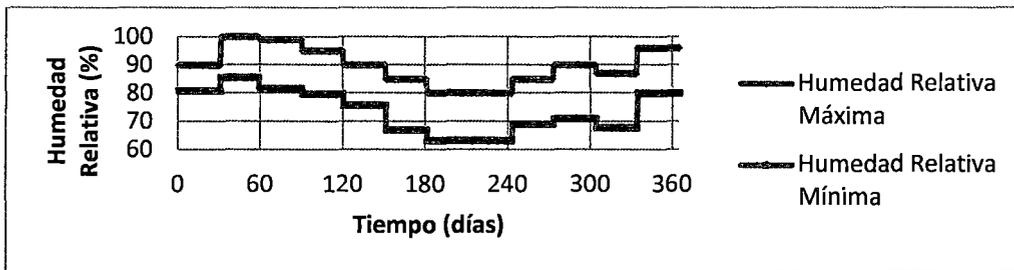
Las Figuras meteorológicas describen la precipitación máxima mensual de una historia de datos, las temperaturas máximas y mínimas, humedades relativas máximas y mínimas, y la velocidad del viento mensual (ver Figura 4.3).



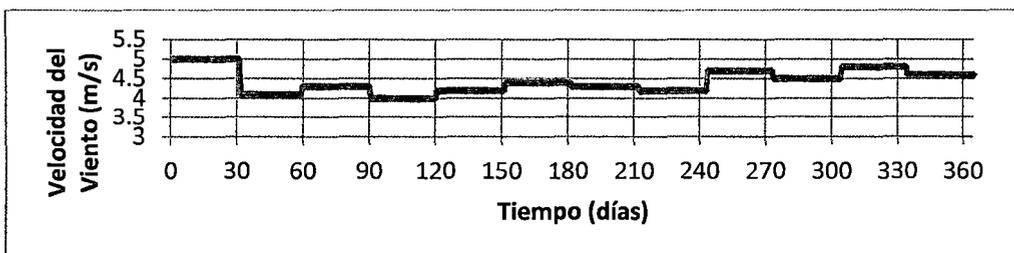
a) Precipitación total mensual



b) Temperatura mensual



c) Humedad relativa mensual



d) Velocidad del viento mensual

Figura 4.3. Características climáticas de la Mina Equity Silver, a) Precipitación total mensual, b) Temperatura mensual, c) Humedad relativa Mensual y d) Velocidad del viento Mensual.

Fuente: Elaboración propia y datos del <http://climate.weather.gc.ca/>

#### 4.1.4. Análisis numérico de la cobertura existente de la mina Equity Silver

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos (ver figura 4.1), las curvas de retención de agua fueron obtenidas del programa VADOSE/W (ver Figura 4.1 y 4.2).

##### 4.1.4.1. Modelamiento de las capas de la cobertura existente y resultados

La cobertura proyectada por la mina Equity Silver consiste en una capa superior de morrena suelta de 0.30 m, seguido por 0.50 m de capa inferior de morrena compacta y 0.30 m de material de desmonte de mina lavado. En el cuadro 4.3 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 4.3. Espesores de capas del Modelo de Cobertura Equity Silver.

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa superior suelta	Morrena	30	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa inferior compacta	Morrena	50	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	30	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2007 y elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, donde las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y las condiciones de borde por clima (ver figura 4.4).

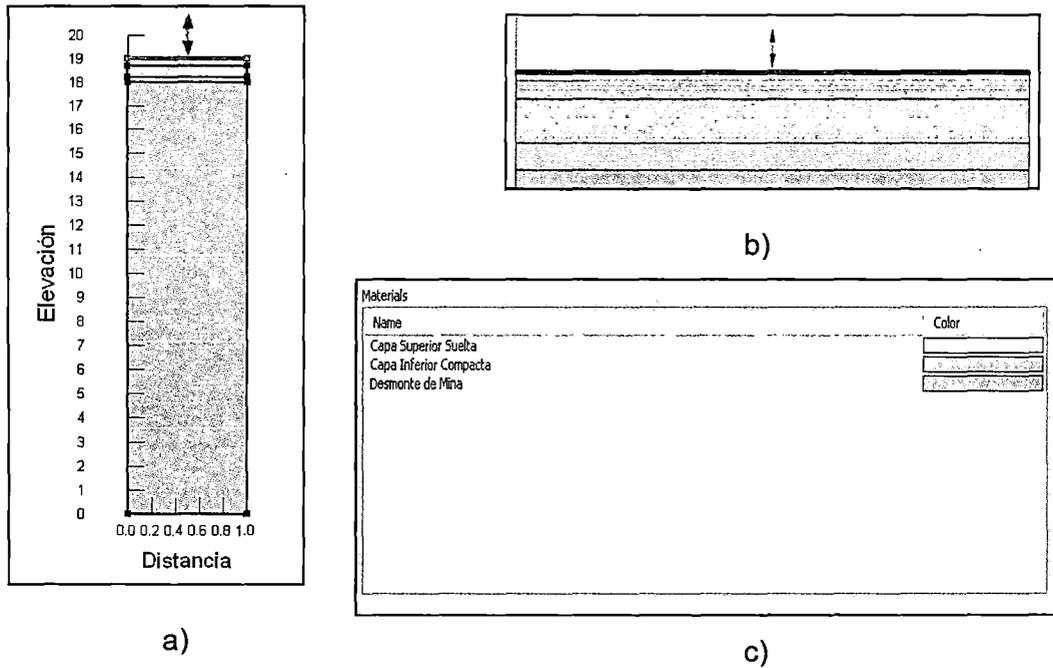


Figura 4.4. Modelo Geométrico y malla de elementos finitos de la cobertura de la Mina Equity Silver, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura, c) materiales que conforman el sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

La malla de elementos finitos consta de 100 nudos y está distribuida en toda la columna del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 4.4 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 4.4. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura Equity Silver.

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	12	-10	Fredlund (1994)
2	Capa de Retención de Humedad	20	-10	Fredlund (1994)
3	Depósito de desmonte	12	-10	Fredlund (1994)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 0.7 mm por mes, el cual corresponde a 1.15 % del total de precipitación (ver cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura Equity Silver.

Balance de agua	mm	%
Precipitación	710	100
Evaporación actual	677	95
Percolación	15.2	2.14

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 1 año. La cantidad de agua que ingresa al depósito de desmonte en ese año es de  $4.9E-07$  (l/s)/m<sup>2</sup>, la curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en los gráficos 4.4 y 4.5 respectivamente.

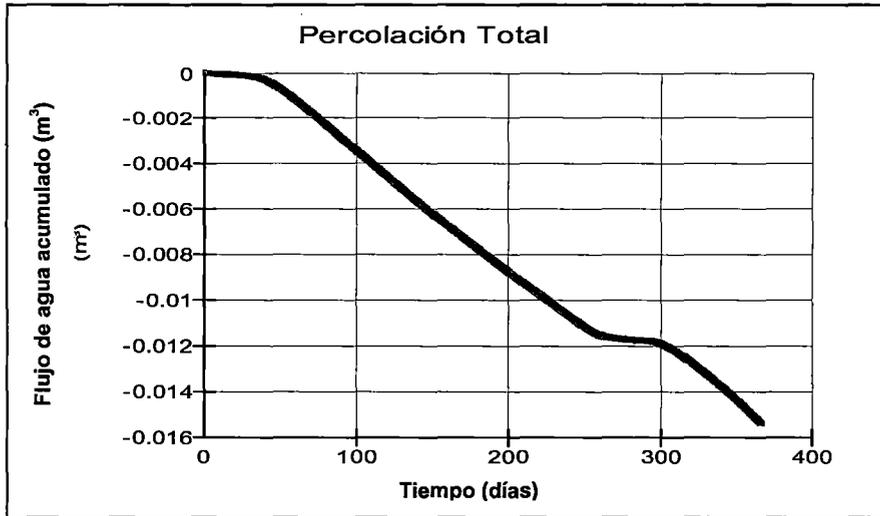


Figura 4.5. Percolación total hacia el desmonte de mina, acumulada durante un año.

Fuente: Elaboración propia.

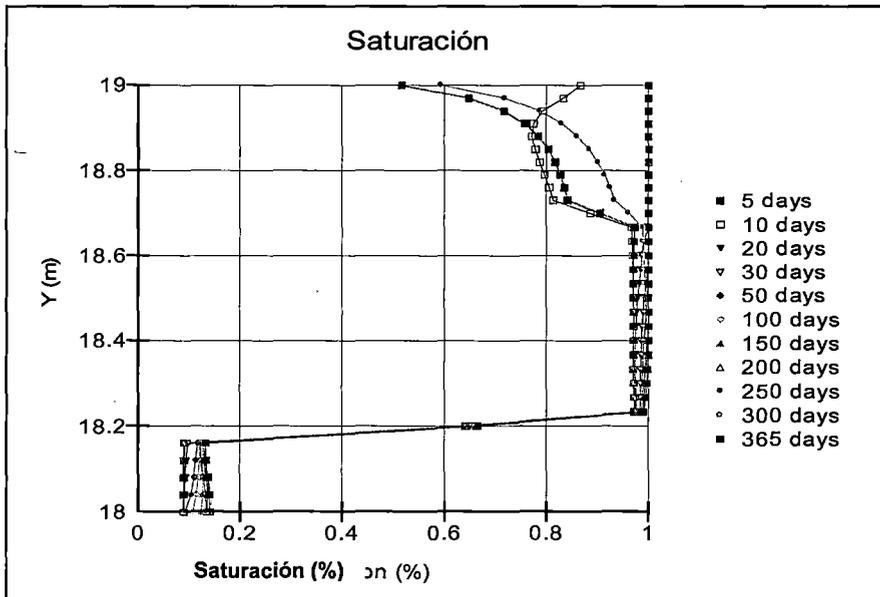


Figura 4.6. Perfil de saturación del sistema de cobertura para diferentes periodos de tiempo

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4.2. Conclusiones y Comentarios

En la sección 4.1, el resultado de percolación acumulada que presentaba la mina Equity Silver era de 20 mm anual, mientras que el modelamiento presentado en la sección 4.4.1 el resultado de la percolación total anual es de 15.2mm. Esta notable diferencia de valor puede ser debido a diferentes factores que se explican a continuación:

- Las curvas de retención de humedad o de agua, fueron generadas con funciones predeterminadas por el software VADOSE/W (ver Figura 4.1) ya que no se tiene información suficiente para poder generar las curvas reales de estos materiales.
- No se tiene una distribución mensual de la precipitación, sino un acumulado anual, por lo cual la distribución diaria de precipitación no es la misma.
- Los otros datos climáticos fueron asumidos, ya que la información que se cuenta es mínima (ver cuadro 4.2 y Figura 4.3).
- Las curvas de conductividad hidráulica fueron generadas con el método de Fredlund (ver Figura 4.2), la información no especifica qué modelo numérico utilizar.
- Finalmente no se consideró evapotranspiración, ya que no se cuenta con información relativa a la vegetación de la zona.

Todos estos factores influyen en el resultado final, por ello debe considerarse un factor de riesgo total de 1.4; el cual multiplicado por el valor teórico de 15.2mm dará un valor corregido de 21.3 ligeramente mayor al valor medido en campo de 20 mm.

Finalmente se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Los resultados de las simulaciones corregidas indican una percolación anual de 20.25 mm que representa el 3% de la precipitación total.
- Los criterios de Hauser 1999, indican una percolación de hasta 3% de la precipitación, por lo cual estaríamos dentro de este criterio.
- La migración de gas (oxígeno) que ingresa al depósito de desmonte debe ser como máximo 0.03 de coeficiente de gas, para esto es necesario que la capa

de retención de humedad se encuentre encima del 85% de saturación, el perfil de saturación muestra valores de hasta 95% (ver Figura 4.6).

## 4.2. MODELO FÍSICO DE LA BARRERA CAPILAR

Se realizó un modelo físico de un sistema de cobertura capilar doble, con la finalidad de estudiar la formación de la barrera capilar y también la trayectoria del flujo de agua que se forma entre los suelos no saturados de grano fino y grueso.

### 4.2.1. Descripción del modelo

Se utilizó una cuba de acrílico de 90 cm x 45 cm x 60 cm, reforzada con ángulos de acero para evitar que se rompan con el peso del suelo (ver figura 4.7).

Además se perforó la base con la finalidad de capturar la percolación a través del sistema de cobertura.

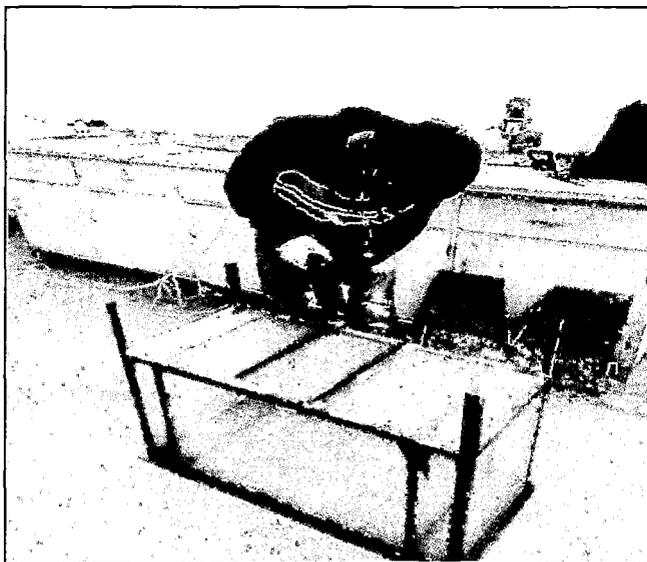


Figura 4.7. Cuba de acrílico con ángulos de acero

Se construyó un sistema de coberturas, en el cual se utilizó tres tipos de capas: capa de almacenamiento (conformada por arena), capa de retención de humedad (conformada por arcilla de alta plasticidad) y capa de soporte (conformada por piedra chancada).

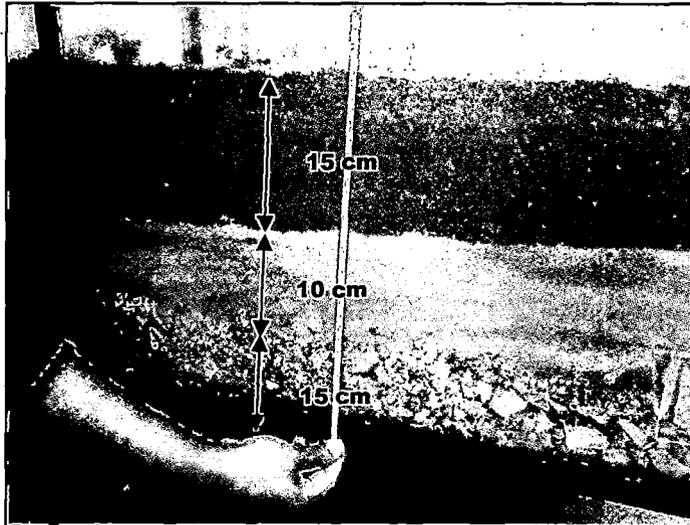


Figura 4.8. Sistema de cobertura de barrera capilar doble

Se aprecia en la figura que primero está la capa de arena, luego la capa de arcilla y por último la capa de grava.

En el cuadro 4.6 se especifica los espesores de las capas utilizadas y también la descripción de estos materiales.

Cuadro 4.6. Espesores de las capas del modelo físico

Capa	Material	Espesor (cm)	Función
1	Arena suelta	15	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Material de grano fino no compactado	10	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo
3	Piedra chancada	15	Desmante de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. Ensayo e interpretación de los resultados

El ensayo duró 5 días, en el cual el primer día se saturó el sistema de cobertura con 4 litros de agua con colorante (ver figura 4.9).



Figura 4.9. Saturación del sistema de cobertura de barrera capilar doble

En la figura se aprecia el humedecimiento de los suelos de grano fino y grueso, esta figura es parecida a la figura 1.9 del capítulo 1, donde se detalla las zonas de humedecimiento en un suelo no saturado.

En el tercer día, se agregaron otros 4 litros de agua para observar la barrera capilar entre los suelos de grano fino y grueso (ver figura 4.10).



Figura 4.10. Formación de la barrera capilar

Se puede observar que el tinte se acumula entre los dos materiales formando una línea o barrera entre éstos. También se aprecia que la figura 4.4 se parece a la figura 1.10 del capítulo 1, en cuanto a la forma del cambio de flujo y se cumple que la capa de grano fino tiene mayor contenido de humedad.

En el quinto día se midió la percolación acumulada que fue de 250 ml, que representa el 3.1% del total que fue de 8 litros (ver figura 4.11).

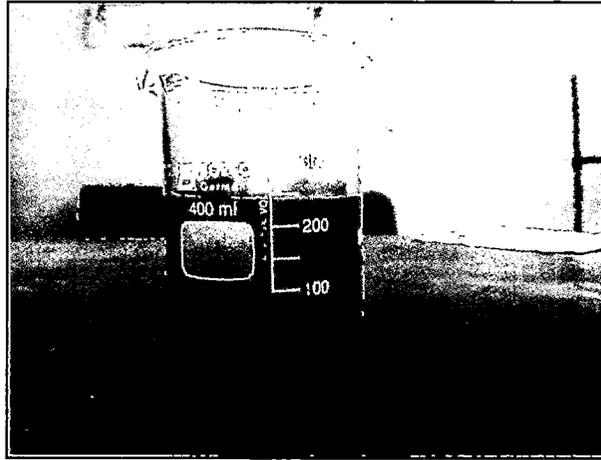


Figura 4.11. Percolación de agua a través del sistema de cobertura

Para finalizar se excavó en el sistema de cobertura, para ver la saturación de los materiales (ver figura 4.12).



Figura 4.12. Retención de agua del sistema de cobertura

Se aprecia que el material de grano fino retiene más agua que el material de grano grueso.

## **CAPÍTULO V.**

### **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE COBERTURA CON EL SOFTWARE VADOSE/W**

En este capítulo se modelará con el software VADOSE/W los sistemas o modelos de cobertura, con la finalidad de analizar las percolaciones que ingresan al depósito de desmonte y los perfiles de saturación de los suelos.

Los modelos de cobertura variarán de espesores de capas, presión de poros negativa y la curva de conductividad hidráulica (o modelo matemático). Por último estos resultados serán calibrados con el factor de ajuste del capítulo 4, para tener una mayor certeza en los resultados.

#### **5.1. BREVE RESUMEN DE LOS SISTEMAS DE COBERTURAS**

El proyecto se encuentra ubicado en Perú, en el departamento y provincia de Huancavelica.

La mina durante su operación extrajo minerales desde su fundación de rocas volcánicas y sedimentarias.

Los ensayos ácido base (ABA), indican que los materiales o desmonte de mina generarán drenaje ácido.

Para determinar el mejor esquema de cierre a futuro del depósito de desmonte de mina, se optará por las coberturas de barrera capilar doble, las cuales tendrán las siguientes capas: GP – GC desmonte de mina lavado, que servirá como cimentación para el sistema de cobertura; CL capa de retención de humedad, que servirá como almacén para las aguas que ingresan al sistema de cobertura y se mantendrá húmedo con la finalidad de evitar la migración de oxígeno; y finalmente SC capa de almacenamiento, que servirá para proteger al material de retención de humedad contra el desecamiento, erosión y evaporación.

Para la evaluación de los sistemas de cobertura, se utilizará estaciones meteorológicas cercanas a la zona del proyecto y datos de permeabilidad saturada de los materiales que conforman el sistema de cobertura. Serán 10 sistemas de cobertura, los cuales son clasificados de la siguiente manera:

Los modelos de cobertura del 1 al 4, se variará la capa de retención de humedad y se mantendrá constante los demás parámetros como capa de almacenamiento (SC), la presión de poros y los modelos matemáticos a utilizarse.

- Los modelos de cobertura 5 y 6 se variarán la capa de almacenamiento y se mantendrá constante los demás parámetros.
- Los modelos de cobertura 7 y 8 se variarán la presión de poros y se mantendrá constante los demás parámetros.
- Los modelos de cobertura 9 y 10 se variarán los modelos matemáticos y se mantendrá constante los demás parámetros.

Para finalizar se podrá comparar la sensibilidad de la percolación del agua a través de los modelos de cobertura de la siguiente manera:

- De los modelos de 1 al 4, se observará la variación de la percolación debido a la variación de la capa de retención de humedad; se tomarán los modelos que solo permitan el paso de percolación menor igual al 3% de la precipitación total.
- De los modelos de 1, 5 y 6, se observará la variación de la percolación debido a la variación de la capa de almacenamiento; se tomarán los modelos que solo permitan el paso de percolación menor igual al 3% de la precipitación total.
- De los modelos de 2, 7 y 8, se observará la variación de la percolación debido a la variación de la presión de poros; se tomarán los modelos que solo permitan el paso de percolación menor igual al 3% de la precipitación total.

- De los modelos de 9 y 10, se observará la variación de la percolación debido a la variación del modelo matemático, que es lo mismo decir la variación de la curva de conductividad hidráulica; se tomarán los modelos que solo permitan el paso de percolación menor igual al 3% de la precipitación total.

## 5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS O SISTEMAS DE COBERTURA

Para el modelamiento se consideró los siguientes parámetros del VADOSE/W:

- Se trabajó con la licencia estudiantil, quiere decir que existe una limitación en la cantidad de elementos finitos y modelos térmicos; por lo cual tiene un mayor margen de error.
- Se trabajó con el modelo "Transient Coupled" o Modelo Transitorio,
- No se consideró tabla de agua.
- Todos los materiales trabajaron con el modelo térmico simple.
- Para todos los materiales se consideraron las siguientes propiedades térmicas:

### Conductividad Térmica

Congelado: 150 kJ/days/m/°C

No Congelado: 125 kJ/days/m/°C

### Capacidad volumétrica de calor

Congelado: 2300 kJ/m<sup>3</sup>/°C

No Congelado: 2500 kJ/m<sup>3</sup>/°C

- Propiedades del Gas: 0 g/m<sup>3</sup>
- Para las condiciones de Borde solo se consideró Clima.

## 5.3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

### 5.3.1. Parámetros Geotécnicos

Los parámetros de cada material utilizado en el diseño de la cobertura se presentan en el cuadro 5.1. La conductividad hidráulica saturada es resultado de

ensayos de laboratorio (ver anexo 1). Además los parámetros de valor de entrada de aire y valor de entrada de agua fueron estimados en base a las propiedades de cada material, utilizando las funciones de contenido de agua existentes en el software. Para finalizar la función de permeabilidad fue determinada utilizando el modelo de Van Genuchten o Fredlund (según el tipo de modelo de cobertura).

Cuadro 5.1. Propiedades de los materiales para el diseño de la cobertura

Material	Símbolo	N	VEA	VEW	Ks (cm/s)
Capa de Almacenamiento	SC	0.29	2.5	80	1.2E-03
Capa de Retención de Humedad	CL	0.37	20	2000	5.45E-07
Depósito de desmonte	GP-GC	0.12	1	20	3.0E-04

n: Porosidad efectiva (vol/vol) VEA: Valor de Entrada de Aire (kPa)  
VEW: Valor de Entrada de Agua (kPa) Ks: Conductividad Hidráulica Saturada (cm/s)

Fuente: Elaboración propia

Las funciones de las curvas de retención de agua de los materiales que conforman el sistema de cobertura (contenido volumétrico vs matriz de succión en escala logarítmica), muestran que la capa de retención de humedad tiene mayor contenido de agua y el material de desmonte de mina tiene el contenido de agua menor a todos los materiales de sistema de cobertura (ver figura 5.1).

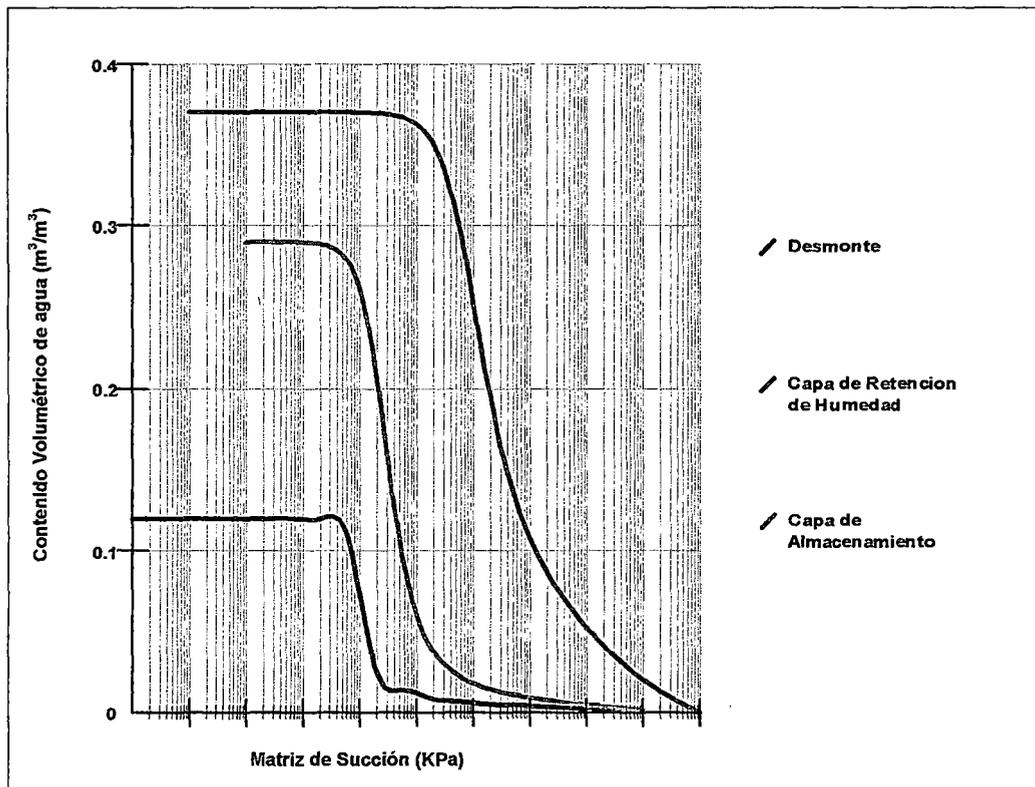


Figura 5.1. Características de las Curvas de Retención de Agua

Fuente: Elaboración propia y datos de laboratorio

Las curvas de conductividad hidráulica de los materiales que conforman el sistema de cobertura (contenido volumétrico vs matriz de succión, ambas en escala logarítmica), muestran que la curva del desmante es la que tiene mayor permeabilidad, mientras que la curva de la capa de retención de humedad es la que tiene menor permeabilidad (ver figura 5.2).

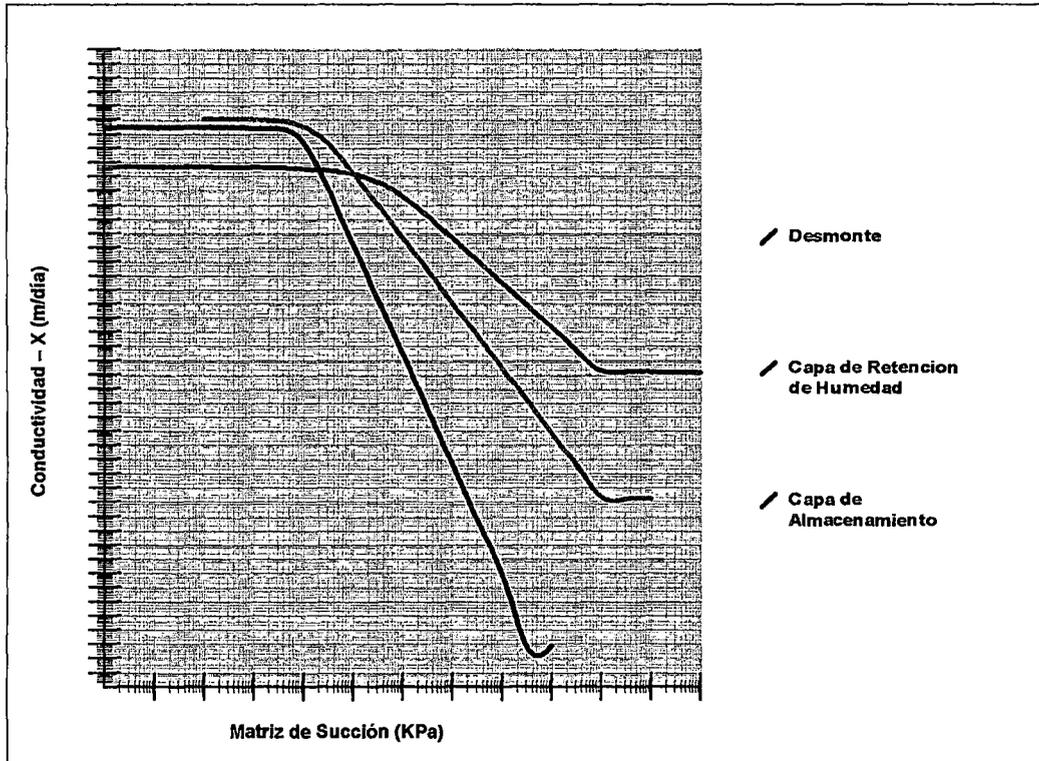


Figura 5.2. Características de las Curvas de Conductividad Hidráulica

Fuente: Elaboración propia y datos de laboratorio

### 5.3.2. Parámetros Climáticos

El modelo climático utilizado para evaluar las condiciones de flujo de la cobertura existente es de 90 días, son los tres primeros meses con las mayores precipitaciones al resto del año, que incluye el año de máxima precipitación total mensual (1981). Este dato climático y otros como de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento corresponden a las Estaciones Huachocolpa, Tunel Cero y Lircay, las cuales están cercanas a la zona de estudio (ver cuadro 5.2).

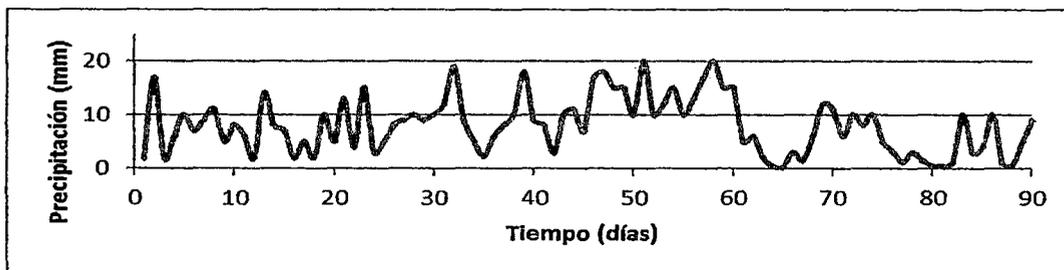
La evaporación actual fue estimada por el programa VADOSEW (GEO-SLOPE, 2007), considerando  $-12^{\circ}58'$  de Latitud, con datos promedios de humedad relativa, temperatura y velocidad del viento.

Cuadro 5.2. Parámetros climáticos

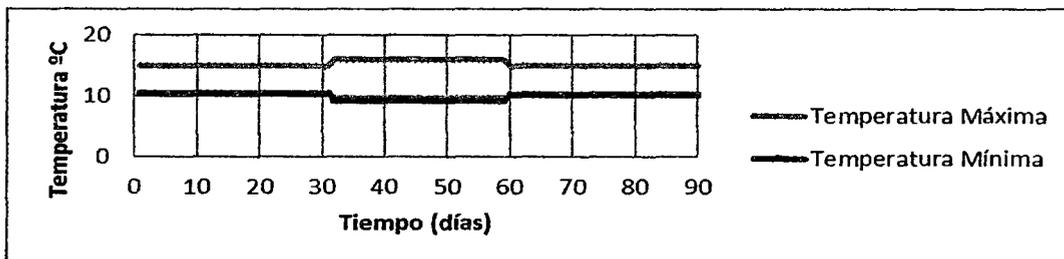
Parámetros Climáticos	MESES		
	Enero	Febrero	Marzo
Precipitación (mm)	235.8	332.2	154.9
Temperatura (°)	12.7	12.6	12.6
Humedad relativa (%)	75	76	79
Velocidad del viento (m/s)	2.7	2.6	2.7

Fuente: Elaboración propia y datos del Senamhi

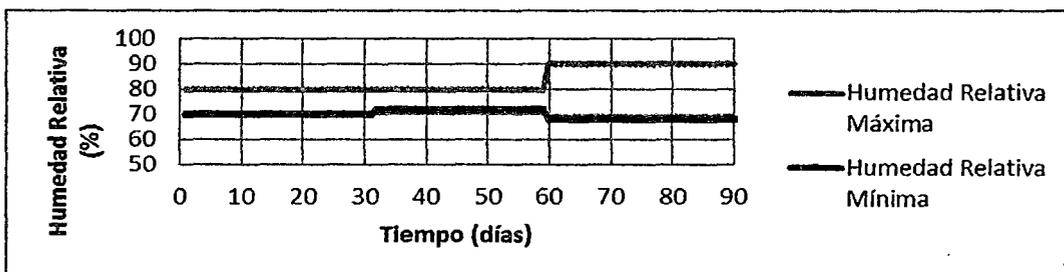
Las Figuras meteorológicas describen la precipitación máxima mensual de una historia de datos, las temperaturas máximas y mínimas, humedades relativas máximas y mínimas, y la velocidad del viento mensual (ver figura 5.3).



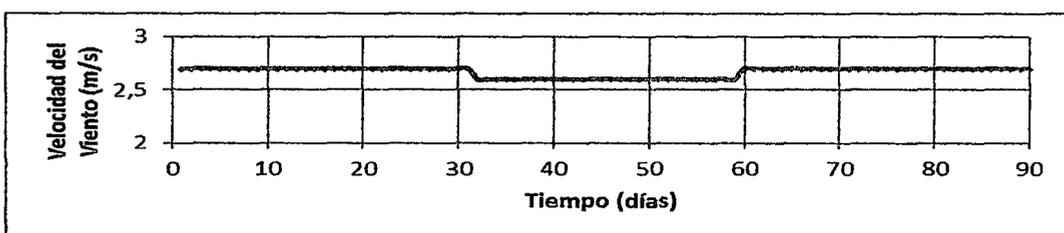
a) Precipitación total mensual



b) Temperatura mensual



c) Humedad relativa Mensual



d) Velocidad del viento Mensual

Figura 5.3. Características climáticas de los sistemas o modelos de cobertura, a) Precipitación total mensual, b) Temperatura mensual, c) Humedad relativa Mensual y d) Velocidad del viento Mensual.

Fuente: Elaboración propia y datos del Senamhi

#### 5.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO LA CAPA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

En este capítulo se presenta la sensibilidad de la percolación hacia el desmonte, debido a la variación de los espesores de la capa de retención de humedad en los modelos presentados.

##### 5.4.1. Modelo de Cobertura 1: Capa de retención de humedad de 0.25 m

El modelo de cobertura 1 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.25 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.3 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.3. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 1

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	25	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.4).

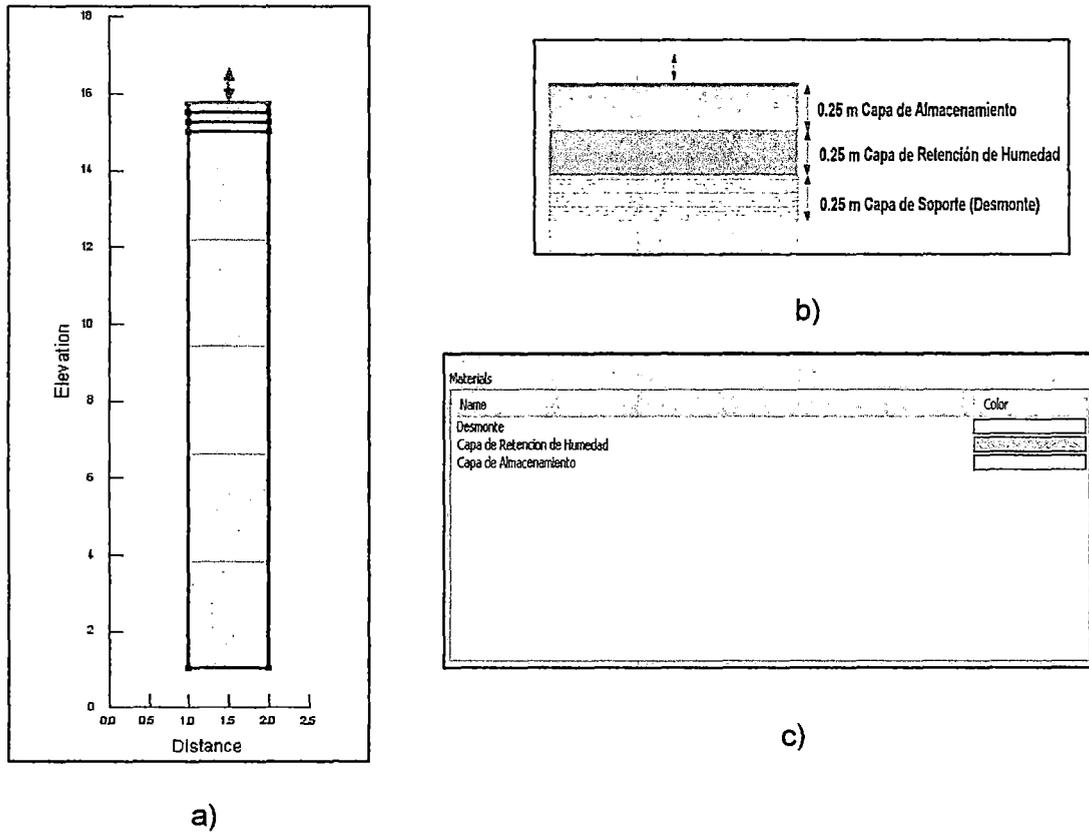


Figura 5.4. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 1, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura, c) materiales que conforman el sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.4.

La malla de elementos finitos consta de 82 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.4 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.4. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 1

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	15	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 13.4 mm por mes, el cual corresponde a 5.56 % del total de precipitación (ver cuadro 5.5).

Cuadro 5.5. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 1

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.86	39.27
Percolación	40.18	5.56

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.5 y 5.6 respectivamente.

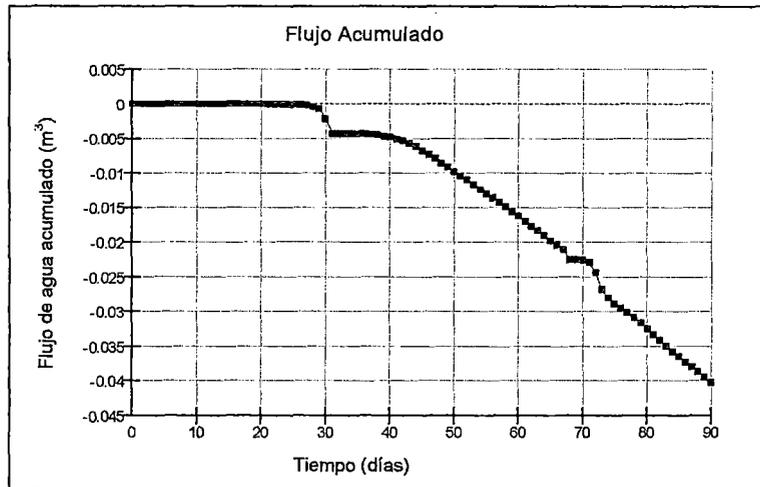


Figura 5.5. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 1 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

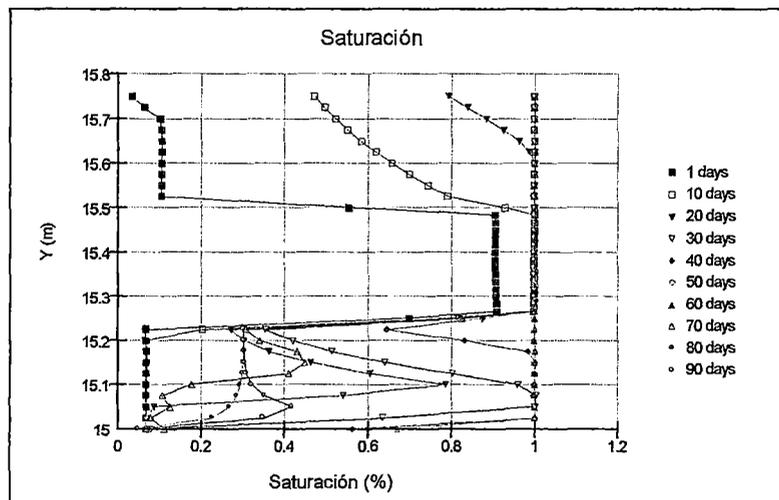


Figura 5.6 Perfil de saturación del modelo de cobertura 1 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 40.18 mm (ver cuadro 5.5) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 56.25 mm.

Para finalizar el modelo 1, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 18.75 mm por mes, el cual

corresponde a 7.78 % del total de precipitación (ver cuadro 5.5), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

#### 5.4.2. Modelo de Cobertura 2: Capa de retención de humedad de 0.40 m

El modelo de cobertura 2 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.40 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.6 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.6. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 2

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	40	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.7).

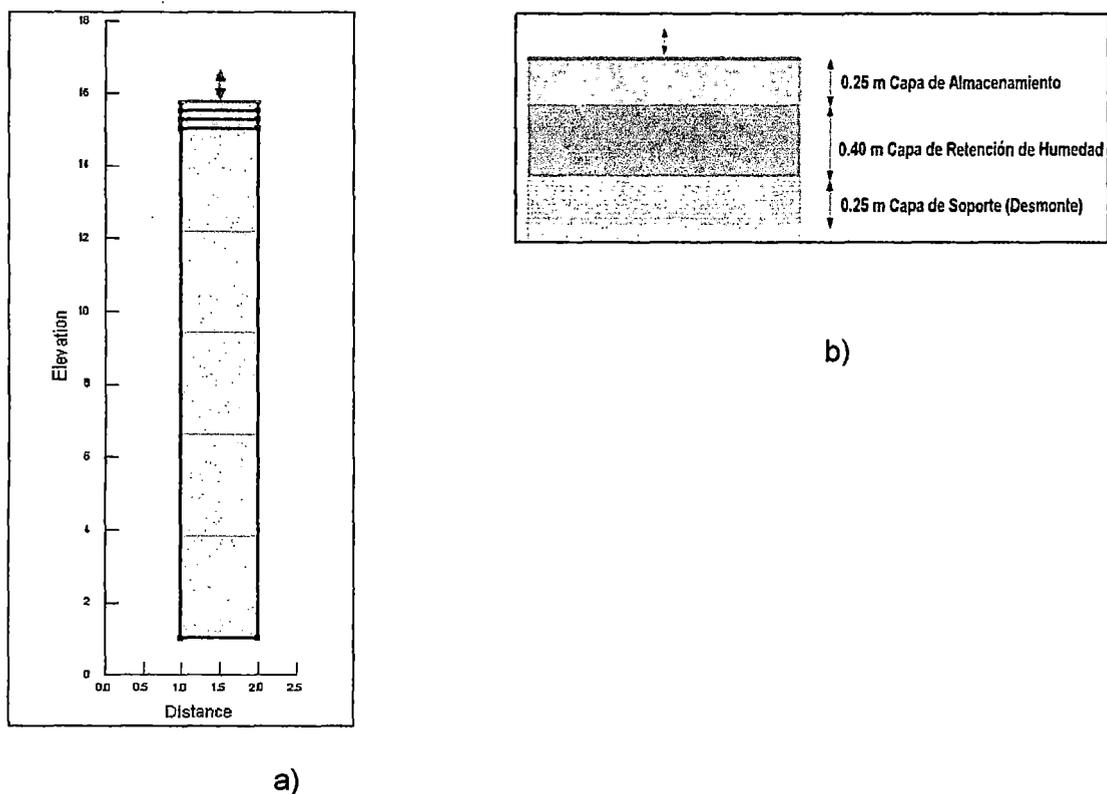


Figura 5.7. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 2, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.7.

La malla de elementos finitos consta de 92 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.7 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.7. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 2

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	20	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmante	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 11.65 mm por mes, el cual corresponde a 5.56 % del total de precipitación (ver cuadro 5.8).

Cuadro 5.8. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 2

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.84	39.27
Percolación	34.96	4.84

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.8 y 5.9 respectivamente.

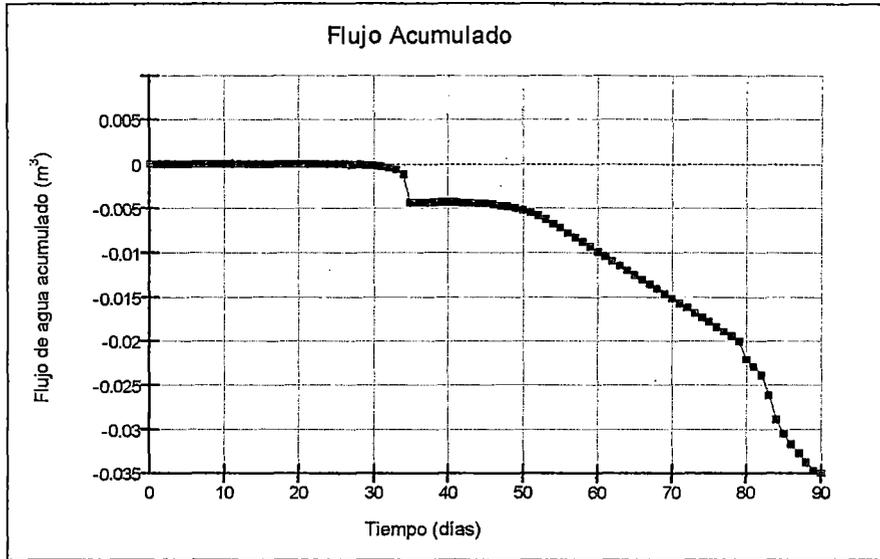


Figura 5.8. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 2 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

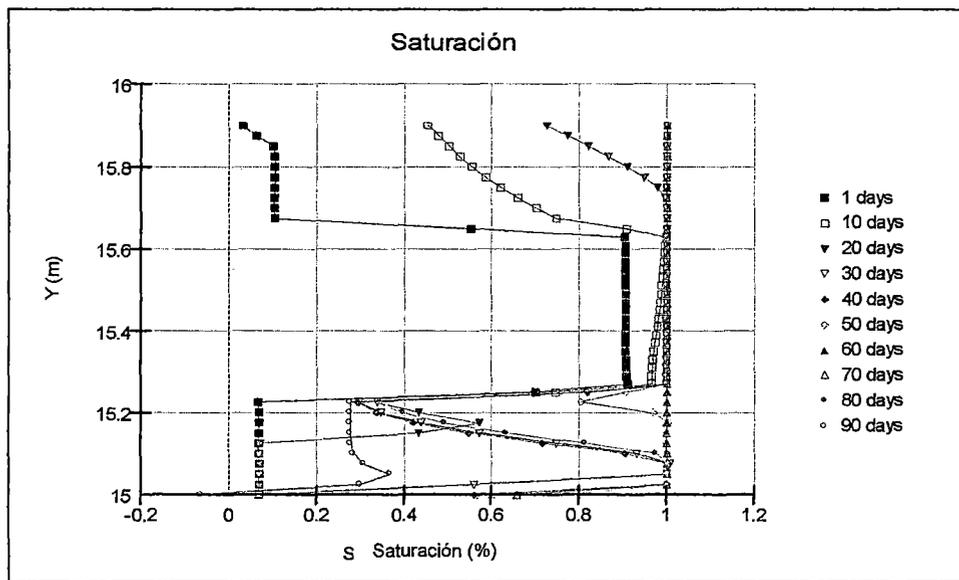


Figura 5.9. Perfil de saturación del modelo de cobertura 2 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 34.96 mm (ver cuadro 5.8) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 48.9 mm.

Para finalizar el modelo 2, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 16.3 mm por mes, el cual corresponde a 6.76 % del total de precipitación (ver cuadro 5.8), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

#### 5.4.3. Modelo de Cobertura 3: Capa de retención de humedad de 0.60 m

El modelo de cobertura 3 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.40 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.9 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.9. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 3

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	60	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.10).

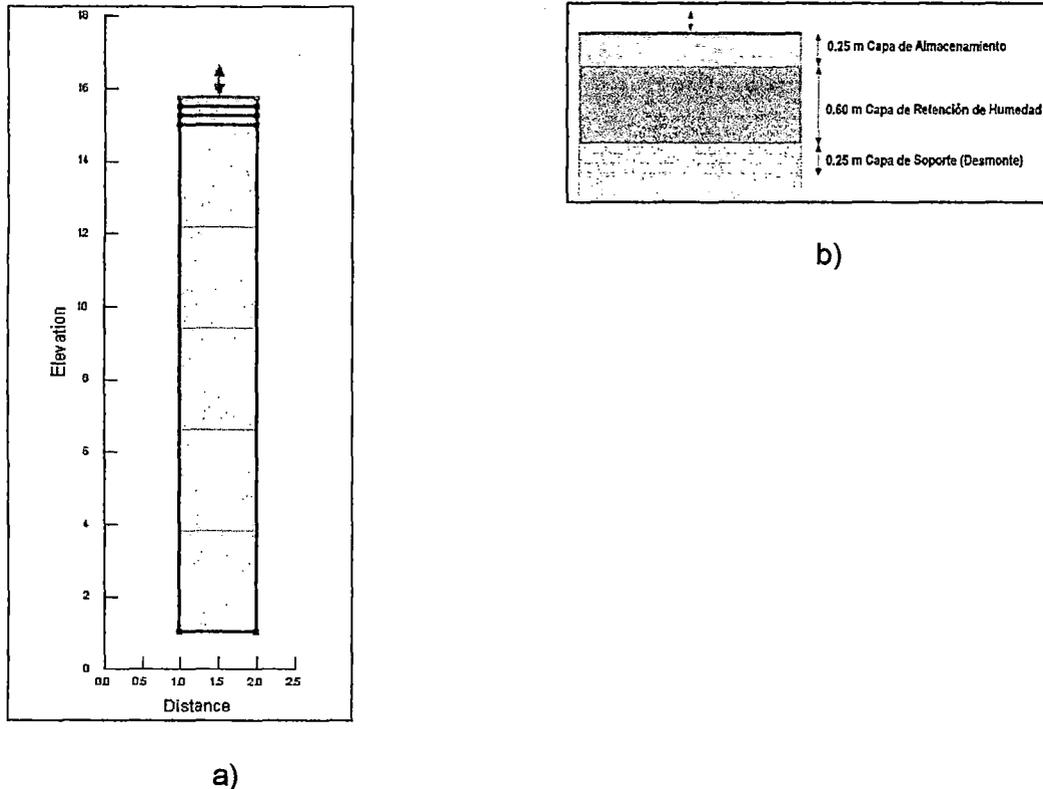


Figura 5.10. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 3, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.10.

La malla de elementos finitos consta de 112 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.10 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.10. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 3

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	30	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 4.65 mm por mes, el cual corresponde a 1.93 % del total de precipitación (ver cuadro 5.11).

Cuadro 5.11. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 3

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.81	39.27
Percolación	13.96	1.93

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.11 y 5.12 respectivamente.

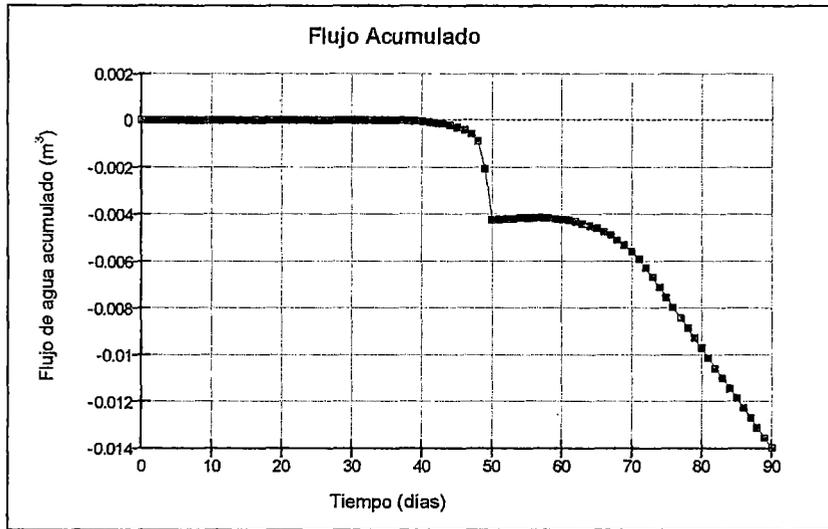


Figura 5.11. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 3 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

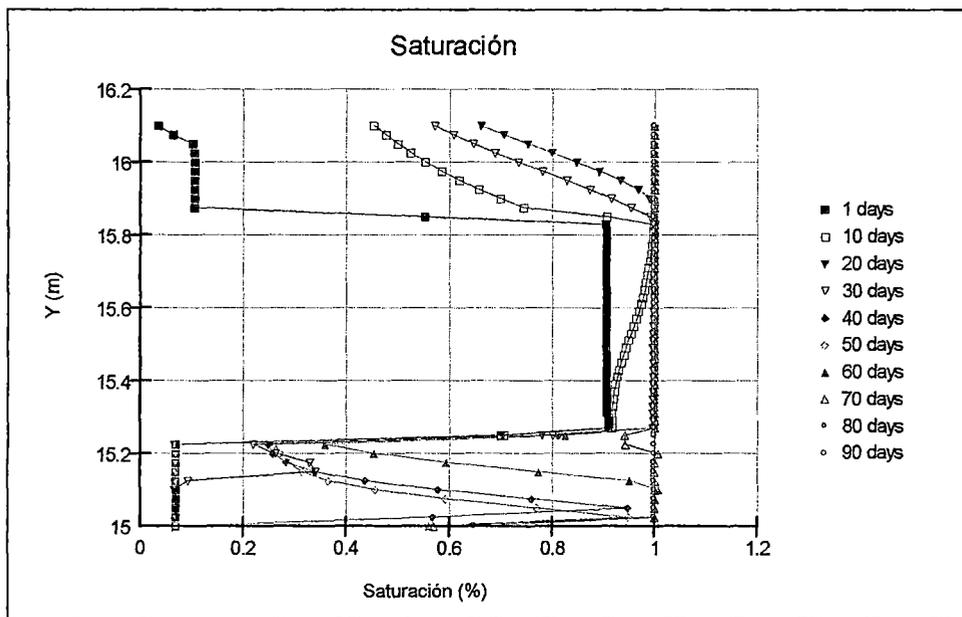


Figura 5.12. Perfil de saturación del modelo de cobertura 3 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 13.96 mm (ver cuadro 5.11) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 19.5 mm.

Para finalizar el modelo 3, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 6.5 mm por mes, el cual corresponde a 2.7 % del total de precipitación (ver cuadro 5.11).

#### 5.4.4. Modelo de Cobertura 4: Capa de retención de humedad de 0.80 m

El modelo de cobertura 4 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.80 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.12 se presentan detalles y especificaciones de cada material

Cuadro 5.12. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 4

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	80	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla

de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.13).

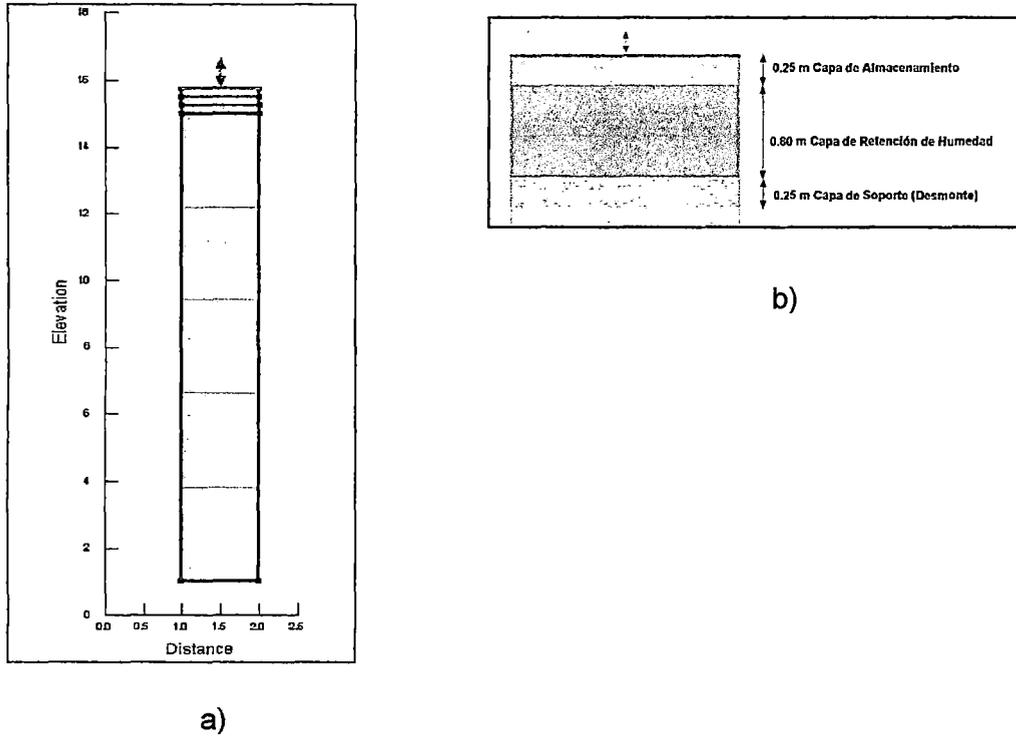


Figura 5.13. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 4, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.13.

La malla de elementos finitos consta de 132 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.13 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.13. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 4

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	40	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 4.4 mm por mes, el cual corresponde a 1.83 % del total de precipitación (ver cuadro 5.14).

Cuadro 5.14. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 4

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.81	39.27
Percolación	13.22	1.83

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.14 y 5.15 respectivamente.

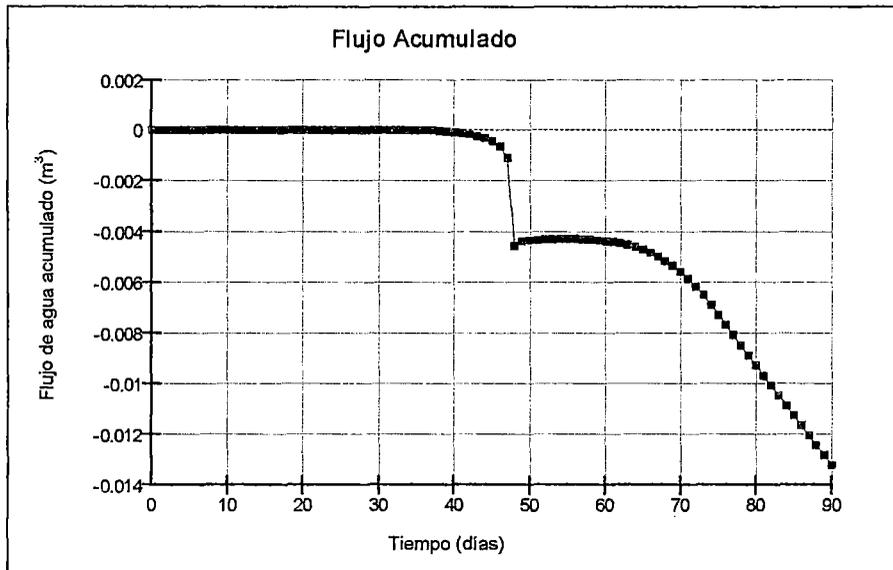


Figura 5.14. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 4 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

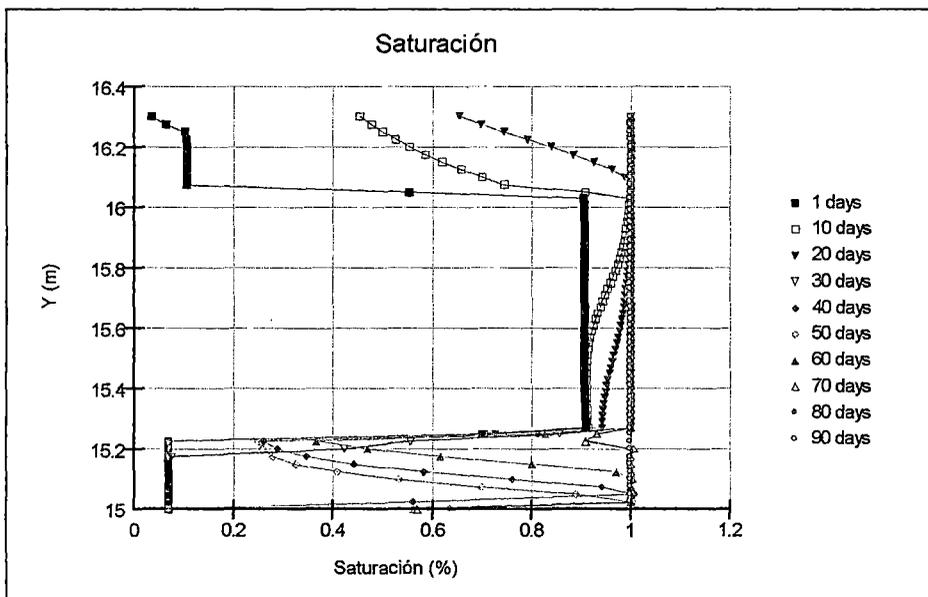


Figura 5.15. Perfil de saturación del modelo de cobertura 4 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 13.22 mm (ver cuadro 5.14) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 18.5 mm.

Para finalizar el modelo 4, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 6.17 mm por mes, el cual corresponde a 2.56 % del total de precipitación (ver cuadro 5.14).

#### 5.4.5. Resultados y Comentarios

El resumen de los modelamientos correspondientes a la variación de la capa de retención de humedad se presenta en el Cuadro 5.15.

Cuadro 5.15. Resumen de resultados de percolación corregidos debido a la variación de la capa de retención de humedad.

Modelos	Descripción (variación de la capa de retención de humedad)	Percolación hacia el Desmonte (mm)	Porcentaje respecto a la Precipitación Total
Modelo 1	0.25 m	56.3	7.78 %
Modelo 2	0.40 m	48.9	6.76 %
Modelo 3	0.60 m	19.5	2.70 %
Modelo 4	0.80 m	18.5	2.56 %

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir que a medida que se aumenta el espesor de la capa de retención de humedad, la percolación hacia el depósito de desmonte disminuye significativamente.

La siguiente figura 5.16 muestra la variación de los resultados en porcentaje de percolación para diferentes valores de la capa de retención de humedad y manteniendo constante las otras capas, la presión de poros y los modelos matemáticos.

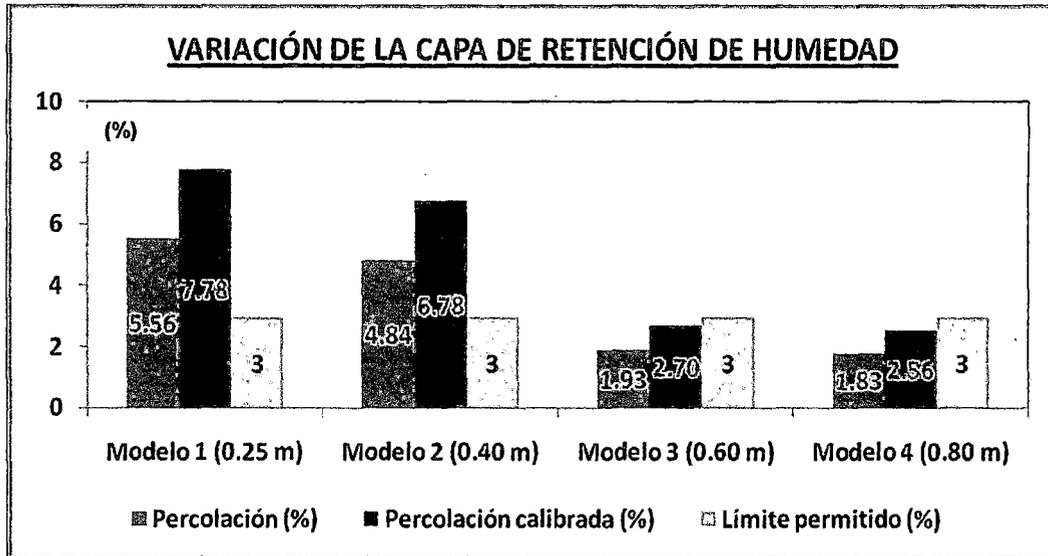


Figura 5.16. Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación de la capa de retención de humedad.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, a medida que se incrementa el espesor de la capa de retención disminuye el porcentaje de percolación mostrando un comportamiento no lineal que puede converger en un valor de espesor óptimo para el diseño.

A partir de los modelo 3 y 4, la percolación disminuye de manera mínima, quiere decir que los espesores óptimos para estas condiciones serán mayores de 0.6 m.

La migración de gas (oxígeno) que ingresa al depósito de desmonte debe ser como máximo 0.03 de coeficiente de gas, para esto es necesario que la capa de retención de humedad se encuentre encima del 85% de saturación, las figuras 5.6, 5.9, 5.12 y 5.15 se presenta el perfil del grado de saturación de los modelos del 1 al 4, los cuales cumplen con este criterio.

Los modelos que cumplen con limitar la generación de drenaje ácido son los modelos 3 y 4.

## 5.5. ANALISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO LA CAPA DE ALMACENAMIENTO

En este capítulo se presenta las variaciones de la percolación hacia el desmonte que varía debido a los diversos espesores de la capa de almacenamiento, es decir muestra el análisis de sensibilidad debido a la variación de la capa de almacenamiento.

### 5.5.1. Modelo de Cobertura 5: Capa de almacenamiento de 0.60 m

El modelo de cobertura 5 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.60 m, seguido por 0.25 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.16 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.16. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 5

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	60	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	25	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmorte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.17).

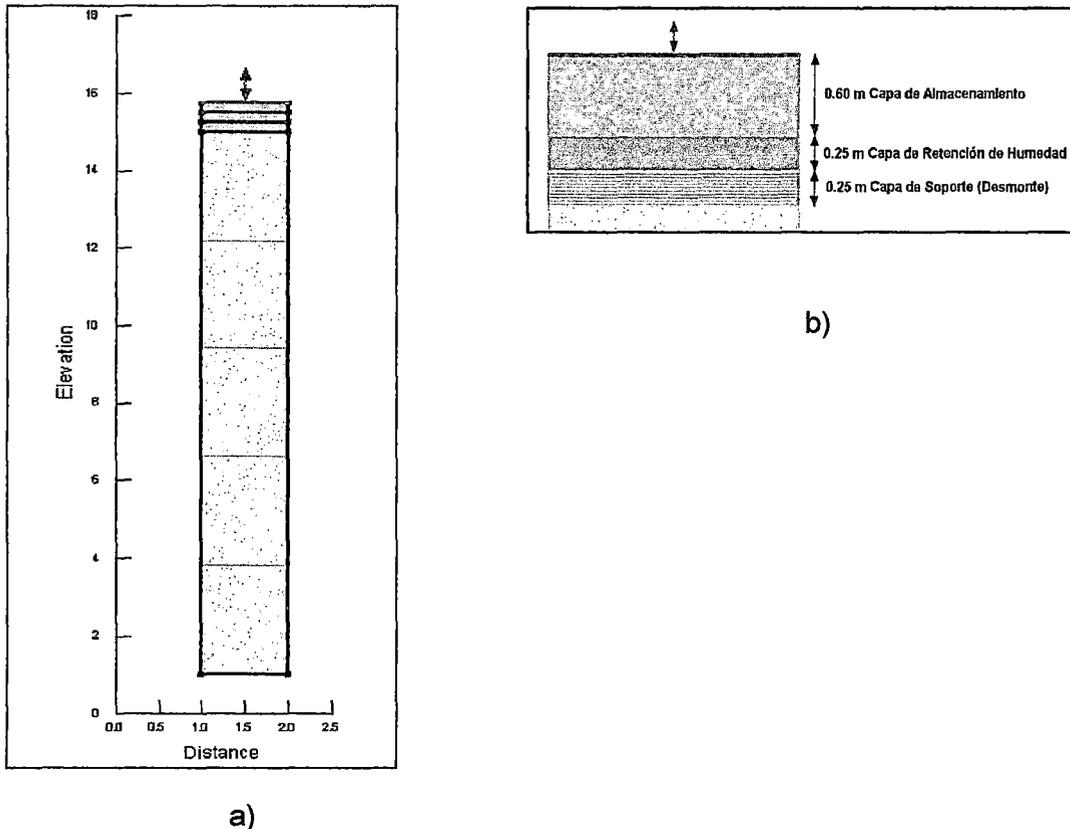


Figura 5.17. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 5, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.17.

La malla de elementos finitos consta de 112 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmorte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.17 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.17. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 5

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	30	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	10	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 13.64 mm por mes, el cual corresponde a 5.66 % del total de precipitación (ver cuadro 5.18).

Cuadro 5.18. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 5

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.76	39.27
Percolación	40.92	5.66

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.18 y 5.19 respectivamente.

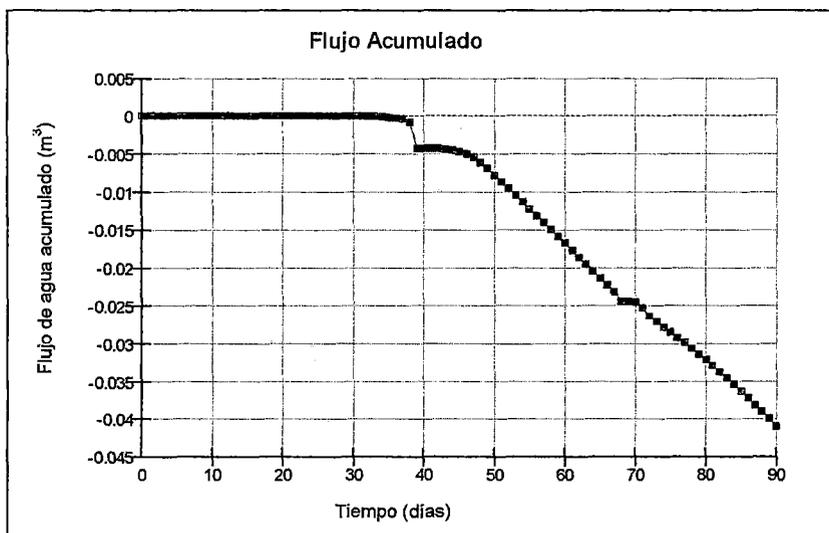


Figura 5.18. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 5 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

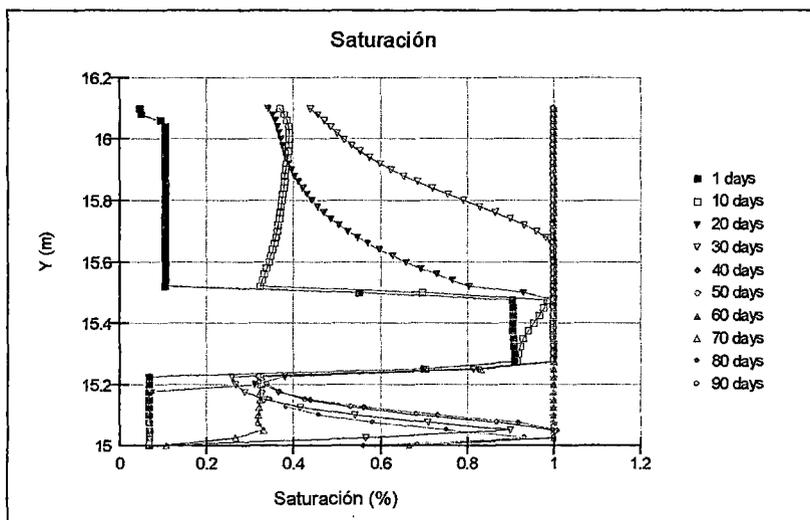


Figura 5.19. Perfil de saturación del modelo de cobertura 5 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 40.92 mm (ver cuadro 5.18) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 57.3 mm.

Para finalizar el modelo 5, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 19.1 mm por mes, el cual corresponde a 7.92 % del total de precipitación (ver cuadro 5.18), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

5.5.2. Modelo de Cobertura 6: Capa de almacenamiento de 0.80 m

El modelo de cobertura 6 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.80 m, seguido por 0.25 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.19 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.19. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 6

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	80	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	25	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla

de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.20).

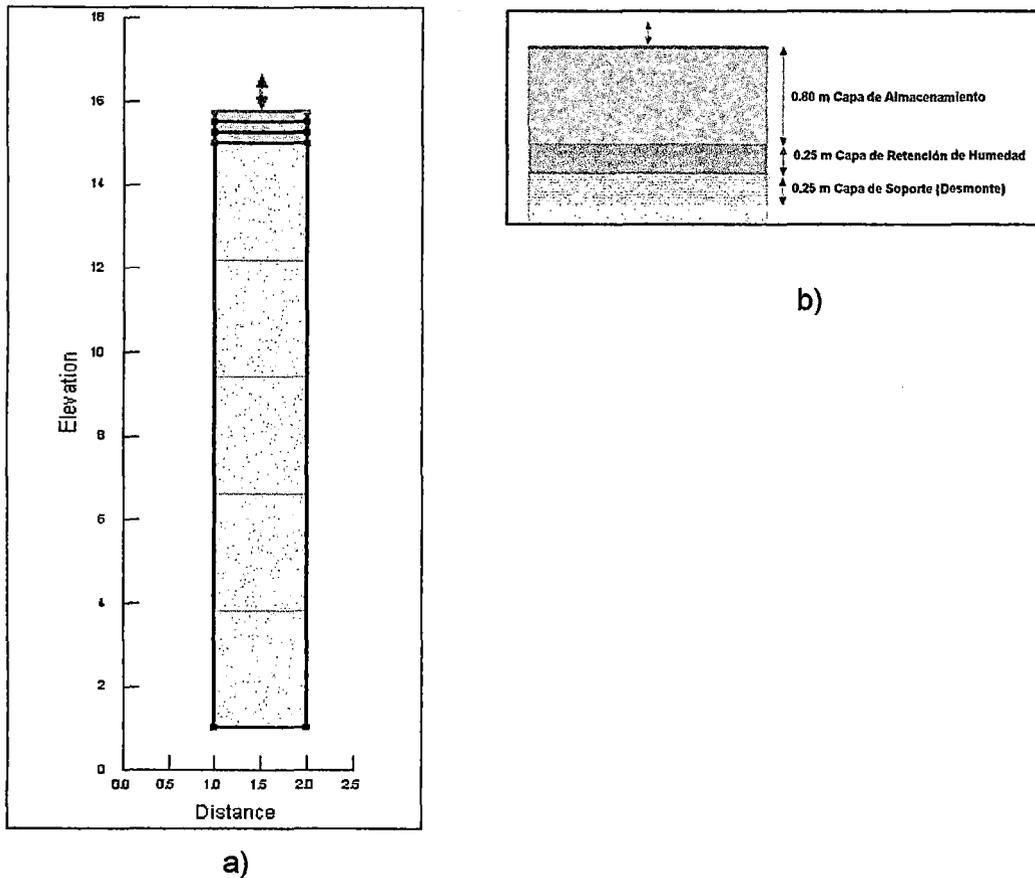


Figura 5.20. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 6, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.20.

La malla de elementos finitos consta de 132 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.20 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.20. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 6

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	40	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	10	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 10.53 mm por mes, el cual corresponde a 4.37 % del total de precipitación (ver cuadro 5.21).

Cuadro 5.21. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 6

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.76	39.27
Percolación	31.59	4.37

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.21 y 5.22 respectivamente.

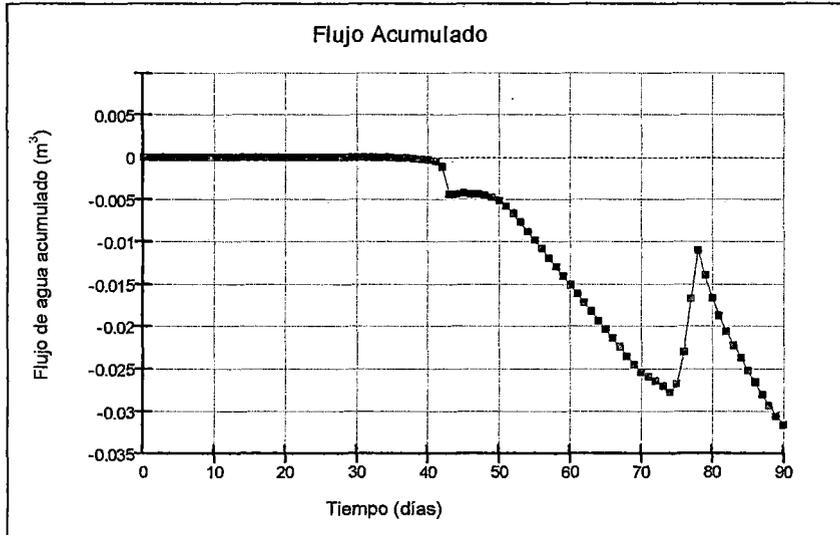


Figura 5.21. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 6 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

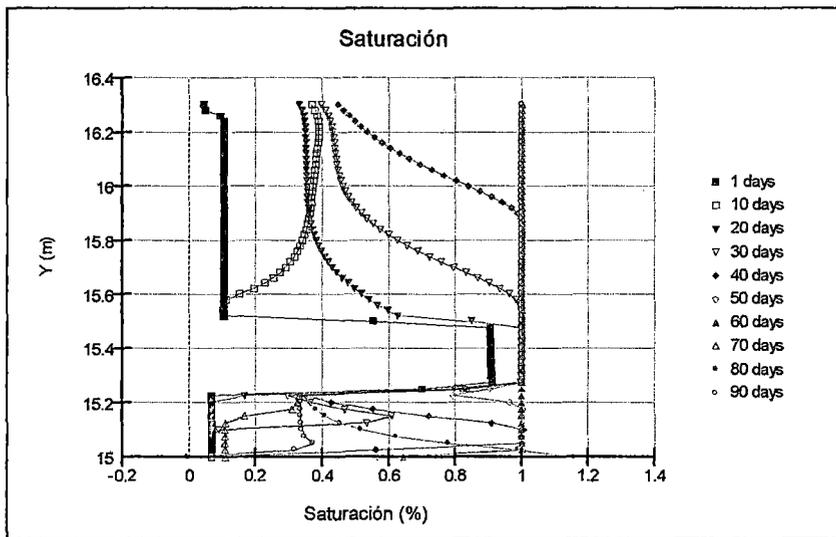


Figura 5.22. Perfil de saturación del modelo de cobertura 6 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 31.59 mm (ver cuadro 5.21) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 44.2 mm.

Para finalizar el modelo 6, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 14.74 mm por mes, el cual corresponde a 6.12 % del total de precipitación (ver cuadro 5.21), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

### 5.5.3. Resultados y Comentarios

El resumen de los modelamientos correspondientes a la variación de la capa de retención almacenamiento se presenta en el Cuadro 5.22.

Cuadro 5.22. Resumen de resultados de la variación de la Capa de almacenamiento.

Modelos	Descripción (variación de la capa de almacenamiento)	Percolación hacia el Desmonte (mm)	Porcentaje respecto a la Precipitación Total
Modelo 1	0.25 m	56.3	7.78 %
Modelo 5	0.60 m	57.3	7.9 %
Modelo 6	0.80 m	44.2	6.12 %

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro 5.22 se observa que a medida que aumenta el espesor de la capa de almacenamiento, la percolación hacia el depósito de desmonte disminuye de manera insignificante, quiere decir que la variación de los espesores de los suelos de grano grueso no influye en la percolación.

La siguiente figura 5.23 muestra la variación de los resultados en porcentaje de percolación para diferentes valores de la capa de almacenamiento y manteniendo constante las otras capas, la presión de poros y los modelos matemáticos.

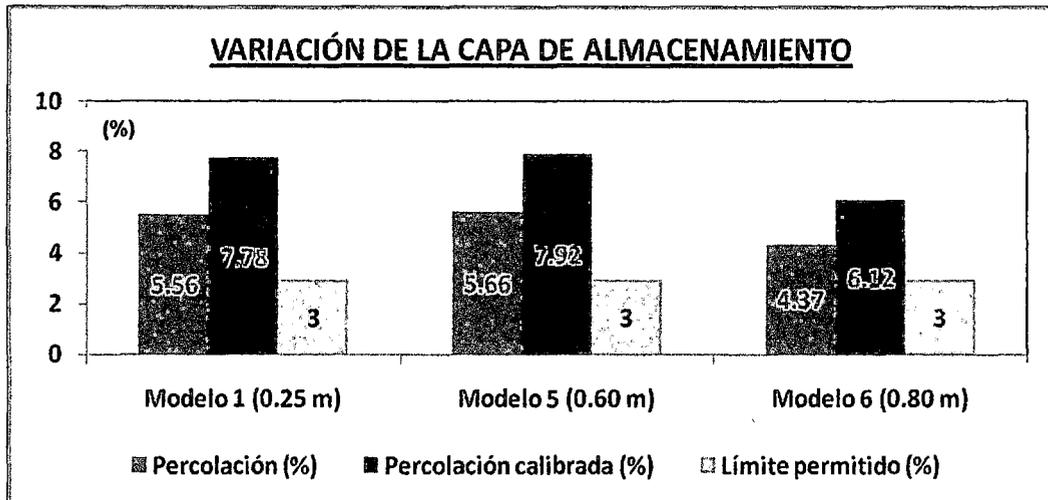


Figura 5.23. Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación de la capa de almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, a medida que se incrementa el espesor de la capa de almacenamiento a 0.60 m la percolación tiene un ligero aumento, pero si se aumenta la capa hasta 0.80 m la percolación disminuye. Se muestra un comportamiento no lineal, en el cual se tendría que aumentar la capa de almacenamiento hasta 0.80 para tener una ligera disminución en la percolación.

En todos los modelos 1, 5 y 6 la percolación disminuye de manera mínima y tiene magnitudes mayores al 3% del total de la precipitación, quiere decir que ninguno de estos modelos minimizará la generación de drenaje ácido.

La migración de gas (oxígeno) que ingresa al depósito de desmonte debe ser como máximo 0.03 de coeficiente de gas, para esto es necesario que la capa de retención de humedad se encuentre encima del 85% de saturación, las figuras 5.6, 5.19 y 5.22 se presenta el perfil del grado de saturación de los modelos 1, 5 y 6 los cuales cumplen con este criterio.

Para finalizar los resultados de porcentaje de percolación para diferentes valores de la capa de retención de almacenamiento, no presentan una tendencia definida, es por ello que incrementar el espesor de la capa no es recomendable.

## 5.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL PWP

En este capítulo se presenta las variaciones de las percolación hacia el desmonte que varía debido a la variación de las presiones de poro negativas o succiones de los materiales.

### 5.6.1. Modelo de Cobertura 7: Presión de poros (PWP) de -20 KPa

El modelo de cobertura 7 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.40 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.23 se presentan detalles y especificaciones de cada material

Cuadro 5.23. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 7

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	40	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmorte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.24).

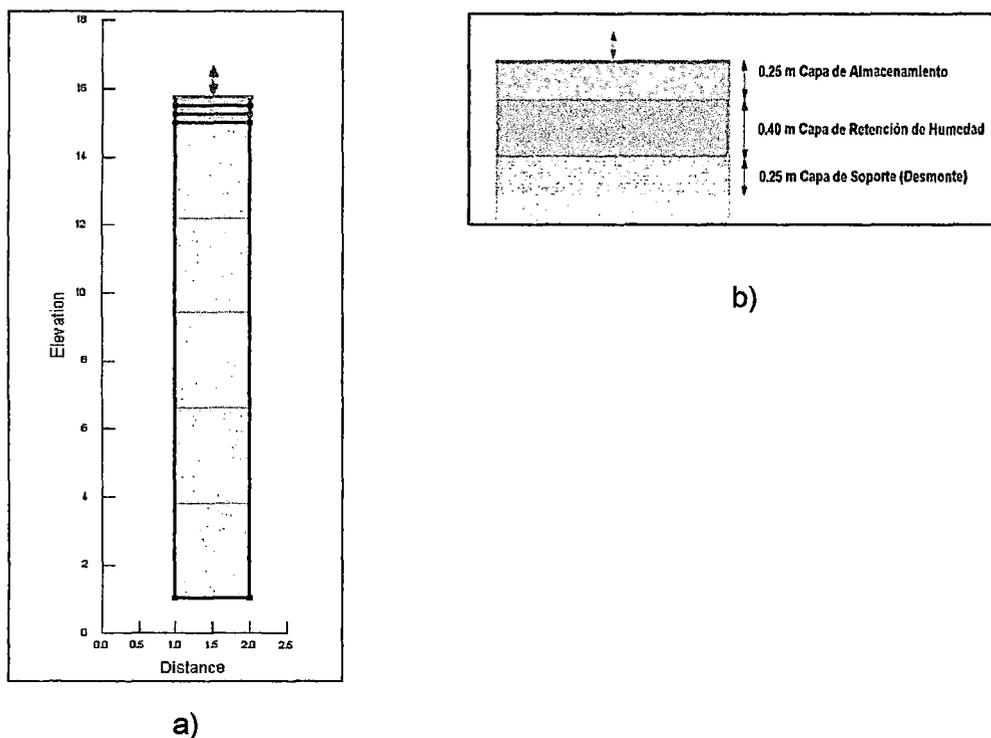


Figura 5.24. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 7, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.24.

La malla de elementos finitos consta de 92 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmorte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.24 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.24. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 7

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-20	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	20	-20	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 11.42 mm por mes, el cual corresponde a 4.74 % del total de precipitación (ver cuadro 5.25).

Cuadro 5.25. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 7

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.95	39.27
Percolación	34.26	4.74

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.25 y 5.26 respectivamente.

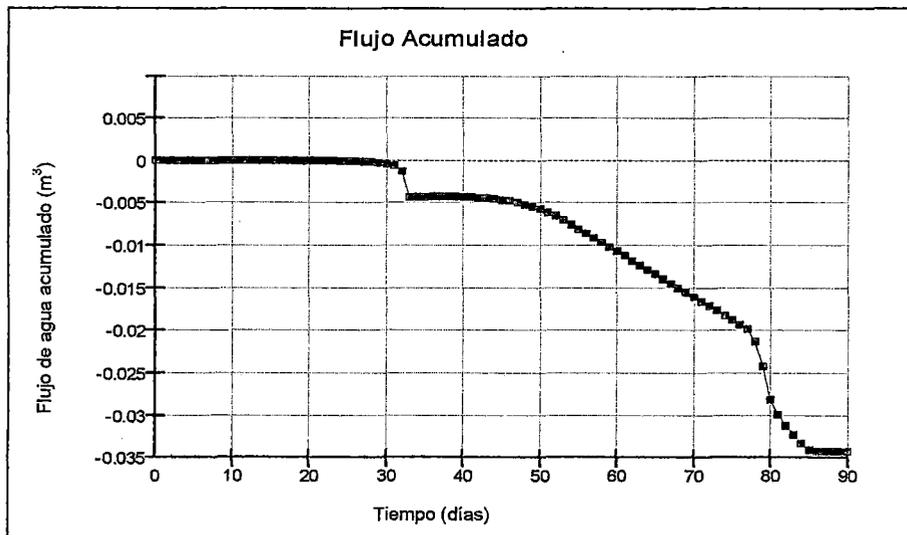


Figura 5.25. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 7 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

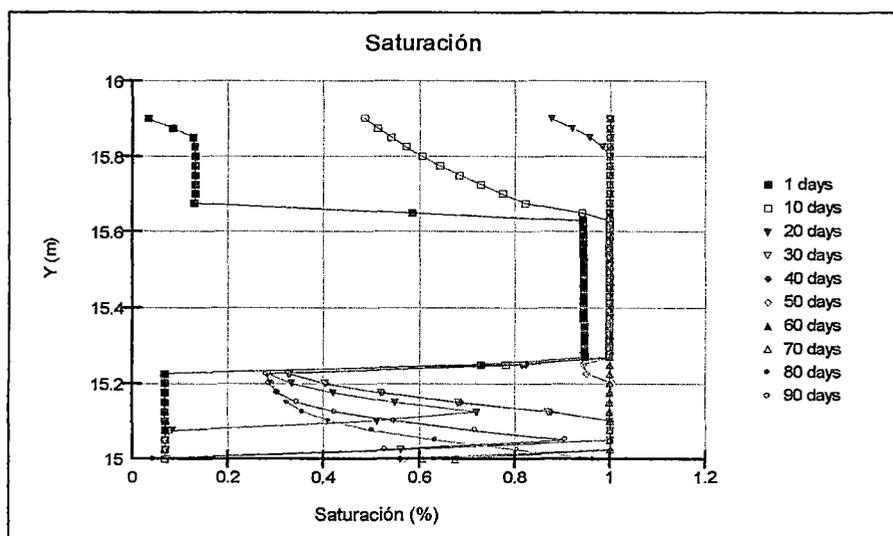


Figura 5.26. Perfil de saturación del modelo de cobertura 7 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 34.26 mm (ver cuadro 5.25) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 47.96 mm.

Para finalizar el modelo 7, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 15.99 mm por mes, el cual corresponde a 6.63 % del total de precipitación (ver cuadro 5.25), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

#### 5.6.2. Modelo de Cobertura 8: Presión de poros (PWP) de -10 KPa

El modelo de cobertura 8 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.40 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.26 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.26. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 8

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	40	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla

de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.27).

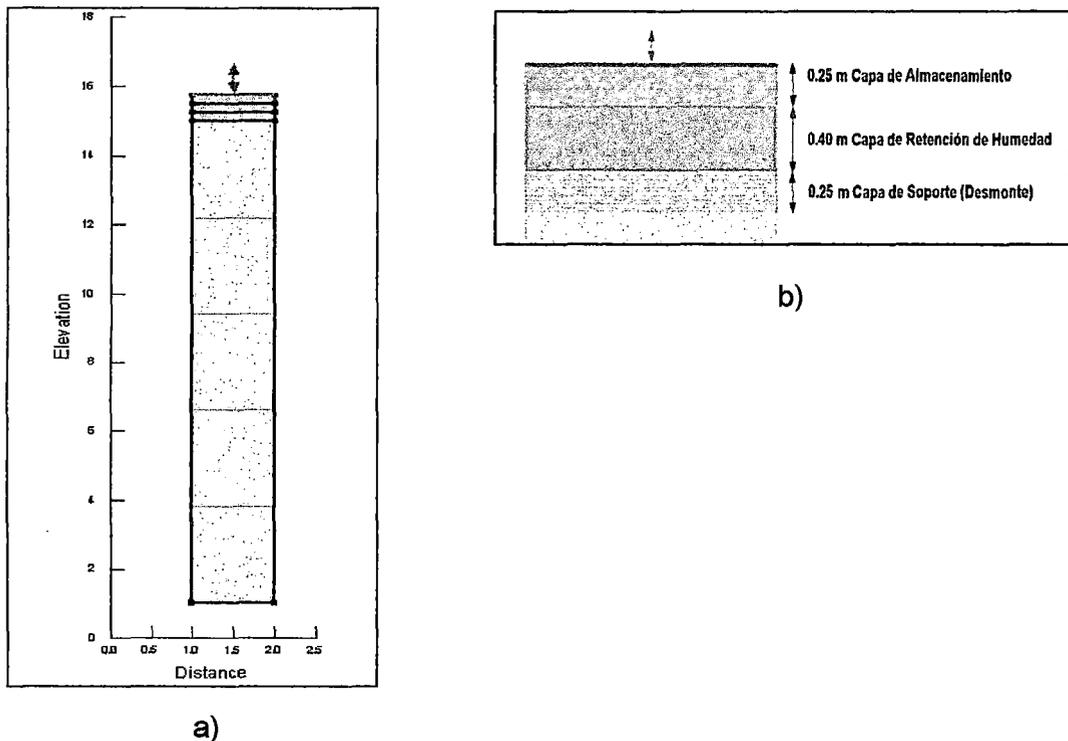


Figura 5.27. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 8, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.27.

La malla de elementos finitos consta de 92 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.27 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.27. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 8

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-10	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	20	-10	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-10	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 12.25 mm por mes, el cual corresponde a 5.08 % del total de precipitación (ver cuadro 5.28).

Cuadro 5.28. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 8

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.96	39.27
Percolación	36.75	5.08

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.28 y 5.29 respectivamente.

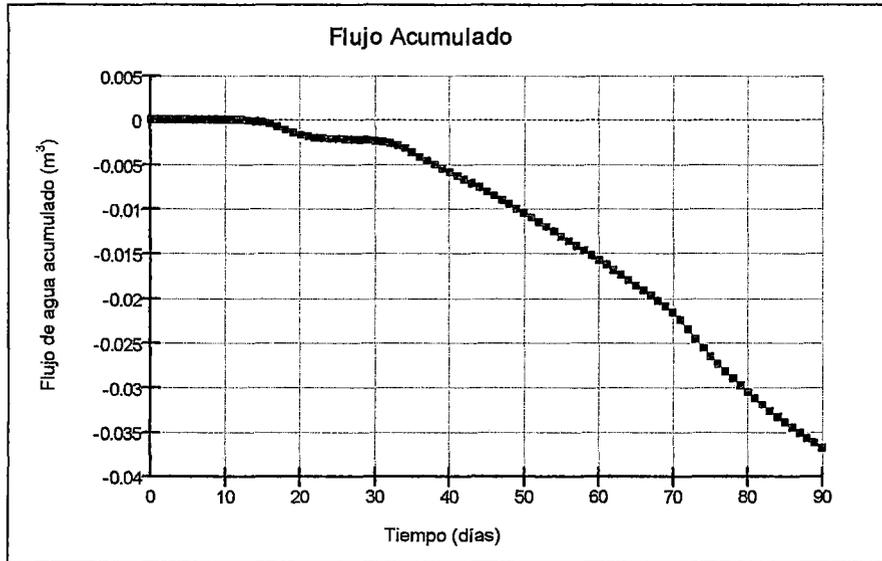


Figura 5.28. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 8.

Fuente: Elaboración propia.

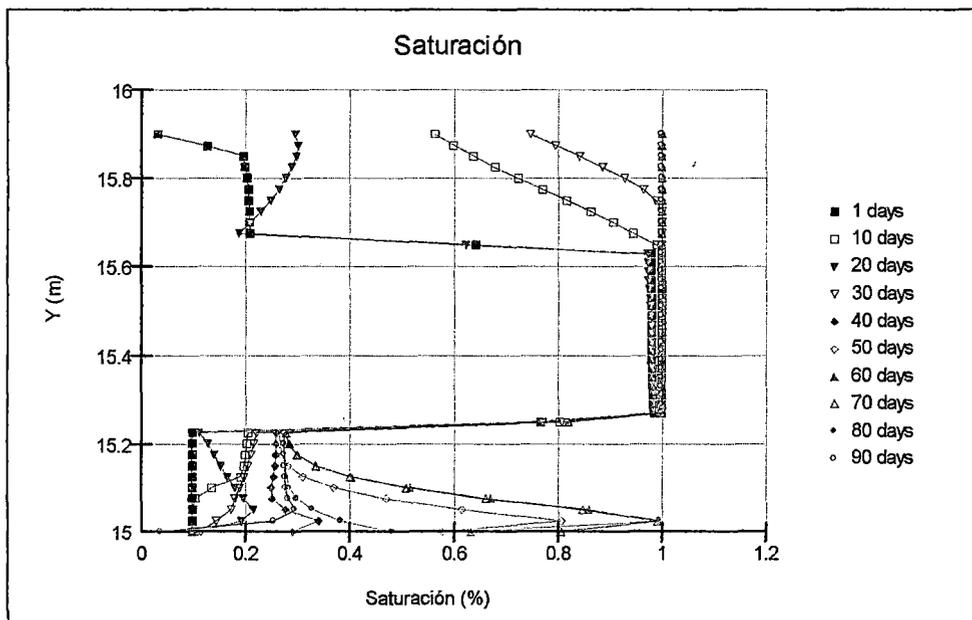


Figura 5.29. Perfil de saturación del modelo de cobertura 8 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 36.75 mm (ver cuadro 5.28) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 51.45 mm.

Para finalizar el modelo 8, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 17.15 mm por mes, el cual corresponde a 7.12 % del total de precipitación (ver cuadro 5.28), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

### 5.6.3. Resultados y Comentarios

El resumen de los modelamientos correspondientes a la variación de la presión de poros de agua (PWP) se presenta en el Cuadro 5.29.

Cuadro 5.29. Resumen de resultados de la variación de la presión de poros

<b>Modelos</b>	<b>Descripción (variación de la presión de poros)</b>	<b>Percolación hacia el Desmonte (mm)</b>	<b>Porcentaje respecto a la Precipitación Total</b>
Modelo 2	-30 KPa	48.9	6.76 %
Modelo 7	-20 KPa	47.96	6.63 %
Modelo 8	-10 KPa	51.45	7.12 %

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro 5.29 se observa que a medida que la presión de poros de agua aumenta, la percolación hacia el depósito de desmonte presenta una variación mínima, quiere decir que la variación de la presión de poros no influye mucho en la percolación de estos modelos para los rangos de -30 KPa a -10 KPa.

La siguiente figura 5.30 muestra la variación de los resultados en porcentaje de percolación para diferentes valores de presión de poros inicial de los materiales de la cobertura, manteniendo constante las capas y los modelos matemáticos.

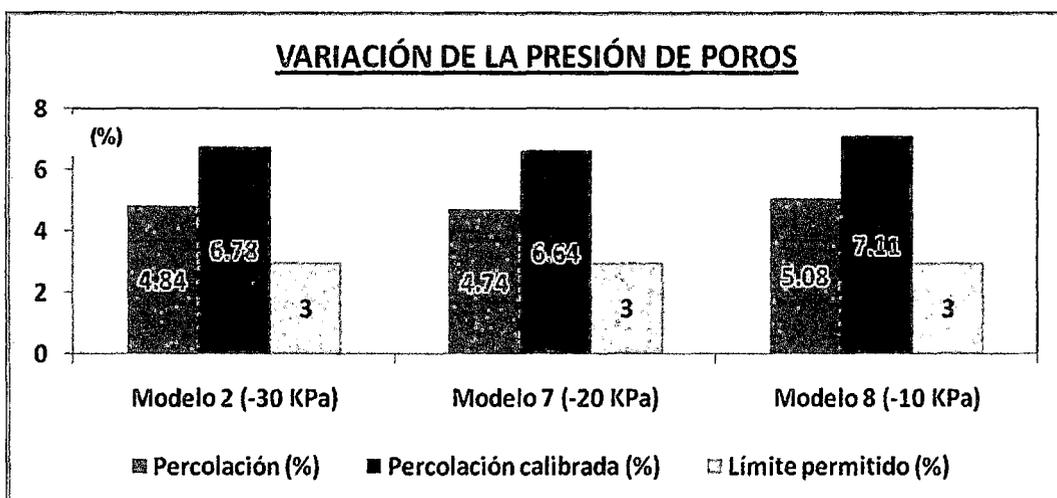


Figura 5.30. Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación de la presión de poros.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, a medida que se incrementa la presión de poros, la percolación tiene una ligera variación, pero no se aprecia una tendencia.

En todos los modelos 2, 7 y 8 la percolación disminuye de manera mínima y tiene magnitudes mayores al 3% del total de la precipitación, quiere decir que ninguno de estos modelos minimizará la generación de drenaje ácido.

La migración de gas (oxígeno) que ingresa al depósito de desmonte debe ser como máximo 0.03 de coeficiente de gas, para esto es necesario que la capa de retención de humedad se encuentre encima del 85% de saturación, las figuras 5.9, 5.26 y 5.29 se presenta el perfil del grado de saturación de los modelos 2, 7 y 8 los cuales cumplen con este criterio.

## 5.7. ANALISIS DE SENSIBILIDAD VARIANDO EL MODELO MATEMÁTICO

En este capítulo se presenta las variaciones de las percolación hacia el desmonte que varía debido a la variación de las curvas de conductividad hidráulica, es decir a la variación de los modelos matemáticos.

### 5.7.1. Modelo de Cobertura 9: Curva de conductividad hidráulica de Van Genuchten (1980)

El modelo de cobertura 9 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.50 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 5.30 se presentan detalles y especificaciones de cada material

Cuadro 5.30. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 9

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	50	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.31).

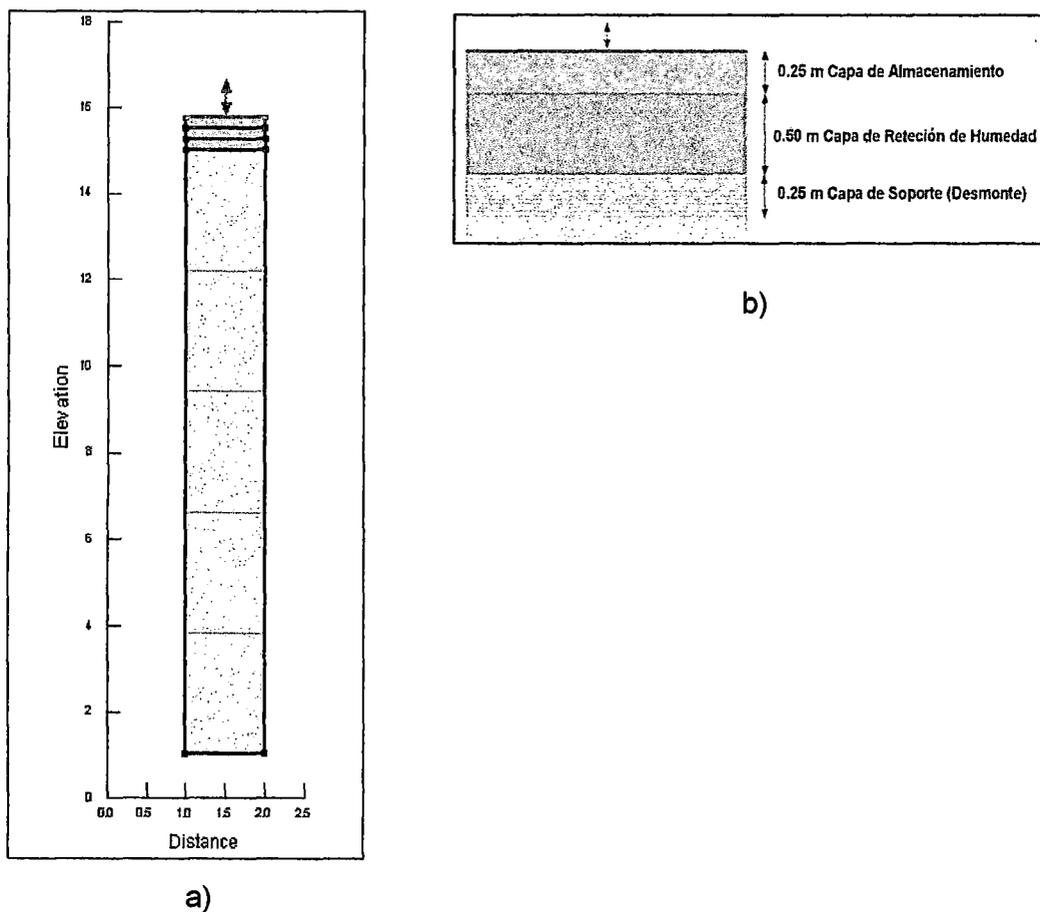


Figura 5.31. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 9, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.31.

La malla de elementos finitos consta de 102 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.31 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.31. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 9

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	25	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 10.06 mm por mes, el cual corresponde a 4.17 % del total de precipitación (ver cuadro 5.28).

Cuadro 5.32. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 9

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.83	39.27
Percolación	30.17	4.17

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.32 y 5.33 respectivamente.

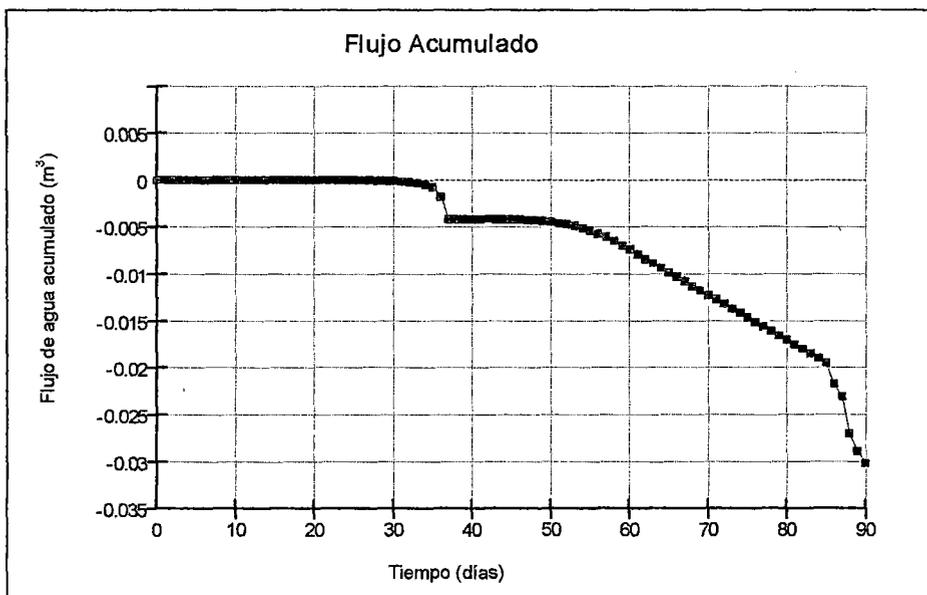


Figura 5.32. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 9 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

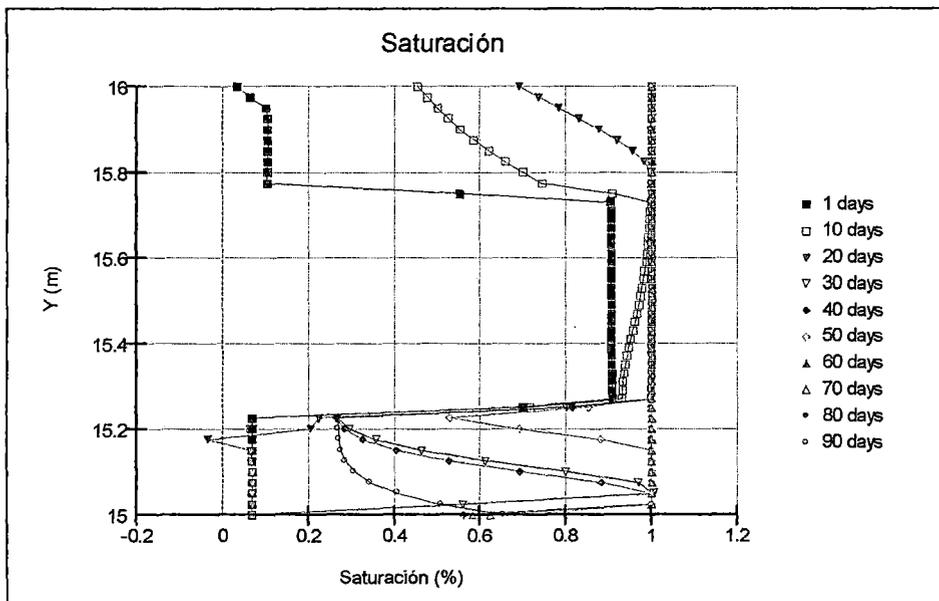


Figura 5.33. Perfil de saturación del modelo de cobertura 9 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 30.17 mm (ver cuadro 5.32) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 42.24 mm.

Para finalizar el modelo 9, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 14.08 mm por mes, el cual corresponde a 5.84 % del total de precipitación (ver cuadro 5.32), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

### 5.7.2. Modelo de Cobertura 10: Curva de conductividad hidráulica de Fredlund (1994)

El modelo de cobertura 10 proyectado consiste en una capa de almacenamiento de 0.25 m, seguido por 0.50 m de capa de retención de humedad y 0.25 m de material de desmonte de mina lavado. En el Cuadro 3.33 se presentan detalles y especificaciones de cada material.

Cuadro 5.33. Espesores de capas del Modelo de Cobertura 10

Capa	Material	Símbolo	Espesor (cm)	Función
1	Capa de Almacenamiento	SC	25	Sirve para proteger al material de baja permeabilidad contra la desecación.
2	Capa de Retención de Humedad	CL	50	Sirve como un almacén para las aguas que ingresan al suelo orgánico y tierra común.
3	Depósito de desmonte	GP-GC	25	Desmonte de mina superficial lavado por las aguas de lluvia. Se considera tamizado del material superficial existente y eliminación de finos. Esta capa sirve como cimentación para la cobertura.

Fuente: Elaboración propia

La descripción del modelo geométrico unidimensional, representa una columna del material de desmonte, se aprecia que las capas superficiales tienen la malla de elementos finitos más densa y la condición de borde por clima (ver figura 5.34).

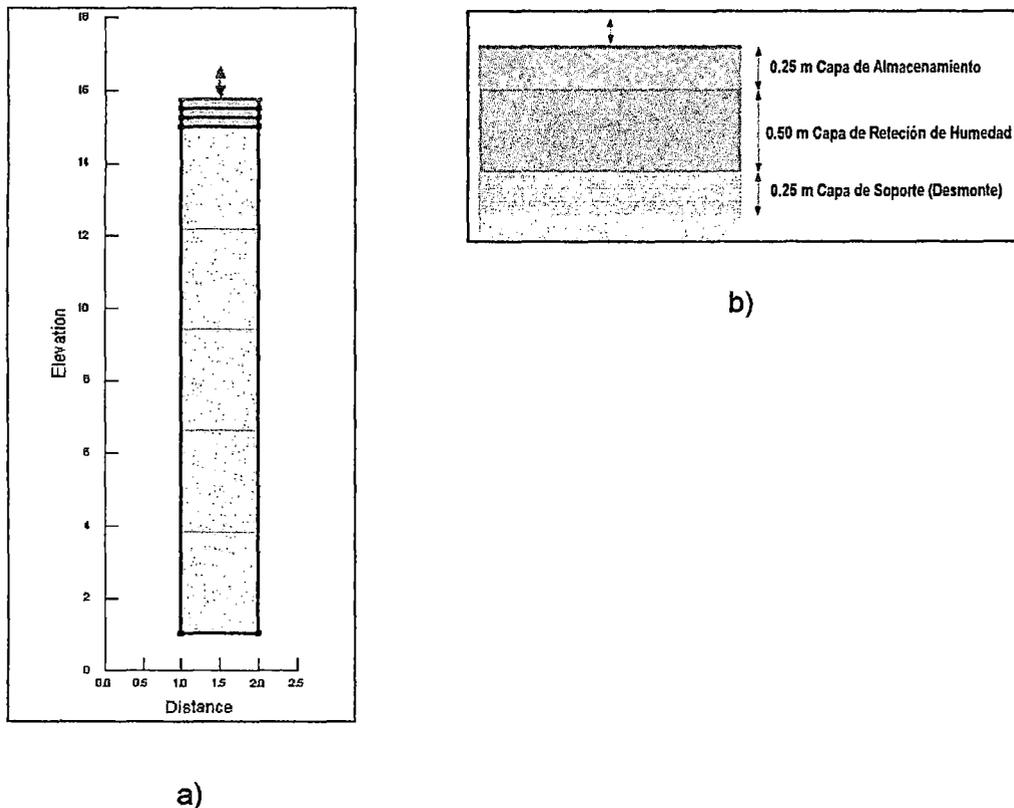


Figura 5.34. Modelo geométrico de malla de elementos finitos del modelo de cobertura 10, a) columna de modelamiento, b) sistema de cobertura.

Fuente: Elaboración propia.

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en la figura 5.34.

La malla de elementos finitos consta de 102 nudos y está distribuida en todo el cuerpo del depósito de desmonte con elementos rectangulares de lado máximo 1m. En el cuadro 5.34 se presenta el modelo matemático utilizado para representar la curva de conductividad hidráulica, la presión de agua en los materiales in situ y la cantidad de elementos finitos utilizado para el modelamiento.

Cuadro 5.34. Parámetros Numéricos del Modelo de Cobertura 10

Capa	Material	Elementos Finitos rectangulares	Presión de poros de agua (KPa)	Modelo matemático de curva de conductividad hidráulica
1	Capa de Almacenamiento	10	-30	Van Genuchten (1980)
2	Capa de Retención de Humedad	25	-30	Van Genuchten (1980)
3	Depósito de desmonte	15	-20	Van Genuchten (1980)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 13.3 mm por mes, el cual corresponde a 5.5 % del total de precipitación (ver cuadro 5.35).

Cuadro 5.35. Balance Hídrico del Modelo de Cobertura 10

Balance de agua	mm	%
Precipitación	722.9	100
Evaporación actual	283.83	39.27
Percolación	40.01	5.53

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de balance hídrico corresponden a un periodo de 3 meses. La curva de percolación y el perfil de saturación del sistema de cobertura se presentan en las figuras 5.35 y 5.36 respectivamente.

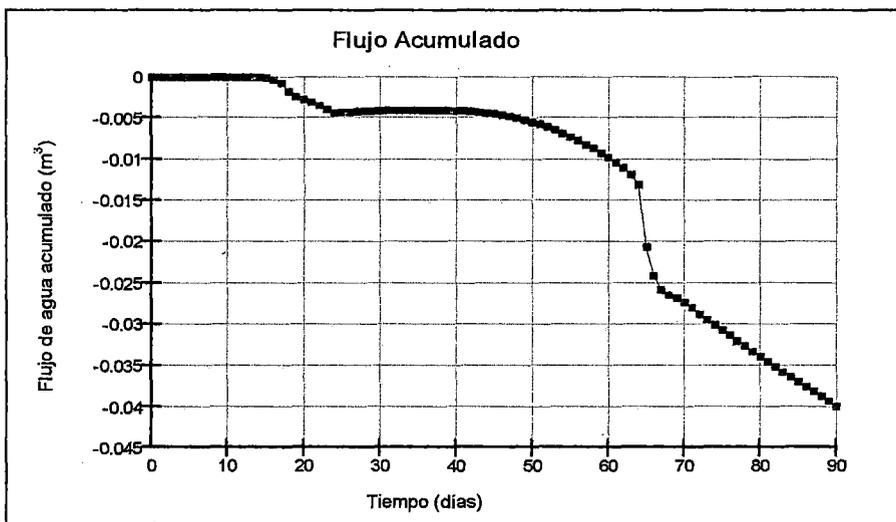


Figura 5.35. Percolación hacia el depósito de desmonte del modelo de cobertura 10 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

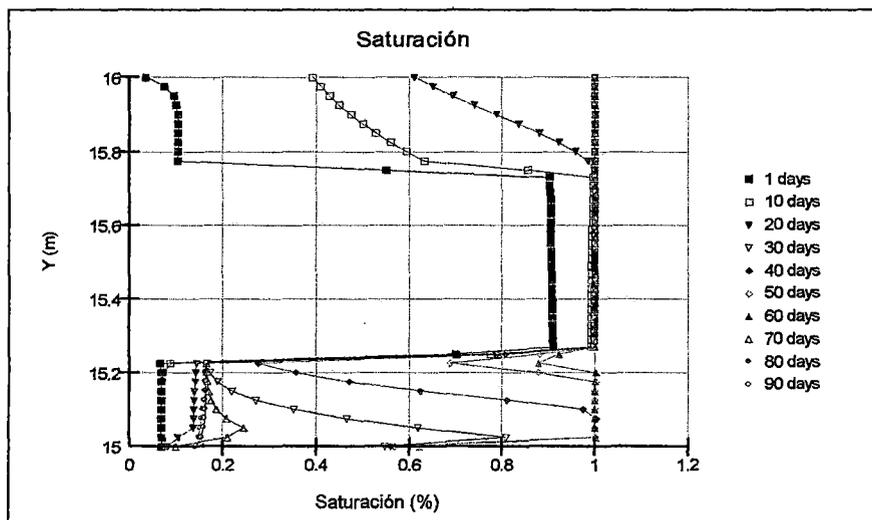


Figura 5.36. Perfil de saturación del modelo de cobertura 10 para 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones deben calibrarse mediante un factor de ajuste de 1.4 (hallado en el ítem 4.4.2), ya que se tienen las mismas limitaciones en data y porque se quiere tener valores de percolación más precisos.

El valor teórico de 40.01mm (ver cuadro 5.35) multiplicado por el factor de ajuste de 1.4 dará un valor corregido de 56.01 mm.

Para finalizar el modelo 10, se concluye que los resultados ajustados de las simulaciones indican una velocidad de percolación de 18.67 mm por mes, el cual

corresponde a 7.75 % del total de precipitación (ver cuadro 5.35), lo que significa que el modelo no cumple con los criterios establecidos y producirá drenaje ácido.

### 5.7.3. Resultados y Comentarios

El resumen de los modelamientos correspondientes a la variación del Modelo Matemático (variación de la curva de conductividad hidráulica) se presenta en el Cuadro 5.36.

Cuadro 5.36. Resumen de resultados de la variación del Modelo Matemático

Modelos	Descripción (variación del Modelo Matemático)	Percolación hacia el Desmonte (mm)	Porcentaje respecto a la Precipitación Total
Modelo 9	Van Genuchten (1980)	42.24	5.84 %
Modelo 10	Fredlund (1994)	56.01	7.75 %

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro 5.36 se observa que modificando el modelo matemático de la curva de conductividad hidráulica, la percolación hacia el depósito de desmonte presenta una variación, quiere decir que el cambio de la curva de conductividad hidráulica o que es lo mismo el cambio del modelo matemático influye en el resultado final de la percolación.

La siguiente figura 5.37 muestra la variación de los resultados en porcentaje de percolación para diferentes valores de modelos matemáticos, es decir diferentes curvas de conductividad hidráulica, manteniendo constante las capas de cobertura y la presión de poros de los materiales.

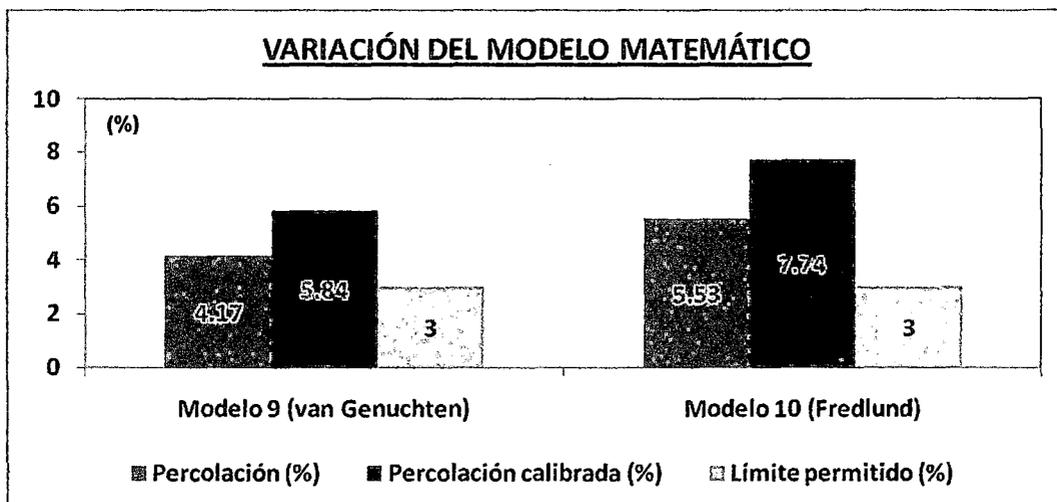


Figura 5.37. Sensibilidad de la percolación de los modelos ante la variación del modelo matemático.

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que la variación del modelo matemático también afecta en el resultado final de la percolación, quiere decir que el cambio de la curva de conductividad hidráulica o que es lo mismo el cambio del modelo matemático influye en el resultado final de la percolación.

En los modelos 9 y 10 la percolación disminuye de manera mínima y tiene magnitudes mayores al 3% del total de la precipitación, quiere decir que ninguno de estos modelos minimizará la generación de drenaje ácido.

La migración de gas (oxígeno) que ingresa al depósito de desmonte debe ser como máximo 0.03 de coeficiente de gas, para esto es necesario que la capa de retención de humedad se encuentre encima del 85% de saturación, las figuras 5.33 y 5.36 presenta el perfil del grado de saturación de los modelos 9 y 10 los cuales cumplen con este criterio.

## CAPÍTULO VI.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Para todos los modelos, las funciones de las curvas de almacenamiento de agua de los suelos fueron generadas a partir del contenido volumétrico de agua y funciones predeterminadas que tiene el VADOSE/W.
- Las curvas de almacenamiento del material fino es mayor que la curva del material de grano grueso, debido a que el contenido volumétrico del material fino es mayor que el material materiales gruesos.
- Las funciones de las curvas de conductividad hidráulica de los materiales gruesos son mayores que los materiales finos, esto es debido a que la permeabilidad saturada de los materiales gruesos es mayor.
- El modelamiento físico permitió observar la formación de la barrera capilar a partir del cambio del tamaño de grano de los suelos y también se observó el cambio de la dirección del flujo de agua entre los suelos de distinto tamaño de grano.
- Para disminuir la percolación del agua, se debe variar la capa de retención de humedad, ya que influye bastante en la reducción de la percolación.
- Para todos los modelos, a partir del espesor de 0.60 m de capa de retención de humedad la percolación disminuye por debajo del 3% de la precipitación total.
- La capa de almacenamiento ayuda a mantener la saturación de la capa de retención de humedad, es decir ayuda en la reducción de la migración de oxígeno, por lo cual se debe variar la capa de almacenamiento hasta mantener la saturación de la capa de retención de humedad en 85%.

- Se concluye que la capa de retención de humedad debe ser un material de grano fino, ya que contiene un valor alto de porosidad y baja permeabilidad. La capa de almacenamiento debe ser un material de grano grueso, para poder generar la barrera capilar.
- Se debe distribuir los materiales de tal manera que los materiales finos se encuentren entre materiales gruesos, de tal manera que se pueda generar la capilaridad.
- La variación de la presión de poros de agua (PWP) no presentó resultados concluyentes, pero se aprecia una variación de percolación a medida que aumenta la presión de poros.
- La variación del modelo matemático (variación de la curva de conductividad hidráulica) influye en los resultados de percolación, de manera que la percolación del modelo de Fredlund es mayor a la percolación del modelo de Van Genuchten.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda recopilar datos de estaciones cercanas al proyecto con un historial de data climática extensa y escoger el año con mayor precipitación total mensual, de manera que se tenga datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima, y velocidad de viento.
- Para futuros trabajos se recomienda que las curvas de contenido de agua, deben ser medidas en laboratorio (papel filtro, psicrómetro) o in situ (tensiómetros, bloque de resistencia).
- Se recomienda realizar ensayos de clasificación SUCS, límites de consistencia y permeabilidad saturada de los materiales a ser utilizados, ya que con estos datos se puede generar las curvas características de los suelos no saturados.

- Para el modelamiento numérico en futuros trabajos, se recomienda estudiar la influencia de la malla de elementos finitos en las capas de la cobertura ya que es el elemento de estudio.
- Se recomienda no utilizar arcilla en la capa de almacenamiento debido a su cambio de forma repentino ante el medio ambiente (en el sol se fisura).
- Se recomienda estudiar la influencia de una capa de material orgánico (ML) y vegetación oriunda de la zona, con la finalidad de aprovechar la evapotranspiración de las plantas y reducir aún más el ingreso de agua al depósito de mina.
- Se recomienda utilizar como criterios de diseño: los criterios de Hauser 1999 y coeficiente de difusión de gas menor a 0.03, ya que permiten limitar la percolación y el ingreso de oxígeno al depósito de desmontes.
- Se recomienda estudiar o modelar una cobertura de barrera capilar en dos dimensiones, con la finalidad de tener valores más reales de percolación de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Barrera Bucio Mauricio. Garnica Anguas Paul. "Introducción a la Mecánica de Suelos no Saturados en Vías Terrestres". Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte Publicación Técnica N°198, Sanfandila, Qro, 2002.
- 2.- Bizarreta Ortega Julio. "Avaliação do potencial de uso de um residuo da indústria". Dissertação de Mestrado (Agosto, 2009).
- 3.-Kowalewski Peter E. "Desing and Evaluation of Engineered Soil Covers for Infiltration Control in Heap Leach Closure". SRK Consulting, Lakewood, Colorado, USA. 1999.
- 4.- Fredlund D., Hoyos Patiño Fabian. "Implementación de la Mecánica del Suelo Parcialmente Saturado en la Práctica de la Ingeniería Geotécnica". Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia (2003).
- 5.-Fredlund D., Xing A. (1996). The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength Function to the Soil-Water Characteristic Curve.
- 6.-GEO-SLOPE International Ltd (2007 a). Vadose Zone Modeling with VADOSEW 2007.
- 7.- GEO-SLOPE International Ltd (2007 a). VADOSE/W Tutorial 2D.
- 8.-Kheng-Boon Chin, Eng-Choon Leong & Harianto Rahardjo. "A simplified method to estimate the soil-water characteristic curve". Canadian Geotechnical Journal, Vol 47 (2010).
- 9.-M. Aubertin, M. Mbonimpa, B. Bussière & R.P. Chapuis. "A physically-based model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties". Canadian Geotechnical Journal (Febrero, 2003).

- 10.- Mendeiros Marinho Fernando. "Os Solos Nao Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados". Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo (Febrero, 2005).
  
- 11.- Pereira Triane Beatriz."Avaliação Geotécnica Do Desempenho de Cobertura Seca em Barreira Capilar Dupla em Rejeito de Mineração". Dissertação de Mestrado, Universidad Federal do Rio de Janeiro (Junio, 2010).
  
- 12.- República del Perú Ministerio de Energía y Minas. "Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros". Primera Edición – Volumen XXIII : Setiembre del 2007
  
- 13.- Tindall & Kunkel et al., 2006. ."Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers" .(Junio, 2010).
  
- 14.- U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste."The Design and Operation of Waste Rock Piles at Noncoal Mines".Science Applications International Corporation (Julio, 1995).
  
- 15.- Zepeda Garrido José Alfredo. "Mecánica de Suelos No Saturados". Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. Universidad Autónoma de Querétaro (2003).

**ANEXOS:**

---

## **ANEXO 1: ENSAYOS DE PERMEABILIDAD**

---

## PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE

Pared Rígida - ASTM D-2434

Fecha : Abril, 2012

Hoja : 1 de 1

Muestra : M - 03  
Profundidad (m) : 0.95 - 1.80  
Estado : Remoldeado

Instalación : 25/04/2012  
AASHTO : A-2-4 (0)  
S U C S : GP - GC / Grava mal gradada con arcilla y arena

### Datos del ensayo

Diámetro	(cm)	10.03	Humedad inicial	(%)	0.7
Altura	(cm)	12.71	Humedad final	(%)	5.4
Densidad seca	(g/cm <sup>3</sup> )	2.18	Saturación inicial	(%)	12.5
Gravedad de sólidos		2.48	Saturación final	(%)	98.4

### Medición del coeficiente de permeabilidad ( $K_{T20^{\circ}C}$ )

Carga Hidráulica (kg/cm <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /seg)	$K_T$ (cm/seg)	Temperatura (°C)	$K_{T20^{\circ}C}$ (cm/seg)
0.455	1.58	100.00	1.1 E+00	3.7 E-04	24.0	3.4 E-04
0.450	1.70	100.00	9.8 E-01	3.5 E-04	24.0	3.2 E-04
0.445	1.80	100.00	9.3 E-01	3.3 E-04	24.0	3.0 E-04
0.440	1.87	100.00	8.9 E-01	3.3 E-04	24.0	3.0 E-04
0.435	1.93	100.00	8.6 E-01	3.2 E-04	24.0	2.9 E-04
0.430	2.03	100.00	8.2 E-01	3.1 E-04	24.0	2.8 E-04
0.425	2.12	100.00	7.9 E-01	3.0 E-04	24.0	2.7 E-04

Promedio (cm/seg) : 3.0 E-04

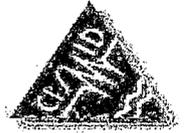
Observaciones : La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante. Material menor de ¾", humedad = 0.69%, densidad seca = 2.18g/cm<sup>3</sup>. Los datos de remoldeo son responsabilidad del solicitante.



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES  
LABORATORIO GEOTÉCNICO



Av. Túpac Amaru Nº 1150, Lima 25, Perú - Telf. (51-1) 482-0804, 481-0170, 482-0777 - Correo labgeoc@uni.edu.pe - Página http://www.cismid-uni.org

## PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE

Pared Rígida - ASTM D-2434

Fecha : Abril, 2012

Hoja : 1 de 1

Muestra : M - 01  
Profundidad (m) : 0.00 - 5.00  
Estado : Remoldeado

Instalación : 17/04/2012  
AASHTO : A-2-6 (0)  
S U C S : SC / Arena arcillosa

### Datos del ensayo

Diámetro	(cm)	10.03	Humedad inicial	(%)	4.24
Altura	(cm)	12.71	Humedad final	(%)	16.00
Densidad seca	(g/cm <sup>3</sup> )	1.84	Saturación inicial	(%)	25.86
Gravedad de sólidos		2.63	Saturación final	(%)	98.29

### Medición del coeficiente de permeabilidad ( $K_{T20^{\circ}C}$ )

Carga Hidráulica (kg/cm <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /seg)	$K_f$ (cm/seg)	Temperatura (°C)	$K_{T20^{\circ}C}$ (cm/seg)
0.240	0.55	100.00	3.0 E+00	2.0 E-03	27.0	1.7 E-03
0.235	0.62	100.00	2.7 E+00	1.9 E-03	27.0	1.6 E-03
0.230	0.68	100.00	2.4 E+00	1.7 E-03	27.0	1.4 E-03
0.225	0.82	100.00	2.0 E+00	1.5 E-03	27.0	1.2 E-03
0.220	1.03	100.00	1.6 E+00	1.2 E-03	27.0	1.0 E-03
0.215	1.22	100.00	1.4 E+00	1.0 E-03	27.0	8.7 E-04
0.210	1.43	100.00	1.2 E+00	8.9 E-04	27.0	7.6 E-04

Promedio (cm/seg) : 1.2 E-03

Observaciones : La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante. Humedad = 4.24%, densidad seca = 1.84g/cm<sup>3</sup>. Los datos de remoldeo son responsabilidad del solicitante.

DAVID LUNA DURAN  
INGENIERO CIVIL - O.P. 43988  
JEFE DEL LAB. GEOTECNICO



**PERMEABILIDAD**  
(Pared Flexible ASTM - D5084)

Fecha : Abril, 2012

Sondaje : Cantera Arcilla  
 Muestra : M - 01  
 Prof. (m) : 0.00 - 1.00  
 Estado : Remoldeado

AASHTO : A-6 (6)  
 SUCS : CL / Arcilla delgada arenosa  
 Hoja : 1 de 1

**Datos del espécimen**

Diámetro : 5 cm  
 Altura : 10.1 cm  
 Densidad seca : 1.68 g/cm<sup>3</sup>  
 Gravedad de sólidos : 2.69

Humedad inicial : 14.3 %  
 Humedad final : 22.2 %  
 Saturación inicial : 63.5 %  
 Saturación final : 98.6 %

**Cálculo de parámetro "B"**

Presión de celda  
 Inicial : 4.01 kg/cm<sup>3</sup>  
 Final : 4.22 kg/cm<sup>3</sup>

Presión de poros  
 Inicial : 3.8 kg/cm<sup>3</sup>  
 Final : 4 kg/cm<sup>3</sup>

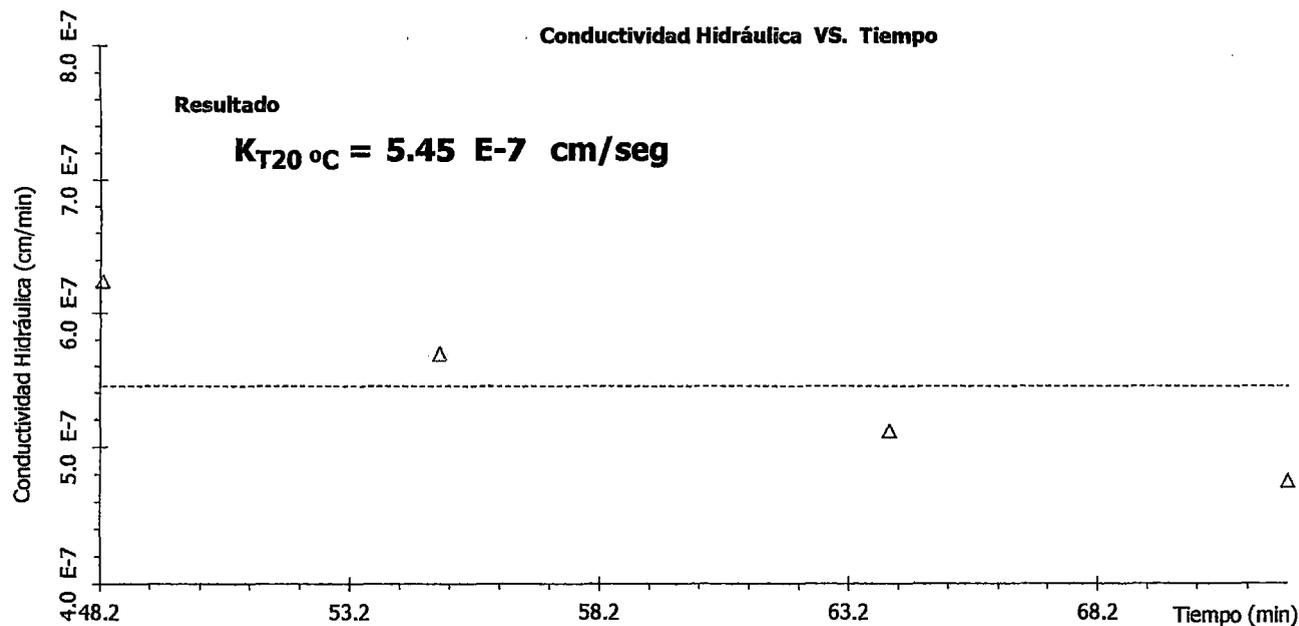
Contrapresión  
 Inicial : 3.8 kg/cm<sup>3</sup>  
 Final : 4.01 kg/cm<sup>3</sup>

Parám. "B" : 97.3 %

**Cálculo de conductividad hidráulica**

P. Entrada (kg/cm <sup>2</sup> )	Tiempo (seg)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Temp. (°C)	Gradiente (l)	Velocidad (cm/seg)	K <sub>T20 °C</sub> (cm/seg)
4.23	4320	1.00	25.0	22.0	1.18 E-5	4.75 E-7
4.24	3840	1.00	25.0	23.0	1.33 E-5	5.12 E-7
4.25	3300	1.00	25.0	24.0	1.54 E-5	5.70 E-7
4.26	2895	1.00	25.0	25.0	1.76 E-5	6.24 E-7

**Conductividad Hidráulica VS. Tiempo**



**Observación :**

La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante. Material que pasa el tamiz N° 4, humedad = 14.3%, densidad seca = 1.68g/cm<sup>3</sup>, remoldeado al 90% de la MDS obtenida del ensayo proctor modificado (O.C.H. = 14.3%; M.D.S. = 1.87g/cm<sup>3</sup>). Los datos de remoldeo son responsabilidad del solicitante.

## **PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL DESMONTE DE MINA**

---

**Tabla 1**

**Valores de la Curva de Retención de Agua del Desmonte de Mina**

<b>Matriz de Succión (kPa)</b>	<b>Contenido Volumétrico de Agua (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>
0.0001	0.12
0.000297635	0.12
0.000885867	0.11999999
0.002636651	0.11999998
0.0078476	0.11999995
0.023357215	0.11999984
0.06951928	0.11999935
0.20691381	0.11994789
0.61584821	0.10763436
1.8329807	0.028605321
5.4555948	0.013689235
16.237767	0.009103235
48.329302	0.006851577
143.84499	0.005489626
428.13324	0.004537511
1274.275	0.003763244
3792.6902	0.003032335
11288.379	0.002307622
33598.183	0.001626253
100000	0.001021569

**PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL DE  
RETENCIÓN DE HUMEDAD**

---

**Tabla 2****Valores de la Curva de Retención de Agua de la Capa de Retención de Humedad**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Contenido Volumétrico de Agua (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>
0.001	0.36999997
0.002976351	0.36999989
0.008858668	0.36999959
0.026366509	0.36999832
0.078475997	0.36999265
0.23357215	0.36996618
0.6951928	0.36983871
2.0691381	0.36921395
6.1584821	0.36615307
18.329807	0.3519846
54.555948	0.30147407
162.37767	0.2104117
483.29302	0.13783834
1438.4499	0.095921965
4281.3324	0.068685056
12742.75	0.048103571
37926.902	0.031826669
112883.79	0.018891473
335981.83	0.008500595
1000000	0

**PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL DE  
ALMACENAMIENTO**

---

**Tabla 3****Valores de la Curva de Retención de Agua de la Capa de Almacenamiento**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Contenido Volumétrico de Agua (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>
0.01	0.28999584
0.023357215	0.28997856
0.054555948	0.28988812
0.1274275	0.28941385
0.29763514	0.28694741
0.6951928	0.27475787
1.6237767	0.22700144
3.7926902	0.13357178
8.8586679	0.065923321
20.691381	0.037039366
48.329302	0.024147636
112.88379	0.017328987
263.66509	0.013184289
615.84821	0.01036915
1438.4499	0.008253248
3359.8183	0.006515969
7847.5997	0.005019722
18329.807	0.003731887
42813.324	0.002645831
100000	0.001743579

**Tabla 4**

**Valores de la Curva de Conductividad Hidráulica del Desmonte de Mina  
utilizando el modelo matemático de van Genuchten (1980)**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Permeabilidad Kx (m/día)</b>
0.0001	0.2592
0.000297635	0.2592
0.000885867	0.25919995
0.002636651	0.2591994
0.0078476	0.2591925
0.023357215	0.25910589
0.06951928	0.25801334
0.20691381	0.24434172
0.61584821	0.11648202
1.8329807	0.000680769
5.4555948	1.74E-07
16.237767	3.59E-11
48.329302	7.35E-15
143.84499	1.50E-18
428.13324	3.08E-22
1274.275	6.29E-26
3792.6902	1.29E-29
11288.379	2.40E-33
33598.183	3.91E-38
100000	7.28E-38

**Tabla 5**

**Valores de la Curva de Conductividad Hidráulica de la Capa de Retención de Humedad utilizando el modelo matemático de van Genuchten (1980)**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Permeabilidad Kx (m/día)</b>
0.001	0.00047088
0.003359818	0.000466207
0.011288379	0.000458075
0.037926902	0.000443994
0.1274275	0.000419843
0.42813324	0.000379137
1.4384499	0.000312845
4.8329302	0.000213035
16.237767	9.24E-05
54.555948	1.50E-05
183.29807	7.13E-07
615.84821	1.86E-08
2069.1381	4.18E-10
6951.928	9.15E-12
23357.215	2.00E-13
78475.997	4.35E-15
263665.09	9.48E-17
885866.79	2.06E-18
2976351.4	1.41E-18
10000000	1.41E-18

**Tabla 6**

**Valores de la Curva de Conductividad Hidráulica de la Capa de Almacenamiento  
utilizando el modelo matemático de van Genuchten (1980)**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Permeabilidad Kx (m/día)</b>
0.01	1.0368
0.029763514	1.0193761
0.088586679	0.9659023
0.26366509	0.80838936
0.78475997	0.42942532
2.3357215	0.051649236
6.951928	0.000811779
20.691381	6.05E-06
61.584821	4.05E-08
183.29807	2.68E-10
545.55948	1.77E-12
1623.7767	1.17E-14
4832.9302	7.71E-17
14384.499	5.09E-19
42813.324	3.36E-21
127427.5	2.22E-23
379269.02	1.47E-25
1128837.9	1.69E-27
3359818.3	1.69E-27
10000000	1.69E-27

**Tabla 7**

**Valores de la Curva de Conductividad Hidráulica del Desmonte de Mina  
utilizando el modelo matemático de Fredlund (1994)**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Permeabilidad Kx (m/día)</b>
0.0001	0.2592
0.000297635	0.2592
0.000885867	0.2592
0.002636651	0.2592
0.0078476	0.25920005
0.023357215	0.25920118
0.06951928	0.25920623
0.20691381	0.25878077
0.61584821	0.21561915
1.8329807	0.004383865
5.4555948	5.13E-06
16.237767	6.54E-07
48.329302	1.34E-08
143.84499	1.00E-09
428.13324	6.59E-11
1274.275	6.69E-12
3792.6902	7.21E-13
11288.379	7.24E-14
33598.183	6.27E-15
100000	4.84E-16

**Tabla 8**

**Valores de la Curva de Conductividad Hidráulica de la Capa de Retención de Humedad utilizando el modelo matemático de Fredlund (1994)**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Permeabilidad Kx (m/día)</b>
0.001	0.00047088
0.003359818	0.000470676
0.011288379	0.000470225
0.037926902	0.000469128
0.1274275	0.000466611
0.42813324	0.000458562
1.4384499	0.000438526
4.8329302	0.000378125
16.237767	0.000250081
54.555948	7.00E-05
183.29807	4.28E-06
615.84821	1.17E-07
2069.1381	4.27E-09
6951.928	2.11E-10
23357.215	1.12E-11
78475.997	5.94E-13
263665.09	2.84E-14
885866.79	5.09E-16
2976351.4	3.30E-16
10000000	3.30E-16

**Tabla 9**

**Valores de la Curva de Conductividad Hidráulica de la Capa de Almacenamiento  
utilizando el modelo matemático de Fredlund (1994)**

<b>Matriz de succión (kPa)</b>	<b>Permeabilidad Kx (m/día)</b>
0.01	1.0368
0.029763514	1.0351327
0.088586679	1.0247883
0.26366509	0.96013704
0.78475997	0.69002881
2.3357215	0.15304305
6.951928	0.0037551
20.691381	4.73E-05
61.584821	1.09E-06
183.29807	3.90E-08
545.55948	1.97E-09
1623.7767	1.33E-10
4832.9302	1.02E-11
14384.499	7.54E-13
42813.324	5.05E-14
127427.5	3.06E-15
379269.02	2.43E-16
1128837.9	7.53E-18
3359818.3	7.53E-18
10000000	7.53E-18

**ANEXO 2: PARÁMETROS CLIMÁTICOS**

---

**DATOS CLIMÁTICOS PARA LOS 90 DÍAS**

Día	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
	Max	Min	Max	Min		
1	15	10.4	80	70	2.7	1.9
2	15	10.4	80	70	2.7	17
3	15	10.4	80	70	2.7	2
4	15	10.4	80	70	2.7	6
5	15	10.4	80	70	2.7	10
6	15	10.4	80	70	2.7	7
7	15	10.4	80	70	2.7	9
8	15	10.4	80	70	2.7	11
9	15	10.4	80	70	2.7	5
10	15	10.4	80	70	2.7	8
11	15	10.4	80	70	2.7	6
12	15	10.4	80	70	2.7	2
13	15	10.4	80	70	2.7	14
14	15	10.4	80	70	2.7	8
15	15	10.4	80	70	2.7	7
16	15	10.4	80	70	2.7	1.9
17	15	10.4	80	70	2.7	5
18	15	10.4	80	70	2.7	2
19	15	10.4	80	70	2.7	10
20	15	10.4	80	70	2.7	5
21	15	10.4	80	70	2.7	13
22	15	10.4	80	70	2.7	4
23	15	10.4	80	70	2.7	15
24	15	10.4	80	70	2.7	3

Día	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento	Precipitación
25	15	10.4	80	70	2.7	5
26	15	10.4	80	70	2.7	8
27	15	10.4	80	70	2.7	9
28	15	10.4	80	70	2.7	10
29	15	10.4	80	70	2.7	9
30	15	10.4	80	70	2.7	10
31	15	10.4	80	70	2.7	12
32	16	9.2	80	72	2.6	19
33	16	9.2	80	72	2.6	9
34	16	9.2	80	72	2.6	5
35	16	9.2	80	72	2.6	2.2
36	16	9.2	80	72	2.6	6
37	16	9.2	80	72	2.6	8
38	16	9.2	80	72	2.6	10
39	16	9.2	80	72	2.6	18
40	16	9.2	80	72	2.6	9
41	16	9.2	80	72	2.6	8
42	16	9.2	80	72	2.6	3
43	16	9.2	80	72	2.6	10
44	16	9.2	80	72	2.6	11
45	16	9.2	80	72	2.6	7
46	16	9.2	80	72	2.6	17
47	16	9.2	80	72	2.6	18
48	16	9.2	80	72	2.6	15
49	16	9.2	80	72	2.6	15
50	16	9.2	80	72	2.6	10
51	16	9.2	80	72	2.6	20

Día	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento	Precipitación
52	16	9.2	80	72	2.6	10
53	16	9.2	80	72	2.6	12
54	16	9.2	80	72	2.6	15
55	16	9.2	80	72	2.6	10
56	16	9.2	80	72	2.6	13
57	16	9.2	80	72	2.6	17
58	16	9.2	80	72	2.6	20
59	16	9.2	80	72	2.6	15
60	15	10.2	90	68	2.7	15
61	15	10.2	90	68	2.7	5
62	15	10.2	90	68	2.7	6
63	15	10.2	90	68	2.7	2
64	15	10.2	90	68	2.7	0.5
65	15	10.2	90	68	2.7	0.3
66	15	10.2	90	68	2.7	3
67	15	10.2	90	68	2.7	1.5
68	15	10.2	90	68	2.7	6
69	15	10.2	90	68	2.7	12
70	15	10.2	90	68	2.7	11
71	15	10.2	90	68	2.7	6
72	15	10.2	90	68	2.7	10
73	15	10.2	90	68	2.7	8
74	15	10.2	90	68	2.7	10
75	15	10.2	90	68	2.7	5
76	15	10.2	90	68	2.7	3.2
77	15	10.2	90	68	2.7	1.2
78	15	10.2	90	68	2.7	3

Día	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)		Velocidad del Viento	Precipitación
79	15	10.2	90	68	2.7	1.5
80	15	10.2	90	68	2.7	0.5
81	15	10.2	90	68	2.7	0.5
82	15	10.2	90	68	2.7	1.1
83	15	10.2	90	68	2.7	10
84	15	10.2	90	68	2.7	3
85	15	10.2	90	68	2.7	4
86	15	10.2	90	68	2.7	10
87	15	10.2	90	68	2.7	1
88	15	10.2	90	68	2.7	0.6
89	15	10.2	90	68	2.7	5
90	15	10.2	90	68	2.7	9

## **ANEXO 3: MANUAL DEL VADOSE**

---

## VADOSE/W Tutorial 2D

### 1 Introduction

This is a transient two dimensional example of an engineered cap structure over an assumed mine or municipal waste material. The objective in this case is to assess the inflow of water and oxygen through the base of the cap into the waste. This example should be read in detail as it includes commentary on all aspects of VADOSE/W modeling.

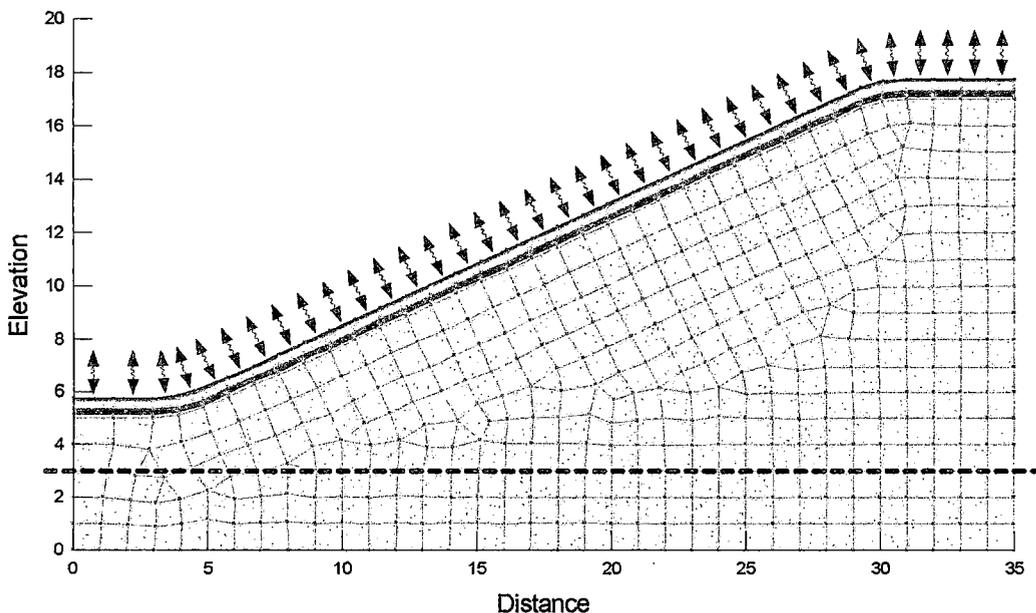
### 2 Feature highlights

GeoStudio feature highlights include:

- Transient flow
- Vegetation and oxygen diffusion analyses
- Climate coupling
- Surface region meshing

### 3 Geometry and boundary conditions

The image below is the cross section being considered. The default finite element mesh pattern is displayed for the waste material, however, the mesh within the cap system has intentionally been hidden from view for clarity reasons.



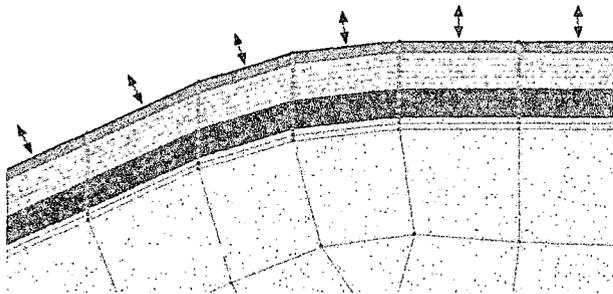
**Figure 3-1 Engineered cap over waste**

The next image shows a close up of the engineered cap. There are several layers to the cap structure, which is built into the model using “surface region meshing”. The bottom layer of the surface regions is a

thin layer with the same material property as the waste. This is numerically advantageous because if there are to be any capillary breaks formed at the base of the compacted (orange) low permeability layer, it is good to have elements of similar shape and size on either side of this break point.

The cap is comprised of a low permeability layer (orange) with a growth layer above that. The growth layer is actually meshed as two surface region layers. The thicker green layer is a growth layer with a fully defined conductivity function and the top inch growth layer is defined with a similar function but one that does not drop off to such low values at higher suctions. The reason for this is that the top inch of soil is often much different than the underlying soil due to desiccation, root penetration, and other surface effects. It generally does not have a very low conductivity when dry because of cracking. Giving the top inch of soil a slightly different K function at higher suctions will accommodate this phenomenon.

You will also see that the transition from slope to flat ground is gradual. This is intentional and is more natural. Experience has shown that sharp breaks in model geometry are collection points for seepage faces and are often numerically less stable.



**Figure 3-2 Close up view of cap with mesh details visible**

The next few images show the analysis settings applied in the model. Many Geo-Slope products have very good default values that do not often need to be changed. However, VADOSE/W has many advanced features that you should know the significance of as they do affect level of detail applied in the analysis as well as the numerical accuracy of the solution.

The first image is the Settings tab. It shows that the initial hydraulic conditions will be based on a drawn water table (which is shown in the first image above). This means that for all nodes below the water table the pore-water pressure will increase hydrostatically. For all nodes above the drawn water table, the suctions will increase hydrostatically up to the maximum value entered as a property of the water table. At this point, the suctions will remain constant with higher elevation, which simulates a slow, steady state infiltration scenario; where the infiltration rate is the same as the conductivity value that corresponds with the maximum suction based on the soils conductivity function entered as a material property.

The initial temperatures and oxygen concentrations are set as “none” which means that they will be based on the various materials “activation” temperatures or pressures, or in the absence of those, a temperature equal to the phase change point and a concentration equal to zero. Gas diffusion has been selected to be on for this analysis. This will allow the diffusion of oxygen through the cap system to be estimated.

Settings | Control | Convergence | Time

Initial Conditions from: Water Table

Initial Temperatures from: (none)

Gas Diffusion

Oxygen Concentration: g/m<sup>3</sup>

Radon Flux: g/day

Initial Gas Concentrations from: (none)

The second tab is the Control tab as shown below. The model will include ground freezing which means that if the temperatures drop below the phase change value, latent heat will be released and ice will start to block off the pores – which in turn decreases the hydraulic conductivity. If ground freezing is “off” then the temperatures will solve but no latent heat is released and pore-ice will not build up.

Vegetation is included in the simulation. This means that all nodes in the mesh that are in a surface region and that within the specified root zones (as defined by the root depth function) will transpire water if the soil suctions are not above the wilting pressure. The maximum transpiration rate is controlled by the climate data but can not exceed the potential evapo-transpiration for the site.

In this model, surface water is allowed to pond on a climate boundary condition node, which, based on the geometry defined, will be the left side of the toe of the slope. If the model has a low point in the ground surface or is flat at the left or right sides of the model, the solver will assume that these are locations where ponded water may form. If it does, it will be stored on surface and be allowed to evaporate or infiltrate on later time steps.

Settings | Control | Convergence | Time

Optional

Include Ground Freezing  
Gauss Regions / Iteration: 50

Include Vegetation

Allow Surface Water to Pond on Climate Boundary Conditions

Convergence of the solution means that it will solve to the same answer (within a tolerance) on two successive iterations. The solver repeats the solution of the equations at any given time step and it uses updated material properties on each try. The material properties change because the pore-water pressures change. The pore-water pressures change because the material properties change. Eventually, the iterative procedure will result in material properties and pressures that are the same and that agree with the applied boundary conditions on successive iterations. When this happens, the program moves to the next time step, with new boundary conditions.

The image below shows the convergence control parameters set in this example. A total of 25 iterations are allowed. In a steady state model this number may have to be set to 200 or so but in a transient model such as this example, it is better to set the value lower. This way, if it fails to reach convergence within 25 iterations, and if the adaptive time stepping is engaged, the model will reduce the time step size by 2 and repeat the solution of the same time step. Often, reducing the time step is the key to getting a stable solution.

The tolerance value is set to 0.1%. This means that if the percent change in vector norm of the heads or temperatures is less than 0.1%, the solution is converged. The vector norm is defined as the square root of the sum of each nodal head (or temperature) squared. It is a value that represents all nodes at the same time.

The conductivity change parameters are default values and should be left alone in almost all cases. You can read more about this in the VADOSE/W Engineering Methodology book.

In this example the parallel direct equation solver is chosen. It solves the equations faster if multiple processors are available on your computer.

The potential seepage reviews are set to 10. This means the program will repeat a time step up to 10 times in order to narrow down the exact location of a seepage face or rainfall runoff area. This is a good default value.

Settings | Control | **Convergence** | Time

Convergence

Max # of Iterations:  Tolerance:

Note: Tolerance is only checked with respect to head.

Conductivity  
(in Orders of Magnitude)

Maximum Change:  Rate of Change:

Minimum Change:

Equation Solver

Direct Equation Solver

Parallel Direct Equation Solver

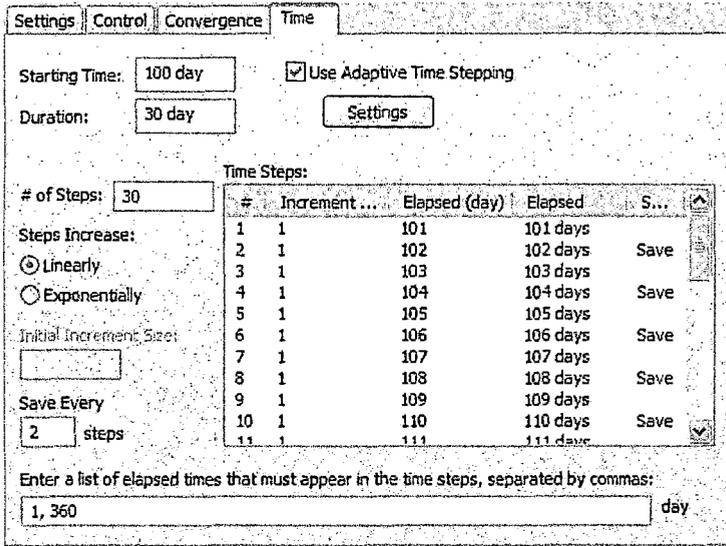
Potential Seepage

Max. # of Reviews:

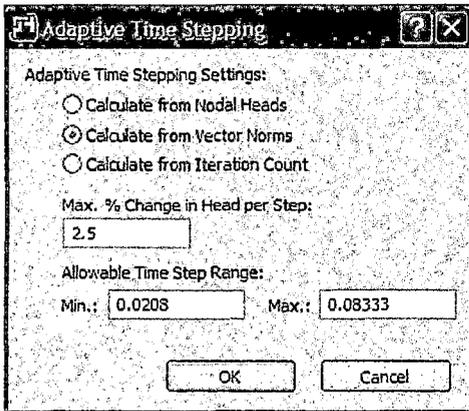
The time stepping control tab is shown next. Here we have entered a starting time of 100 days. This means the climate data on day 100 will be used first. The duration is set to 30 days in this case just to keep the solution time reasonable. If you want to model the entire year, set the starting time to 0 and the duration to 365 or more days. If you exceed the number of days of climate data, the model will loop over the same climate data.

This example is set to save data every 2<sup>nd</sup> day. If the model were run for a year or more, I would suggest data be saved every 15<sup>th</sup> or 30<sup>th</sup> day. The program will accumulate data from the first day of the analysis and also within all time steps between “save” steps. It is not necessary to save data every day.

The time steps in VADOSE/W must align with one day increments IF climate data is applied in the model. This means if the time units are “days” then the steps must be such there is one, 1 day step; or two 0.5 day steps etc. If the time units are “hours” then there must be one, 24 hour step, or two 12 hour steps. The program will not pass the VERIFY check if the time steps are not set up correctly.



In most VADOSE/W models with climate data you will use the adaptive time stepping. This is a way for the program to insert additional steps between your user specified steps in order to help with convergence or to capture key trends during the day. For example, if you have rainfall events that are less than a day in duration, you want the adaptive time stepping routine to reduce time step size so that it captures the start and end of the event and so that it captures the sinusoidal intensity pattern of the event itself.



In a 2D model, you want to control the time steps based on vector norms. In a 1D model, you want to use individual nodal heads. This is because in a 1D model, the wetting or drying fronts are always passing a single pair of nodes and you want smaller steps if the gradients are high. In a 2D model, there can be several high gradient sections and the solution solves faster if you consider all nodes at one time. You

can change these parameters to see what happens. In this example, the range of time step size is 0.0208 to 0.0833 days, which equates to ½ hour to 2 hour time steps.

The following image shows the climate data applied in this example. It was imported from the database supplied in the Resources CD with the software. You can import the data using the arrow button next to the Add... button. This data is from Spokane, WA, USA.

The distribution pattern selected is sinusoidal which means the temperatures, rainfall, relative humidity and sun's energy will be distributed throughout the day based on a sine wave pattern. The time of sun rise is controlled by the latitude and day of year; while the rainfall times are controlled by the data in the list.

There are options to scale the climate data. For example, if you want to simulate a year of data where there is 50% more precipitation then you can simply set the scale(%) value of the precipitation column to be 150%. The solver will apply 50% more rainfall in that analysis.

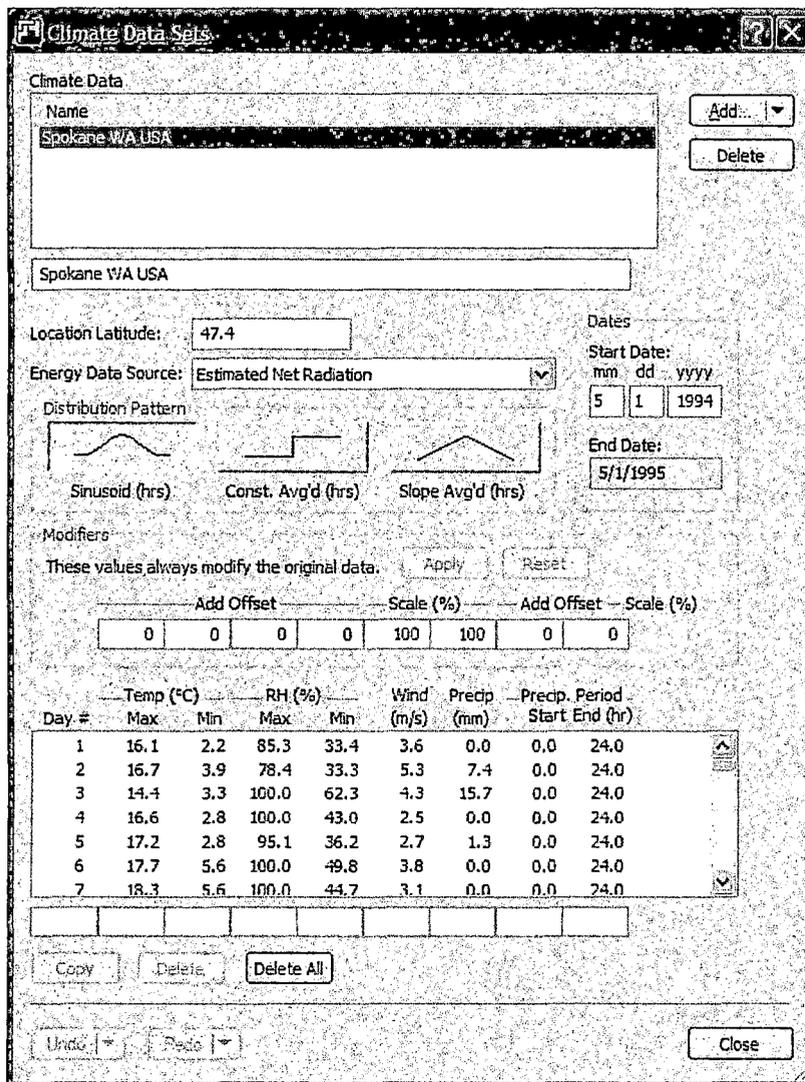
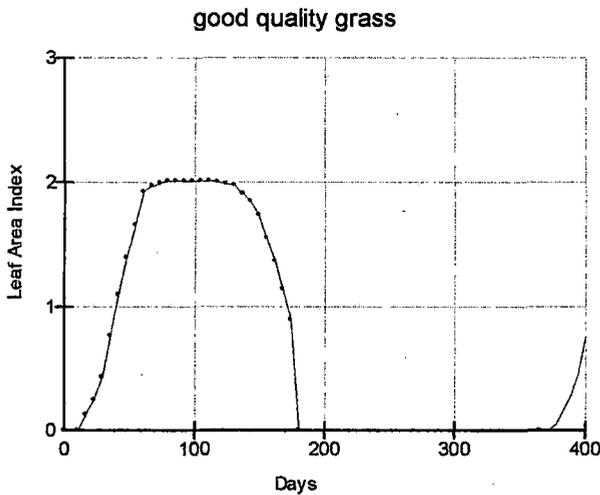


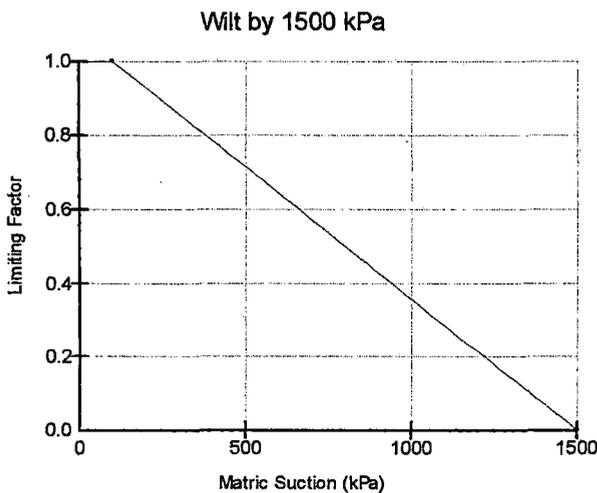
Figure 3-3 Climate data set for this example

In this model we have specified that vegetation will be included. Therefore we need to set up three related functions: the leaf area index, the moisture limiting function, and the root depth over growing season function. These are shown below. The leaf area index function was estimated within the software based on a standard shaped function for a “good” quality grass. The function will cycle itself if the model solves for more than one year.



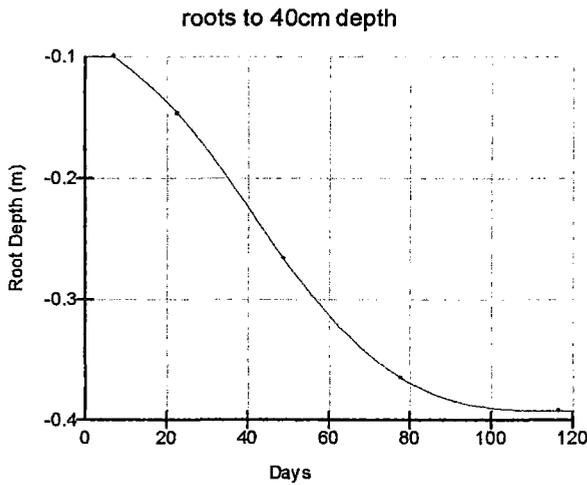
**Figure 3-4 Leaf area index function**

The moisture limiting function shows that at a soil suction of 100 kPa the plants will start to have their uptake limited. By a suction of 1500 kPa, they will not be able to pull water from the soil.



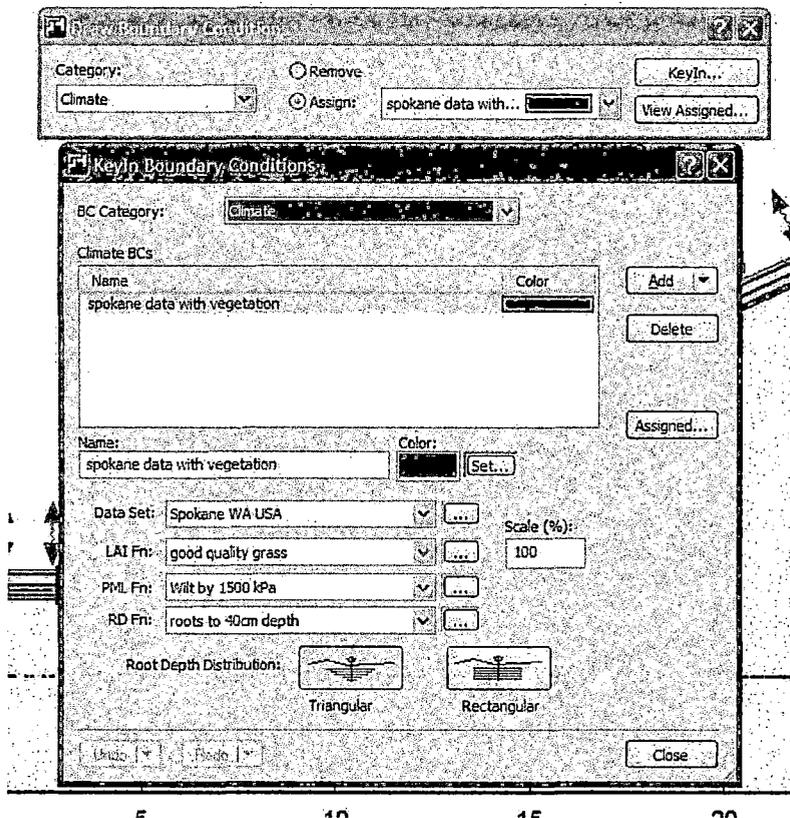
**Figure 3-5 Moisture limiting factor function**

In this example the roots are assumed to be at a depth of 10cm at the first day of the analysis and they grow to a depth of 40cm by the 3<sup>rd</sup> month. It is important to know that the root depth values must be less than the thickness of the surface regions you created. In other words, the root zone must lie within the surface region.



**Figure 3-6 Root depth function**

Once all the functions and climate data are specified, they must be combined together as a boundary condition object as shown below. You can have many objects with different combinations applied in the model. You may want to do this to have different climate values on different slope aspects, for example.

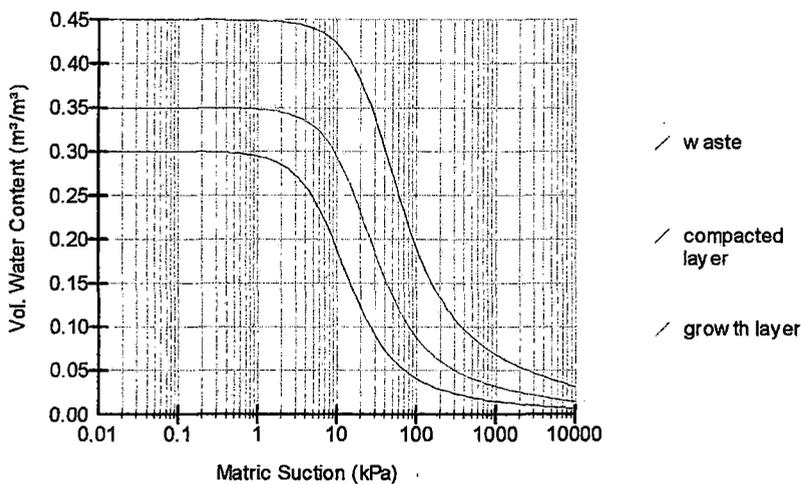


**Figure 3-7 Climate boundary condition object set up**

## 4 Material properties

Careful definition of material functions and properties is critical to numerical accuracy in VADOSE/W and to reliable understanding of your projects anticipated performance and functionality. You must know what these functions mean and you must ensure you create realistic functions. Do not try to connect all the “dots” of laboratory data. There is scatter in lab data. You should ensure the functions you create are smooth and continuous where they are supposed to be.

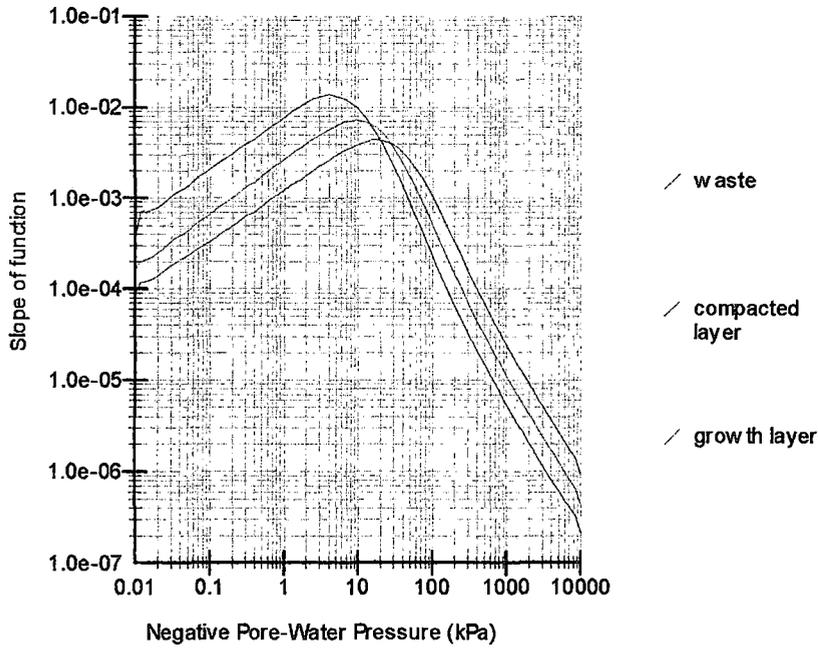
The first function below is the water content function. In this example we have three soil types: waste, a compacted low permeability layer, and a growth layer. The waste layer has the lower porosity and the compacted layer the highest. Contrary to “gut instinct”, a clay type material has a higher porosity than a coarse, sandy material.



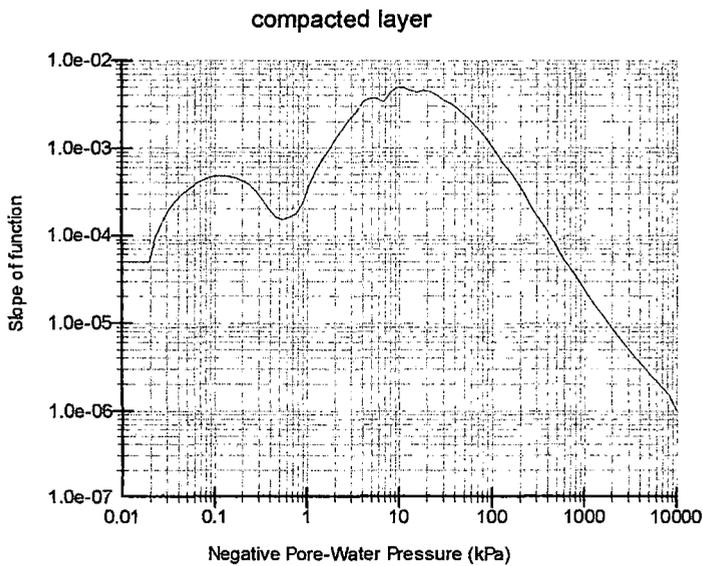
**Figure 4-1 Water content functions for three soils**

The following function is actually MORE important than the one above. The function shows the first derivative (or Slope) of the water content function and this Slope function is used directly within the solver. You do not enter the slope function. It is computed as the slope of your water content function.

In a transient seepage equation (VADOSE/W uses a more rigorous form of Richards equation) the numerical value of the slope of the water content function is required to know the change in mass for a given change in suction. All of the three functions in the image below show smooth slope functions with no sudden inconsistencies. An example of a poorly defined water content function that results in a poor slope function is also shown below. If you have a slope function that shows these odd trends, you can use the curve fit adjustment controls in the function dialogue box to adjust the function until both the water content function and its slope function are appropriate.



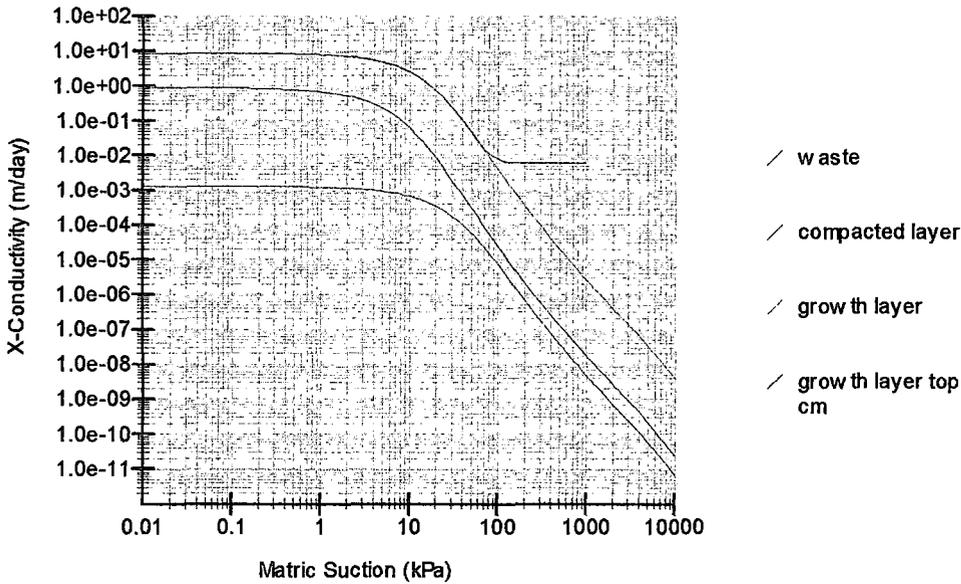
**Figure 4-2 Slope function for given water content functions**



**Figure 4-3 Example of poorly fit slope function**

Once the water content functions are defined, they can be used to internally estimate the corresponding hydraulic conductivity functions. You can estimate the conductivity using either Van Genuchten or Fredlund and Xing, or you can enter your own data points or write your own external Add In function. In this case, the Van Genuchten estimation has been used.

There are four functions shown below even though we only have three soil types. That is because the upper inch of the growth layer has a modified function that does not drop to such low conductivity values at higher suctions (or when the soil is dry). This will let us take into account desiccation cracking and other surface effects in the top inch or so of soil.



Finally it is necessary to specify thermal properties. In this example we have applied the Simplified Thermal model which means we don't need to create functions for all these parameters. We simply specify a frozen and unfrozen set of parameters and in doing so we are assuming that there is not a significant change in thermal properties as the soil wets and dries. This is NOT ALWAYS the case, but if we are less concerned about thermal issues then it is likely all right to make this assumption.

Thermal Properties		
Thermal Conductivity:	Volumetric Heat Capacity:	<input checked="" type="checkbox"/> Activation Temp:
Unfrozen: 125 kJ/day/m/°C	Unfrozen: 2500 kJ/m³/°C	10 °C
Frozen: 150 kJ/day/m/°C	Frozen: 2300 kJ/m³/°C	
Gas Properties		
Gas Decay (Yrs): 0	<input checked="" type="checkbox"/> Activation Gas Concentration:	0 g/m³

Notice that we did not specify a gas diffusion coefficient function. VADOSE/W internally computes the diffusion function using Millington and Shearer, a method that considers the degree of saturation of the pore-water.

The temperature and concentration "activation" values will be used to establish the initial conditions which are necessary for the transient model. Recall that in the analysis settings we did not specify a secondary file where this data would come from. The activation values are only used the first time a soil becomes "active" in an analysis. So, for example, if we had several analyses linked together in the same file, the activation values are only used in the first analysis.

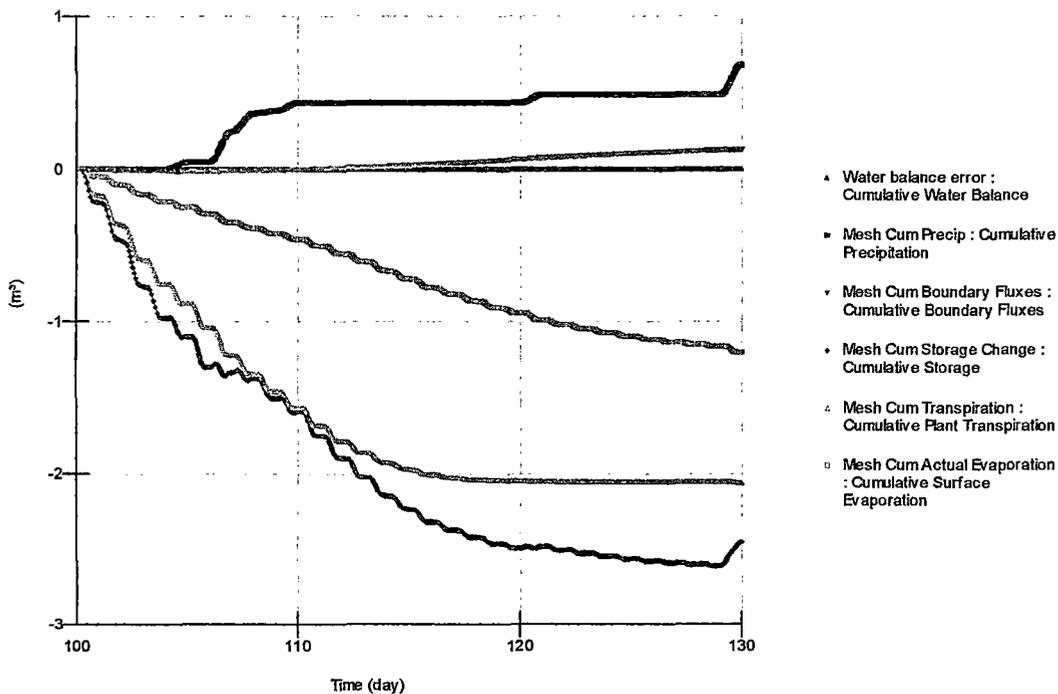
## 5 Discussion of results

VADOSE/W has many ways to interpret the data in order to gain confidence in the solution of the equations and in the design of the system. This discussion presents a logical sequence to follow when considering the model results.

### 5.1 Water Balance

The water balance graphing in CONTOUR contains data written to a convergence data file at each converged time step; not just when you choose to write data to file. It is, by default, a graph or multiple graphs of data plotted versus time. It is not necessary to choose a location on the profile for this data because it applies to the entire geometry. Each graph is created independently and then in the image below, all plotted together by holding the Control key and multi-selecting graphs.

The image below summarizes the mass balance for the entire model. It has categories such as precipitation, actual evaporation, actual transpiration, other boundary flows (not AE or AT), and change in stored mass within the system. The sum of all these should be zero in an ideal solution. The reported error category shows this summation. In this case, the error is so small it appears as zero on the graph.



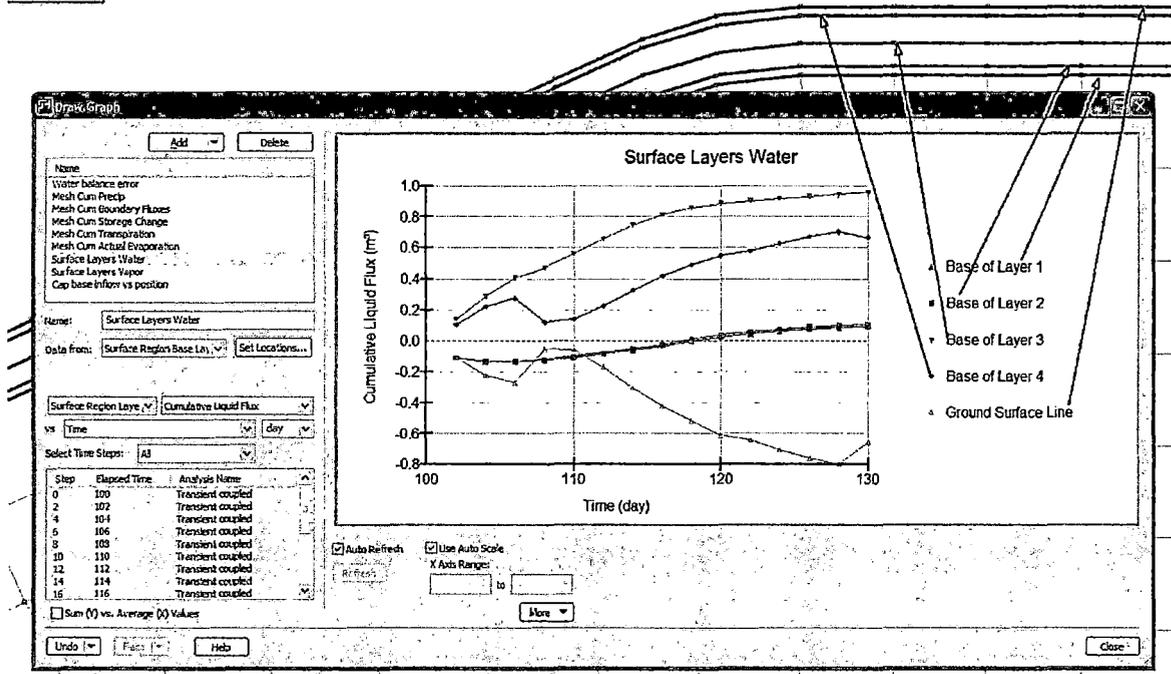
### 5.2 Cap layer flows

If you have taken time to apply surface layer regions to the model, then, by default, every layer interface is a built in location for a summation of fluxes across each layer. This way, you can tell very quickly, how much water is flowing down or up through each cap layer. The graph below shows a summary of all flow across all cap layers over time. It is not necessary to show all layers, you can pick and choose. In this case, sketch arrows have been added to the image to help you understand what the terms in the graph mean.

One thing you will see is that the ground surface values are negative which the others are positive. If the location you choose data from is an OUTSIDE mesh boundary, then the sign convention is that positive flow is INTO the system and negative flow is OUT OF the system. At any internal location, positive flow is UPWARDS and negative flow is DOWNWARDS. In this example, you can see that there is a net upward flow of water from the waste through the cap system.

What this graph does not tell you is where the water is flowing up or down. That is discussed next.

2.231121, 18.054261

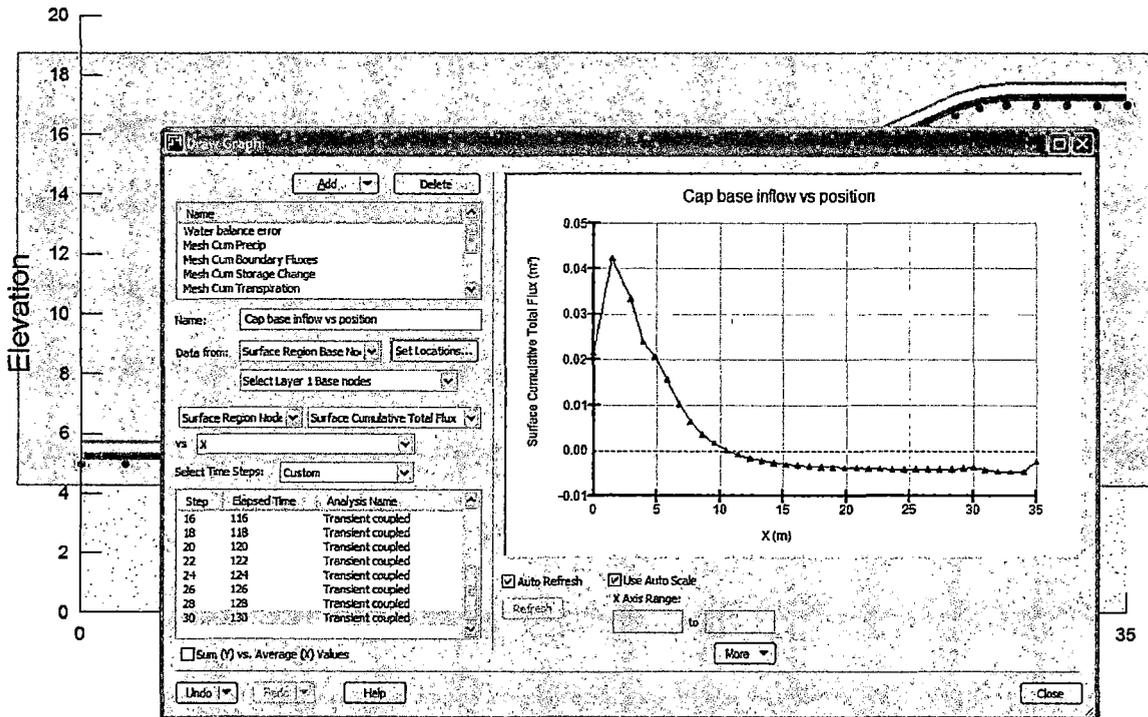


### 5.3 Cap layer flow locations

The following graph considers the individual nodal flow at the base of any selected cap interface layer. In this case, the base of the first surface region mesh layer drawn in the model. For this type of graph, you must choose the locations you want data for. Here, we have chosen the entire cap base across the profile so that we can see where water is passing the interface location. The above image showed that the total flow was about 0.1 m<sup>3</sup> upwards. The image below shows the individual values used to arrive at this number.

You can clearly see that near the base of the slope there is a net cumulative infiltration at the end of the model period. At the upslope locations, there is a net cumulative upward flow. The sum of each value displayed will equal the 0.1 m<sup>3</sup> total for this interface.

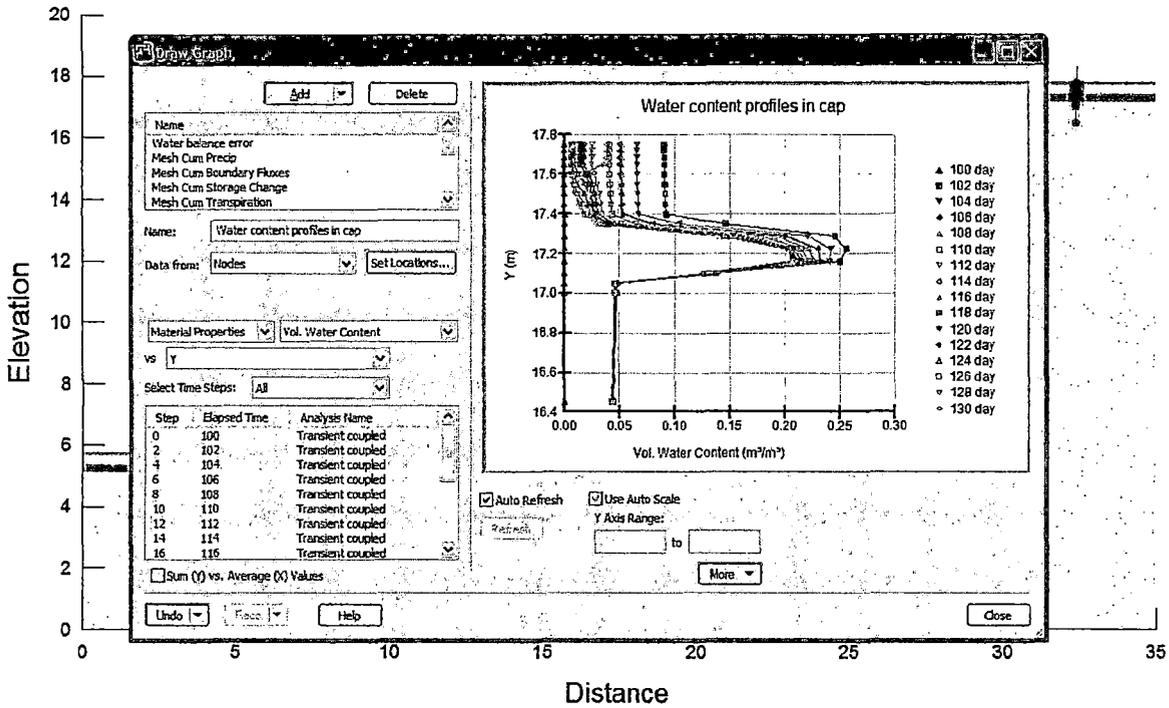
This graph is very useful for helping you understand how your system is behaving. You can now consider if you need to add thickness to a cap layer near the base or higher up slope to promote or discourage flow in those areas – depending on the objectives of your design.



#### 5.4 Vertical water content profiles

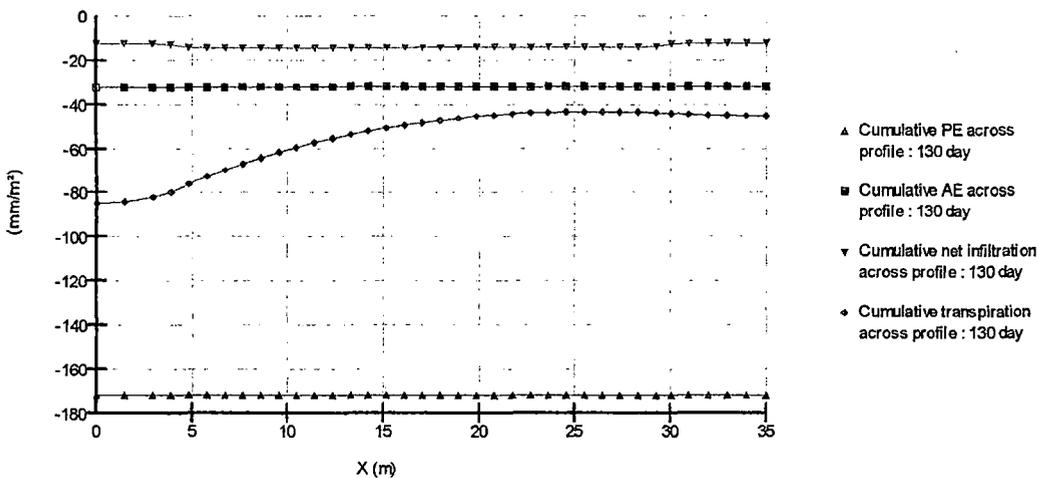
This particular cap design included a low permeability compacted clay layer that is supposed to remain near saturation over the time period such that gas diffusion through the cap is minimized which may be advantageous in preventing various chemical reactions within the waste.

With the graph feature you can set up multiple graphs to consider soil properties such as water content at different position and times. This graph shows a water content profile at the crest of the slope for various time periods. You can see a that it shows a continual drying trend over time which may not be desired.



### 5.5 Ground surface water balance

One final typical graph to consider is the water balance at the ground surface itself as a function of position. The following graph shows the various climate related influences as a function of position. The data is the cumulative data at the end of the model. You can choose any time period (s). You should note here that the units are mm/m<sup>2</sup>. This is done intentionally for this category



## **ANEXO 4: RESULTADOS**

---

**ANEXO 4.1: RESULTADOS DE LA PERCOLACION HACIA  
EL DESMONTE**

---

**RESUMEN DE PERCOLACION DE LOS MODELAMIENTOS PARA LOS 90 DÍAS**

Tiempo (días)	Percolación (m3)									
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3.24E-10	5.63E-11	9.68E-13	-3.30E-12	2.34E-12	-3.12E-12	5.41E-11	-7.20E-10	1.36E-11	-1.84E-07
2	3.79E-09	1.72E-09	5.10E-10	1.15E-10	5.60E-10	1.46E-10	1.74E-09	-6.98E-11	9.63E-10	-3.69E-07
3	8.87E-09	4.98E-09	2.11E-09	7.83E-10	2.22E-09	8.87E-10	5.02E-09	2.08E-09	3.29E-09	-5.52E-07
4	1.40E-08	8.74E-09	4.41E-09	2.06E-09	4.61E-09	2.25E-09	8.79E-09	4.83E-09	6.27E-09	-7.32E-07
5	1.90E-08	1.27E-08	7.07E-09	3.74E-09	7.41E-09	4.05E-09	1.28E-08	7.80E-09	9.36E-09	-9.10E-07
6	2.41E-08	1.68E-08	9.95E-09	5.68E-09	1.05E-08	6.13E-09	1.68E-08	1.09E-08	1.27E-08	-1.09E-06
7	2.89E-08	2.07E-08	1.29E-08	7.81E-09	1.36E-08	8.42E-09	2.08E-08	1.39E-08	1.61E-08	-1.27E-06
8	3.35E-08	2.46E-08	1.59E-08	1.01E-08	1.68E-08	1.08E-08	2.47E-08	1.68E-08	1.95E-08	-1.44E-06
9	3.79E-08	2.85E-08	1.90E-08	1.24E-08	2.00E-08	1.33E-08	2.85E-08	1.97E-08	2.29E-08	-1.61E-06
10	4.20E-08	3.20E-08	2.19E-08	1.47E-08	2.31E-08	1.59E-08	3.21E-08	2.23E-08	2.62E-08	-1.78E-06
11	4.58E-08	3.53E-08	2.47E-08	1.70E-08	2.62E-08	1.84E-08	3.55E-08	2.47E-08	2.93E-08	-1.95E-06
12	4.93E-08	3.86E-08	2.75E-08	1.93E-08	2.91E-08	2.09E-08	3.89E-08	-4.28E-06	3.23E-08	-2.13E-06
13	5.25E-08	4.15E-08	3.02E-08	2.16E-08	3.18E-08	2.33E-08	4.19E-08	-5.33E-05	3.52E-08	-2.30E-06
14	5.58E-08	4.46E-08	3.27E-08	2.37E-08	3.45E-08	2.55E-08	4.49E-08	-0.0001357	3.80E-08	-1.99E-05
15	5.91E-08	4.76E-08	3.53E-08	2.59E-08	3.71E-08	2.78E-08	4.79E-08	-0.0002557	4.07E-08	-0.0001254
16	6.22E-08	5.05E-08	3.78E-08	2.80E-08	3.98E-08	3.01E-08	5.09E-08	-0.0004341	4.35E-08	-0.0003483
17	6.50E-08	5.33E-08	4.03E-08	3.02E-08	4.22E-08	3.22E-08	5.36E-08	-0.0007043	4.61E-08	-0.0007732
18	6.75E-08	5.58E-08	4.26E-08	3.22E-08	4.45E-08	3.43E-08	5.62E-08	-0.0010431	4.86E-08	-0.0017892
19	6.99E-08	5.82E-08	4.47E-08	3.42E-08	4.68E-08	3.63E-08	5.87E-08	-0.0013816	5.09E-08	-0.0024171
20	7.25E-08	6.05E-08	4.68E-08	3.61E-08	4.90E-08	3.83E-08	6.11E-08	-0.0016637	5.32E-08	-0.0027275
21	-1.37E-06	6.27E-08	4.89E-08	3.79E-08	5.12E-08	4.03E-08	6.34E-08	-0.0018573	5.54E-08	-0.0030715

22	-1.87E-05	6.51E-08	5.11E-08	3.98E-08	5.34E-08	4.22E-08	-1.98E-06	-0.0019725	5.76E-08	-0.0034943
23	-4.11E-05	6.73E-08	5.33E-08	4.15E-08	5.55E-08	4.41E-08	-1.93E-05	-0.0020362	5.97E-08	-0.0039895
24	-7.03E-05	7.60E-08	5.55E-08	4.33E-08	5.76E-08	4.61E-08	-4.06E-05	-0.0020881	6.19E-08	-0.0044305
25	-0.0001095	-1.27E-05	5.74E-08	4.50E-08	5.98E-08	4.79E-08	-6.69E-05	-0.0021333	6.41E-08	-0.0044070
26	-0.0001645	-3.38E-05	5.93E-08	4.66E-08	6.17E-08	4.98E-08	-0.0001000	-0.0021719	-1.30E-05	-0.0043415
27	-0.0002468	-6.00E-05	6.10E-08	4.82E-08	6.36E-08	5.15E-08	-0.0001429	-0.0022061	-3.15E-05	-0.0042858
28	-0.0003844	-9.29E-05	6.28E-08	4.99E-08	6.55E-08	5.33E-08	-0.0002003	-0.0022369	-5.46E-05	-0.0042399
29	-0.0006763	-0.0001354	6.46E-08	5.15E-08	-3.62E-06	5.51E-08	-0.0002815	-0.0022721	-8.37E-05	-0.0042024
30	-0.0022203	-0.0001923	6.64E-08	5.32E-08	-1.92E-05	5.68E-08	-0.0004065	-0.0023271	-0.0001208	-0.0041718
31	-0.0043162	-0.0002730	6.82E-08	5.48E-08	-3.80E-05	5.86E-08	-0.0006319	-0.0024246	-0.0001694	-0.0041469
32	-0.0042945	-0.0003974	6.99E-08	5.64E-08	-6.13E-05	6.04E-08	-0.0012335	-0.0026327	-0.0002354	-0.0041264
33	-0.0042850	-0.0006225	7.17E-08	5.81E-08	-9.12E-05	-9.06E-07	-0.0043687	-0.0028782	-0.0003304	-0.0041104
34	-0.0042893	-0.0012302	7.36E-08	5.98E-08	-0.0001321	-1.72E-05	-0.0043306	-0.0031639	-0.0004813	-0.0040989
35	-0.004310	-0.0043576	7.58E-08	6.17E-08	-0.0001913	-3.79E-05	-0.0043105	-0.0036485	-0.0007716	-0.0040924
36	-0.0043521	-0.0043206	-3.65E-06	6.37E-08	-0.0002831	-6.42E-05	-0.0042962	-0.0041116	-0.0017641	-0.0040915
37	-0.0044172	-0.0043011	-1.59E-05	-1.42E-05	-0.0004463	-9.84E-05	-0.0042883	-0.0045511	-0.004204	-0.0040972
38	-0.0045114	-0.0042874	-3.08E-05	-3.53E-05	-0.0008512	-0.0001444	-0.0042879	-0.0049786	-0.004176	-0.0041105
39	-0.0046413	-0.0042800	-4.87E-05	-6.04E-05	-0.0043503	-0.0002101	-0.0042964	-0.0054025	-0.0041571	-0.0041327
40	-0.0048170	-0.0042804	-7.05E-05	-9.08E-05	-0.0042945	-0.0003138	-0.0043156	-0.0058286	-0.0041423	-0.0041656
41	-0.0050472	-0.0042902	-9.71E-05	-0.0001282	-0.0042850	-0.0005120	-0.0043475	-0.0062606	-0.0041321	-0.0042107
42	-0.0053438	-0.0043109	-0.0001302	-0.0001754	-0.0043101	-0.0011258	-0.0043937	-0.0066988	-0.0041275	-0.0042698
43	-0.0057200	-0.0043444	-0.0001720	-0.0002371	-0.0043795	-0.0043344	-0.0044565	-0.007143	-0.0041296	-0.0043449
44	-0.0061850	-0.0043925	-0.0002264	-0.0003215	-0.0045058	-0.0043042	-0.0045393	-0.0075928	-0.0041393	-0.0044381
45	-0.0067305	-0.0044581	-0.0002999	-0.0004456	-0.0047058	-0.0042947	-0.0046451	-0.0080497	-0.0041578	-0.0045523
46	-0.0073208	-0.0045442	-0.0004054	-0.0006525	-0.0050069	-0.0043083	-0.0047795	-0.0085139	-0.0041868	-0.0046898
47	-0.0079331	-0.0046557	-0.0005731	-0.0011035	-0.0054497	-0.0043635	-0.0049480	-0.0089860	-0.0042279	-0.0048541
48	-0.0085501	-0.0047982	-0.0008986	-0.0045538	-0.0060797	-0.0045011	-0.0051600	-0.0094680	-0.0042835	-0.0050487
49	-0.0091703	-0.0049771	-0.0020737	-0.0043668	-0.006893	-0.0047447	-0.0054213	-0.0099597	-0.0043563	-0.0052755

50	-0.0097923	-0.0052012	-0.0042469	-0.0043448	-0.0077783	-0.0051401	-0.0057420	-0.0104600	-0.0044485	-0.0055353
51	-0.0104190	-0.0054775	-0.0042184	-0.0043273	-0.0086682	-0.0057604	-0.0061261	-0.0109670	-0.0045649	-0.0058308
52	-0.0110502	-0.0058176	-0.0041981	-0.0043126	-0.0095595	-0.0066571	-0.0065731	-0.0114806	-0.0047094	-0.0061615
53	-0.0116829	-0.0062209	-0.0041812	-0.0043009	-0.0104471	-0.0077021	-0.0070626	-0.0119996	-0.0048875	-0.0065245
54	-0.0123199	-0.0066853	-0.0041680	-0.0042929	-0.0113347	-0.0087590	-0.0075751	-0.0125222	-0.0051055	-0.0069176
55	-0.0129607	-0.0071875	-0.0041593	-0.0042893	-0.0122226	-0.0098113	-0.0080944	-0.0130486	-0.0053694	-0.0073393
56	-0.0136050	-0.0077085	-0.0041561	-0.0042909	-0.0131109	-0.0108587	-0.0086146	-0.0135774	-0.0056868	-0.0077868
57	-0.0142564	-0.0082346	-0.0041593	-0.0042984	-0.0140036	-0.0119062	-0.0091380	-0.0141080	-0.0060586	-0.0082592
58	-0.0149186	-0.0087658	-0.0041701	-0.0043129	-0.0149049	-0.0129587	-0.0096666	-0.0146422	-0.0064853	-0.0087580
59	-0.0155911	-0.0093015	-0.0041900	-0.0043355	-0.0158144	-0.0140164	-0.0102005	-0.0151821	-0.0069498	-0.0092855
60	-0.0162722	-0.0098407	-0.004220	-0.0043674	-0.0167306	-0.0150781	-0.0107382	-0.0157276	-0.0074348	-0.0098468
61	-0.0169579	-0.0103811	-0.0042630	-0.0044096	-0.0176499	-0.0161404	-0.0112771	-0.0162789	-0.0079252	-0.0104534
62	-0.0176445	-0.0109199	-0.0043195	-0.0044639	-0.0185687	-0.0171999	-0.0118147	-0.0168338	-0.0084139	-0.0111265
63	-0.0183311	-0.0114563	-0.0043919	-0.0045317	-0.0194862	-0.0182560	-0.0123505	-0.0173917	-0.0089006	-0.0119263
64	-0.0190160	-0.0119892	-0.004481	-0.0046143	-0.0204008	-0.0193069	-0.0128832	-0.0179522	-0.0093839	-0.0131198
65	-0.0196992	-0.0125182	-0.0045928	-0.0047145	-0.0213130	-0.0203528	-0.0134124	-0.0185155	-0.0098637	-0.0207700
66	-0.0203835	-0.0130444	-0.0047273	-0.0048344	-0.0222255	-0.0213959	-0.0139391	-0.0190836	-0.0103410	-0.0242125
67	-0.0210720	-0.0135683	-0.0048894	-0.0049765	-0.0231427	-0.0224382	-0.0144639	-0.0196605	-0.0108158	-0.0259293
68	-0.0224402	-0.0140911	-0.0050839	-0.0051452	-0.0244023	-0.0234835	-0.0149880	-0.0202527	-0.0112890	-0.0265150
69	-0.0224405	-0.0146160	-0.0053148	-0.0053437	-0.0244023	-0.0245429	-0.0155146	-0.0208744	-0.0117633	-0.0268470
70	-0.0225707	-0.0151449	-0.0055901	-0.0055768	-0.0244706	-0.0254132	-0.0160455	-0.0215589	-0.0122400	-0.0273633
71	-0.0229046	-0.0156760	-0.0059108	-0.0058483	-0.0252722	-0.0258791	-0.0165790	-0.0223729	-0.0127179	-0.0280806
72	-0.0243557	-0.0162095	-0.0062757	-0.0061568	-0.0263196	-0.0263728	-0.0171153	-0.0233773	-0.0131969	-0.0287871
73	-0.0267242	-0.0167460	-0.0066781	-0.0065030	-0.0270616	-0.0270364	-0.0176552	-0.0244723	-0.0136776	-0.0294991
74	-0.0280184	-0.0172859	-0.0071032	-0.0068786	-0.0277715	-0.0278044	-0.0181991	-0.0255140	-0.0141603	-0.0301299
75	-0.0288008	-0.0178287	-0.0075411	-0.0072711	-0.0284739	-0.0267691	-0.0187467	-0.0264641	-0.0146442	-0.0307471
76	-0.0294677	-0.0183729	-0.0079802	-0.0076736	-0.0291779	-0.0230349	-0.0192970	-0.0273382	-0.0151281	-0.0313752
77	-0.0301606	-0.0189180	-0.0084171	-0.0080772	-0.0298897	-0.0166600	-0.0198506	-0.0281575	-0.0156112	-0.0320249

78	-0.0309087	-0.0194650	-0.0088517	-0.0084792	-0.0306149	-0.0109803	-0.0213312	-0.0289388	-0.0160936	-0.0326733
79	-0.0316961	-0.0200166	-0.0092845	-0.0088799	-0.0313584	-0.0139809	-0.0241656	-0.0296943	-0.0165756	-0.0333137
80	-0.0325051	-0.0220508	-0.0097149	-0.0092789	-0.0321234	-0.0166384	-0.0281229	-0.0304331	-0.0170569	-0.0339449
81	-0.0333242	-0.0228845	-0.0101427	-0.0096761	-0.0329104	-0.0187565	-0.0298822	-0.0311608	-0.0175375	-0.0345672
82	-0.0341452	-0.0238364	-0.0105684	-0.0100717	-0.0337175	-0.0205810	-0.0311502	-0.0318799	-0.0180181	-0.0351820
83	-0.0349581	-0.0261135	-0.0109938	-0.0104669	-0.0345451	-0.0222070	-0.0322696	-0.0325876	-0.0185013	-0.0357911
84	-0.0357433	-0.0288720	-0.0114192	-0.0108624	-0.0353973	-0.0237226	-0.0333437	-0.0332730	-0.0189899	-0.0363978
85	-0.0364878	-0.030479	-0.0118437	-0.0112573	-0.0362694	-0.0251787	-0.0340662	-0.0339204	-0.0194839	-0.0370028
86	-0.0372113	-0.0316864	-0.0122687	-0.0116524	-0.0371617	-0.0265991	-0.0342627	-0.0345204	-0.0216896	-0.0376063
87	-0.0379375	-0.0327506	-0.0126939	-0.012047	-0.0380756	-0.0279918	-0.0342629	-0.0350876	-0.0230663	-0.0382099
88	-0.0386757	-0.0337679	-0.0131174	-0.0124416	-0.0390059	-0.0293413	-0.0342631	-0.0356428	-0.0270226	-0.0388127
89	-0.0394247	-0.0346653	-0.0135401	-0.0128349	-0.0399526	-0.0305648	-0.0342634	-0.0361959	-0.0289086	-0.0394133
90	-0.0401823	-0.0349585	-0.0139638	-0.0132288	-0.0409195	-0.0315964	-0.0342637	-0.0367503	-0.0301706	-0.0400124

**ANEXO 4.2: RESULTADOS DEL PERFIL DE SATURACION  
DE LOS MODELOS DE COBERTURA**

---



Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.47	0.9052283	0.9988266	1	1	1	1	1	1	1	1
15.48	0.9049587	0.9988758	1	1	1	1	1	1	1	1
15.50	0.5527827	0.9283725	1	1	1	1	1	1	1	1
15.53	0.1046703	0.7917105	1	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.1048413	0.7446275	1	1	1	1	1	1	1	1
15.58	0.1049166	0.6992981	1.000060938	1	1	1	1	1	1	1
15.60	0.1050025	0.6570857	0.999648053	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.1051260	0.6184702	0.987098152	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.1053346	0.5834972	0.962236166	1	1	1	1	1	1	1
15.68	0.1056234	0.5519193	0.926289435	1	1	1	1	1	1	1
15.70	0.1015998	0.5232351	0.884508273	1	1	1	1	1	1	1
15.73	0.0628997	0.4966813	0.839408527	1	1	1	1	1	1	1
15.75	0.0338565	0.4711733	0.792527069	1	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 2 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.0681372	0.06817916	0.068216651	0.06978823	0.5602195	0.5661366	0.59969712	0.6584988	0.77868553	-0.06413984
15.03	0.0681377	0.06823464	0.068290258	0.55976827	1	1	1	1	1	0.30005005
15.05	0.0681381	0.06824873	0.068342953	1	0.99999999	1	1	1	1	0.36683918
15.08	0.0681387	0.06824015	0.068315115	1.00679369	1.00532982	1	1	1	1.00307145	0.30676211
15.10	0.0681393	0.06825405	0.068263299	0.9322512	0.90489397	1	1	1	0.97488084	0.28492789
15.13	0.0681401	0.06826714	0.072648548	0.74890993	0.71650833	1	1	1	0.81431462	0.27910806
15.15	0.0681411	0.06826924	0.433385815	0.5734707	0.54720022	1	1	1	0.63406664	0.27782376
15.18	0.0681423	0.06827343	0.572336829	0.43900781	0.42051044	1.0036835	1	1	0.49317386	0.27760028
15.20	0.0681438	0.06828528	0.434304918	0.34845525	0.33814588	0.9701128	1	1	0.39709301	0.27760589
15.23	0.0677562	0.06800752	0.338527117	0.29701961	0.29381004	0.8038216	1	1	0.33836374	0.27766278
15.25	0.70011	0.7455398	0.820975278	0.81892066	0.81925581	0.9058735	0.99999857	1	0.82681218	0.82013074
15.27	0.9096184	0.96475304	0.998765343	0.99897896	0.99903366	0.9996537	1.00000025	1	0.99927879	0.99920811
15.29	0.9088851	0.96535441	0.999003566	0.99936626	0.99943594	0.9999083	1	1	0.99968843	0.99964624
15.31	0.9081978	0.966662	0.999205337	0.99963349	0.99971627	1.0000085	1	1	0.99998023	0.9999618
15.33	0.9075863	0.96855557	0.999371679	0.9998577	0.99993886	1	1	1	1.00000257	1.00000462
15.35	0.9070748	0.97088384	0.999506971	0.99999451	1.00000787	1	1	1	1	1
15.37	0.9066743	0.97348602	0.999623904	1.00000079	1	1	1	1	1	1
15.39	0.9063811	0.97621016	0.999731615	1	1	1	1	1	1	1
15.41	0.90618	0.97892599	0.999826513	1	1	1	1	1	1	1
15.43	0.9060496	0.98153242	0.999904259	1	1	1	1	1	1	1
15.45	0.9059678	0.98396081	0.999960859	1	1	1	1	1	1	1
15.47	0.9059148	0.98617613	0.999990207	1	1	1	1	1	1	1
15.49	0.9058743	0.98817806	1.000001193	1	1	1	1	1	1	1

15.51	0.9058335	0.99000738		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.53	0.90578	0.99171444		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.9057038	0.99328526		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.57	0.9055975	0.9947013		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.59	0.9054552	0.99594657		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.61	0.9052666	0.99701029		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.9049994	0.99789678		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.5527832	0.90892403		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.68	0.1046695	0.74749424		1	1	1	1	1	1	1	1	1
15.70	0.1048398	0.70215685	1.000499807		1	1	1	1	1	1	1	1
15.73	0.1049149	0.65994171	0.996025908		1	1	1	1	1	1	1	1
15.75	0.1050007	0.62138721	0.979065051		1	1	1	1	1	1	1	1
15.78	0.1051241	0.58659359	0.94889154		1	1	1	1	1	1	1	1
15.80	0.1053327	0.5553847	0.910247916		1	1	1	1	1	1	1	1
15.83	0.1056207	0.52734988	0.866923495		1	1	1	1	1	1	1	1
15.85	0.1015928	0.50185317	0.821023511		1	1	1	1	1	1	1	1
15.88	0.0629023	0.47799654	0.773734603		1	1	1	1	1	1	1	1
15.90	0.0338481	0.45454625	0.726419093		1	1	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 3 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.06813714	0.06816596	0.06819873	0.06822439	0.06726828	0.56724469	0.5605444	0.56957388	0.60018888	0.64836461
15.03	0.06813718	0.06820205	0.06826761	0.06831093	0.56713826	0.94876838	1	1	1	1
15.05	0.06813723	0.06820624	0.06827248	0.06831753	0.94672609	0.77052704	1	1	1	1
15.08	0.06813728	0.06821057	0.06827732	0.06832905	0.75975832	0.59184443	1	1	1	1
15.10	0.06813735	0.06821505	0.06828256	0.06484271	0.5780225	0.45532014	1.006031	1	1	1
15.13	0.06813743	0.0682197	0.06828741	0.09297252	0.43650445	0.36549552	0.9511784	1	1	1
15.15	0.06813755	0.06822452	0.06829267	0.34051626	0.33867854	0.31450604	0.774002	1	1	1
15.18	0.06813769	0.06822951	0.06829808	0.3291891	0.2825247	0.28709987	0.5940283	1	1	1
15.20	0.06813783	0.06823461	0.06830343	0.26209469	0.25738341	0.27106606	0.45379	1.00658438	1	1
15.23	0.06775101	0.06799256	0.06495604	0.21894546	0.24827874	0.26069622	0.357779	0.94246672	1	1
15.25	0.70011624	0.70635945	0.78101208	0.80158343	0.81198684	0.81416107	0.8261831	0.94150412	0.99998782	1
15.27	0.90962152	0.9177554	0.99631263	0.99809679	0.99873251	0.99882223	0.9990658	0.99972423	1.00000217	1
15.29	0.90888589	0.91761074	0.99606379	0.99817595	0.99908653	0.99919521	0.9994152	0.99991038	1	1
15.31	0.90819759	0.91789426	0.99587914	0.99825369	0.99936051	0.99946786	0.9996639	1.00000085	1	1
15.33	0.90758564	0.91864155	0.99576184	0.9983302	0.99956404	0.99967627	0.9998745	1	1	1
15.35	0.90707383	0.91989417	0.9957124	0.99840561	0.99973869	0.99985629	0.999997	1	1	1
15.37	0.90667326	0.92169357	0.9957289	0.99848003	0.99988498	0.99997537	1.0000004	1	1	1
15.39	0.90638034	0.92407284	0.9958074	0.99855351	0.99997798	1.00000351	1	1	1	1
15.41	0.90618007	0.92704747	0.9959422	0.99862607	1.00000319	1	1	1	1	1
15.43	0.9060518	0.9306063	0.99612626	0.99869768	1	1	1	1	1	1
15.45	0.90597463	0.9347051	0.99635155	0.99876831	1	1	1	1	1	1
15.47	0.9059309	0.93926455	0.99660944	0.99883786	1	1	1	1	1	1
15.49	0.90590752	0.94417374	0.99689112	0.99890622	1	1	1	1	1	1
15.51	0.9058957	0.94929858	0.99718802	0.99897323	1	1	1	1	1	1

15.53	0.90589006	0.9544932	0.99749235	0.99903869	1	1	1	1	1	1
15.55	0.90588746	0.95961791	0.99779774	0.99910239	1	1	1	1	1	1
15.57	0.90588615	0.96455151	0.9981	0.99916409	1	1	1	1	1	1
15.59	0.90588506	0.96919492	0.99839335	0.99922355	1	1	1	1	1	1
15.61	0.90588418	0.97347432	0.99867043	0.99928053	1	1	1	1	1	1
15.63	0.90588221	0.97734187	0.99892408	0.99933483	1	1	1	1	1	1
15.65	0.90587791	0.98077521	0.9991478	0.99938633	1	1	1	1	1	1
15.67	0.90586917	0.98377708	0.99933699	0.999435	1	1	1	1	1	1
15.69	0.90585264	0.98637654	0.99949159	0.99948095	1	1	1	1	1	1
15.71	0.90582348	0.98863347	0.9996239	0.9995245	1	1	1	1	1	1
15.73	0.90577547	0.99065239	0.99974643	0.99956627	1	1	1	1	1	1
15.75	0.90570187	0.99249348	0.9998531	0.99960696	1	1	1	1	1	1
15.77	0.90559674	0.99414055	0.99993643	0.99964647	1	1	1	1	1	1
15.79	0.90545505	0.99557898	0.99998373	0.99968453	1	1	1	1	1	1
15.81	0.90526707	0.99679738	1.00000228	0.9997209	1	1	1	1	1	1
15.83	0.90500076	0.99779824	1	0.99975528	1	1	1	1	1	1
15.85	0.55278563	0.90778358	1.00000001	0.99211164	1	1	1	1	1	1
15.88	0.10466879	0.74497057	1.00037463	0.95384637	1	1	1	1	1	1
15.90	0.10483908	0.69979857	0.98995373	0.91612205	1	1	1	1	1	1
15.93	0.10491431	0.65779619	0.96746828	0.87338746	1	1	1	1	1	1
15.95	0.10500017	0.61947147	0.93289201	0.82794219	1	1	1	1	1	1
15.98	0.10512369	0.58490821	0.89191626	0.78116182	1	1	1	1	1	1
16.00	0.1053323	0.5539197	0.84731361	0.73429067	1	1	1	1	1	1
16.03	0.10562044	0.52608733	0.800784	0.6893964	1	1	1	1	1	1
16.05	0.10159246	0.50076829	0.75332714	0.64742988	1	1	1	1	1	1
16.08	0.06290167	0.47705801	0.70681462	0.60855855	1	1	1	1	1	1
16.10	0.03384725	0.4537152	0.66272384	0.57247747	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 4 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.06813713	0.06815652	0.06818463	0.06820712	0.06779636	0.56074205	0.56062425	0.56857329	0.59566081	0.63716501
15.03	0.06813714	0.06817891	0.06823438	0.06827421	0.56004556	1.00333645	1	1	1	1
15.05	0.06813714	0.06818197	0.06823814	0.0682785	1.00667445	0.88855459	1	1	1	1
15.08	0.06813714	0.06818513	0.06824189	0.06828261	0.94064014	0.6986477	1	1	1	1
15.10	0.06813715	0.06818841	0.06824575	0.06828683	0.75950578	0.53212279	1.00385021	1	1	1
15.13	0.06813716	0.06819182	0.06824973	0.06829115	0.58143253	0.40746279	0.96883007	1	1	1
15.15	0.06813717	0.06819535	0.06825382	0.06816406	0.44274441	0.32522763	0.80086123	1	1	1
15.18	0.06813718	0.06819902	0.06825803	0.07503927	0.34640551	0.27936743	0.61665639	0.99999999	1	1
15.20	0.06813716	0.06820277	0.06826232	0.4227319	0.2886159	0.25793319	0.46994634	1.00562496	1	1
15.23	0.06775028	0.06788461	0.06827445	0.556019	0.25970218	0.24904911	0.36684089	0.90876991	1	1
15.25	0.700117	0.70310327	0.72604617	0.85678537	0.81249388	0.81203652	0.82678992	0.93110934	0.99996838	1
15.27	0.90962182	0.91345444	0.94215901	0.99921241	0.99870048	0.9987297	0.999014	0.99965649	1.00000337	1
15.29	0.90888593	0.9127892	0.94217259	0.99940536	0.99902567	0.99908122	0.99933594	0.99983298	1	1
15.31	0.90819752	0.91218824	0.94266842	0.99955833	0.99928658	0.99935419	0.99956796	0.99995943	1	1
15.33	0.9075855	0.91165704	0.94362747	0.99969407	0.99948621	0.99955729	0.99976361	1.00000418	1	1
15.35	0.90707364	0.91120346	0.94501892	0.99981474	0.99964842	0.99973088	0.99992091	1	1	1
15.37	0.90667302	0.9108383	0.94680154	0.99991193	0.99979383	0.99987751	0.99999915	1	1	1
15.39	0.90638005	0.91057606	0.94892552	0.9999743	0.99991078	0.99997351	1	1	1	1
15.41	0.90617973	0.91043578	0.95133467	1.00000176	0.99998136	1.00000379	1	1	1	1
15.43	0.90605138	0.91044203	0.95396891	1	1.00000269	1	1	1	1	1
15.45	0.90597412	0.91062588	0.95676763	1	1	1	1	1	1	1
15.47	0.90593029	0.91102565	0.95967178	1	1	1	1	1	1	1
15.49	0.90590679	0.91168727	0.96262568	1	1	1	1	1	1	1
15.51	0.90589486	0.91266376	0.9655784	1	1	1	1	1	1	1

15.53	0.9058891	0.91401343	0.96848472	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.90588648	0.91579627	0.97130564	1	1	1	1	1	1	1
15.57	0.90588535	0.91806826	0.97400874	1	1	1	1	1	1	1
15.59	0.90588492	0.92087362	0.97656821	1	1	1	1	1	1	1
15.61	0.90588479	0.92423593	0.97896497	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.9058848	0.92814956	0.9811867	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.90588487	0.93257366	0.9832281	1	1	1	1	1	1	1
15.67	0.90588498	0.93743078	0.9850912	1	1	1	1	1	1	1
15.69	0.90588512	0.9426109	0.98678604	1	1	1	1	1	1	1
15.71	0.90588527	0.94798052	0.98833179	1	1	1	1	1	1	1
15.73	0.90588539	0.95339422	0.98975962	1	1	1	1	1	1	1
15.75	0.90588534	0.9587115	0.99110278	1	1	1	1	1	1	1
15.77	0.90588522	0.96381229	0.99236041	1	1	1	1	1	1	1
15.79	0.90588489	0.96859928	0.99352668	1	1	1	1	1	1	1
15.81	0.90588411	0.97300066	0.99459613	1	1	1	1	1	1	1
15.83	0.90588219	0.97697059	0.9955638	1	1	1	1	1	1	1
15.85	0.9058779	0.9804886	0.99642605	1	1	1	1	1	1	1
15.87	0.90586916	0.98355905	0.99718206	1	1	1	1	1	1	1
15.89	0.90585264	0.98621235	0.99783759	1	1	1	1	1	1	1
15.91	0.90582348	0.9885093	0.99840759	1	1	1	1	1	1	1
15.93	0.90577547	0.99055586	0.99888596	1	1	1	1	1	1	1
15.95	0.90570186	0.99242069	0.99925922	1	1	1	1	1	1	1
15.97	0.90559674	0.9940885	0.99952539	1	1	1	1	1	1	1
15.99	0.90545505	0.99554454	0.99973863	1	1	1	1	1	1	1
16.01	0.90526707	0.99677722	0.99991349	1	1	1	1	1	1	1
16.03	0.90500078	0.99778869	0.99999999	1	1	1	1	1	1	1
16.05	0.55278567	0.90764826	1.00006597	1	1	1	1	1	1	1
16.08	0.10466877	0.74467107	0.99949659	1	1	1	1	1	1	1

16.10	0.10483906	0.69951824	0.98663286	1	1	1	1	1	1	1
16.13	0.1049143	0.65754057	0.96140726	1	1	1	1	1	1	1
16.15	0.10500017	0.61924265	0.92528358	1	1	1	1	1	1	1
16.18	0.10512369	0.58470633	0.88343917	1	1	1	1	1	1	1
16.20	0.10533229	0.55374374	0.83838337	1	1	1	1	1	1	1
16.23	0.10562043	0.52593528	0.79163422	1	1	1	1	1	1	1
16.25	0.10159245	0.50063738	0.74422002	1	1	1	1	1	1	1
16.28	0.06290167	0.47694461	0.69815079	1	1	1	1	1	1	1
16.30	0.03384725	0.45361483	0.65463857	1	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 5 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.06813714	0.06816759	0.06820162	0.06621707	0.56034179	0.58378971	0.66550463	0.10656366	0.60838228	0.68690218
15.03	0.0681372	0.06820646	0.06827422	0.56565731	0.99999999	1	1	0.26592491	0.93293284	1.00029921
15.05	0.06813726	0.06821095	0.06828166	0.89885327	1.00636334	1	1	0.33081537	0.75275988	0.9989227
15.08	0.06813732	0.06821557	0.06828461	0.7098507	0.91809745	1	1	0.31863505	0.58338639	0.87099692
15.10	0.06813741	0.06822036	0.06829011	0.54160226	0.73201088	1	1	0.31977587	0.45998462	0.68605801
15.13	0.06813752	0.06822502	0.06829731	0.41554083	0.56219416	1	1	0.32184942	0.3848699	0.5333375
15.15	0.06813767	0.06823021	0.06820255	0.33281575	0.4390189	1	1	0.3231134	0.34787093	0.42865974
15.18	0.06813787	0.06823644	0.07346854	0.28735463	0.36556695	1	1	0.32376279	0.3327799	0.3689782
15.20	0.06813806	0.06824132	0.31126475	0.26682404	0.33118804	1	1	0.3240912	0.32728574	0.34115456
15.23	0.06775948	0.06795474	0.37971388	0.25907596	0.31802937	1	1	0.32426981	0.32537442	0.33010609
15.25	0.7005057	0.70418587	0.8246809	0.81489172	0.82913568	0.99996415	1	0.83187696	0.83196046	0.83231022
15.28	0.90990112	0.91555959	0.99859709	0.9990293	0.99979646	1.00000638	1	0.99995386	0.99995338	0.99995163
15.30	0.90892229	0.91764746	0.99863558	0.99946998	1.00002579	1	1	1.00000387	1.00000391	1.00000408
15.33	0.90800878	0.92246983	0.99867398	0.99977358	1	1	1	1	1	1
15.35	0.90722712	0.93058972	0.99871238	0.99998496	1	1	1	1	1	1
15.38	0.9066031	0.94175366	0.99875082	1.00000216	1	1	1	1	1	1
15.40	0.90610831	0.95450994	0.99878933	1	1	1	1	1	1	1
15.43	0.90567343	0.96681526	0.99882791	1	1	1	1	1	1	1
15.45	0.90521392	0.97713014	0.99886652	1	1	1	1	1	1	1
15.48	0.90465604	0.98483234	0.99890511	1	1	1	1	1	1	1
15.50	0.55232141	0.69620295	0.92965327	1	1	1	1	1	1	1
15.52	0.10436381	0.32340529	0.80407023	1	1	1	1	1	1	1
15.54	0.10452959	0.32757956	0.76633023	1	1	1	1	1	1	1

15.56	0.1045657	0.33262826	0.72897692	1	1	1	1	1	1	1
15.58	0.10459469	0.33792429	0.69309129	1	1	1	1	1	1	1
15.60	0.10460472	0.34307562	0.6592077	1	1	1	1	1	1	1
15.62	0.10461386	0.34786647	0.62758082	1	1	1	1	1	1	1
15.64	0.10462387	0.35219934	0.59830938	1.00038333	1	1	1	1	1	1
15.66	0.10463494	0.35605071	0.57140156	0.99502399	1	1	1	1	1	1
15.68	0.10464711	0.35944109	0.54681162	0.9820521	1	1	1	1	1	1
15.70	0.10466038	0.36241583	0.52445985	0.96046402	1	1	1	1	1	1
15.72	0.10467483	0.36503352	0.50424381	0.93217669	1	1	1	1	1	1
15.74	0.10469643	0.36735869	0.48604496	0.89991376	1	1	1	1	1	1
15.76	0.10471553	0.36945781	0.46973273	0.86518059	1	1	1	1	1	1
15.78	0.10473481	0.37139654	0.45516881	0.82905395	1	1	1	1	1	1
15.80	0.10475769	0.37323772	0.44219571	0.79227321	1	1	1	1	1	1
15.82	0.10478032	0.37503932	0.43064463	0.75541889	1	1	1	1	1	1
15.84	0.10481275	0.37685131	0.4203648	0.71962971	1	1	1	1	1	1
15.86	0.10482399	0.37871109	0.41122359	0.68579214	1	1	1	1	1	1
15.88	0.10485052	0.38063726	0.40310483	0.65433101	1	1	1	1	1	1
15.90	0.1048833	0.38262151	0.39590896	0.62542775	1	1	1	1	1	1
15.92	0.10493081	0.38461972	0.38954983	0.59910929	1	1	1	1	1	1
15.94	0.10497654	0.3865432	0.38394897	0.57529271	1	1	1	1	1	1
15.96	0.10504541	0.38825579	0.37902325	0.55381246	1	1	1	1	1	1
15.98	0.10515438	0.38956598	0.37466092	0.53441686	1	1	1	1	1	1
16.00	0.10533138	0.39021616	0.37069049	0.51678892	1	1	1	1	1	1
16.02	0.10560255	0.3898841	0.36684575	0.50054141	1	1	1	1	1	1
16.04	0.10586493	0.38816116	0.36272586	0.48521257	1	1	1	1	1	1
16.06	0.09353306	0.38450559	0.35774252	0.4702503	1	1	1	1	1	1
16.08	0.04875174	0.37813209	0.35102397	0.45497487	1	1	1	1	1	1
16.10	0.0457215	0.36777356	0.34121364	0.43848836	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 6 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.06813713	0.06815803	0.06818754	0.0682119	0.07159859	0.56568063	0.64310544	0.11035051	1.1583854	-0.00255253
15.03	0.06813714	0.06818269	0.06824143	0.0682836	0.56086949	1	1	0.10932445	0.98858038	0.31597012
15.05	0.06813714	0.06818604	0.06824557	0.06829103	1	1	1	0.10843446	0.77969186	0.37313864
15.08	0.06813716	0.06818951	0.06824971	0.06542744	0.99999999	1	1	0.10748968	0.62070976	0.34719873
15.10	0.06813716	0.06819311	0.06825397	0.08841371	1.00560419	1	1	0.10651259	0.51639549	0.33893221
15.13	0.06813717	0.06819685	0.06825836	0.53315124	0.90822683	1	1	0.10967553	0.45204991	0.33656558
15.15	0.06813719	0.06820072	0.06826289	0.6087751	0.72099403	1	1	0.16832882	0.41077674	0.3359245
15.18	0.06813721	0.06820476	0.06826702	0.46820558	0.55279111	1.00463831	1	0.3095422	0.38249423	0.33576939
15.20	0.06813719	0.06820883	0.06534303	0.36461266	0.42905435	0.96281189	1	0.3271937	0.36274357	0.33575218
15.23	0.06775902	0.06785525	0.16888585	0.29844721	0.35173998	0.79327326	1	0.33295704	0.34951539	0.33577366
15.25	0.7005065	0.70141039	0.79827521	0.81661976	0.82887897	0.90466938	1	0.83457741	0.83616865	0.83474767
15.28	0.90990135	0.91109301	0.9978497	0.99884958	0.99950861	1.00006939	1	1.00003494	1.00003796	1.00003306
15.30	0.90892225	0.91016904	0.99781038	0.99920127	0.99997995	1	1	1	1	1
15.33	0.90800861	0.90925867	0.99777265	0.9994605	1.00000213	1	1	1	1	1
15.35	0.90722682	0.90836191	0.99773539	0.99965848	1	1	1	1	1	1
15.38	0.9066025	0.90747864	0.99769792	0.99983082	1	1	1	1	1	1
15.40	0.90610685	0.90660861	0.99766009	0.999955	1	1	1	1	1	1
15.43	0.90566927	0.90575132	0.99762219	1.00000264	1	1	1	1	1	1
15.45	0.90520194	0.90490581	0.99758492	1	1	1	1	1	1	1
15.48	0.9046235	0.90407078	0.99754928	1	1	1	1	1	1	1
15.50	0.55226014	0.55178293	0.84840331	1	1	1	1	1	1	1
15.52	0.10433228	0.10374666	0.62583695	1	1	1	1	1	1	1
15.54	0.10451379	0.10408738	0.59577008	1.00039185	1	1	1	1	1	1
15.56	0.10454159	0.10484482	0.56796331	0.99603873	1	1	1	1	1	1

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.58	0.10455292	0.11274059	0.54237617	0.98371061	1	1	1	1	1	1
15.60	0.10455593	0.15248726	0.51894152	0.96304017	1	1	1	1	1	1
15.62	0.10455834	0.19578453	0.49757852	0.93524915	1	1	1	1	1	1
15.64	0.10456104	0.22808341	0.47819931	0.90327462	1	1	1	1	1	1
15.66	0.10456418	0.25347538	0.46071326	0.86866813	1	1	1	1	1	1
15.68	0.10456783	0.27406221	0.44502057	0.83253667	1	1	1	1	1	1
15.70	0.10457205	0.29097108	0.4309876	0.79563446	1	1	1	1	1	1
15.72	0.10457692	0.30497919	0.4184947	0.75851484	1	1	1	1	1	1
15.74	0.10458249	0.31665391	0.40744031	0.72227316	1	1	1	1	1	1
15.76	0.10458884	0.32642398	0.39773488	0.68786158	1	1	1	1	1	1
15.78	0.10459603	0.33462275	0.38929635	0.65575098	1	1	1	1	1	1
15.80	0.10460414	0.34151609	0.38204579	0.62617173	1	1	1	1	1	1
15.82	0.10461321	0.34732075	0.37590377	0.59921527	1	1	1	1	1	1
15.84	0.10462331	0.35221713	0.37078705	0.57488765	1	1	1	1	1	1
15.86	0.10463446	0.35635782	0.36660638	0.55313949	1.00027477	1	1	1	1	1
15.88	0.1046467	0.35987422	0.36326504	0.53388258	0.9978254	1	1	1	1	1
15.90	0.10466002	0.36288084	0.36065878	0.51699998	0.98673674	1	1	1	1	1
15.92	0.10467452	0.36547899	0.35867715	0.50235257	0.96803285	1	1	1	1	1
15.94	0.1046962	0.36775931	0.35720614	0.48978392	0.94141875	1	1	1	1	1
15.96	0.10471533	0.36980368	0.35613162	0.47912532	0.9102158	1	1	1	1	1
15.98	0.10473463	0.37168667	0.35534411	0.47019934	0.87611637	1	1	1	1	1
16.00	0.10475755	0.3734759	0.35474325	0.46282401	0.84031474	1	1	1	1	1
16.02	0.10478019	0.37523154	0.35424298	0.45681484	0.80362744	1	1	1	1	1
16.04	0.10481265	0.37700423	0.3537765	0.45198531	0.7666072	1	1	1	1	1
16.06	0.1048239	0.37883137	0.35329858	0.44814869	0.73019207	1	1	1	1	1
16.08	0.10485043	0.38073095	0.35278763	0.44511708	0.69543809	1	1	1	1	1

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
16.10	0.10488323	0.38269392	0.35224532	0.44269795	0.66286301	1	1	1	1	1
16.12	0.10493075	0.38467531	0.35169152	0.44069566	0.63269825	1	1	1	1	1
16.14	0.10497648	0.38658574	0.35115369	0.43889923	0.60500121	1	1	1	1	1
16.16	0.10504537	0.3882882	0.35064779	0.43708403	0.57971647	1	1	1	1	1
16.18	0.10515434	0.38959082	0.35015293	0.43500797	0.55668809	1	1	1	1	1
16.20	0.10533136	0.39023523	0.34957258	0.43240322	0.53568317	1	1	1	1	1
16.22	0.10560253	0.38989893	0.34868758	0.42896329	0.51639219	1	1	1	1	1
16.24	0.10586491	0.38817287	0.3471118	0.42431867	0.49842417	1	1	1	1	1
16.26	0.09353304	0.3845151	0.34423837	0.41798956	0.4812938	1	1	1	1	1
16.28	0.04875173	0.3781402	0.33913397	0.4092903	0.46439369	1	1	1	1	1
16.30	0.04572141	0.36778097	0.33029689	0.39715138	0.44694904	1	1	1	1	1



Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	0.94468334	0.99828164	1	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.94456711	0.99842719	1	1	1	1	1	1	1	1
15.57	0.94442036	0.99857492	1	1	1	1	1	1	1	1
15.59	0.94423604	0.99872074	1	1	1	1	1	1	1	1
15.61	0.94400245	0.99886105	1	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.94369821	0.99899284	1	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.58533775	0.94147732	1	1	1	1	1	1	1	1
15.68	0.12981742	0.82225884	1	1	1	1	1	1	1	1
15.70	0.13030662	0.77535313	1	1	1	1	1	1	1	1
15.73	0.13051408	0.72870107	1	1	1	1	1	1	1	1
15.75	0.13064098	0.68439559	1	1	1	1	1	1	1	1
15.78	0.13078931	0.64337323	1.00019997	1	1	1	1	1	1	1
15.80	0.13089278	0.60590465	0.99834088	1	1	1	1	1	1	1
15.83	0.13027799	0.57188187	0.98372877	1	1	1	1	1	1	1
15.85	0.12559819	0.54091298	0.95633489	1	1	1	1	1	1	1
15.88	0.08372173	0.51234075	0.91905458	1	1	1	1	1	1	1
15.90	0.03220866	0.48519975	0.87649618	1	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 8 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09698851	0.09702803	0.1073534	0.11308148	0.28907956	0.57718356	0.63109906	0.80477998	0.48002877	0.03612253
15.03	0.09698888	0.09708274	0.19133911	0.1431172	0.33913795	0.80593108	0.99589784	0.99179077	0.38236119	0.25286563
15.05	0.09698921	0.09708729	0.21360829	0.17090125	0.27575556	0.61517783	0.85822682	0.84670531	0.32699756	0.29436446
15.08	0.09698962	0.10212487	0.19543936	0.17905643	0.2509611	0.46966411	0.67045674	0.66049311	0.29823491	0.28202652
15.10	0.0969901	0.13453822	0.17905778	0.18826138	0.2487646	0.36901486	0.51457655	0.5085746	0.28467191	0.27721089
15.13	0.09699071	0.19049889	0.16448859	0.19651717	0.25295401	0.30970558	0.40289203	0.40089992	0.27865344	0.27529166
15.15	0.09699148	0.19671479	0.15124968	0.20353783	0.25596593	0.28134268	0.33365423	0.33437733	0.27605718	0.27454301
15.18	0.09699245	0.19899993	0.13872862	0.2095583	0.25716916	0.27007626	0.29773383	0.29936461	0.2749369	0.27428034
15.20	0.09699368	0.20149502	0.12634177	0.21496316	0.25754733	0.26605897	0.28202932	0.28350645	0.27443689	0.27422098
15.23	0.09699292	0.20396862	0.11087521	0.2201238	0.25768676	0.26472178	0.27596985	0.27706765	0.27419575	0.27424673
15.25	0.76539323	0.80211376	0.77130382	0.80691126	0.81511249	0.81675959	0.81915137	0.81935258	0.81920972	0.81926931
15.27	0.98279545	0.998176	0.98707604	0.99849728	0.99892984	0.99902056	0.99914299	0.99915153	0.99915711	0.9991619
15.29	0.98235183	0.99831742	0.98651888	0.99878502	0.99934084	0.9994432	0.99957312	0.99958197	0.99959001	0.99959545
15.31	0.98195172	0.99845112	0.98592402	0.99903389	0.99962063	0.99973546	0.99988807	0.99989756	0.99990703	0.99991325
15.33	0.98159607	0.99857739	0.98528861	0.99924295	0.99985289	0.99995938	1.00001232	1.00001238	1.00001183	1.00001095
15.35	0.98128469	0.99869645	0.98460982	0.99941323	0.99999527	1.00000523	1	1	1	1
15.37	0.98101636	0.99880846	0.98388501	0.99955144	1.00000069	1	1	1	1	1
15.39	0.98078897	0.99891349	0.98311189	0.99967524	1	1	1	1	1	1
15.41	0.98059976	0.99901161	0.98228876	0.99978745	1	1	1	1	1	1
15.43	0.98044553	0.99910283	0.98141487	0.99988191	1	1	1	1	1	1
15.45	0.98032286	0.9991872	0.98049101	0.99995275	1	1	1	1	1	1
15.47	0.98022835	0.9992648	0.9795202	0.99998976	1	1	1	1	1	1
15.49	0.9801587	0.99933581	0.97850898	1.00000125	1	1	1	1	1	1
15.51	0.98011084	0.99940056	0.97746905	1	1	1	1	1	1	1

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	0.98008194	0.99945956	0.97641935	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.98006939	0.99951363	0.97538948	1	1	1	1	1	1	1
15.57	0.98007062	0.99956401	0.97442349	1	1	1	1	1	1	1
15.59	0.98008306	0.99961211	0.97358406	1	1	1	1	1	1	1
15.61	0.98010394	0.99965797	0.9729558	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.98013019	0.99970134	0.97264496	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.64100612	0.98953192	0.62307401	1	1	1	1	1	1	1
15.68	0.20769152	0.94524899	0.18718572	1	1	1	1	1	1	1
15.70	0.20718804	0.90602664	0.20699558	1.00004434	1	1	1	1	1	1
15.73	0.20667463	0.86243692	0.22832162	0.99982391	1	1	1	1	1	1
15.75	0.20593289	0.81653127	0.24734024	0.98766431	1	1	1	1	1	1
15.78	0.20464595	0.76949561	0.26354514	0.96325392	1	1	1	1	1	1
15.80	0.20246288	0.72284204	0.27734919	0.92755729	1	1	1	1	1	1
15.83	0.19916917	0.67848566	0.28880818	0.88594167	1	1	1	1	1	1
15.85	0.19501216	0.6371464	0.29710691	0.84098501	1	1	1	1	1	1
15.88	0.12617996	0.59890383	0.30033843	0.79424806	1	1	1	1	1	1
15.90	0.03141978	0.56342829	0.29503919	0.74676847	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 9 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15	0.06813716	0.06817154	0.06820705	0.06837604	0.56039293	0.56216224	0.58264278	0.62397215	0.71463648	0.65438838
15.03	0.06813731	0.06821647	0.06828392	0.55986625	1.00006084	1	1	1	1	0.50928974
15.05	0.06813746	0.06822232	0.0682968	1.00374054	1.00216864	1	1	1	1	0.40759984
15.08	0.06813763	0.06822678	0.0683036	0.96935919	0.88204605	1	1	1	1	0.34304927
15.10	0.06813784	0.06823247	0.06830245	0.79881221	0.69201934	1	1	1	1	0.30598968
15.13	0.06813812	0.06823859	0.06831355	0.61261726	0.52733471	1.00008031	1	1	1	0.28643055
15.15	0.06813847	0.0682439	0.06453865	0.46351574	0.40529163	1.00183109	1	1	1	0.2766655
15.18	0.06813893	0.06847839	-0.03452	0.35797066	0.32637224	0.88069023	1	1	1	0.27192919
15.20	0.06813946	0.06606977	0.20469502	0.29513338	0.28387744	0.69129595	1	1	1	0.26967009
15.23	0.06775248	0.06844969	0.22335775	0.26587764	0.26502918	0.52836526	0.99999999	1	1	0.26862074
15.25	0.70011451	0.71697641	0.80112173	0.8144562	0.81511219	0.85293783	0.99987917	1	1	0.81772506
15.27	0.90962073	0.93131744	0.99844389	0.99883056	0.99888509	0.99934065	0.99999527	1	1	0.99907344
15.29	0.90888572	0.93197452	0.99869918	0.99920394	0.9992771	0.99961684	1.00000072	1	1	0.99949999
15.31	0.9081977	0.93352148	0.99892205	0.99947586	0.99955079	0.99984669	1	1	1	0.99980338
15.33	0.90758588	0.93590505	0.99911203	0.99968495	0.99977238	0.99999155	1	1	1	0.99999996
15.35	0.90707417	0.93903939	0.99926973	0.9998647	0.99994353	1.00000123	1	1	1	1.00000023
15.37	0.90667368	0.94280723	0.99939744	0.99998024	1.00000545	1	1	1	1	1
15.39	0.90638084	0.947065	0.99950356	1.00000286	1	1	1	1	1	1
15.41	0.90618065	0.95165146	0.99960059	1	1	1	1	1	1	1
15.43	0.90605244	0.95640006	0.9996903	1	1	1	1	1	1	1
15.45	0.90597529	0.96115609	0.99977117	1	1	1	1	1	1	1
15.47	0.90593144	0.96578463	0.99984139	1	1	1	1	1	1	1
15.49	0.90590763	0.97017565	0.99990027	1	1	1	1	1	1	1
15.51	0.90589471	0.97424668	0.9999467	1	1	1	1	1	1	1

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	0.90588659	0.97794305	0.99997251	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.90587953	0.98123708	0.99999399	1	1	1	1	1	1	1
15.57	0.90586981	0.98412749	1.0000007	1	1	1	1	1	1	1
15.59	0.9058529	0.98664032	1	1	1	1	1	1	1	1
15.61	0.90582358	0.98883344	1	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.90577551	0.99080815	1	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.90570189	0.99261092	1	1	1	1	1	1	1	1
15.67	0.90559674	0.99422467	1	1	1	1	1	1	1	1
15.69	0.90545501	0.99563485	1	1	1	1	1	1	1	1
15.71	0.90526693	0.99683037	1	1	1	1	1	1	1	1
15.73	0.9050004	0.99781419	1	1	1	1	1	1	1	1
15.75	0.55278493	0.90803546	1	1	1	1	1	1	1	1
15.78	0.10466903	0.74552899	1.00020917	1	1	1	1	1	1	1
15.80	0.10483929	0.70032212	0.99826453	1	1	1	1	1	1	1
15.83	0.10491449	0.65827443	0.98355917	1	1	1	1	1	1	1
15.85	0.10500032	0.61990046	0.95605157	1	1	1	1	1	1	1
15.88	0.10512381	0.58528752	0.91874001	1	1	1	1	1	1	1
15.90	0.10533239	0.55425111	0.8761844	1	1	1	1	1	1	1
15.93	0.10562051	0.52637441	0.83070969	1	1	1	1	1	1	1
15.95	0.10159255	0.50101614	0.78368234	1	1	1	1	1	1	1
15.98	0.0629018	0.47727317	0.73623045	1	1	1	1	1	1	1
16.00	0.03384743	0.45390598	0.69041185	1	1	1	1	1	1	1

**RESUMEN DE PERFIL DE SATURACION DEL MODELO 10 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.06813716	0.06816968	0.08102642	0.54779205	0.56023389	0.56853327	0.62303034	0.09897277	0.16097147	0.14255021
15.03	0.06813731	0.06815298	0.10432294	0.80765037	1	1	1	0.20980901	0.15061105	0.15542031
15.05	0.06813747	0.06814466	0.13757347	0.61978119	1	1	1	0.24563936	0.15250011	0.1599737
15.08	0.06813765	0.06810416	0.13873702	0.46702182	1.00310387	1	1	0.2085291	0.15621366	0.16243117
15.10	0.06813784	0.06804612	0.13868984	0.3521626	0.97462872	1	1	0.18728273	0.15952815	0.16373443
15.13	0.06813745	0.06793687	0.13911295	0.2714339	0.81077314	1	1	0.17581995	0.16190315	0.1644143
15.15	0.06813455	0.06788267	0.14012416	0.21962525	0.62431991	1.00011521	1	0.16998643	0.16336601	0.16476464
15.18	0.06810042	0.06851161	0.14141294	0.18949004	0.47180245	1.00129593	1.00012092	0.16715123	0.16418123	0.16494487
15.20	0.06781282	0.07182755	0.14269126	0.17306768	0.35716555	0.87837691	1.00120646	0.1658205	0.16460672	0.16503967
15.23	0.0660783	0.08822378	0.14378841	0.16474279	0.27658101	0.68848848	0.87844841	0.16521433	0.16481868	0.16509171
15.25	0.70117351	0.77667744	0.78624684	0.79045577	0.80666595	0.88138316	0.92283804	0.79154285	0.79153595	0.79158812
15.27	0.9109127	0.99277204	0.99739875	0.99789289	0.99851806	0.99939777	0.99962085	0.99810744	0.99811312	0.99811887
15.29	0.91021677	0.9925186	0.99757059	0.99824613	0.9988302	0.99957761	0.99981324	0.99858681	0.99859725	0.99860517
15.31	0.9095827	0.99231981	0.99773704	0.99857381	0.99910544	0.99974694	0.99996748	0.99900431	0.99901765	0.99902671
15.33	0.90900994	0.99217635	0.99789851	0.9988711	0.99933784	0.99990023	1.00000419	0.99934234	0.99935599	0.99936474
15.35	0.90849714	0.99208815	0.99805538	0.99913263	0.99952642	0.99999744	1	0.9995985	0.99961244	0.99962126
15.37	0.90804213	0.99205447	0.99820743	0.99935335	0.99969644	1.00000014	1	0.99983281	0.99984848	0.99985812
15.39	0.90764185	0.992074	0.99835439	0.99953349	0.99985629	1	1	0.99999942	1.00000273	1.00000415
15.41	0.90729235	0.99214487	0.99849597	0.99969754	0.99997645	1	1	1.00000006	1	1
15.43	0.90698879	0.99226474	0.99863183	0.99985185	1.00000317	1	1	1	1	1
15.45	0.90672552	0.99243082	0.9987616	0.99997054	1	1	1	1	1	1
15.47	0.90649622	0.99263993	0.99888488	1.00000395	1	1	1	1	1	1
15.49	0.90629396	0.99288852	0.99900127	1	1	1	1	1	1	1
15.51	0.90611144	0.99317272	0.99911037	1	1	1	1	1	1	1

Y (m)	Saturación (%)									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	0.90594116	0.99348838	0.99921182	1	1	1	1	1	1	1
15.55	0.90577575	0.99383108	0.99930539	1	1	1	1	1	1	1
15.57	0.9056078	0.99419617	0.99939113	1	1	1	1	1	1	1
15.59	0.90543006	0.99457879	0.99946957	1	1	1	1	1	1	1
15.61	0.90523573	0.99497394	0.99954223	1	1	1	1	1	1	1
15.63	0.90501822	0.99537652	0.99961254	1	1	1	1	1	1	1
15.65	0.90477098	0.99578138	0.99968183	1	1	1	1	1	1	1
15.67	0.90448698	0.99618346	0.99974918	1	1	1	1	1	1	1
15.69	0.90415819	0.99657793	0.99981336	1	1	1	1	1	1	1
15.71	0.90377494	0.9969604	0.99987249	1	1	1	1	1	1	1
15.73	0.90332558	0.99732726	0.99992445	1	1	1	1	1	1	1
15.75	0.55144427	0.85595797	0.99952408	1	1	1	1	1	1	1
15.78	0.10385576	0.63374913	0.98532618	1	1	1	1	1	1	1
15.80	0.10433946	0.59570536	0.95907713	1	1	1	1	1	1	1
15.83	0.10464533	0.56101046	0.92239476	1	1	1	1	1	1	1
15.85	0.104756	0.5295235	0.880195	1	1	1	1	1	1	1
15.88	0.1044946	0.50103883	0.83490803	1	1	1	1	1	1	1
15.90	0.10341953	0.47531116	0.78799619	1	1	1	1	1	1	1
15.93	0.10079099	0.45207492	0.74055588	1	1	1	1	1	1	1
15.95	0.09573781	0.43098348	0.69467968	1	1	1	1	1	1	1
15.98	0.0753442	0.41160372	0.65156523	1	1	1	1	1	1	1
16.00	0.03547912	0.39350182	0.61161544	1	1	1	1	1	1	1

**ANEXO 4.3: RESULTADOS DEL PERFIL DE COEFICIENTE  
DE DIFUSION DE GAS DE LOS MODELOS DE  
COBERTURA**

---

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 1 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538103	0.09536378	0.09535114	0.09054516	0.03889034	0.02946724	0.01411816	0.08223863	0.08296284	0.09510345
15.03	0.09538034	0.09535702	0.09555118	0.02154378	5.00E-07	4.94E-07	4.91E-07	0.08363382	0.05251349	0.03886866
15.05	0.09537973	0.09533862	0.08936514	4.63E-07	4.98E-07	4.93E-07	4.90E-07	0.07113177	0.04508327	0.02220487
15.08	0.09537903	0.09532004	0.03910941	4.15E-07	4.97E-07	4.91E-07	4.89E-07	0.07599726	0.04206563	0.03108024
15.10	0.09537823	0.09533469	0.00069419	-5.52E-05	4.96E-07	4.90E-07	4.88E-07	0.06099988	0.04062975	0.03601886
15.13	0.09537727	0.0953392	0.00633711	0.00055575	4.50E-07	4.89E-07	4.87E-07	0.02228535	0.039925	0.03812825
15.15	0.09537614	0.09532038	0.01726575	0.00480305	4.08E-07	4.88E-07	4.86E-07	0.01626116	0.03957596	0.03890517
15.18	0.09537477	0.09529762	0.0295666	0.01278352	-3.98E-05	4.86E-07	4.85E-07	0.01836883	0.03940461	0.03916879
15.20	0.09537316	0.09587938	0.03916381	0.0221465	0.00023509	4.84E-07	4.84E-07	0.03310072	0.03932372	0.03925063
15.23	0.09549506	0.06042693	0.04475379	0.03078688	0.00444503	4.98E-07	4.83E-07	0.03836799	0.03928928	0.03927057
15.25	0.04900627	0.02636953	0.02372117	0.01870684	0.00696102	1.03E-06	1.09E-06	0.01965017	0.01963959	0.01963621
15.27	0.00025087	1.47E-06	1.43E-06	1.41E-06	1.38E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.39E-06	1.40E-06	1.41E-06
15.28	0.00025583	1.47E-06	1.43E-06	1.41E-06	1.38E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06
15.30	0.00026058	1.46E-06	1.43E-06	1.40E-06	1.53E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.78E-06
15.32	0.000265	1.45E-06	1.42E-06	1.56E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06	1.72E-06
15.33	0.00026899	1.44E-06	1.42E-06	1.71E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06
15.35	0.00027248	1.44E-06	1.41E-06	1.71E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.37	0.00027545	1.43E-06	1.41E-06	1.70E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.38	0.00027795	1.43E-06	1.56E-06	1.70E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.40	0.00028008	1.42E-06	1.72E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.42	0.00028196	1.42E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.43	0.00028371	1.41E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.70E-06
15.45	0.00028545	1.41E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.70E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.47	0.0002874	1.41E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06
15.48	0.00028987	1.41E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.50	0.11015568	0.00053752	1.51E-06	1.49E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.47E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.53	0.2194602	0.00237645	1.31E-06	1.29E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.55	0.21932877	0.00447096	1.32E-06	1.31E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.58	0.2192709	0.00741719	1.38E-06	1.32E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06	1.34E-06
15.60	0.21920488	0.01113927	1.05E-06	1.34E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.63	0.21910989	0.01549774	-2.20E-07	1.37E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.39E-06
15.65	0.2189496	0.02033048	9.58E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
15.68	0.2187284	0.0254932	8.93E-05	1.44E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
15.70	0.22176865	0.03089569	0.00037623	1.48E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
15.73	0.25323092	0.0365465	0.00105829	1.53E-06	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
15.75	0.27877234	0.04260445	0.0023537	1.58E-06	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 2 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15	0.09538114	0.09536793	0.09535613	0.09478881	0.03984245	0.03816584	0.02928822	0.01622617	-0.00121371	0.10871907
15.025	0.09538099	0.09535047	0.09533296	0.03998521	5.12E-07	4.95E-07	4.93E-07	4.98E-07	5.00E-07	0.04762213
15.05	0.09538085	0.09534603	0.09531638	3.91E-07	3.92E-07	4.94E-07	4.93E-07	4.97E-07	4.55E-07	0.02884721
15.075	0.09538068	0.09534873	0.09532514	-1.63E-06	-6.32E-06	4.93E-07	4.92E-07	4.97E-07	4.14E-07	0.0383878
15.1	0.09538048	0.09534436	0.09534082	-8.83E-05	-7.41E-05	4.92E-07	4.91E-07	4.96E-07	-5.06E-05	0.04229821
15.125	0.09538023	0.09534024	0.09390541	0.00130272	0.00202868	4.91E-07	4.91E-07	4.96E-07	0.00039013	0.04337308
15.15	0.09537993	0.09533958	0.04070389	0.00815045	0.0099053	4.47E-07	4.90E-07	4.95E-07	0.00495723	0.04361108
15.175	0.09537954	0.09533826	0.00819916	0.0197079	0.02184781	4.06E-07	4.89E-07	4.95E-07	0.0143523	0.04365249
15.2	0.09537907	0.09533453	0.02019221	0.03160779	0.03321159	-5.87E-05	4.88E-07	4.94E-07	0.02488231	0.04365145
15.225	0.09549985	0.09541868	0.03308051	0.04008578	0.04066871	0.00048698	5.03E-07	4.93E-07	0.03327623	0.04364091
15.25	0.04899692	0.04610627	0.02143109	0.02224908	0.02212887	0.00273443	8.25E-07	1.11E-06	0.01942425	0.02181507
15.27	0.00024911	1.56E-05	1.47E-06	1.39E-06	1.39E-06	1.39E-06	1.77E-06	1.73E-06	1.42E-06	1.42E-06
15.29	0.00025526	1.49E-05	1.47E-06	1.39E-06	1.39E-06	1.39E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.42E-06	1.42E-06
15.31	0.00026112	1.34E-05	1.46E-06	1.39E-06	1.39E-06	1.54E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.36E-06	1.36E-06
15.33	0.00026641	1.15E-05	1.46E-06	1.39E-06	1.38E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.79E-06	1.80E-06
15.35	0.00027089	9.35E-06	1.46E-06	1.33E-06	1.54E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.37	0.00027443	7.38E-06	1.45E-06	1.75E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.39	0.00027704	5.70E-06	1.45E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.41	0.00027883	4.38E-06	1.44E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.71E-06	1.72E-06	1.73E-06
15.43	0.00028	3.39E-06	1.44E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.45	0.00028073	2.69E-06	1.43E-06	1.68E-06	1.66E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.47	0.0002812	1.50E-06	1.37E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06
15.49	0.00028156	1.42E-06	1.80E-06	1.67E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.51	0.00028192	1.40E-06	1.73E-06	1.66E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.53	0.0002824	1.40E-06	1.73E-06	1.66E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.55	0.00028308	1.39E-06	1.72E-06	1.66E-06	1.63E-06	1.63E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.57	0.00028404	1.39E-06	1.72E-06	1.66E-06	1.63E-06	1.63E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.59	0.00028533	1.39E-06	1.71E-06	1.66E-06	1.63E-06	1.63E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.70E-06
15.61	0.00028705	1.40E-06	1.71E-06	1.66E-06	1.63E-06	1.63E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.63	0.0002895	1.40E-06	1.71E-06	1.66E-06	1.63E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.65	0.1101556	0.001138	1.51E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.47E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.675	0.21946079	0.00431767	1.31E-06	1.28E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.7	0.21932989	0.00720171	1.20E-06	1.29E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.725	0.21927216	0.01085574	1.02E-06	1.31E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.75	0.21920625	0.0151358	5.56E-07	1.33E-06	1.32E-06	1.32E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.775	0.21911135	0.01986779	2.65E-05	1.36E-06	1.35E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.39E-06
15.8	0.21895113	0.02488908	0.00016868	1.39E-06	1.39E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
15.825	0.21873042	0.03007892	0.00058778	1.43E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
15.85	0.22177408	0.03539726	0.00148327	1.48E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.48E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
15.875	0.25322896	0.04092201	0.00307162	1.53E-06	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
15.9	0.27877997	0.04690376	0.00553452	1.58E-06	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 3 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538116	0.09537209	0.09536177	0.09535369	0.09556707	0.03961598	0.03975017	0.03720703	0.02916828	0.01827352
15.03	0.09538115	0.09536073	0.09534009	0.09532646	0.03977183	-8.35E-05	5.05E-07	5.06E-07	5.07E-07	5.08E-07
15.05	0.09538113	0.09535941	0.09533856	0.09532438	-8.99E-05	0.00092426	5.04E-07	5.05E-07	5.06E-07	5.07E-07
15.08	0.09538112	0.09535805	0.09533703	0.09532076	0.00092328	0.00706516	4.59E-07	5.05E-07	5.06E-07	5.07E-07
15.10	0.0953811	0.09535663	0.09533539	0.0963162	0.00753546	0.01798033	3.86E-07	5.04E-07	5.05E-07	5.06E-07
15.13	0.09538107	0.09535517	0.09533386	0.08674592	0.01965006	0.02913853	-8.11E-05	5.03E-07	5.05E-07	5.06E-07
15.15	0.09538103	0.09535365	0.0953322	0.03234142	0.03286129	0.03710469	0.00086876	5.03E-07	5.04E-07	5.05E-07
15.18	0.09538098	0.09535208	0.0953305	0.03442991	0.04257505	0.04189734	0.00692766	4.58E-07	5.04E-07	5.05E-07
15.20	0.09538094	0.09535048	0.09532882	0.04626514	0.04746462	0.04486787	0.01810287	2.27E-07	5.03E-07	5.04E-07
15.23	0.0955015	0.09542567	0.0962726	0.05527127	0.04930773	0.04685748	0.03021043	-8.69E-05	5.19E-07	5.04E-07
15.25	0.04899663	0.04878535	0.03914082	0.02933988	0.0249513	0.02408614	0.01959063	0.00056112	8.52E-07	1.14E-06
15.27	0.0002491	0.00018731	1.50E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.43E-06	1.82E-06	1.77E-06
15.29	0.00025527	0.0001883	1.49E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.43E-06	1.76E-06	1.77E-06
15.31	0.00026114	0.00018635	1.49E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.59E-06	1.76E-06	1.77E-06
15.33	0.00026644	0.00018127	1.48E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.42E-06	1.42E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.35	0.00027093	0.00017297	1.48E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.42E-06	1.36E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.37	0.00027447	0.0001615	1.48E-06	1.46E-06	1.43E-06	1.36E-06	1.79E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.39	0.00027708	0.00014713	1.47E-06	1.46E-06	1.37E-06	1.80E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.41	0.00027888	0.00013042	1.47E-06	1.45E-06	1.81E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.43	0.00028003	0.00011219	1.47E-06	1.45E-06	1.75E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06
15.45	0.00028072	9.34E-05	1.46E-06	1.45E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06
15.47	0.00028112	7.52E-05	1.46E-06	1.44E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.49	0.00028132	5.85E-05	1.46E-06	1.44E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.51	0.00028143	4.40E-05	1.46E-06	1.44E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.75E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	0.00028147	3.20E-05	1.45E-06	1.43E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06
15.55	0.00028149	2.27E-05	1.45E-06	1.43E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.57	0.00028149	1.57E-05	1.45E-06	1.42E-06	1.71E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.59	0.0002815	1.07E-05	1.44E-06	1.42E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.61	0.0002815	7.33E-06	1.44E-06	1.41E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.63	0.00028151	5.07E-06	1.43E-06	1.41E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.65	0.00028154	3.62E-06	1.43E-06	1.40E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.67	0.00028161	2.74E-06	1.42E-06	1.40E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.69	0.00028176	1.43E-06	1.42E-06	1.39E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.71	0.00028201	1.40E-06	1.41E-06	1.39E-06	1.66E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.73	0.00028244	1.39E-06	1.41E-06	1.38E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.75	0.0002831	1.39E-06	1.40E-06	1.38E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.77	0.00028405	1.39E-06	1.40E-06	1.37E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.79	0.00028533	1.39E-06	1.40E-06	1.37E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.81	0.00028705	1.39E-06	1.55E-06	1.37E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.83	0.00028949	1.39E-06	1.71E-06	1.37E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.85	0.11015502	0.00118298	1.55E-06	4.75E-07	1.45E-06	1.45E-06	1.47E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.88	0.21946138	0.00445288	1.01E-06	1.87E-05	1.26E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.90	0.21933046	0.00737986	9.03E-08	0.00013568	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.93	0.21927264	0.01106925	5.65E-06	0.00050272	1.30E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.95	0.21920664	0.01537419	6.57E-05	0.00131234	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.98	0.21911169	0.02011972	0.000305	0.00277039	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.37E-06	1.39E-06
16.00	0.21895142	0.02514408	0.00090402	0.00505566	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.41E-06	1.42E-06
16.03	0.21873066	0.03032871	0.00206931	0.00819964	1.45E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
16.05	0.22177436	0.03563692	0.00401458	0.01213942	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
16.08	0.25322948	0.0411508	0.00685557	0.01678073	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
16.10	0.27878074	0.04712614	0.0105764	0.02204678	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 4 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538116	0.09537506	0.09536621	0.09535913	0.09540565	0.03969407	0.03972737	0.03748509	0.03030173	0.02062646
15.03	0.09538116	0.09536801	0.09535055	0.09533801	0.03989808	-1.10E-05	5.13E-07	5.12E-07	5.12E-07	5.13E-07
15.05	0.09538116	0.09536705	0.09534937	0.09533666	1.35E-07	-4.54E-05	5.12E-07	5.11E-07	5.12E-07	5.12E-07
15.08	0.09538116	0.09536605	0.09534819	0.09533537	-8.96E-05	0.00251512	4.66E-07	5.11E-07	5.11E-07	5.12E-07
15.10	0.09538116	0.09536502	0.09534697	0.09533404	0.00110435	0.01100177	4.23E-07	5.10E-07	5.10E-07	5.11E-07
15.13	0.09538115	0.09536395	0.09534572	0.09533268	0.00765155	0.02341276	-6.11E-05	5.09E-07	5.10E-07	5.10E-07
15.15	0.09538115	0.09536284	0.09534443	0.09537148	0.01926829	0.03524072	0.00051335	5.25E-07	5.09E-07	5.10E-07
15.18	0.09538115	0.09536168	0.09534311	0.09317321	0.03187997	0.04326856	0.0057257	4.02E-07	5.09E-07	5.09E-07
15.20	0.09538115	0.0953605	0.09534176	0.04111358	0.04155292	0.04738583	0.01644294	-5.45E-06	5.08E-07	5.09E-07
15.23	0.09550173	0.09545952	0.09533791	0.00927741	0.0470299	0.0491576	0.02887793	-7.65E-05	5.24E-07	5.08E-07
15.25	0.0489966	0.04889937	0.04784402	0.01061798	0.02474456	0.02493146	0.01936646	0.00096813	9.19E-07	1.15E-06
15.27	0.0002491	0.00021847	6.53E-05	1.51E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.62E-06	1.78E-06
15.29	0.00025527	0.00022358	6.52E-05	1.50E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.78E-06	1.78E-06
15.31	0.00026115	0.00022826	6.36E-05	1.50E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.78E-06	1.78E-06
15.33	0.00026645	0.00023245	6.05E-05	1.50E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.61E-06	1.78E-06	1.78E-06
15.35	0.00027093	0.00023607	5.61E-05	1.50E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.77E-06	1.77E-06	1.78E-06
15.37	0.00027448	0.00023902	5.09E-05	1.50E-06	1.46E-06	1.45E-06	1.60E-06	1.77E-06	1.77E-06	1.78E-06
15.39	0.00027709	0.00024114	4.51E-05	1.49E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06	1.77E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.41	0.00027889	0.00024229	3.92E-05	1.66E-06	1.40E-06	1.60E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.43	0.00028005	0.00024223	3.33E-05	1.82E-06	1.84E-06	1.76E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.45	0.00028074	0.00024073	2.78E-05	1.82E-06	1.78E-06	1.76E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.47	0.00028114	0.00023748	2.27E-05	1.82E-06	1.78E-06	1.76E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.49	0.00028135	0.00023218	1.83E-05	1.81E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.51	0.00028146	0.0002245	1.46E-05	1.81E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.76E-06	1.76E-06	1.77E-06
15.53	0.00028151	0.00021417	1.15E-05	1.81E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06
15.55	0.00028153	0.00020101	9.00E-06	1.80E-06	1.76E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.57	0.00028154	0.00018506	7.03E-06	1.80E-06	1.76E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.59	0.00028154	0.00016656	5.52E-06	1.79E-06	1.76E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.61	0.00028154	0.0001461	4.37E-06	1.79E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.63	0.00028154	0.0001245	3.53E-06	1.79E-06	1.75E-06	1.73E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.65	0.00028153	0.00010283	2.95E-06	1.78E-06	1.75E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06
15.67	0.00028153	8.22E-05	2.01E-06	1.78E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.69	0.00028152	6.35E-05	1.48E-06	1.77E-06	1.74E-06	1.72E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.71	0.00028152	4.74E-05	1.44E-06	1.77E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.73	0.00028151	3.43E-05	1.43E-06	1.76E-06	1.73E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06
15.75	0.00028151	2.42E-05	1.42E-06	1.76E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.77	0.0002815	1.66E-05	1.42E-06	1.75E-06	1.71E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.79	0.0002815	1.13E-05	1.42E-06	1.75E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.81	0.0002815	7.65E-06	1.42E-06	1.74E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.83	0.00028151	5.25E-06	1.42E-06	1.73E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.85	0.00028154	3.72E-06	1.41E-06	1.73E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.71E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.87	0.00028161	2.83E-06	1.41E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.89	0.00028176	1.46E-06	1.41E-06	1.71E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.70E-06	1.71E-06	1.72E-06
15.91	0.00028201	1.39E-06	1.40E-06	1.71E-06	1.66E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.93	0.00028244	1.38E-06	1.40E-06	1.70E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.95	0.0002831	1.38E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.97	0.00028405	1.38E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.99	0.00028533	1.39E-06	1.39E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
16.01	0.00028705	1.39E-06	1.39E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
16.03	0.00028949	1.39E-06	1.55E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
16.05	0.11015501	0.0011884	1.55E-06	1.49E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.48E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
16.08	0.2194614	0.00446912	1.01E-06	1.29E-06	1.27E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06
16.10	0.21933047	0.00740123	-2.18E-07	1.31E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.33E-06
16.13	0.21927265	0.01109487	1.03E-05	1.32E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
16.15	0.21920665	0.01540283	9.33E-05	1.34E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
16.18	0.21911168	0.02015004	0.00038734	1.37E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.37E-06	1.39E-06
16.20	0.21895142	0.02517483	0.0010796	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.41E-06	1.42E-06
16.23	0.21873066	0.03035888	0.00237896	1.44E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
16.25	0.22177437	0.03566591	0.0044921	1.48E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
16.28	0.25322949	0.0411785	0.00750279	1.53E-06	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
16.30	0.27878075	0.04715305	0.01138115	1.58E-06	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 5 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538116	0.09537157	0.09536086	0.09589152	0.03980692	0.03335967	0.01483705	0.08376554	0.02909325	0.01159611
15.03	0.09538114	0.09535934	0.09533801	0.03961771	4.07E-07	5.07E-07	5.02E-07	0.05014487	-8.37E-05	4.01E-07
15.05	0.09538112	0.09535793	0.09533567	-6.54E-05	-3.66E-06	5.06E-07	5.02E-07	0.03445049	0.00125358	-1.86E-05
15.08	0.0953811	0.09535647	0.09533474	0.0022025	-8.49E-05	5.05E-07	5.01E-07	0.03648942	0.00762028	1.97E-05
15.10	0.09538108	0.09535496	0.09533301	0.01030327	0.00166503	5.04E-07	5.00E-07	0.03630588	0.01759726	0.00295214
15.13	0.09538104	0.0953535	0.09533075	0.02243354	0.00891581	5.03E-07	4.99E-07	0.03596805	0.02655673	0.01103045
15.15	0.09538099	0.09535186	0.09535969	0.03403671	0.01979969	5.02E-07	4.98E-07	0.03576324	0.03187594	0.02104946
15.18	0.09538093	0.0953499	0.09365092	0.04181625	0.02920572	5.01E-07	4.97E-07	0.03565832	0.03421717	0.02876891
15.20	0.09538087	0.09534837	0.04672815	0.04566799	0.03444502	5.00E-07	4.96E-07	0.03560533	0.03509189	0.0329063
15.23	0.09549885	0.09543747	0.02696958	0.04717351	0.03658809	4.55E-07	4.95E-07	0.03557653	0.03539868	0.03464124
15.25	0.04898414	0.0488629	0.02003157	0.02380193	0.01867206	8.60E-07	1.12E-06	0.01778044	0.01775354	0.01764073
15.28	0.00024677	0.00020277	1.50E-06	1.47E-06	1.38E-06	1.80E-06	1.73E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.38E-06
15.30	0.00025496	0.00018785	1.49E-06	1.47E-06	1.82E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.81E-06	1.81E-06	1.82E-06
15.33	0.00026276	0.0001562	1.49E-06	1.46E-06	1.76E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.75E-06	1.76E-06
15.35	0.00026957	0.00011135	1.49E-06	1.40E-06	1.75E-06	1.73E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06
15.38	0.00027509	6.52E-05	1.48E-06	1.85E-06	1.75E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06
15.40	0.00027952	3.10E-05	1.48E-06	1.78E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.43	0.00028345	1.25E-05	1.47E-06	1.77E-06	1.74E-06	1.72E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.45	0.00028764	4.94E-06	1.47E-06	1.77E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.48	0.00029279	2.07E-06	1.46E-06	1.76E-06	1.73E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06
15.50	0.11026314	0.04626442	0.00051787	1.55E-06	1.52E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.52E-06	1.53E-06	1.53E-06
15.52	0.21969548	0.09150493	0.00198693	1.33E-06	1.30E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06
15.54	0.21956789	0.08975946	0.00342071	1.33E-06	1.30E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.56	0.21954008	0.08767979	0.00540433	1.32E-06	1.30E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.32E-06
15.58	0.21951779	0.08553452	0.00793104	1.32E-06	1.29E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.60	0.21951008	0.08348303	0.01095616	1.31E-06	1.29E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06
15.62	0.21950306	0.08160581	0.01440841	1.31E-06	1.28E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06
15.64	0.21949535	0.07993323	0.01820022	1.18E-06	1.28E-06	1.27E-06	1.27E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.31E-06
15.66	0.21948684	0.07846642	0.0222364	1.02E-06	1.27E-06	1.26E-06	1.27E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.30E-06
15.68	0.21947748	0.07719053	0.02642092	1.00E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.27E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.30E-06
15.70	0.21946728	0.07608281	0.03066225	1.32E-05	1.26E-06	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.30E-06
15.72	0.21945617	0.07511709	0.03487743	7.30E-05	1.26E-06	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06
15.74	0.21943953	0.07426632	0.03899493	0.00024786	1.25E-06	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.29E-06
15.76	0.21942508	0.07350394	0.04295654	0.00062608	1.25E-06	1.24E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.29E-06
15.78	0.21940991	0.07280457	0.04671783	0.00130509	1.25E-06	1.24E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.29E-06
15.80	0.21939268	0.0721446	0.05025207	0.00238126	1.25E-06	1.24E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.29E-06
15.82	0.21937531	0.07150278	0.05354862	0.00394038	1.25E-06	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06
15.84	0.21935048	0.0708612	0.05660381	0.00600426	1.25E-06	1.25E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06
15.86	0.2193419	0.07020681	0.0594189	0.0085331	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06
15.88	0.21932159	0.06953344	0.06199792	0.01145437	1.27E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.90	0.21929644	0.06884441	0.06434667	0.01467575	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.92	0.21925996	0.06815531	0.06647229	0.01809843	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06	1.34E-06
15.94	0.21922481	0.06749618	0.06838405	0.02162956	1.31E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.33E-06	1.35E-06
15.96	0.21917186	0.06691621	0.07009692	0.02519519	1.34E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.36E-06	1.35E-06	1.37E-06
15.98	0.21908809	0.06647911	0.07163975	0.02874117	1.37E-06	1.37E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.38E-06	1.39E-06
16.00	0.21895209	0.06626808	0.07306646	0.0322467	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
16.02	0.21874397	0.06639057	0.07446962	0.03572709	1.43E-06	1.44E-06	1.43E-06	1.44E-06	1.43E-06	1.45E-06
16.04	0.21854334	0.06698665	0.07599684	0.03923914	1.48E-06	1.48E-06	1.47E-06	1.47E-06	1.47E-06	1.48E-06
16.06	0.22815397	0.06825151	0.07787483	0.04288939	1.52E-06	1.52E-06	1.50E-06	1.51E-06	1.50E-06	1.51E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
16.08	0.26534713	0.07048775	0.08045682	0.04685086	1.57E-06	1.57E-06	1.54E-06	1.55E-06	1.54E-06	1.55E-06
16.10	0.26834112	0.07423413	0.08433861	0.05140778	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 6 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538116	0.09537458	0.09536529	0.09535763	0.09422195	0.03829339	0.01932915	0.08270665	-0.0132049	0.10027024
15.03	0.09538116	0.09536682	0.09534833	0.09533506	0.03967835	5.16E-07	5.10E-07	0.08300413	-0.01037645	0.04028269
15.05	0.09538116	0.09536576	0.09534703	0.09533272	5.39E-07	5.15E-07	5.09E-07	0.08325931	-0.00852632	0.02817128
15.08	0.09538116	0.09536467	0.09534573	0.09616388	4.13E-07	5.13E-07	5.08E-07	0.08353079	-0.00051483	0.03199327
15.10	0.09538115	0.09536354	0.09534438	0.08813994	-5.55E-06	5.12E-07	5.07E-07	0.08381204	0.00899197	0.03326411
15.13	0.09538115	0.09536236	0.095343	0.02001665	-7.65E-05	5.11E-07	5.06E-07	0.08290148	0.01679217	0.03363141
15.15	0.09538115	0.09536114	0.09534158	0.00620776	0.00192396	4.65E-07	5.05E-07	0.06780419	0.02251377	0.03373111
15.18	0.09538114	0.09535987	0.09534027	0.0166558	0.00953865	4.20E-07	5.04E-07	0.03782076	0.02665852	0.03375525
15.20	0.09538114	0.09535859	0.09614844	0.02918188	0.02089328	-6.63E-05	5.03E-07	0.03510152	0.02962318	0.03375793
15.23	0.09549899	0.09546869	0.06754611	0.03978614	0.03118516	0.00062302	5.02E-07	0.03419392	0.03163677	0.03375458
15.25	0.04898411	0.04895598	0.03085346	0.02310532	0.01871705	0.00286783	1.13E-06	0.01692903	0.0164361	0.01687591
15.28	0.00024677	0.00023696	1.52E-06	1.49E-06	1.46E-06	1.61E-06	1.76E-06	1.60E-06	1.61E-06	1.61E-06
15.30	0.00025496	0.00024447	1.52E-06	1.49E-06	1.40E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.77E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.33	0.00026277	0.00025203	1.52E-06	1.49E-06	1.85E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.35	0.00026958	0.00025963	1.51E-06	1.49E-06	1.78E-06	1.76E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.38	0.0002751	0.00026727	1.51E-06	1.48E-06	1.78E-06	1.76E-06	1.74E-06	1.76E-06	1.77E-06	1.77E-06
15.40	0.00027954	0.00027494	1.50E-06	1.48E-06	1.78E-06	1.76E-06	1.74E-06	1.76E-06	1.76E-06	1.77E-06
15.43	0.0002835	0.00028264	1.50E-06	1.64E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.76E-06	1.76E-06	1.77E-06
15.45	0.00028777	0.00029037	1.50E-06	1.80E-06	1.77E-06	1.75E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.77E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.48	0.00029311	0.00029815	1.49E-06	1.80E-06	1.76E-06	1.74E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.76E-06
15.50	0.11027748	0.11038781	0.00553093	1.58E-06	1.55E-06	1.53E-06	1.52E-06	1.54E-06	1.55E-06	1.55E-06
15.52	0.2197198	0.22017051	0.01461471	1.36E-06	1.33E-06	1.32E-06	1.31E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.54	0.21958004	0.21990806	0.01855425	1.23E-06	1.33E-06	1.32E-06	1.31E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.56	0.21955863	0.21931901	0.02278795	1.08E-06	1.33E-06	1.32E-06	1.31E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.58	0.21954991	0.21319194	0.02722375	9.12E-07	1.33E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06
15.60	0.21954759	0.18454815	0.03177099	1.07E-05	1.32E-06	1.31E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06
15.62	0.21954574	0.15664701	0.03634354	6.31E-05	1.32E-06	1.31E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06
15.64	0.21954367	0.13787642	0.04086195	0.00022277	1.32E-06	1.31E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06
15.66	0.21954125	0.12424007	0.04525478	0.00057713	1.31E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.32E-06	1.33E-06
15.68	0.21953845	0.11388496	0.04946201	0.00122449	1.31E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.32E-06	1.33E-06
15.70	0.21953519	0.1058342	0.0534436	0.00226402	1.31E-06	1.30E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.33E-06
15.72	0.21953145	0.0994665	0.05716761	0.00378791	1.30E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06
15.74	0.21952717	0.09436377	0.06060733	0.00583033	1.30E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06
15.76	0.21952229	0.09023344	0.06374162	0.00835952	1.30E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06
15.78	0.21951676	0.08686432	0.06655531	0.01130812	1.29E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.80	0.21951052	0.08409889	0.06903974	0.01458414	1.29E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06
15.82	0.21950355	0.08181736	0.07119333	0.01808192	1.28E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06
15.84	0.21949578	0.07992603	0.0730221	0.02169184	1.28E-06	1.27E-06	1.27E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.86	0.21948721	0.07835005	0.07453994	0.02530788	1.32E-06	1.26E-06	1.27E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.30E-06
15.88	0.2194778	0.07702847	0.07576842	0.02883382	9.72E-07	1.26E-06	1.27E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.30E-06
15.90	0.21946756	0.0759106	0.07673617	0.03218766	1.14E-07	1.25E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06
15.92	0.21945639	0.07495357	0.07747757	0.03530445	6.95E-06	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06
15.94	0.21943971	0.07412041	0.07803108	0.03813743	4.59E-05	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.29E-06
15.96	0.21942523	0.07337885	0.07843707	0.04065794	0.00017646	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.29E-06
15.98	0.21941004	0.07270031	0.07873553	0.042854	0.00048152	1.24E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.29E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
16.00	0.21939278	0.07205954	0.07896364	0.04472835	0.00105722	1.24E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.29E-06
16.02	0.21937541	0.07143455	0.07915499	0.04629609	0.00200206	1.25E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06
16.04	0.21935055	0.07080725	0.07933366	0.04758281	0.00341026	1.25E-06	1.27E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06
16.06	0.21934198	0.07016464	0.07951658	0.04862212	0.00533296	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.29E-06	1.31E-06
16.08	0.21932165	0.06950081	0.07971198	0.04945417	0.00774953	1.27E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06
16.10	0.21929649	0.06881937	0.07991937	0.05012484	0.01060278	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
16.12	0.21926001	0.06813621	0.08013133	0.05068936	0.01381219	1.30E-06	1.31E-06	1.32E-06	1.32E-06	1.34E-06
16.14	0.21922485	0.06748167	0.08033773	0.0512015	0.01728688	1.32E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.33E-06	1.35E-06
16.16	0.21917189	0.06690518	0.08053298	0.05172402	0.02094057	1.34E-06	1.35E-06	1.36E-06	1.35E-06	1.37E-06
16.18	0.21908812	0.06647071	0.08072597	0.05232664	0.0246965	1.37E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.38E-06	1.39E-06
16.20	0.21895212	0.06626164	0.08095517	0.05308889	0.02850102	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
16.22	0.21874399	0.06638556	0.08130682	0.05410554	0.03233128	1.44E-06	1.43E-06	1.44E-06	1.43E-06	1.45E-06
16.24	0.21854336	0.06698267	0.08193341	0.05549696	0.0362031	1.48E-06	1.47E-06	1.47E-06	1.47E-06	1.48E-06
16.26	0.22815399	0.06824823	0.08307879	0.05742952	0.04018036	1.52E-06	1.50E-06	1.51E-06	1.50E-06	1.51E-06
16.28	0.26534714	0.0704849	0.0851321	0.0601579	0.04438947	1.57E-06	1.54E-06	1.55E-06	1.54E-06	1.55E-06
16.30	0.2683412	0.07423141	0.08876927	0.06411909	0.04904691	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 7 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538114	0.09536788	0.0953559	0.09376813	0.03980667	0.03716246	0.02744933	0.01312543	-0.00319833	0.10325466
15.03	0.09538099	0.09535064	0.09532902	0.0395574	5.08E-07	5.01E-07	4.97E-07	5.00E-07	0.00049877	0.05076894
15.05	0.09538085	0.09534896	0.09544464	5.33E-07	5.23E-07	5.00E-07	4.96E-07	4.99E-07	0.00506062	-7.51E-05
15.08	0.09538068	0.09534511	0.09084159	4.08E-07	4.00E-07	4.99E-07	4.95E-07	4.99E-07	0.01372603	0.0020008
15.10	0.09538048	0.09534289	0.04015986	-1.85E-05	-1.58E-05	4.98E-07	4.94E-07	4.98E-07	0.02306296	0.00979982
15.13	0.09538023	0.09534384	0.0019353	9.69E-06	-1.10E-05	4.97E-07	4.94E-07	4.98E-07	0.03048383	0.02147641
15.15	0.09537992	0.09533988	0.0097291	0.00305511	0.00288566	4.96E-07	4.93E-07	4.97E-07	0.0355165	0.03221086
15.18	0.09537952	0.09533545	0.02187342	0.01192635	0.01164904	4.51E-07	4.92E-07	4.96E-07	0.03876211	0.03886627
15.20	0.09537903	0.09533492	0.03398917	0.02405138	0.02376837	3.79E-07	4.91E-07	4.96E-07	0.04086254	0.04187305
15.23	0.09537996	0.09599982	0.04262921	0.03490678	0.03455287	-7.94E-05	4.90E-07	4.95E-07	0.04221359	0.04298934
15.25	0.04754256	0.03913104	0.02366413	0.02090241	0.0206144	0.00046803	1.10E-06	1.12E-06	0.02151904	0.02168202
15.27	4.98E-05	1.52E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.42E-06	1.43E-06
15.29	5.13E-05	1.51E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.41E-06	1.34E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.42E-06	1.43E-06
15.31	5.27E-05	1.51E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.41E-06	1.77E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.36E-06	1.37E-06
15.33	5.37E-05	1.50E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.35E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.80E-06	1.80E-06
15.35	5.46E-05	1.49E-06	1.46E-06	1.59E-06	1.78E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.37	5.52E-05	1.48E-06	1.45E-06	1.75E-06	1.71E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.39	5.56E-05	1.48E-06	1.45E-06	1.74E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.41	5.59E-05	1.47E-06	1.38E-06	1.74E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.43	5.62E-05	1.46E-06	1.82E-06	1.73E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06	1.73E-06
15.45	5.64E-05	1.45E-06	1.75E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.47	5.65E-05	1.44E-06	1.75E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.49	5.67E-05	1.44E-06	1.74E-06	1.71E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.51	5.69E-05	1.43E-06	1.73E-06	1.70E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	5.72E-05	1.42E-06	1.73E-06	1.70E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.55	5.76E-05	1.42E-06	1.72E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.57	5.80E-05	1.41E-06	1.72E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.59	5.86E-05	1.41E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.61	5.93E-05	1.40E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.63	6.02E-05	1.40E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.65	0.10081353	0.00028445	1.51E-06	1.49E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.47E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.68	0.20071003	0.00145193	1.31E-06	1.29E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.70	0.20035651	0.00300496	1.32E-06	1.30E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.73	0.20020666	0.00539302	1.33E-06	1.32E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.75	0.20011501	0.00861565	1.35E-06	1.34E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.78	0.20000805	0.01257605	1.43E-06	1.37E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.37E-06	1.39E-06
15.80	0.19993399	0.01713221	1.08E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
15.83	0.20037856	0.02213802	4.33E-07	1.44E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
15.85	0.20375331	0.02748282	1.56E-05	1.48E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
15.88	0.23652983	0.03313544	0.00012104	1.53E-06	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
15.90	0.28020254	0.03919459	0.00047125	1.58E-06	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 8 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.08658895	0.0865773	0.08351236	0.08192529	0.04516736	0.03263444	0.02240225	-0.0043163	0.0156853	0.09750057
15.03	0.08658885	0.08656118	0.06211898	0.07392757	0.02441572	0.00023059	-2.47E-05	-3.30E-05	0.02661525	0.04939588
15.05	0.08658875	0.08655973	0.05662619	0.06660313	0.03826975	0.00506933	5.99E-05	0.00011511	0.0350116	0.04049194
15.08	0.08658863	0.08508631	0.0607344	0.06461223	0.04622652	0.0157765	0.00343102	0.00380196	0.03991302	0.0428191
15.10	0.08658849	0.07617124	0.06461102	0.06241433	0.04846813	0.02814768	0.0124197	0.01293895	0.04235054	0.04372261
15.13	0.08658831	0.06186933	0.06819747	0.06048738	0.04823754	0.03770094	0.02404911	0.02432654	0.04345707	0.04408121
15.15	0.08658808	0.06044371	0.07157126	0.05888084	0.0477656	0.0428928	0.03395631	0.03385746	0.04393897	0.0442211
15.18	0.08658779	0.05991825	0.07486421	0.05752628	0.0475461	0.04504858	0.03999591	0.03971537	0.04414774	0.04427021
15.20	0.08658743	0.05934731	0.07822138	0.05632818	0.0474738	0.04582362	0.04283087	0.04256173	0.04424109	0.0442813
15.23	0.08658671	0.05878499	0.08256088	0.05519998	0.04744666	0.04608153	0.04395414	0.04375012	0.04428614	0.04427649
15.25	0.04245	0.02912887	0.04090485	0.02704757	0.02371498	0.02307971	0.02217732	0.02210246	0.02215591	0.02213372
15.27	3.24E-06	1.52E-06	1.49E-06	1.44E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.42E-06
15.29	3.36E-06	1.51E-06	1.54E-06	1.44E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.42E-06	1.43E-06
15.31	3.48E-06	1.51E-06	1.64E-06	1.43E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.39E-06	1.41E-06	1.36E-06	1.37E-06
15.33	3.59E-06	1.50E-06	1.89E-06	1.43E-06	1.40E-06	1.34E-06	1.55E-06	1.57E-06	1.80E-06	1.81E-06
15.35	3.68E-06	1.50E-06	2.32E-06	1.43E-06	1.34E-06	1.76E-06	1.70E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.37	3.77E-06	1.49E-06	2.69E-06	1.42E-06	1.77E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.39	3.84E-06	1.48E-06	2.92E-06	1.42E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.41	3.90E-06	1.47E-06	3.15E-06	1.41E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.43	3.94E-06	1.47E-06	3.42E-06	1.41E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.68E-06	1.71E-06	1.72E-06	1.73E-06
15.45	3.98E-06	1.46E-06	3.73E-06	1.40E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.47	4.00E-06	1.45E-06	4.10E-06	1.34E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.49	4.02E-06	1.44E-06	4.52E-06	1.77E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06
15.51	4.03E-06	1.43E-06	5.00E-06	1.70E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	4.03E-06	1.43E-06	5.54E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.55	4.02E-06	1.42E-06	6.12E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.57	4.01E-06	1.41E-06	6.70E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.59	3.99E-06	1.41E-06	7.25E-06	1.68E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.61	3.98E-06	1.41E-06	7.69E-06	1.68E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.63	3.96E-06	1.41E-06	7.92E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.65	0.0746684	7.05E-07	0.08431132	1.49E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.47E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.68	0.14968481	3.34E-05	0.16209411	1.29E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.70	0.14998257	0.0001954	0.15003933	1.35E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.73	0.15028704	0.00065229	0.13779405	1.02E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.75	0.15072764	0.00160244	0.12748037	-2.30E-07	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.78	0.15149325	0.00325426	0.11912346	8.70E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.37E-06	1.39E-06
15.80	0.1527964	0.00576104	0.11230762	8.44E-05	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
15.83	0.15477506	0.0091233	0.10686516	0.00036168	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
15.85	0.157296	0.0132661	0.10306974	0.00102633	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
15.88	0.20717096	0.01808919	0.10165553	0.00228767	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
15.90	0.28088658	0.02351345	0.10416141	0.00435887	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 9 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538115	0.09537033	0.09535915	0.09522651	0.03979209	0.03928895	0.03366501	0.0235275	0.00644118	0.00436053
15.03	0.09538111	0.09535619	0.09533496	0.03995161	4.06E-07	5.05E-07	5.01E-07	5.03E-07	5.04E-07	0.01294849
15.05	0.09538106	0.09535435	0.09533091	4.40E-07	-1.35E-05	5.04E-07	5.00E-07	5.02E-07	5.04E-07	0.02353332
15.08	0.09538101	0.09535294	0.09532876	-6.03E-05	-2.83E-05	5.03E-07	4.99E-07	5.02E-07	5.03E-07	0.03252784
15.10	0.09538094	0.09535115	0.09532913	0.00049557	0.00271609	5.18E-07	4.98E-07	5.01E-07	5.03E-07	0.03857121
15.13	0.09538085	0.09534922	0.09532563	0.00583819	0.01137672	3.97E-07	4.97E-07	5.00E-07	5.02E-07	0.04202851
15.15	0.09538074	0.09534755	0.09640198	0.01697735	0.02369917	-1.41E-05	4.97E-07	5.00E-07	5.02E-07	0.04382377
15.18	0.0953806	0.09527725	0.09863638	0.03006783	0.0350742	-2.30E-05	4.96E-07	4.99E-07	5.01E-07	0.04471091
15.20	0.09538043	0.09600265	0.04553106	0.04034652	0.04245232	0.00274547	5.11E-07	4.99E-07	5.01E-07	0.04513778
15.23	0.09550103	0.09528587	0.04936323	0.04582549	0.0460133	0.01131663	3.91E-07	4.98E-07	5.01E-07	0.04533688
15.25	0.04899671	0.04834222	0.02827204	0.02396731	0.02371359	0.01157526	9.10E-07	1.12E-06	1.13E-06	0.02271267
15.27	0.0002491	0.00010896	1.49E-06	1.46E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.35E-06	1.75E-06	1.76E-06	1.43E-06
15.29	0.00025527	0.00010585	1.49E-06	1.46E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.79E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.43E-06
15.31	0.00026114	9.88E-05	1.48E-06	1.46E-06	1.43E-06	1.41E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.43E-06
15.33	0.00026643	8.85E-05	1.48E-06	1.45E-06	1.43E-06	1.35E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.37E-06
15.35	0.00027091	7.62E-05	1.48E-06	1.45E-06	1.42E-06	1.79E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.81E-06
15.37	0.00027446	6.30E-05	1.48E-06	1.39E-06	1.58E-06	1.72E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.39	0.00027707	5.00E-05	1.47E-06	1.83E-06	1.73E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.75E-06	1.75E-06
15.41	0.00027886	3.83E-05	1.47E-06	1.77E-06	1.73E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06
15.43	0.00028001	2.83E-05	1.46E-06	1.76E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.45	0.0002807	2.03E-05	1.46E-06	1.76E-06	1.72E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.47	0.00028109	1.43E-05	1.45E-06	1.75E-06	1.71E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.49	0.0002813	9.88E-06	1.45E-06	1.74E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.51	0.0002814	6.83E-06	1.44E-06	1.74E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.53	0.00028147	4.79E-06	1.46E-06	1.73E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06	1.73E-06
15.55	0.00028153	3.47E-06	1.21E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.57	0.00028161	2.57E-06	1.83E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.59	0.00028175	1.41E-06	1.74E-06	1.71E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.61	0.00028201	1.40E-06	1.73E-06	1.70E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.63	0.00028244	1.39E-06	1.73E-06	1.70E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.65	0.0002831	1.39E-06	1.72E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.67	0.00028405	1.39E-06	1.72E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.69	0.00028533	1.39E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.71	0.00028705	1.39E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.73	0.00028949	1.40E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.75	0.11015518	0.00117295	1.51E-06	1.49E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.47E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.78	0.2194612	0.00442272	1.36E-06	1.29E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.80	0.21933029	0.00734006	1.01E-06	1.31E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.83	0.2192725	0.01102143	3.45E-07	1.32E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.85	0.21920652	0.0153206	1.58E-05	1.34E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.88	0.21911159	0.02006285	0.00012249	1.37E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.37E-06	1.39E-06
15.90	0.21895134	0.02508625	0.00046851	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.41E-06	1.42E-06
15.93	0.2187306	0.0302718	0.0012474	1.44E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
15.95	0.2217743	0.03558209	0.00267184	1.48E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
15.98	0.25322937	0.04109828	0.0049408	1.53E-06	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
16.00	0.27878058	0.04707504	0.00811357	1.58E-06	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06

**RESUMEN DE PERFIL DE COEFICIENTE DE DIFUSION DE GAS DEL MODELO 10 PARA LOS 90 DÍAS**

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.00	0.09538115	0.09537092	0.08985142	0.03947735	0.03984188	0.03750932	0.02387664	0.08599233	0.0652507	0.07310116
15.03	0.09538111	0.09537618	0.08383104	0.00036848	5.13E-07	5.05E-07	4.99E-07	0.06013361	0.0690856	0.07039574
15.05	0.09538106	0.09537876	0.07508139	0.00540106	4.67E-07	5.04E-07	4.98E-07	0.04973453	0.07024089	0.06931159
15.08	0.095381	0.09539157	0.07483249	0.01652151	4.24E-07	5.03E-07	4.97E-07	0.05771487	0.06996456	0.06871169
15.10	0.09538094	0.09540981	0.07486114	0.03078853	-5.37E-05	5.02E-07	4.96E-07	0.06263538	0.06935438	0.06838941
15.13	0.09538106	0.09544422	0.07475502	0.04453908	0.00040512	5.17E-07	4.95E-07	0.0653976	0.06882556	0.06822019
15.15	0.09538198	0.09546128	0.07448987	0.05519277	0.00533516	3.96E-07	5.10E-07	0.06683228	0.06847712	0.06813275
15.18	0.09539275	0.09526289	0.07415044	0.06208674	0.01619995	-1.50E-05	3.90E-07	0.06753659	0.06827752	0.0680877
15.20	0.09548342	0.09421624	0.07381379	0.0660617	0.03016081	-1.69E-05	-1.50E-05	0.06786867	0.06817208	0.06806398
15.23	0.0960305	0.08916669	0.07352511	0.06813494	0.04363814	0.0028219	-1.61E-05	0.06802027	0.06811928	0.06805096
15.25	0.0489359	0.04016927	0.0366517	0.03457232	0.02709069	0.00579652	0.00141209	0.03404429	0.03404768	0.03402238
15.27	0.0002385	1.52E-06	1.48E-06	1.46E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.40E-06	1.42E-06	1.42E-06	1.43E-06
15.29	0.00024417	1.51E-06	1.48E-06	1.45E-06	1.43E-06	1.42E-06	1.40E-06	1.42E-06	1.42E-06	1.43E-06
15.31	0.00024941	1.50E-06	1.48E-06	1.45E-06	1.43E-06	1.41E-06	1.34E-06	1.42E-06	1.43E-06	1.43E-06
15.33	0.00025422	1.50E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.42E-06	1.41E-06	1.77E-06	1.42E-06	1.43E-06	1.43E-06
15.35	0.00025857	1.49E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.42E-06	1.35E-06	1.71E-06	1.42E-06	1.43E-06	1.43E-06
15.37	0.00026247	1.49E-06	1.47E-06	1.45E-06	1.42E-06	1.78E-06	1.71E-06	1.42E-06	1.42E-06	1.43E-06
15.39	0.00026594	1.48E-06	1.47E-06	1.44E-06	1.42E-06	1.72E-06	1.71E-06	1.36E-06	1.58E-06	1.59E-06
15.41	0.00026899	1.48E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.35E-06	1.71E-06	1.71E-06	1.79E-06	1.74E-06	1.75E-06
15.43	0.00027165	1.47E-06	1.46E-06	1.44E-06	1.78E-06	1.71E-06	1.70E-06	1.73E-06	1.74E-06	1.75E-06
15.45	0.00027398	1.46E-06	1.45E-06	1.37E-06	1.72E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.74E-06	1.74E-06
15.47	0.00027602	1.46E-06	1.45E-06	1.81E-06	1.71E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06
15.49	0.00027782	1.45E-06	1.44E-06	1.74E-06	1.71E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.72E-06	1.73E-06	1.74E-06

Y (m)	Coeficiente de Difusión de Gas									
	1 día	10 días	20 días	30 días	40 días	50 días	60 días	70 días	80 días	90 días
15.51	0.00027945	1.44E-06	1.44E-06	1.74E-06	1.70E-06	1.69E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.73E-06	1.73E-06
15.53	0.00028098	1.44E-06	1.43E-06	1.73E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06	1.73E-06
15.55	0.00028247	1.43E-06	1.43E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.57	0.00028399	1.42E-06	1.42E-06	1.72E-06	1.68E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.72E-06	1.72E-06
15.59	0.0002856	1.42E-06	1.42E-06	1.71E-06	1.67E-06	1.66E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.72E-06
15.61	0.00028737	1.41E-06	1.41E-06	1.70E-06	1.66E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.71E-06	1.71E-06
15.63	0.00028936	1.40E-06	1.41E-06	1.70E-06	1.65E-06	1.65E-06	1.67E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.65	0.00029164	1.40E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.67	0.00029427	1.40E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.69	0.00029734	1.39E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.70E-06
15.71	0.00030095	1.39E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.64E-06	1.64E-06	1.66E-06	1.68E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.73	0.00030522	1.39E-06	1.40E-06	1.69E-06	1.65E-06	1.64E-06	1.67E-06	1.69E-06	1.70E-06	1.71E-06
15.75	0.11046689	0.00471059	1.22E-06	1.49E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.48E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.51E-06
15.78	0.2200875	0.01365054	2.14E-07	1.29E-06	1.26E-06	1.26E-06	1.28E-06	1.29E-06	1.30E-06	1.31E-06
15.80	0.21971513	0.01853383	1.24E-05	1.30E-06	1.28E-06	1.28E-06	1.30E-06	1.31E-06	1.31E-06	1.32E-06
15.83	0.21948003	0.02391288	0.00010551	1.32E-06	1.30E-06	1.30E-06	1.32E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06
15.85	0.21939559	0.02963274	0.00042229	1.34E-06	1.33E-06	1.33E-06	1.34E-06	1.35E-06	1.35E-06	1.36E-06
15.88	0.21959796	0.03555209	0.00115346	1.37E-06	1.36E-06	1.36E-06	1.37E-06	1.38E-06	1.37E-06	1.39E-06
15.90	0.22042743	0.0415486	0.00250995	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.40E-06	1.41E-06	1.40E-06	1.42E-06
15.93	0.2224601	0.04752636	0.00469412	1.44E-06	1.45E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.45E-06	1.44E-06	1.46E-06
15.95	0.22639757	0.05343815	0.00777274	1.48E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.49E-06	1.50E-06
15.98	0.24297556	0.05929676	0.01169901	1.53E-06	1.56E-06	1.56E-06	1.53E-06	1.54E-06	1.53E-06	1.54E-06
16.00	0.27723644	0.06515371	0.01636555	1.58E-06	1.62E-06	1.62E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06	1.59E-06