



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

**ANÁLISIS NUMÉRICO UNIDIMENSIONAL DE LA INFLUENCIA DEL
REGIMEN HIDROCLIMÁTICO SOBRE LOS FLUJOS
SUBSUPERFICIALES EN ZONAS MONTAÑOSAS DEL
CENTRO-NORTE DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

FRANCO ADOLFO ORDENES GONZALEZ

PROFESOR GUÍA:
JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS
MANUEL CARABALLO MONGE

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: FRANCO ADOLFO ORDENES GONZALEZ
FECHA: ENERO 2018
PROFESOR GUÍA: JAMES MCPHEE TORRES

ANÁLISIS NUMÉRICO UNIDIMENSIONAL DE LA INFLUENCIA DEL REGIMEN HIDROCLIMÁTICO SOBRE LOS FLUJOS SUBSUPERFICIALES EN ZONAS MONTAÑOSAS DEL CENTRO-NORTE DE CHILE

La zona no saturada está implicada en una serie de procesos hidrológicos relevante en el transporte de contaminantes: infiltración, recarga de aguas subterráneas, etc. Por ello, es de suma importancia analizar los flujos subsuperficiales de esta zona, en lugares donde la minería es una actividad relevante, pues dicha actividad está asociada a problemas de contaminación, como lo es el drenaje ácido.

En el presente trabajo, se evalúa el movimiento y generación de estos flujos en la base de una columna de material homogéneo, bajo distintos escenarios hidrológicos, mediante el modelo computacional HYDRUS-1D. Más específicamente, se simulan tres materiales distintos: muy grueso (GRV), grueso (SBL) y fino (SLT); sobre ellos se aplican cuatro condiciones hidrológicas distintas. En la cuenca del río Mapocho en los Almendros se tienen a escala de sitio: Manto de nieve estacional (condición A) y solo precipitación líquida (condición B). De la cuenca alta del río Copiapó se tiene, también a escala de sitio: un manto de nieve efímero (condición C) y solo precipitación líquida (condición D).

Cada condición cuenta con la información de un año completo (detalle horario), para la simulación y obtención de resultados se reitera el registro durante un periodo de 40 años. Sumado a lo anterior, se realiza un análisis de sensibilidad al variar la profundidad del material ($H=30, 60$ y 90 m) y se evalúa el efecto del cambio climático en los sitios de estudio. En consecuencia, se tiene un total de 60 simulaciones.

Como principales resultados se obtiene que la condición que más percolación en la base genera, es A, seguida por B, D y luego C. En cuanto a los materiales, SBL resulta ser el que más rápido transporta el fluido, seguido por GRV, mientras que SLT tiende a acumular mayor volumen de agua en su interior. En general, el cambio climático implica una disminución en las tasas de percolación en la base del sustrato. El efecto del aumento en la profundidad del sustrato, es la tendencia disminuir las variaciones extremas a lo largo del año, logrando un caudal más estable. Otro efecto al variar H , es el impacto sobre los tiempos de inicio de percolación en la base, donde un aumento de H al doble o triple, significa poco más del doble o triple de tiempo con respecto al caso $H=30$ m.

Las numerosas simulaciones llevadas a cabo son de gran utilidad como un primer paso para comprender el complejo comportamiento de los flujos subsuperficiales en la zona no saturada de botaderos o suelos naturales. La investigación elaborada puede ser aprovechada para evaluar en una primera instancia y sin información detallada del terreno, el posible rango de valores alcanzados por los caudales generados, los valores mínimos o bases, los máximos, su duración y las variaciones durante el año.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis papás, que siempre me inculcaron la importancia de los estudios y me apoyaron incondicionalmente a lo largo de toda la carrera, sin ellos, esto no sería posible. Gracias a mi hermana, hermano y sobrinas, por aguantarme en esos días de estrés donde me volvía insoportable. Gracias a todos ustedes, por su paciencia, apoyo y cariño.

Gracias al resto de mi familia, abuela, tíos, tías, primos y primas, por su preocupación y consejos, que me alentaban a seguir. Agradecer también a todos mis amigos y amigas, especialmente a Vivi y Seba, que apañaron siempre, alegrando y haciendo mucho más llevadero este proceso, gracias por su compañía, amistad y buenos momentos.

Quiero agradecer a los miembros de mi comisión, al profesor Carlos Espinoza, por aceptar ser mi co-guía con tan poco tiempo de anticipación; al profesor Manuel Caraballo por sus consejos y su enriquecedor aporte al trabajo desde la mirada de otra especialidad y, por último, al profesor James McPhee, por las oportunidades brindadas antes y durante el desarrollo de esta investigación, por su buena disposición, por su confianza y el apoyo entregado.

Agradecer a todos los profesores del área de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, que ayudaron a que me interesara y encantara con la carrera, gracias todos por los conocimientos transmitidos. Finalmente dar gracias a quienes de una u otra forma me ayudaron en este trabajo, a Michelle, Francisco y Luis, que siempre respondieron mis dudas y me facilitaron la información que requería.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Metodología	3
1.3.1. Recopilación Bibliográfica.....	3
1.3.2. Levantamiento de las Condiciones Hidroclimáticas a Aplicar	3
1.3.3. Confección y Aplicación del Modelo	3
1.3.4. Análisis de Sensibilidad y Comparación Simulaciones	4
1.4. Estructura del Informe	4
2. Revisión de Antecedentes	5
2.1. Flujo en Medio No Saturado.....	5
2.1.1. Curva Característica Suelo-Agua (SWCC)	6
2.1.2. Conductividad Hidráulica	9
2.1.3. Ecuación de Richards	10
2.2. HYDRUS-1D	12
2.3. Drenaje Ácido y Botaderos.....	14
2.4. Cold Regions Hydrological Model (CRHM)	17
2.5. Escenarios Climáticos	18
3. Zonas de Estudio	20
3.1. Cuenca Alta del Río Copiapó	21
3.1.1. Hidrología y Estaciones de Monitoreo	22
3.1.2. Clima.....	25
3.1.3. Características del Terreno.....	27
3.1.4. Geología e Hidrogeología	28
3.2. Cuenca Alta del Río Mapocho.....	28
3.2.1. Hidrología y Estaciones de Monitoreo	30
3.2.2. Clima.....	32
3.2.3. Características del Terreno.....	34
3.2.4. Geología e Hidrogeología	35
4. Condiciones Hidrológicas a Simular	36
4.1. Condición A.....	36
4.2. Condición B.....	39

4.3. Condición C.....	40
4.4. Condición D.....	43
5. Construcción Modelo en HYDRUS-1D	44
5.1. Materiales Simulados.....	45
6. Resultados de las Simulaciones	48
6.1. Condición A (Nieve en Mapocho en los Almendros)	48
6.1.1. Material: GRV	48
6.1.2. Material: SBL	50
6.1.3. Material: SLT	52
6.2. Condición B (Precipitación en Mapocho en los Almendros).....	54
6.2.1. Material: GRV	54
6.2.2. Material: SBL	56
6.2.3. Material: SLT	58
6.3. Condición C (Nieve en cuenca alta Río Copiapó)	59
6.3.1. Material: GRV	59
6.3.2. Material: SBL	61
6.3.3. Material: SLT	63
6.4. Condición D (Precipitación en cuenca alta Río Copiapó).....	64
6.4.1. Material: GRV	64
6.4.2. Material: SBL	66
6.4.3. Material: SLT	68
7. Discusión y Conclusiones	70
7.1. Discusión de los resultados.....	70
7.2. Conclusiones y recomendaciones.....	75
Bibliografía	77
Anexos	83
Anexo A. Determinación evaporación horaria.....	83
Anexo B. Principales valores de las simulaciones	85
Anexo C. Balance de masa.....	87

Índice de ilustraciones

Figura 2-1. Sección vertical mostrando los términos usados para describir el flujo subterráneo. (Modificado de Fitts, 2012).....	5
Figura 2-2. Zonas correspondientes a una curva suelo-agua característica. (Modificado de López-Acosta & Mendoza-Promotor, 2016).	7
Figura 2-3. Curvas características de varios tipos de suelo del trabajo de Brooks y Corey: “Properties of porous media affecting fluid flow”, 1966. (Modificado de Fitts, 2012).	8
Figura 2-4. Ejemplo de curva de retención mostrando histéresis. (Modificado de Šimůnek et al., 2013).	9
Figura 2-5. A la derecha, ejemplo de una curva de conductividad hidráulica relativa, obtenida a partir de una SWCC, gráfico de la izquierda. (Modificado de Van Genuchten, 1980).	10
Figura 3-1. Mapa ubicación y elevación cuenca alta del río Copiapó.....	21
Figura 3-2. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Jorquera en Vertedero, entre los años hidrológicos 2001 y 2015. (Fuente: Jara, 2017; Zapata, 2016)	22
Figura 3-3. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Pulido en Vertedero, entre los años hidrológicos 2001 y 2015. (Fuente: Jara, 2017; Zapata, 2016)	23
Figura 3-4. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Manflas en Vertedero, entre los años hidrológicos 2001 y 2015. (Fuente: Jara, 2017; Zapata, 2016)	23
Figura 3-5. Subcuencas al interior de la cuenca alta del río Copiapó y ubicación de estaciones de monitoreo.	24
Figura 3-6. Valores mensuales de temperatura y precipitación en estaciones meteorológica de la cuenca alta del río Copiapó, donde en cada caso se indica el periodo de datos utilizados. (Fuente: DGA).	26
Figura 3-7. Curvas hipsométricas de la cuenca alta del río Copiapó y las tres subcuencas que la componen.....	27
Figura 3-8. Mapa ubicación y elevación cuenca del río Mapocho en los Almendros.	29
Figura 3-9. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Mapocho en los Almendros. (Modificado de: Comte, 2017).	30
Figura 3-10. Subcuencas al interior de la cuenca del río Mapocho en los Almendros y ubicación de estaciones de monitoreo.	31
Figura 3-11. Valores mensuales de temperatura y precipitación en estaciones meteorológica de la cuenca Mapocho en los Almendros, donde en cada caso se indica el periodo de datos utilizados. (Fuente: DGA).....	33
Figura 3-12. Curvas hipsométricas de la cuenca Mapocho en los Almendros y las cinco subcuencas que la componen.....	34
Figura 4-1. Temperatura horaria en Valle Nevado para año hidrológico 2015-2016.....	37
Figura 4-2. Precipitación horaria en Valle Nevado para año hidrológico 2015-2016.....	37
Figura 4-3. SWE modelado en Valle Nevado y su variación para distintos escenarios de cambio climático.....	38
Figura 4-4. Tasas de derretimiento en Valle Nevado. Escenario actual y cambio climático.	38
Figura 4-5. Temperatura horaria modificada para condición B en Valle Nevado.	40

Figura 4-6. Tasas de evaporación potencial en Valle Nevado para condición B. Escenario actual.....	40
Figura 4-7. Temperatura horaria en La Ollita para año 2015-2016.	41
Figura 4-8. Precipitación horaria en La Ollita para año 2015-2016.	41
Figura 4-9. SWE modelado en La Ollita y su variación para distintos escenarios de cambio climático.	42
Figura 4-10. Tasas de derretimiento en La Ollita. Escenario actual y cambio climático.	42
Figura 4-11. Temperatura horaria modificada para condición D en Valle Nevado.	43
Figura 4-12. Tasas de evaporación potencial en La Ollita para condición D. Escenario Actual.	43
Figura 5-1. Curva característica Suelo-Agua (SWCC) para los tres materiales simulados.	47
Figura 5-2. Conductividad hidráulica (K) para los tres materiales simulados.....	47
Figura 6-1. Tasas de percolación en la base del material GRV, caso base, condición A, 20 años de simulación.....	48
Figura 6-2. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición A.	49
Figura 6-3. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición A.	49
Figura 6-4. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material GRV, condición A.	50
Figura 6-5. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición A.	51
Figura 6-6. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición A.	51
Figura 6-7. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición A.	52
Figura 6-8. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SLT, caso base, condición A.	53
Figura 6-9. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SLT, condición A.....	53
Figura 6-10. Percolación con una profundidad igual a 60 m a la izquierda. A la derecha se presenta el perfil del sustrato y el contenido de humedad para H igual a 90 m. Material SLT, condición A.	54
Figura 6-11. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición B.	54
Figura 6-12. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición B.	55
Figura 6-13. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material GRV, condición B.	56
Figura 6-14. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición B.	56
Figura 6-15. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición B.	57
Figura 6-16. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición B.	58

Figura 6-17. Perfil del sustrato y contenido de agua volumétrico para el tiempo final de simulación de 40 años. (a) Caso base, (b) escenario moderado y (c) escenario severo. Material SLT, condición B.....	59
Figura 6-18. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición C.....	60
Figura 6-19. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición C.....	60
Figura 6-20. Perfil del sustrato y contenido volumétrico de agua al término de los 40 años de simulación, escenario actual, material GRV, condición C.....	61
Figura 6-21. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición C.....	62
Figura 6-22. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición C.....	62
Figura 6-23. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición C.....	63
Figura 6-24. Perfil del sustrato y contenido de agua volumétrico para el tiempo final de simulación de 40 años. (a) Caso base, (b) escenario moderado y (c) escenario severo. Material SLT, condición C.....	64
Figura 6-25. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición D.....	65
Figura 6-26. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición D.....	65
Figura 6-27. Percolación con una profundidad igual a 60 m a la izquierda. A la derecha se presenta el perfil del sustrato y el contenido de humedad para H igual a 90 m. Material GRV, condición D.....	66
Figura 6-28. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición D.....	67
Figura 6-29. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición D.....	67
Figura 6-30. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición D.....	68
Figura 6-31. Perfil del sustrato y contenido de agua volumétrico para el tiempo final de simulación de 40 años. (a) Caso base, (b) escenario moderado y (c) escenario severo. Material SLT, condición D.....	69
Figura A-1. Tasas de evaporación potencial a utilizar en las condiciones B (Gráficos de arriba) y D (Gráficos de abajo) en los escenarios climáticos moderado y severo.....	84
Figura C-1. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición A, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).....	87
Figura C-2. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición B, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).....	87
Figura C-3. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición C, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).....	88

Figura C-4. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición D, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).....88

Índice de tablas

Tabla 2-1. Conductividad hidráulica saturada declarada en estudios previos sobre botaderos. Cada columna corresponde a un material distinto.	17
Tabla 2-2. Resultados de proyecciones de cambios en la temperatura del aire y precipitación, para el periodo 2031-2050. Fuente: Rojas (2012).....	19
Tabla 3-1. Estaciones fluviométricas y meteorológicas en la cuenca alta del río Copiapó y algunas de las cercanas. (Fuente: DGA).....	24
Tabla 3-2. Estaciones de monitoreo en la cuenca del río Mapocho en los Almendros. (Fuente: DGA).....	30
Tabla 5-1. Parámetros requeridos por el modelo de van Genuchten para los tres materiales simulados. (Modificado de Dawood & Aubertin, 2014; Fala et al., 2013).....	46
Tabla B-1. Principales valores obtenidos de las simulaciones según condición (Cond.), material (Mat.), profundidad del perfil del sustrato (H) y escenario climático. (-) Simulaciones sin percolación.	85

1. Introducción

1.1. Motivación

La minería en Chile (y en el mundo) se ve enfrentada actualmente a una serie de dificultades, donde una de las principales es la generación y manejo de residuos sólidos, los cuales son fuente potencial de contaminación. La explotación de ciertos minerales, incluyendo el oro y el cobre, están asociadas con problemas de drenaje ácido que pueden causar deterioros a largo plazo a los cursos de agua y a la biodiversidad. Incluso, algunos efluentes generados por la industria minera incluyen grandes cantidades de sustancias tóxicas que tienen serias implicancias ecológicas y en la salud humana (Azapagic, 2004).

El drenaje ácido de minas (AMD por sus siglas en inglés) es el escurrimiento de soluciones ácidas sulfatadas, con un contenido importante de metales disueltos, que resultan de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados y de la lixiviación de metales pesados asociados (SERNAGEOMIN, 2002). A pesar de que este proceso ocurre de manera natural, la minería promueve su generación a través del incremento de la cantidad de sulfuros expuestos. Las reacciones son aceleradas también por la acción de algunas bacterias catalizadoras (Akcil & Koldas, 2006).

Esta problemática ambiental, sumada a la escasez del recurso hídrico, los impactos producidos por el cambio climático, mayores exigencias legales, demandas de las comunidades locales y, en general, un requerimiento de mejoras en los indicadores de desempeño ambiental de la minería, genera la motivación para progresar en estrategias que enfrenten de buena manera esta serie de desafíos. Una de ellas es el tratamiento pasivo de aguas ácidas, que se caracteriza según la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras (SERNAGEOMIN, 2015), por no requerir insumos químicos ni energía para operar, utilizando fuentes de energía disponible en la naturaleza (usando el gradiente topográfico o la energía metabólica microbiana, por ejemplo), lo que tiene un impacto positivo sobre los costos operacionales.

La selección y el diseño de un sistema pasivo apropiado se basa en la química del agua, las tasas de flujo (caudales), topografía local y características del sitio en cuestión (Hyman & Watzlaf, 1995). Es por ello, que se plantea el desafío de identificar rigurosamente el impacto que tienen las distintas características hidrológicas y climáticas sobre los flujos subsuperficiales, ya que con ello es posible realizar pronósticos o estimaciones más precisas de las tasas y calidad del caudal contaminado.

Este conocimiento acabado de las condicionantes hidrológicas es fundamental para que las posibles soluciones de ingeniería sean sustentables en el tiempo, y dado que es un factor que se ha vuelto cada vez más crítico en la toma de decisiones (Johnson & Hallberg, 2005), considerar diversos escenarios climáticos (cambio climático) también es necesario, pues es en base a ello que se puede optimizar y evaluar la capacidad de adaptación que tienen las instalaciones frente a fluctuaciones de temperatura y precipitaciones, y por lo tanto, a las alteraciones de los caudales o percolaciones generadas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar el movimiento y la generación de aguas en la base de una columna de un material homogéneo, bajo distintos escenarios hidrológicos. En particular, el estudio se lleva a cabo en una dimensión con el modelo computacional HYDRUS-1D realizando un análisis de los flujos de agua en medios porosos de saturación variable.

1.2.2. Objetivos Específicos

El trabajo consta de tres objetivos específicos:

- I. Evaluar el comportamiento hidrológico que presentan distintos sustratos (materiales) homogéneos, en respuesta a diferentes condiciones hidroclimáticas, para desarrollar predicciones sobre la cuantía y movimiento del agua.
- II. Analizar los patrones de variabilidad temporal esperables en cuanto a la generación de flujos de agua para instalaciones ubicadas en las zonas montañosas del centro-norte de Chile a partir de datos históricos.
- III. Estudiar el efecto de cambios sobre estos patrones de variabilidad y sobre las dimensiones físicas del material simulado, para evaluar su impacto sobre la generación y movimiento del recurso hídrico.

1.3. Metodología

Los pasos para cumplir con los objetivos previamente mencionados se enumeran a continuación.

1.3.1. Recopilación Bibliográfica

Se realiza una exhaustiva revisión bibliográfica sobre el comportamiento hidrológico de los materiales ubicados en la zona no saturada. Lo anterior para llevar a cabo una compilación de las variables y parámetros involucrados en los procesos de flujo (Tipos de material, conductividad hidráulica, etc.). Junto a ello, se debe profundizar en el tema de flujo de agua en medios porosos con distintos grados de saturación, en particular, en el uso del programa computacional HYDRUS-1D.

1.3.2. Levantamiento de las Condiciones Hydroclimáticas a Aplicar

Se realiza un estudio bibliográfico de la información científica y técnica disponible, con el fin de describir el régimen hydroclimático característico de dos zonas de alta montaña en Chile donde la minería es una actividad relevante, para que sean aplicadas posteriormente en el modelo.

Más específicamente, se recopilan series de datos de evaporación, precipitación y derretimiento dados por masas de hielo/nieve en los sitios de interés, según sea el caso, que corresponden a las entradas del modelo HYDRUS-1D. Para la generación de las tasas de derretimiento de hielo/nieve, se utiliza el programa CRHM con modelos ya elaborados, que entregan como resultado las series de datos de un año completo con detalle horario a escala de sitio.

1.3.3. Confección y Aplicación del Modelo

A partir de la información hidrológica recopilada, se debe confeccionar el modelo unidimensional en HYDRUS-1D. Se utilizan datos reportadas en la literatura con información de depósitos de estériles para tres tipos de materiales.

Luego, se simulan las condiciones hidrológicas siguientes:

- Sustrato rocoso expuesto al aire y con una serie de eventos de precipitación.
- Sustrato rocoso cubierto por un manto de nieve.

Para cada una de las simulaciones se utiliza el año completo, con detalle horario reiterado en un periodo de 40 años. Como principales resultados se entregan las tasas de caudales en la base del material (percolación), destacando los valores máximos, mínimos, promedio y tiempos de inicio de la percolación a la base.

1.3.4. Análisis de Sensibilidad y Comparación Simulaciones

En cada condición hidrológica se debe llevar a cabo un análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros más relevantes, como lo es el espesor (profundidad) del material rocoso.

Además, se realiza un análisis para poder evaluar el efecto de las proyecciones de cambio climático en los sitios de estudio, donde en los modelos puntuales en CRHM, se simula el efecto de aumentar la temperatura y disminuir la precipitación según los escenarios proyectados.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos por cada condición hidroclimática y por cada análisis de sensibilidad.

1.4. Estructura del Informe

El presente trabajo se distribuye en los siguientes capítulos:

En el actual Capítulo 1, se presenta la introducción al tema de estudio, la motivación, los principales objetivos del trabajo y la metodología a seguir.

En el Capítulo 2 se realiza la revisión bibliográfica, destacando la información más relevante de las fuentes consultadas.

En el Capítulo 3 se presentan las dos zonas de estudio y sus principales características.

En el Capítulo 4 se presentan los distintos escenarios hidrológicos a simular, mostrando las variables de entrada al modelo HYDRUS-1D.

El Capítulo 5 muestra el detalle de la construcción del modelo en HYDRUS-1D y las características de los tipos de materiales simulados.

El Capítulo 6 muestra los resultados de la modelación para cada caso estudiado.

El Capítulo 7 contiene las principales discusiones y conclusiones con respecto al trabajo y los resultados presentados.

2. Revisión de Antecedentes

2.1. Flujo en Medio No Saturado

La zona no saturada corresponde a la porción bajo la superficie que se encuentra sobre el nivel freático del agua; el medio en esta zona contiene tanto aire como agua en sus poros. En algunos lugares la zona no saturada está ausente, como es común donde hay lagos y pantanos, y en otros sitios es de cientos de metros de espesor, como es común en las regiones áridas (USGS, 2013). Esta zona está implicada en una serie de procesos hidrológicos: infiltración, evaporación, recarga de aguas subterráneas, almacenamiento de la humedad del suelo, etc. y por lo tanto es muy relevante también en el transporte de contaminantes.

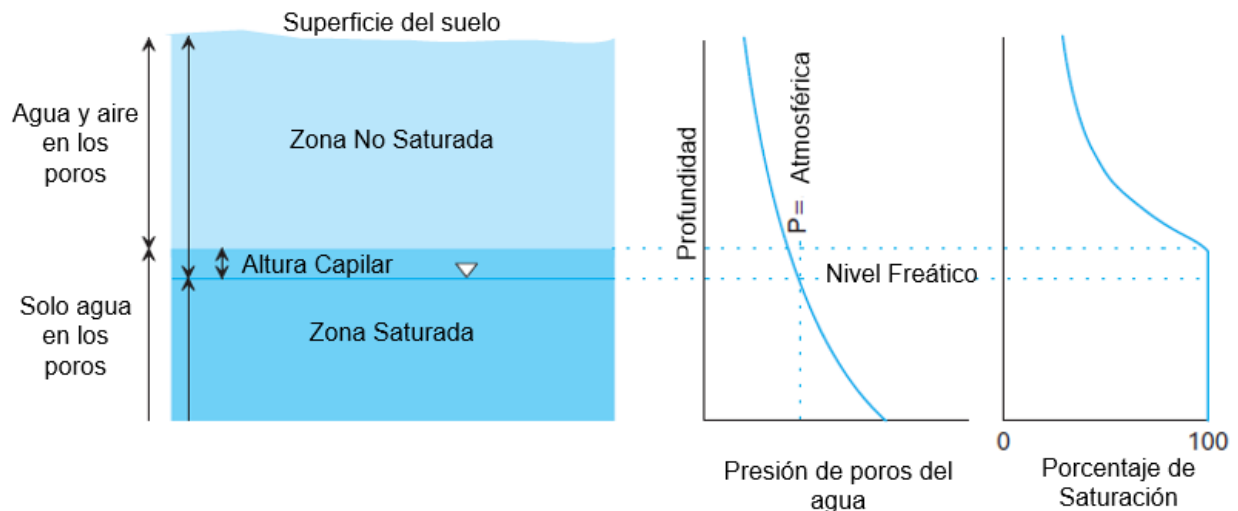


Figura 2-1. Sección vertical mostrando los términos usados para describir el flujo subterráneo. (Modificado de Fitts, 2012).

Como se observa en la Figura 2-1, en la zona no saturada la presión del agua es menor a la presión atmosférica a causa de las fuerzas capilares que atraen el agua hacia la superficie del mineral, a diferencia de la presión en la zona saturada que es mayor a la atmosférica debido al peso de la columna de agua que se ubica sobre la sección. En referencia a este mecanismo físico de retención de agua, la altura de presión negativa (h) es a menudo llamada succión (ψ) o tensión (Freeze & Cherry, 1979).

La altura capilar se encuentra por sobre el nivel freático, por lo que tradicionalmente se ha considerado dentro de la zona no saturada, a pesar de tener un comportamiento más similar a la zona saturada. Esta altura depende del tamaño de los poros en el medio, siendo mayor para los tamaños de poros pequeños que en medios con poros grandes. En limo o arcilla el grosor puede alcanzar más de un metro mientras que en grava gruesa el espesor puede ser menor al milímetro (Fitts, 2012).

Algunas propiedades físicas del medio donde ocurren los flujos, que son importantes de definir, son la porosidad, que corresponde simplemente a la fracción del volumen del material que es espacio de poros (Ecuación (2.1)) y el contenido volumétrico de agua (Ecuación (2.2)) que es la fracción del espacio ocupado por el agua en un volumen del material.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.1)$$

Donde,

n : Porosidad [L^3L^{-3}].

V_v : Volumen de vacío [L^3].

V_t : Volumen total del material [L^3].

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.2)$$

Donde,

θ : Contenido volumétrico de agua [L^3L^{-3}].

V_w : Volumen de agua [L^3].

V_t : Volumen total del material [L^3].

Ambos son parámetros adimensionales expresados como una fracción decimal o como porcentaje. Si el material está saturado θ será igual a n y si se encuentra en la zona no saturada θ será menor a n . El grado de saturación será la simple división entre el contenido volumétrico de agua y la porosidad.

2.1.1. Curva Característica Suelo-Agua (SWCC)

El contenido de agua es de gran relevancia, pues se relaciona con la altura de presión o succión mátrica, entendida como la diferencia entre la presión atmosférica y la presión del agua, mediante la llamada curva característica suelo-agua (SWCC, soil-water characteristic curve) o curva de retención, que se emplea para describir el comportamiento del suelo.

En el trabajo de López-Acosta y Mendoza-Promotor del 2016, se realiza una descripción de una curva típica donde es posible describir zonas y parámetros relevantes según la Figura 2-2:

- Zona capilar saturada: El suelo se mantiene en un estado saturado a pesar de los cambios en la succión, esto ocurre hasta el límite llamado valor de entrada del aire, que puede describirse como aquella succión mátrica que debe ser excedida antes de que el aire entre a los macroporos del suelo, situación que comienza con aquellos poros de mayor tamaño.

- Zona de transición. En esta zona el agua es desplazada debido a la entrada de aire a los poros y el contenido de agua comienza a reducirse. El límite de esta zona está determinado por el contenido de agua residual (θ_r), cuando el agua en los poros se vuelve discontinuo, envuelve a las partículas del suelo con una fina película, y la permeabilidad decrece considerablemente.
- Zona residual: En esta sección aumentos en la succión no producen cambios significativos en el contenido de agua. El agua es escasa por lo que no fluye entre poros y su remoción solo ocurre por evaporación. Esta región se caracteriza por valores extremadamente altos de succión.

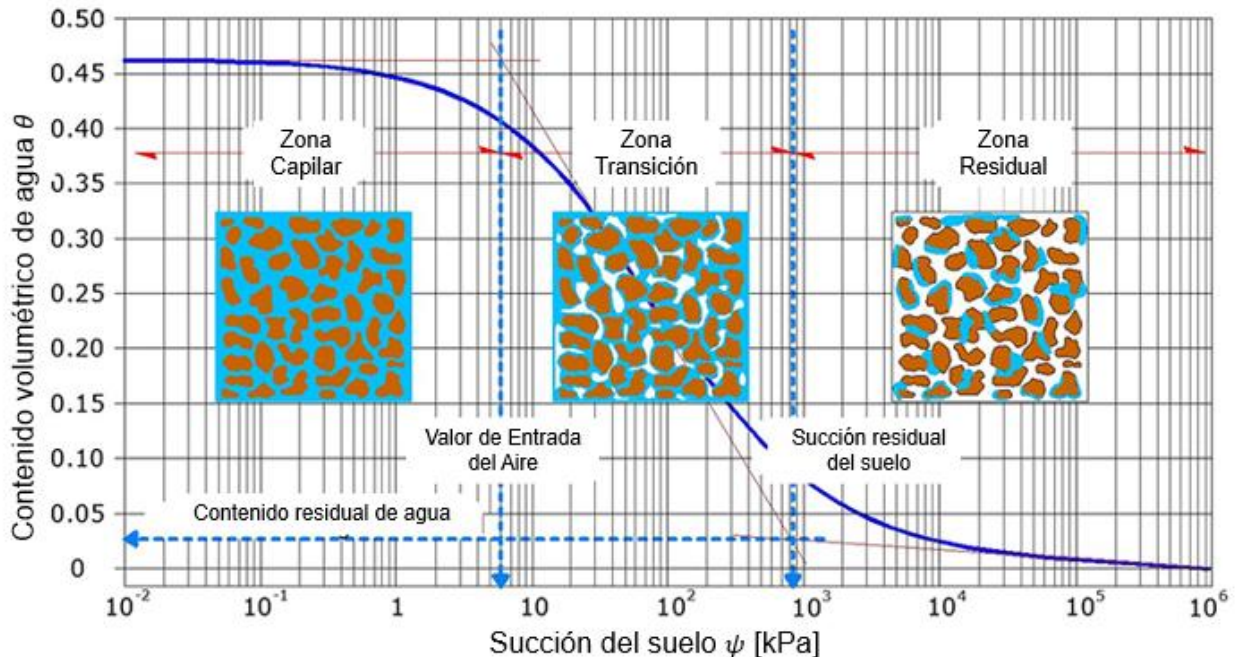


Figura 2-2. Zonas correspondientes a una curva suelo-agua característica. (Modificado de López-Acosta & Mendoza-Promotor, 2016).

La estimación de la SWCC se puede realizar en laboratorio, mediante modelos de estimación como función de las propiedades del suelo (volumen-masa y relaciones con la distribución del tamaño del grano) o a través de métodos de ajuste que están basado en ecuaciones empíricas o experimentales de acuerdo a datos obtenidos en pruebas de laboratorio (López-Acosta & Mendoza-Promotor, 2016).

La naturaleza de la SWCC está directamente asociada con la distribución del tamaño del grano y la estructura del suelo. Por ello, la curva varía como función del tipo de material. Al observar la Figura 2-3 es aparente que materiales con poros más pequeños tienden a tener menores presiones (mayores succiones) dado un contenido de agua. A muy bajas presiones, el contenido de agua permanece prácticamente constante a pesar de reducciones en la presión, este límite es conocido como el contenido volumétrico de humedad residual (Fitts, 2012). Cuando la presión es igual a cero, el contenido volumétrico de agua es igual a la porosidad, por ende, el suelo está saturado.

El valor de entrada del aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, a causa de la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la desaturación del suelo (Meza, 2012).

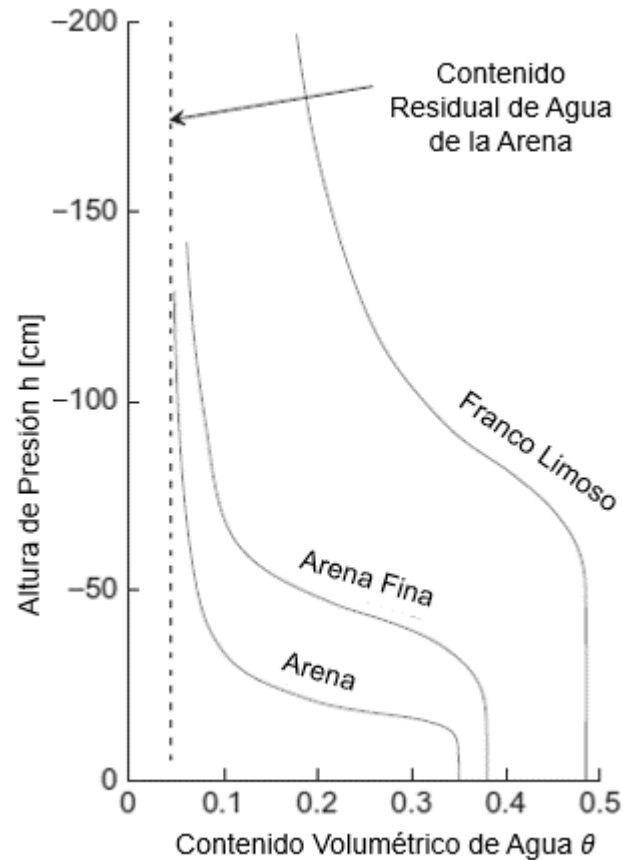


Figura 2-3. Curvas características de varios tipos de suelo del trabajo de Brooks y Corey: "Properties of porous media affecting fluid flow", 1966. (Modificado de Fitts, 2012).

En general, la curva característica suelo-agua tiene un comportamiento diferente si es que el suelo se encuentra en el proceso de secado o de humedecimiento, es decir, la relación entre el contenido volumétrico del agua y la presión depende de la historia del contenido de humedad del suelo.

Este fenómeno se conoce como histéresis y la Figura 2-4 muestra dicho comportamiento, θ^w representa la curva asociada al humedecimiento del suelo, mientras que θ^d es la curva de secado del suelo.

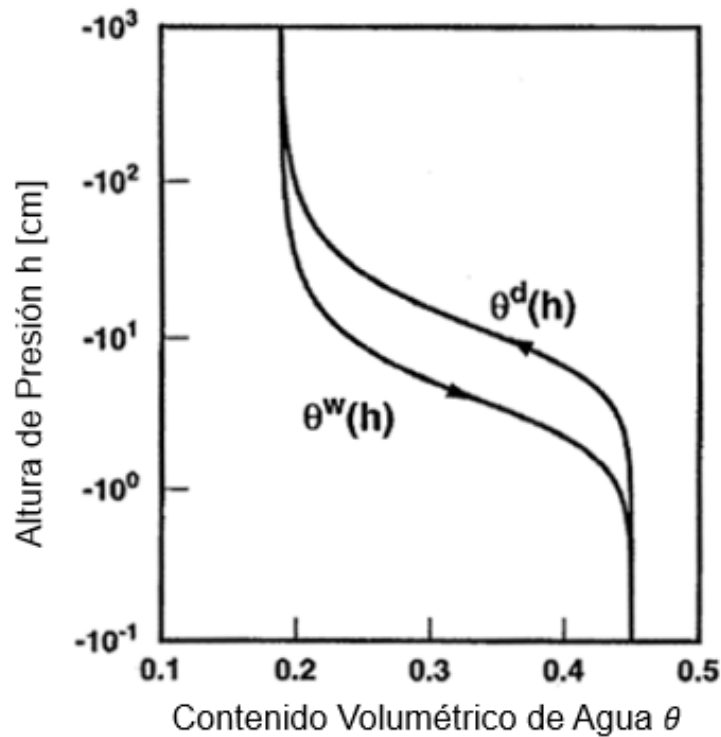


Figura 2-4. Ejemplo de curva de retención mostrando histéresis. (Modificado de Šimůnek et al., 2013).

2.1.2. Conductividad Hidráulica

Otro parámetro importante es la conductividad hidráulica, que es una medida de la facilidad con que un medio permite la transmisión de agua a través de él. Sobre un medio saturado, estable y homogéneo, la conductividad permanece prácticamente constante si las propiedades del fluido también lo son.

Esto no ocurre en el flujo en medios no saturados, ya que la conductividad depende del contenido de agua en el medio. A medida que el suelo drena, el aire empieza a llenar los poros con la consecuente disminución del volumen del agua por el que el fluido circula. Cuando la succión aumenta, los poros más grandes y que más agua conducen drenan primero, aumenta la tortuosidad y, por lo tanto, la conductividad hidráulica disminuye notablemente junto al contenido de agua, usualmente varios órdenes de magnitud (Hillel, 1971).

La conductividad hidráulica no saturada es difícil de medir experimentalmente, por lo que es a menudo estimada a partir de las SWCC mediante una gran variedad de métodos, como por ejemplo el modelo de Mualem–van Genuchten (1980). Esto permite generar una curva de la conductividad hidráulica versus el contenido de humedad o la altura de presión, como se presentan en la Figura 2-5, donde se refleja el hecho de que la conductividad de un suelo no saturado aumenta con el incremento de la humedad.

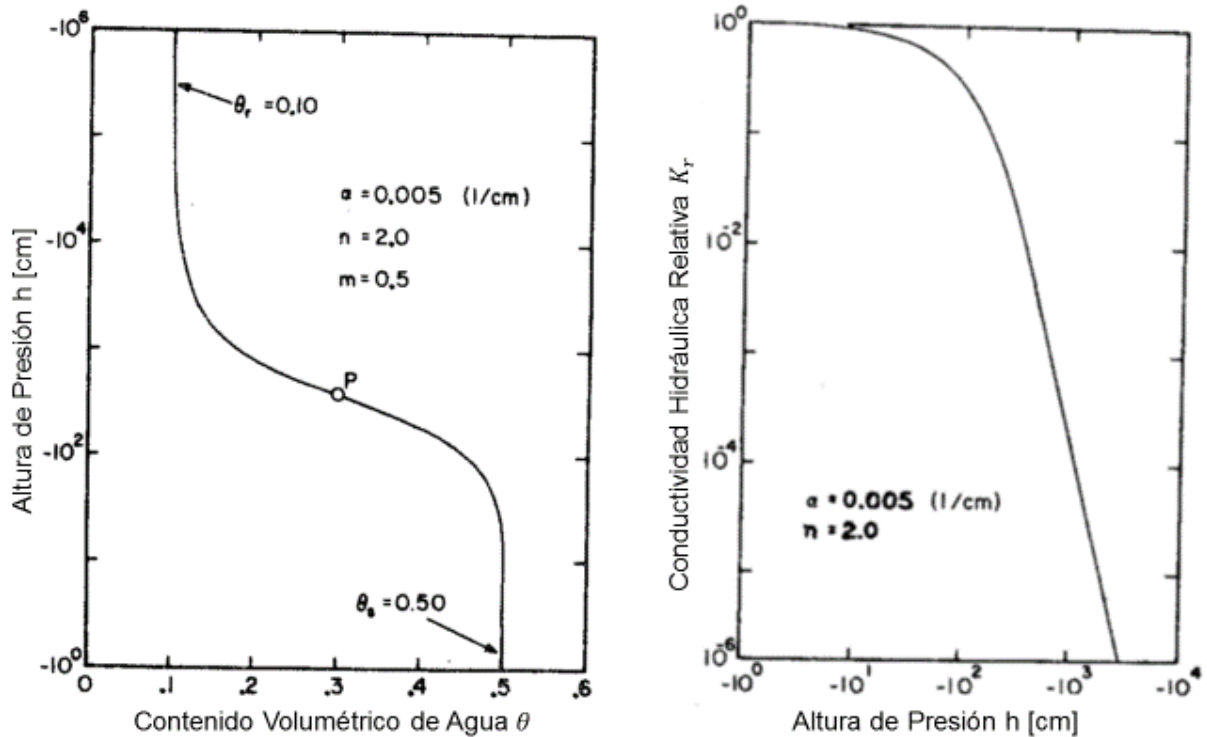


Figura 2-5. A la derecha, ejemplo de una curva de conductividad hidráulica relativa, obtenida a partir de una SWCC, gráfico de la izquierda. (Modificado de Van Genuchten, 1980).

En este caso, la conductividad hidráulica no saturada (K) está dada por la ecuación (2.3). Se obtiene de la conductividad saturada y la conductividad hidráulica relativa, que corresponde a un factor dependiente de la humedad y la altura de presión.

$$K(h, \theta) = K_s \cdot K_r(h, \theta) \quad (2.3)$$

Donde,

K_r : Conductividad hidráulica relativa [-].

K_s : Conductividad hidráulica saturada [LT^{-1}].

2.1.3. Ecuación de Richards

La ecuación que gobierna el flujo en medio no saturado corresponde a la de Richards formulada en 1931. La diferencia esencial entre el flujo a través de un medio poroso saturado y el flujo no saturado radica en que, para esta última condición, la presión es determinada por las fuerzas capilares y la conductividad hidráulica depende del contenido de humedad del medio (Richards, 1931).

Por ello, para la derivación de la ecuación de Richards, se emplea la ley de Darcy modificada, en la que se incluye la dependencia entre conductividad y altura de presión (Ecuación (2.4)). Esta es llamada, según Swartzendruber (1969), como la ecuación Buckingham–Darcy, en honor al trabajo de Edgar Buckingham (1907).

$$v = -K(h) \cdot \nabla H \quad (2.4)$$

Donde,

v : Vector descarga específica o velocidad de Darcy [LT^{-1}].

K : Conductividad hidráulica no saturada [LT^{-1}].

H : Carga hidráulica ($H = h + z$) [L].

Con z la altura geométrica [L] y h la altura de presión [L]

La ley de conservación de masa en medios saturados requiere que la tasa neta de la masa del fluido en un volumen de control elemental sea igual a los cambios en la masa del fluido almacenado en el elemento:

$$-\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho \cdot n)}{\partial t} \quad (2.5)$$

Donde,

ρ : Densidad del fluido [ML^{-3}].

v_i : Velocidad de Darcy en la dirección i [LT^{-1}].

n : Porosidad [L^3L^{-3}].

Para el flujo no saturado, la ecuación de continuidad debe modificar el término $\rho \cdot n$ del lado derecho de la ecuación (2.5) por $\rho \cdot n \cdot \theta'$, con $\theta' = \theta/n$. Esto debido a que deben ser incluidas las tasas de cambio en el contenido de humedad, en la densidad del fluido y cambios en el medio (compactación):

$$-\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} = n \cdot \theta' \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \theta' \frac{\partial n}{\partial t} + n \cdot \rho \frac{\partial \theta'}{\partial t} \quad (2.6)$$

En este tipo de flujo, los dos primeros términos del lado derecho son mucho menos importantes que el tercero, por lo que son depreciados los cambios en el tiempo de la densidad y porosidad. Luego, asumiendo una densidad constante dentro del volumen, se simplifica en ambos lados de la ecuación y reconociendo que $n d\theta' = d\theta$, se llega a:

$$-\frac{\partial(v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.7)$$

Combinando las ecuaciones (2.4) y (2.7), además reemplazando $H = h + z$, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial(h)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h) \frac{\partial(h)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial(h)}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.8)$$

O equivalentemente:

$$\nabla \cdot K(h) \nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.9)$$

Que corresponde a la ecuación de Richards forma mixta, al tener presente la presión (h) y el contenido volumétrico de agua (θ). La derivación anterior se obtiene de Freeze y Cherry (1979). Alternativamente, hay otras dos formas estándar que se pueden identificar (Celia et al., 1990), la ecuación basada en h (ecuación (2.10)) y la basada en θ (ecuación (2.11)).

$$\nabla \cdot K(h)\nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = C(h)\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.10)$$

Donde,

$C(h) = d\theta/dh$ es la función capacidad específica de humedad [L^{-1}].

$$\nabla \cdot D(\theta)\nabla\theta - \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (2.11)$$

Donde,

$D(\theta) = K(\theta)/C(\theta)$ es la difusividad no saturada [L^2T^{-1}].

Debido a que esta ecuación es altamente no lineal, las soluciones analíticas no son posibles, salvo casos especiales. Por lo tanto, aproximaciones numéricas son típicamente usadas para resolver las ecuaciones de flujo no saturado. Las aproximaciones estándar que son aplicadas al dominio espacial son el método de diferencias finitas y el método de elementos finitos (Celia et al., 1990).

2.2. HYDRUS-1D

HYDRUS-1D es un modelo de dominio público desarrollado por Šimůnek et al. (1998) en Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California. El software incluye el modelo de elementos finitos unidimensionales HYDRUS para simular el movimiento del agua, flujo de calor y el transporte de múltiples solutos en medios saturados de forma variable. Está soportado por una interfaz interactiva basada en gráficos para el pre-procesamiento de datos, la discretización del perfil del medio y la presentación gráfica de los resultados.

El programa resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el flujo de agua saturada/no saturada y la ecuación tipo advección-dispersión para el transporte de calor y solutos. Las ecuaciones de flujo pueden incluir un término sumidero para tomar en cuenta el agua consumida por las raíces de las plantas, así como también se puede considerar flujos del tipo porosidad dual en que una parte del contenido de agua es móvil y la otra fracción inmóvil, o flujos del tipo permeabilidad dual, donde se tienen dos regiones, una representando la matriz y la otra los macroporos.

La región de flujo puede estar compuesta por material no uniforme y el movimiento puede ocurrir en la vertical, horizontal o una dirección inclinada. La parte de flujos de agua del modelo puede emplear condiciones de carga hidráulica y/o flujos, condiciones controladas por variables atmosféricas, así como también condición de drenaje libre. Las ecuaciones son resueltas numéricamente usando el método tipo Galerkin de esquemas lineales de elementos finitos.

El movimiento del agua en una dimensión, en un medio poroso rígido parcialmente saturado, es descrito por una forma modificada de la ecuación de Richards (Ecuación (2.12)) asumiendo que la fase gaseosa juega un rol insignificante en el proceso de flujo del agua líquido y que el flujo debido a gradientes termales puede ser despreciado.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - S \quad (2.12)$$

Donde,

h : Altura de presión [L].

θ : Contenido de agua volumétrico [L^3L^{-3}].

t : Tiempo [T].

x : Coordenada espacial [L].

S : Término sumidero [$L^3L^{-3}T^{-1}$].

β : Ángulo entre la dirección del flujo y el eje vertical (por ejemplo, 0° para flujo vertical, 90° para horizontal y $0^\circ < \beta < 90^\circ$ para el flujo inclinado).

K : Función conductividad hidráulica no saturada [LT^{-1}].

En cuanto a las propiedades hidráulicas del suelo, θ y K en la ecuación (2.12), HYDRUS-1D permite su obtención mediante cinco diferentes modelos analíticos: Brooks and Corey (1964), van Genuchten (1980), Vogel and Císlerová (1988), Kosugi (1996) y Durner (1994). Las expresiones de van Genuchten, que utilizan el modelo estadístico de distribución del tamaño de poro de Mualem (1976), son las empleadas en este trabajo, por lo que se presentan a continuación.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \cdot h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$K(h) = K_s \cdot S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2.14)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.15)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (2.16)$$

Donde,

θ_r : Contenido de humedad residual.

θ_s : Contenido de humedad saturado.

S_e : Saturación efectiva.

m, n, α : Parámetros del modelo de van Genuchten.

K_s : Conductividad hidráulica saturada [LT^{-1}].

l : Parámetro que representa el grado de conectividad de los poros.

Una ventaja importante de los modelos en HYDRUS es que no están limitados a ninguna escala temporal o espacial, ya que han sido aplicados a escalas involucrando muy pequeñas columnas de suelo en laboratorio, perfiles de suelo de varios metros de profundidad, así como también perfiles de suelo de varios cientos de metros.

Las diferentes versiones de HYDRUS han sido usadas a lo largo de los años para un gran número de estudios, donde más de 850 referencias de su aplicación, para su versión 1D, se pueden encontrar en la página web del programa. Los tipos de aplicación son muy variados y van desde problemas en la agricultura evaluando distintos sistemas de riego, los efectos de las plantas en el balance de masa del suelo, recarga de aguas subterráneas, aplicaciones medioambientales, hasta flujos de agua en botaderos altamente heterogéneos (Šimůnek et al., 2016).

2.3. Drenaje Ácido y Botaderos

El drenaje ácido de minas ocurre “como resultado de la oxidación natural de minerales sulfurados contenidos en rocas, siendo uno de los principales la piritita, que han sido expuestos a la humedad y condiciones oxidantes, lo que genera una reducción del pH del agua de infiltración y lixiviación de metales. La acidez y elementos disueltos en el drenaje dependen de la naturaleza y reactividad de los sulfuros, de los elementos químicos de las rocas y de los controles físicos, químicos y biológicos que limitan la razón de oxidación y lixiviación” (García, 2013).

Este proceso se presenta de manera natural, pero la minería promueve su generación a través del incremento de la cantidad de sulfuros expuestos al oxígeno y agua. Las reacciones son aceleradas también por la acción de algunas bacterias catalizadoras (Akcil & Koldas, 2006).

Las principales fuentes potenciales de drenaje ácido en una mina durante su operación y al cierre de la faena minera son (SERNAGEOMIN, 2002):

- Residuos mineros masivos:
 - Botaderos: de estériles (menor al 0.2% de cobre) donde en Chile se generan más de 3.000.000 ton/día, de sulfuros de baja ley (0.2-0.4% de cobre), marinas y desmontes, escorias.
 - Depósitos de relaves: Embalses de relave, tranques de relave, relaves filtrados, relaves en pasta y relaves espesados.
 - Depósitos de lixiviación: Ripios de lixiviación, pilas permanentes y dinámicas, pilas ROM.

- Estructuras mineras subterráneas y a rajo abierto:
 - Las paredes, bancos y taludes de un rajo abierto.
 - Cráteres subyacentes asociados a minería subterránea.
 - Túneles y sistemas de ventilación minera. Especialmente una vez que la faena ha finalizado y los túneles se inundan al dejar de deprimir la napa freática.

En cuanto a la ocurrencia y tratamientos del AMD, Akcil y Koldas (2006) entregan una revisión detallada, donde los principales factores que determinan las tasas de generación ácida responden a: el pH, la temperatura, el contenido de oxígeno en la fase gaseosa si la saturación es menor al 100%, concentración de oxígeno en la fase líquida, actividad química del Fe^{3+} , área de superficie expuesta del mineral sulfurado, energía química de activación requerida para iniciar la generación ácida y la actividad de las bacterias.

Indican que los factores químicos, biológicos y físicos son importantes en la determinación de las tasas de generación de aguas ácidas, pero es particularmente importante la permeabilidad del suelo. Altas permeabilidades tienen mayor ingreso de oxígeno, lo que contribuye a mayores tasas de reacción química, por lo tanto, a mayores temperaturas y un incremento al ingreso de oxígeno por convección.

Como conclusiones, indican que la pirita es la causa principal de la contaminación de aguas originadas desde instalaciones mineras y depósitos abandonados y que, para minimizar la contaminación, las precauciones tomadas deberían apuntar a evitar el contacto de la precipitación con la pirita.

En la industria minera, los botaderos corresponden a los lugares destinados a la depositación de desmontes o desechos sólidos. Estos residuos mineros masivos son generados en grandes volúmenes y son los materiales provenientes de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales. Algunos ejemplos de desechos son los estériles (material económicamente inútil que sale con la mena o en desarrollos mineros) y los minerales de baja ley (SERNAGEOMIN, 2015).

Los desechos de roca estéril se generan en la tronadura (explosiones realizadas como parte de los procesos de extracción del mineral), resultando una amplia variedad de partículas rocosas altamente heterogéneas, cuyo rango de tamaño varía de arcillas a grandes bloques (León, 2010).

Los botaderos típicos son estructuras de gran escala que muestran una variabilidad espacial significativa en cuanto a mineralogía, tamaño de partícula y porosidad, lo que crea una gran fluctuación en las propiedades hidrogeológicas y geoquímicas correspondientes (Fala et al., 2013).

Esta heterogeneidad ha sido reconocida en numerosas caracterizaciones de sitios, en pruebas de terreno a gran escala y en estudios de modelos numéricos. La mayoría de los estudios han postulado que la variabilidad espacial de los materiales contribuye a la presencia de vías preferenciales de flujo (Lahmira & Lefebvre., 2015), las cuales se pueden desarrollar en lugares donde áreas particulares de un perfil geológico se vuelven más conductivas que el material que lo rodea (Newman et al., 1997).

La respuesta ambiental y la evaluación del movimiento de la humedad en depósitos de estériles dependen de muchos factores, como la composición mineralógica de los desechos y sus características hidro-geotécnicas, incluyendo la distribución del tamaño de partícula, porosidad y propiedades hidrogeológicas, la configuración y construcción del depósito, los procesos de meteorización dominantes que ocurren dentro del botadero y las condiciones climáticas de cada sitio minero. Por ello, la distribución del agua y los sistemas de flujo al interior de los botaderos son complejos y difíciles de medir, interpretar y predecir (Newman et al., 1997; Dawood & Aubertin, 2012; Fala et al., 2013).

Amos et al. (2015), realiza una revisión muy detallada de la hidrogeología y la geoquímica de estos desechos rocosos, donde señala que el tamaño de partícula varía desde rocas de más de 1 metro de escala a fracciones sub-milimétricas de tamaño de arcilla. Los botaderos generalmente pueden ser considerados formados por dos fracciones: fracción fina, donde las fuerzas capilares son importantes y la fracción gruesa, donde las fuerzas capilares no son relevantes.

Al respecto se han realizado diversos trabajos de modelación numérica, donde el modelo HYDRUS ha sido ampliamente utilizado (Fala et al., 2003, 2005, 2006, 2013; Molson et al., 2005; Aubertin et al., 2005; Dawood & Aubertin, 2012, 2014; Namaghi et al., 2014, 2015; León, 2010; Dawood et al., 2011). En cada uno de ellos las expresiones de van Genuchten fueron las empleadas para resolver el problema.

Como la conductividad hidráulica corresponde a una de las principales variables que controlan los flujos al interior de los depósitos de estériles, se genera una recopilación de los distintos valores adoptados en estudios relacionados a estos sistemas. La Tabla 2-1 indica que la conductividad varía notablemente y va del orden de los 10^{-7} m/s, hasta valores del orden de los 10^{-2} m/s.

Otra característica que puede resultar interesante en la modelación corresponde a la altura del depósito, donde, según los estudios ya nombrados, la mayoría simula alturas de 20-30 metros, pero en otros casos se usan valores de cientos de metros, como en el caso de León (2010) que considera una altura de 300 metros.

Tabla 2-1. Conductividad hidráulica saturada declarada en estudios previos sobre botaderos. Cada columna corresponde a un material distinto.

<i>Fuente</i>	<i>Conductividad Hidráulica Saturada [m/s]</i>			
<i>Bay, 2009</i>	$3.7 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$		
<i>Fala et al. 2003, 2005, 2006, 2013</i> <i>Molson et al. 2005</i>	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$		
<i>Aubertin et al. 2005,</i> <i>Dawood & Aubertin, 2012, 2014</i>	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$	
<i>Namaghi et al., 2014, 2015</i>	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-6}$	$8.4 \cdot 10^{-6}$
<i>Leon, 2010</i>	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
<i>EIA El Morro, 2008</i>	$5.5 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	
<i>Lahmira et al., 2007, 2016</i>	$4.9 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$4.9 \cdot 10^{-2}$
<i>Amos et al., 2015</i>	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$		
<i>Dawood et al. 2011</i>	$5.0 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	
<i>Lahmira & Lefebvre, 2015</i>	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$9.8 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$
<i>Peterson, 2014</i>	$5.7 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	
<i>Azam et al. 2007</i>	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	

2.4. Cold Regions Hydrological Model (CRHM)

El modelo CRHM fue desarrollado para incorporar una serie de procesos hidrológicos de considerable incertidumbre, como la redistribución de nieve por viento, intercepción de la nieve, sublimación, derretimiento, infiltración hacia suelos congelados, evaporación efectiva e intercambio de radiación sobre superficies complejas, que luego de un programa que integra investigación de terreno y modelación fueron descritos usando algoritmos físicamente basados. El modelo integra estos algoritmos y otros, para simular el ciclo hidrológico de las regiones frías en cuencas medianas y pequeñas. Fue descrito y demostrado en cuencas de Canadá, incluyendo ambientes de praderas, zonas verdes, bosque boreal, sub-ártico, ártico, bosques de alta elevación y tundra, lugares donde modelos tradicionales tenían gran dificultad en la descripción de los fenómenos hidrológicos (Pomeroy et al., 2007).

CRHM es un modelo modular que permite vincular los procesos hidrológicos para la cuenca y simular el ciclo hidrológico de las unidades de respuesta hidrológica (URH). Las URH son definidas como unidades espaciales de cálculo de balance de masa y energía que corresponden a unidades de paisaje biofísicos, en las cuales procesos y estados pueden ser descritos adecuadamente para el cálculo de un conjunto único de parámetros, variables de estado y flujos.

La dirección del flujo y las secuencias entre URH pueden ser específicas para los procesos, por ejemplo, el fenómeno de blowing snow es enrutado desde baja vegetación a una URH de alta vegetación, el flujo subsuperficial va pendiente abajo y el flujo superficial sigue la red de flujo. Por lo anterior, la caracterización de una cuenca se realiza como una serie de cascadas de URH.

CHRM es fundamentalmente distinto al resto porque es una plataforma de modelación, donde los modelos pueden ser creados, ofrece una gama de complejidad espacial, desde agrupado a distribuido, de realismo físico, desde lo conceptual hasta enfoques físicamente basados y brinda una amplia selección de módulos de proceso, permitiendo al usuario acomodar el modelo a la complejidad apropiada que es requerida por los objetivos de la modelación, escala e información disponible en el lugar de estudio.

2.5. Escenarios Climáticos

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se crea en 1988 con el fin de proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. El año 2014 finalizó el Quinto Informe de Evaluación (el más actual a la fecha), preparado por tres grupos de trabajo, que comprende tres contribuciones: bases físicas; impactos, adaptación y vulnerabilidad; y mitigación del cambio climático.

Se desarrollan cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que dependen fuertemente de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática. Es en base a estos factores que realizan las proyecciones, en total cuatro e incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). Los escenarios sin esfuerzos adicionales para limitar las emisiones dan lugar a trayectorias que se sitúan entre RCP6.0 y RCP8.5. RCP2.6 representa un escenario que tiene por objetivo que sea probable mantener el calentamiento global a menos de 2 °C por encima de las temperaturas preindustriales.

Para predecir cambios climáticos más allá de valores promedios globales, se emplean modelos numéricos de la atmósfera (GCMs). Estos modelos consideran los escenarios de emisiones ya nombrados, e integrados en el tiempo en períodos de hasta 100 años. El problema ocurre debido al gran dominio espacial de los GCM con grillas de diferencias finitas no muy detallada, usualmente entre 200 y 300 km en la horizontal. Esta resolución resulta insuficiente y para solucionar lo anterior se recurre a modelos llamados Regional Climate Models (RCMs), que realizan un escalamiento (downscaling) de la información de mayor escala provista por un GCM. Así, los resultados de un RCM son altamente determinados por el GCM que los alimenta en sus bordes laterales, pero su resolución es alta de manera que los resultados son físicamente consistentes con la geografía local (Garreaud, 2011).

Un trabajo a nivel nacional corresponde al efectuado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (Fuenzalida et al., 2006), que emplea el modelo PRECIS (“Providing REgional Climates for Impact Studies”), un RCM desarrollado por el Hadley Centre del Reino Unido, integrándolo en una grilla con espaciamiento horizontal de 25 km, la cual cubre Chile continental junto al océano y continente adyacentes. El modelo fue forzado en sus bordes laterales por el modelo global HadCM3. Los escenarios modelados en este caso corresponden a los indicados en el tercer informe del IPCC: uno moderado (SRES B2) y otro severo (SRES A2).

Otro trabajo más reciente es el de M. Rojas del año 2012, donde se emplean nuevos escenarios de emisiones, los Representative Concentration Pathways (RCPs), que tienen su nombre de acuerdo al forzamiento radiativo que producen al año 2100: RCP2.6 W m⁻², RCP4.5 W m⁻², RCP6.0 W m⁻² y RCP8.5 W m⁻². Los modelos globales se obtienen de la base de datos de CMIP5.

Los principales resultados se entregan por zonas, y en cuanto a la temperatura se indica que dominan los cambios positivos (calentamiento) en todas las regiones, siendo mayores para el escenario RCP8.5. El calentamiento es mayor en el norte y zona Altiplánica, disminuyendo hacia el sur, con valores más altos en la cordillera que zonas aledañas más bajas. En cuanto a las precipitaciones, el conjunto de simulaciones muestra disminuciones de entre 10-20% entre las latitudes 25-45°S aproximadamente, para el periodo 2031-2050.

En la Tabla 2-2 se presentan las tres zonas de interés en el estudio, con sus respectivas variaciones en las variables de temperatura y precipitación, siendo los valores positivos aumentos y los valores negativos disminuciones. Para cada zona se entregan los resultados para el escenario moderado, RCP2.6, y para el escenario severo, RCP8.5.

Tabla 2-2. Resultados de proyecciones de cambios en la temperatura del aire y precipitación, para el periodo 2031-2050. Fuente: Rojas (2012).

<i>Zona</i>	<i>Variable</i>	<i>RCP2.6</i>	<i>RCP8.5</i>
<i>Norte Grande</i> 23- 27°S	<i>Temperatura [°C]</i>	0.9	1.4
	<i>Precipitación [%]</i>	-12.1	-15.8
<i>Norte Chico</i> 23- 27°S	<i>Temperatura [°C]</i>	1.3	1.9
	<i>Precipitación [%]</i>	-11.6	-16.0
<i>Chile Central</i> 23- 27°S	<i>Temperatura [°C]</i>	1.1	1.5
	<i>Precipitación [%]</i>	-12.8	-16.6

3. Zonas de Estudio

Chile corresponde a un país con una variabilidad climática y de disponibilidad del recurso hídrico notable. Esto se puede explicar por el amplio rango de latitudes que se tiene, con Arica ubicada a 18° S, mientras que el Cabo de Hornos se sitúa a aproximadamente 57° S. Sumado a lo anterior, también se tienen drásticas variaciones en altitud, desde la costa del Océano Pacífico hasta las cumbres más altas de la cordillera de los Andes a solo 200 km de distancia.

Los factores que impactan en la presencia de la enorme variedad de climas son el efecto de la latitud (principalmente), el relieve (altura) y la influencia oceánica del gran frente marino existente. Existe influencia también por la existencia de la corriente fría de Humboldt y el movimiento de las masas de aire, la presencia de centros de altas y bajas presiones, etc. Debido a estas características, a lo largo del país se tienen diversos regímenes hidrológicos, donde por ejemplo el desierto de Atacama, el más seco del mundo, coexiste en el mismo país con regiones de la Patagonia en donde es común que la precipitación anual sobrepase los 4 m (McPhee et al., 2012; INE, 2016).

En el país existe una relativa homogeneidad térmica, mas no ocurre lo mismo con las precipitaciones, que varían en monto y distribución, pero normalmente se incrementan con el avance en latitud.

Tal como lo indican MCPhee et al. (2012), existen grandes diferencias en los eventos de precipitación en las distintas zonas chilenas. Si se refiere a la distribución de este valor anual promedio, acumulado de acuerdo a las distintas regiones administrativas antes del 2007, en función de la latitud, es posible apreciar las bajas precipitaciones en la zona norte (Entre los 18° S y 29° S), siendo el mayor aporte de las lluvias en las regiones más altas del Altiplano y en las cumbres andinas.

Más al sur, la precipitación aumenta, hasta 200 – 800 mm por año en las Regiones del Norte Chico (Sur de la Región de Atacama, la Región de Coquimbo, y la zona al norte del río Aconcagua en la Región de Valparaíso) y Chile Central. Son áreas con clima típicamente mediterráneo (movimiento estacional del anticiclón del Pacífico) con precipitaciones concentradas en el invierno y acumulación de una cubierta de nieve dominante, lo que explica el comportamiento determinado por la nieve de varios ríos ubicados en esta zona, como el Limarí, Elqui, Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito y Maule.

Esta descripción general de las condiciones climáticas e hidrológicas en Chile, muestra que, al ser tan disímiles, lo mismo ocurrirá con las tasas generadas de aguas ácidas si se comparan entre ellas. Entonces, se vuelve necesario caracterizar de mejor forma y con más detalle lugares en específico que pueden ser potencialmente afectados por el drenaje ácido de minas.

En este trabajo, se realiza un estudio de dos cuencas distintas, ubicadas en la zona centro-norte de Chile, pues como es conocido, es en ella donde los problemas asociados a la minería ocurren (McPhee et al., 2012). También es en esta zona del país donde se concentra la mayor producción de minerales metálicos, específicamente la asociada al cobre (SERNAGEOMIN, 2015). Por estas razones, se opta por analizar la cuenca alta del Río Copiapó y la cuenca alta del Río Mapocho, que poseen un comportamiento hidrológico distinto, lo que genera dos opciones relativamente representativas de una parte importante de la realidad nacional.

3.1. Cuenca Alta del Río Copiapó

La cuenca alta del Río Copiapó se ubica en la zona norte de Chile, específicamente en la tercera región de Atacama, entre los paralelos 27.14° y 28.65° latitud sur y entre los meridianos 70.10° y 69.08° longitud oeste. Corresponde a la cuenca cabecera del Río Copiapó y presenta elevaciones que van desde aproximadamente los 1230 m.s.n.m. y los 6000 m.s.n.m. como se muestra en la Figura 3-1.

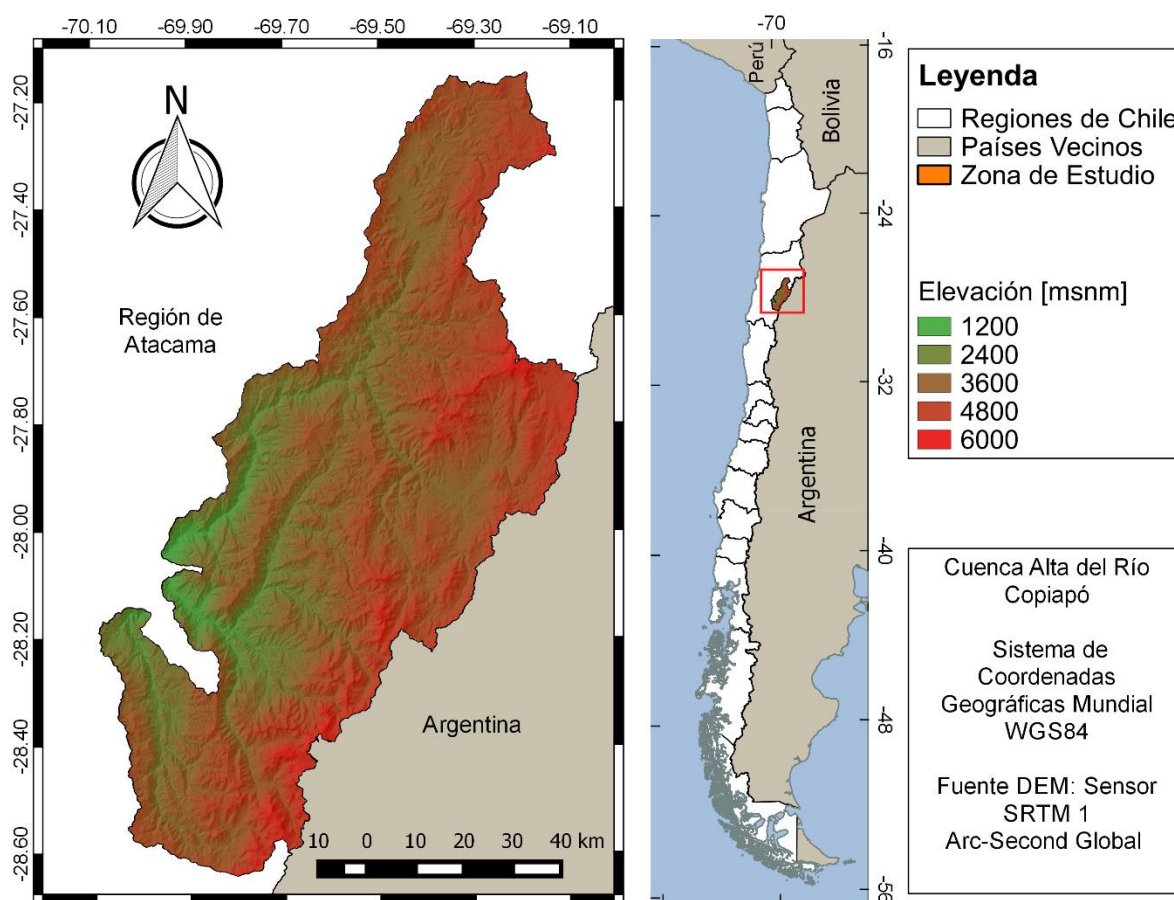


Figura 3-1. Mapa ubicación y elevación cuenca alta del río Copiapó.

Esta cuenca en estudio se puede dividir en tres subcuencas (Figura 3-5), donde cada una está definida por los principales cauces y las correspondientes estaciones fluviométricas:

- Cuenca Río Jorquera, delimitada por la estación río Jorquera en Vertedero.
- Cuenca Río Pulido, delimitada por la estación río Pulido en Vertedero.
- Cuenca Río Manflas, delimitada por la estación río Manflas en Vertedero.

3.1.1. Hidrología y Estaciones de Monitoreo

La cuenca presenta un comportamiento variado dependiendo de la subcuenca. Las curvas de variación estacional presentadas, muestran 6 distintas probabilidades de excedencias (Pexc, que corresponde a la probabilidad de que un evento definido, como un caudal o una precipitación, sea igualado o superado en magnitud).

En la cuenca del río Jorquera (Figura 3-2) se tiene un régimen pluvial el 80% del tiempo, con los caudales medios mensuales máximos alcanzados en los meses de junio, julio y agosto. Para probabilidades menores al 20% se presentan caudales importantes en los meses de diciembre, enero y febrero.

La cuenca del río Pulido (Figura 3-3) presenta un comportamiento claramente nival para todas las probabilidades de excedencia, con los caudales máximos encontrados en los meses de verano: enero y febrero. Por último, la cuenca del río Manflas (Figura 3-4) tiene un comportamiento nivo-pluvial, con caudales muy similares para casi todas las probabilidades de excedencia mayores al 10%, presentando unos aumentos hacia el verano; para la probabilidad de excedencia del 5% se presentan mayores aumentos hacia el periodo estival, con un caudal máximo en noviembre.

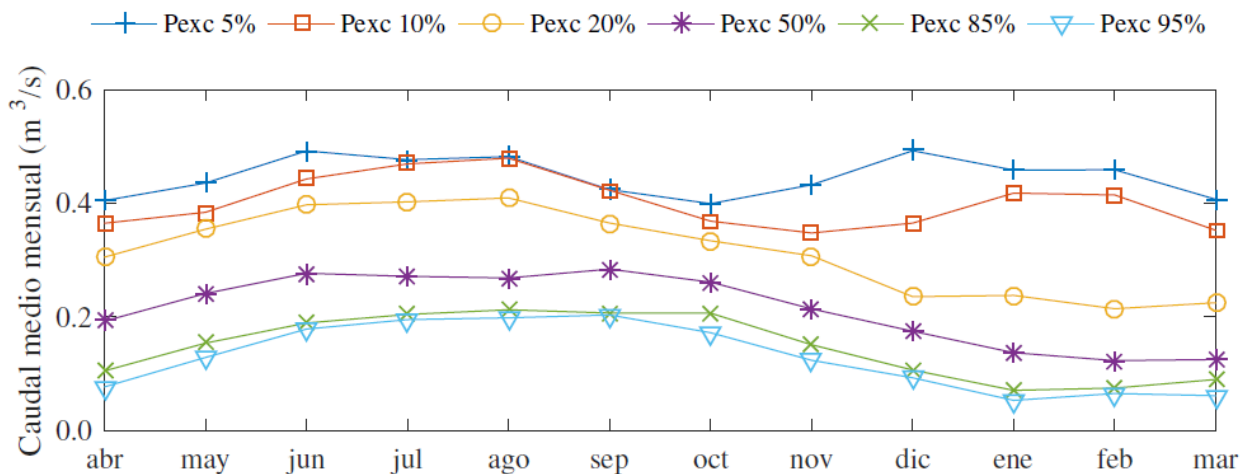


Figura 3-2. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Jorquera en Vertedero, entre los años hidrológicos 2001 y 2015. (Fuente: Jara, 2017; Zapata, 2016)

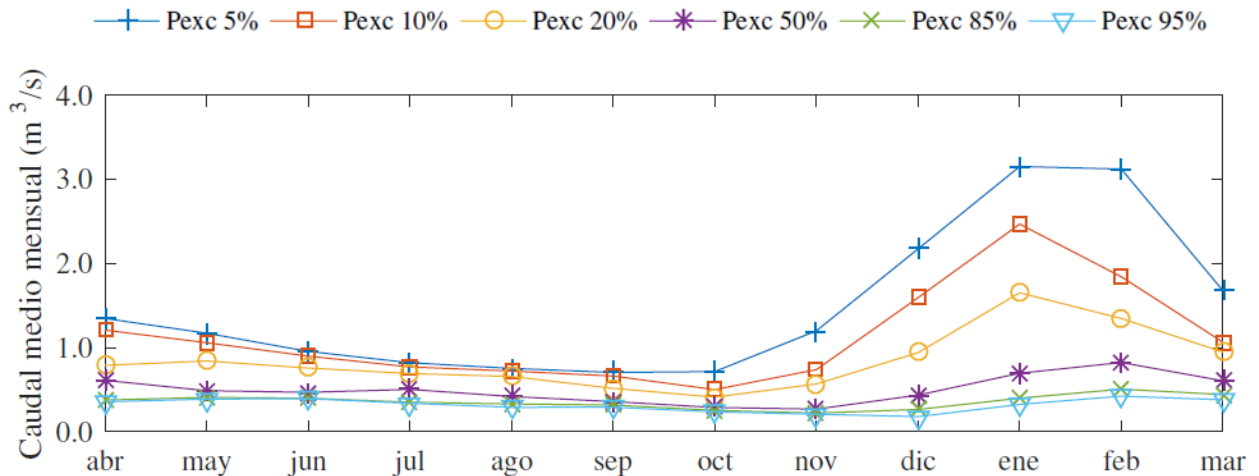


Figura 3-3. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Pulido en Vertedero, entre los años hidrológicos 2001 y 2015. (Fuente: Jara, 2017; Zapata, 2016)

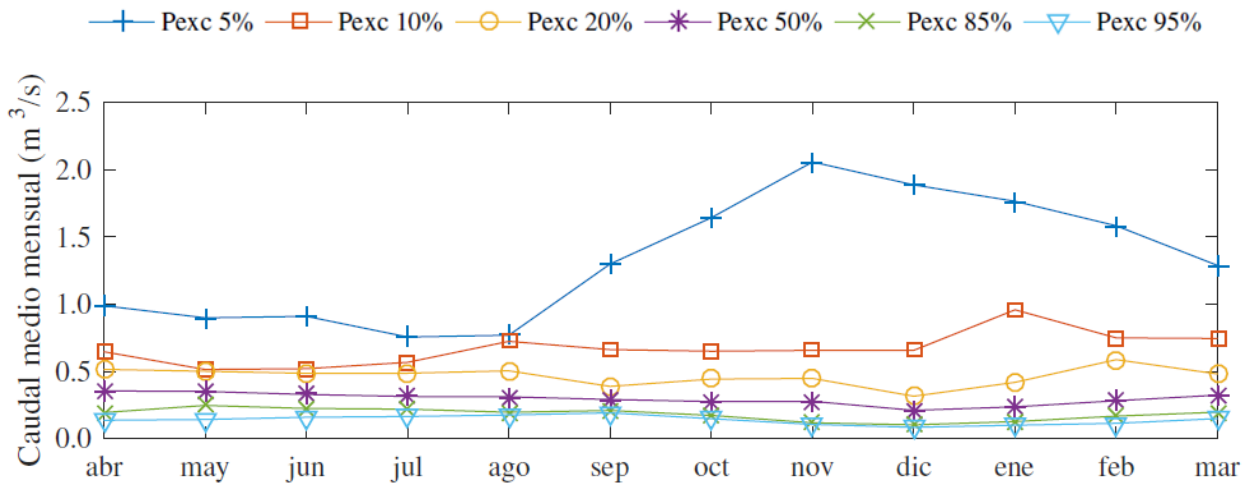


Figura 3-4. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Manflas en Vertedero, entre los años hidrológicos 2001 y 2015. (Fuente: Jara, 2017; Zapata, 2016)

Al interior de la cuenca y sus alrededores se ubican una serie de estaciones fluviométricas y meteorológicas, en su mayoría operadas por la Dirección General de Aguas (DGA). La Tabla 3-1 detalla la información de las que se encuentran dentro de la zona de estudio y algunas de las que se tienen en las cercanías. Lo anterior se muestra en la Figura 3-5.

Las estaciones Iglesia Colorada y Los Loros cuentan tanto con registros de precipitación como de temperatura, Jorquera en la Guardia posee datos de precipitación y Portezuelo el Gaucho de temperatura.

Tabla 3-1. Estaciones fluviométricas y meteorológicas en la cuenca alta del río Copiapó y algunas de las cercanas. (Fuente: DGA).

Estación Fluviométrica	Código	Latitud [°]	Longitud [°]	Cota [msnm]	Vigencia
Río Jorquera en Vertedero	RJV	-28.043	-69.957	1250	1947 – Vigente
Río Manflas en Vertedero	RMV	-28.148	-69.994	1550	1964 – Vigente
Río Pulido en Vertedero	RPV	-28.086	-69.941	1310	1964 – Vigente
Estación Meteorológica	Código	Latitud [°]	Longitud [°]	Cota [msnm]	Vigencia
Iglesia Colorada	ICO	-28.157	-69.881	1550	1988 – Vigente
Jorquera en La Guardia	JLG	-27.836	-69.755	2000	1966 – Vigente
Los Loros	LLO	-27.832	-70.112	940	1963 – Vigente
Portezuelo el Gaucho	PEG	-28.623	-70.045	4000	2003 – Vigente
La Ollita	OLL	-28.210	-69.543	4220	2015 – Vigente

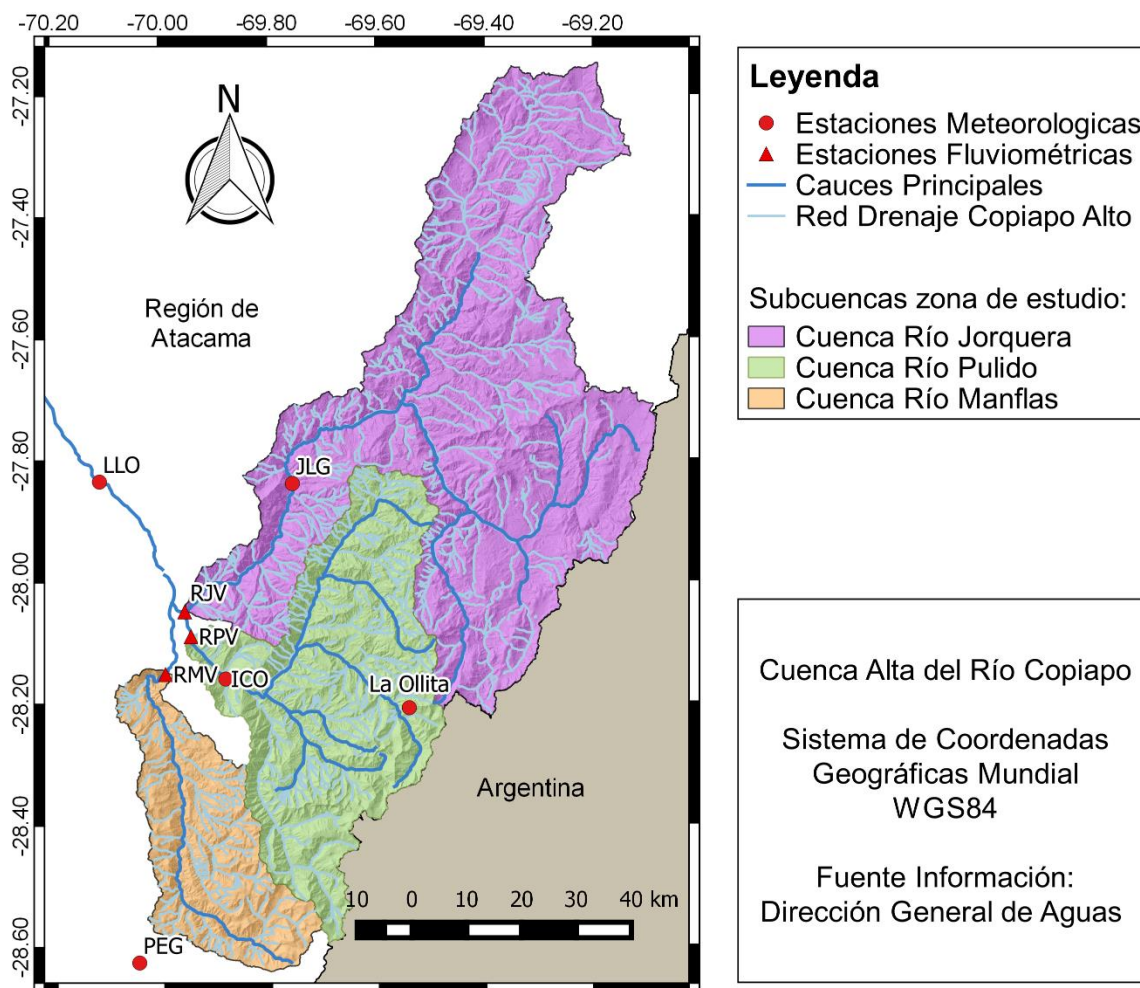


Figura 3-5. Subcuencas al interior de la cuenca alta del río Copiapó y ubicación de estaciones de monitoreo.

Dentro de las estaciones destaca la meteorológica-nival La Ollita, operada por la Universidad de Chile, como parte del proyecto FONDEF D13R20005. Se ubica en las coordenadas 28.2095° S y 69.5425° O, al interior de las dependencias de la minera Caserones, a una altura aproximada de 4220 m.s.n.m., en una zona sin vegetación y con baja inclinación (cerca al 10%).

Se encuentra operativa desde diciembre del año 2015 y cuenta con una serie de instrumentos de medición (sensores nivales y meteorológicos) que permiten registrar con alta precisión las condiciones de alta montaña. Los instrumentos instalados permiten la determinación del balance de masa nival y las forzantes radiativas del balance de energía (Jara, 2017).

3.1.2. Clima

Las características climáticas de la región de Atacama están determinadas principalmente por la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y la corriente fría de Humboldt que, sumados a la compleja topografía, determinan una zona árida con bajas tasas de precipitación concentradas en pocos días durante el invierno (Juliá et al., 2008).

Según la regionalización climática de Chile Continental (Sarricolea et al., 2017), que utiliza la clasificación de Köppen-Geiger, en la zona baja del área de estudio domina la presencia de los climas BSk y BSk(s), que corresponden a un clima semiárido y un clima semiárido con ocurrencia de lluvias invernales, respectivamente. Estos se caracterizan por presentar una gran amplitud térmica diaria, a causa de la inexistencia de un regulador térmico del calor, y por precipitaciones escasas e irregulares (Inzunza, 2005).

En el resto del área, predominantemente se tienen climas de tundra (ET) y climas de tundra con lluvia invernal (ET(s)), estos destacan por ser ambientes con baja temperatura debidos principalmente a la altitud, las precipitaciones son mayoritariamente en forma de nieve, incluso en verano (Jara, 2017). También se presentan pequeñas áreas con un clima glacial o de hielo (EF), donde la temperatura media del mes más cálido debe ser menor a 0° C.

Los registros de las estaciones meteorológicas (Figura 3-6) muestran temperaturas promedio anuales en la parte baja de la cuenca cercanas a los 18 y 19°C, para Los Loros e Iglesia Colorada, respectivamente. Durante el verano se observan temperaturas mensuales mayores a los 20°C y en los meses de junio, julio y agosto se tienen las menores temperaturas rondando los 15-16°C.

La estación Portezuelo el Gaucho, ubicada en la zona alta a 4000 m.s.n.m., posee una temperatura media anual de 1.5°C, con valores promedio mensuales menores a los 0°C para los meses de mayo a septiembre. Las temperaturas más altas se dan en los meses de diciembre, enero y febrero.

Las precipitaciones, según la Figura 3-6, ocurren generalmente en los meses de invierno, con un valor mensual máximo del orden de los 10 mm para las tres estaciones. Durante los meses de octubre a febrero, las lluvias son muy escasas o prácticamente nulas, como en el caso de los meses de enero, febrero y noviembre en la estación Los Loros.

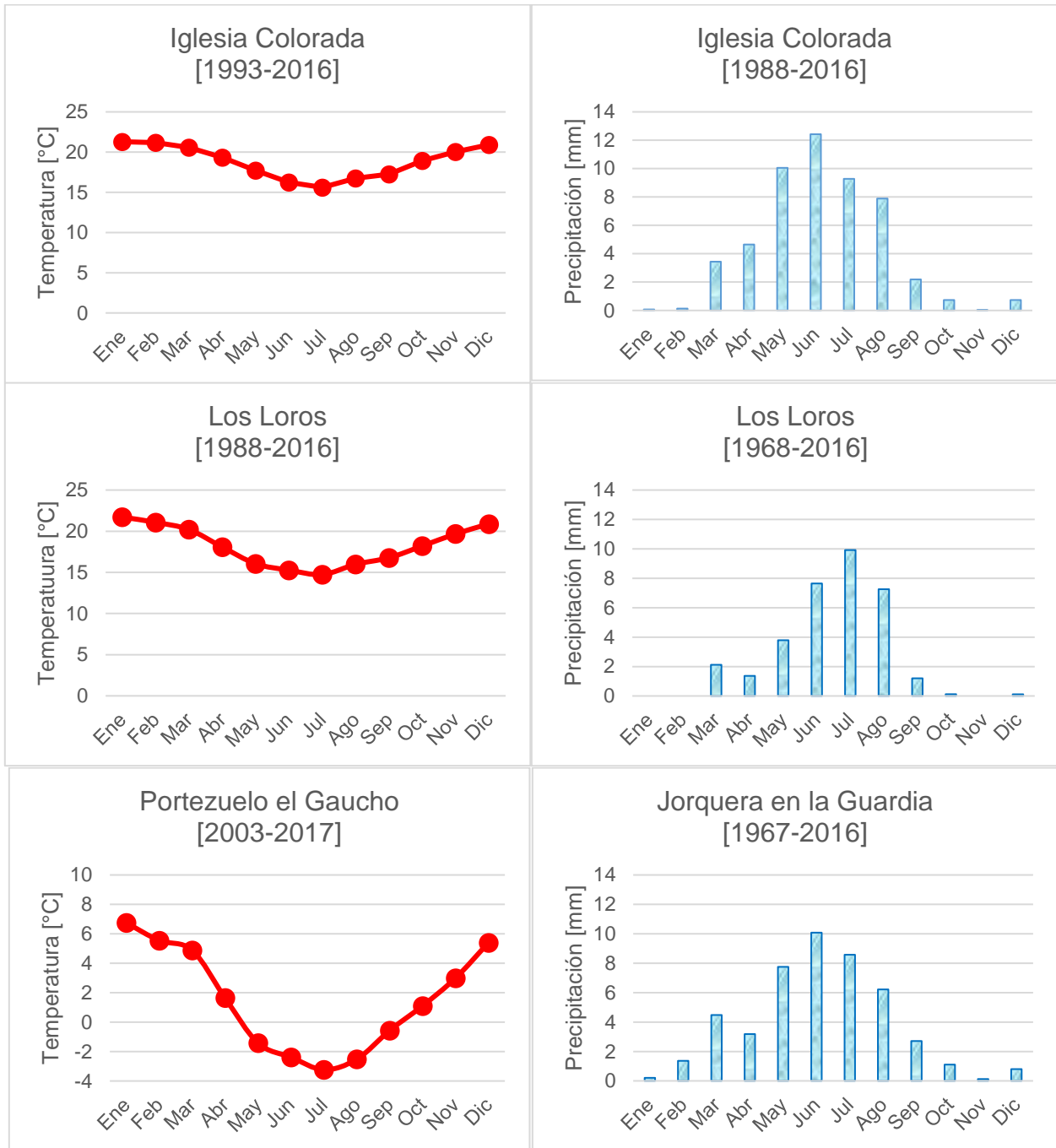


Figura 3-6. Valores mensuales de temperatura y precipitación en estaciones meteorológica de la cuenca alta del río Copiapó, donde en cada caso se indica el periodo de datos utilizados. (Fuente: DGA).

3.1.3. Características del Terreno

La cuenca está ubicada en la cordillera de los Andes y presenta elevaciones entre los 1228 m.s.n.m. y los 5997 m.s.n.m., según el DEM del sensor SRTM de 1 arc-second. La cuenca alta completa posee un área total de 7194 km², la cuenca del río Jorquera 4192 km², la del río Manflas 982 km² y la del río Pulido 2021 km².

La curva hipsométrica de la Figura 3-7 muestra un comportamiento muy similar para cada subcuenca, con solo un 10% del área con alturas menores a los 3000-2500 m.s.n.m., luego se presenta un crecimiento relativamente constante hasta los 4500 m.s.n.m. donde el último 10% del área abarca las elevaciones más extremas que llegan a casi los 6000 m.s.n.m.

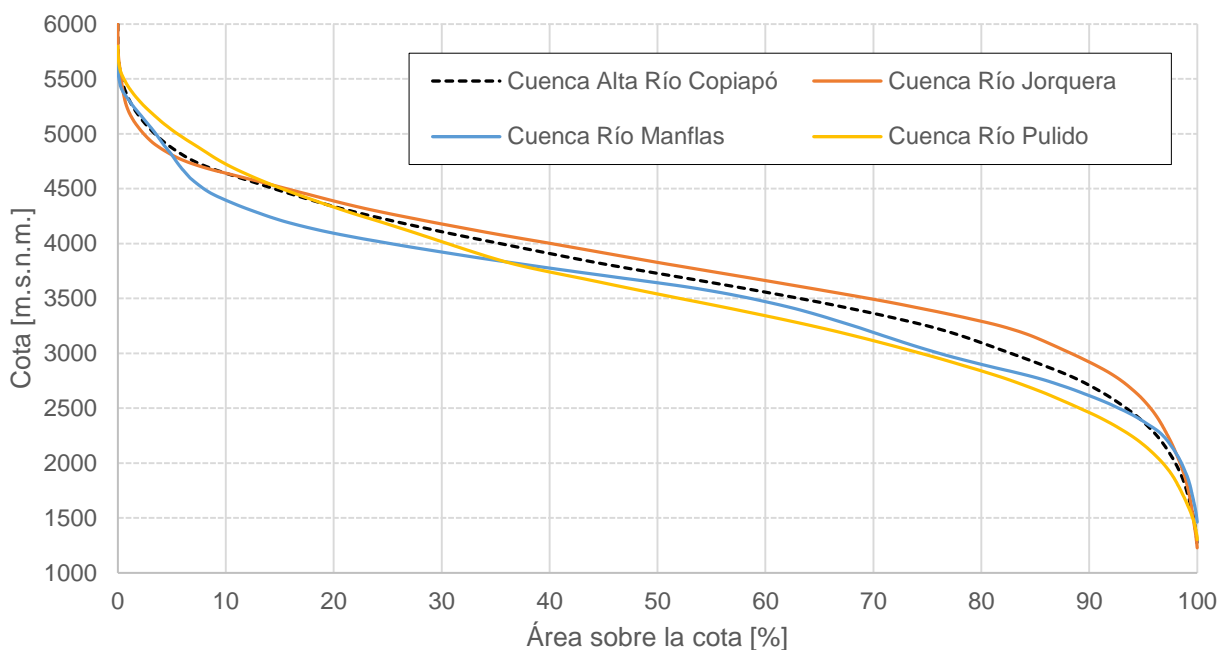


Figura 3-7. Curvas hipsométricas de la cuenca alta del río Copiapó y las tres subcuencas que la componen.

En cuanto al uso de suelo y cobertura vegetal, en la zona baja dominan en abundancia los matorrales andinos, esto hasta los 4000 m.s.n.m., y en la zona alta, debido al clima y la pendiente, solo prolifera vegetación en las cercanías de los cursos de agua. Existen también reducidos terrenos agrícolas localizados a la salida de la cuenca. Ya por sobre los 5000 m.s.n.m., en las subcuencas del río Pulido y Manflas, se encuentran varios glaciares con un área total cercana a los 23 km² (Jara, 2017).

Según CADE-IDEPE (2004), la formación vegetal corresponde a una del tipo estepa altoandina de Coquimbo, que ocurre en sectores andinos con precipitaciones y bajas temperaturas. La flora corresponde a matorrales bajos, pajonales y Laretilla, esta última para las partes más altas.

3.1.4. Geología e Hidrogeología

En esta cuenca destaca el desarrollo de ríos y esteros en etapas juveniles, cortando principalmente rocas intrusivas del paleozoico y secuencias sedimentarias Mesozoicas. Según la geología del sector, se establece la presencia de dos distintas unidades acuíferas en el sector: La unidad superior y la unidad inferior.

La primera es aquella con potencial de acuífero y corresponden exclusivamente a depósitos sedimentarios de los cauces actuales de quebradas, esteros y ríos; en general son gravas y arenas de origen fluvial y fluvio-aluvional, regular a mal seleccionadas, que rellenan los mencionados cauces. Su espesor, aunque en algunos sectores no se presenta, no sobrepasa los 60 metros. La transmisividad de esta unidad es media a alta, y constituye el acuífero más importante de la cuenca.

La unidad inferior, está constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico que corresponden a areniscas de grano medio a muy fino. Estos se consideran acuíferos muy secundarios (Sitac, 2008; Schlumberger, 2008).

Una campaña de medición de infiltración en varios puntos (método del doble anillo), principalmente en la cuenca de río Pulido, entregó valores de la conductividad hidráulica que van del orden de los $10^{-4} - 10^{-5}$ m/s (Sitac, 2008). En la zona alta, ensayos de permeabilidad llevados a cabo en varias litologías y calidad geotécnica del macizo rocoso, permiten caracterizar las unidades geológicas con valores de conductividad hidráulica medios bajos que van desde los 10^{-6} m/s para el pórfido dacítico y valores bajos del orden de 10^{-7} m/s para el resto de las unidades: Monzogranito, Brecha y el macizo rocoso profundo (Schlumberger, 2008).

3.2. Cuenca Alta del Río Mapocho

La cuenca alta del río Mapocho o la cuenca del río Mapocho en los Almendros se ubica en la zona central de Chile, específicamente en la XIII región Metropolitana de Santiago, entre los paralelos 33.10° y 33.49° latitud sur y entre los meridianos 70.45° y 70.18° longitud oeste. Corresponde a una cuenca tributaria del río Maipo y presenta elevaciones que van desde aproximadamente casi los 1000 m.s.n.m. y los 5400 m.s.n.m. como se muestra en la Figura 3-8.

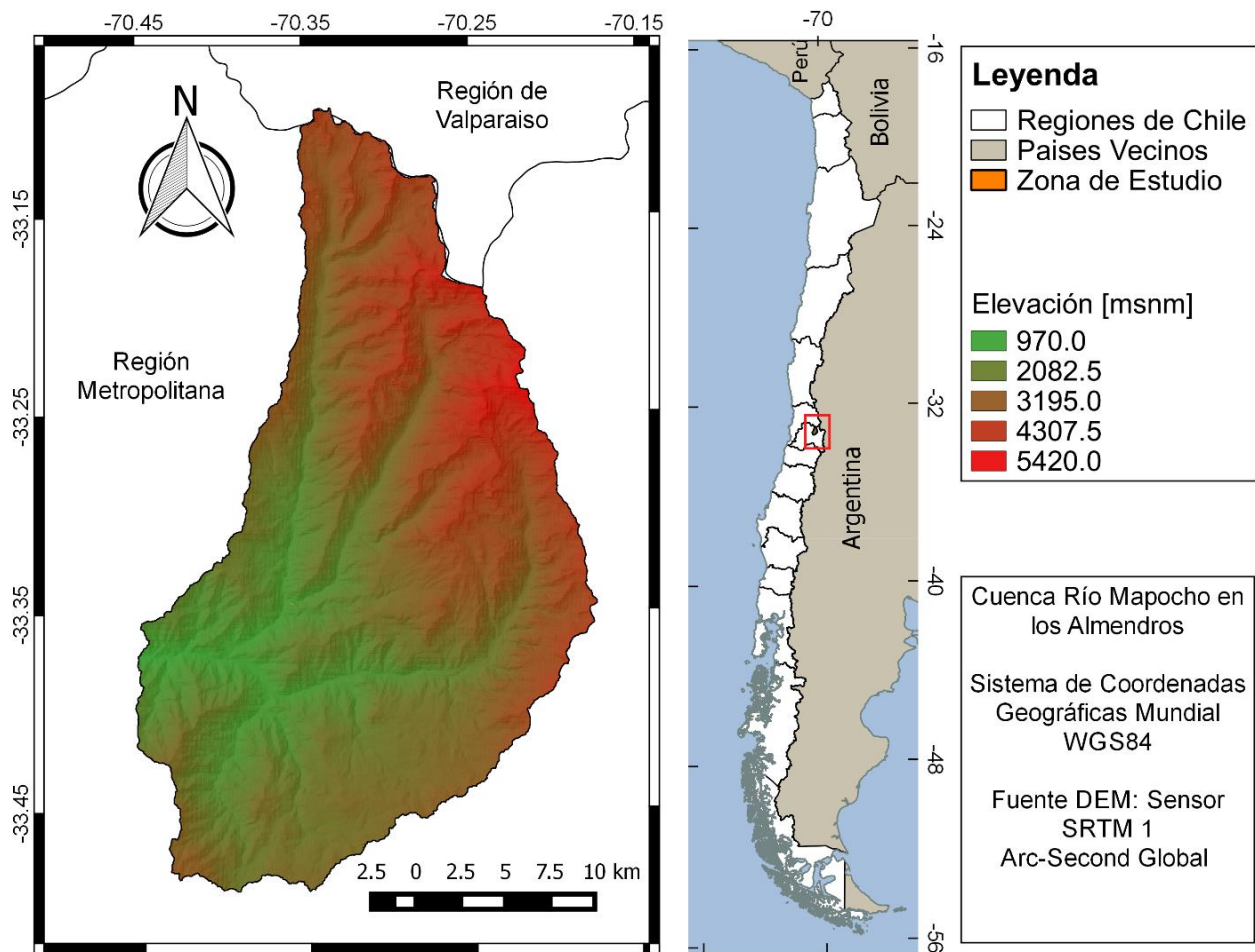


Figura 3-8. Mapa ubicación y elevación cuenca del río Mapocho en los Almendros.

Esta cuenca analizada puede ser dividida en cinco subcuencas (Figura 3-10), donde cada una está definida por los principales cauces y las estaciones fluviométricas:

- Cuenca 1. Cuenca río Molina antes de junta río San Francisco, delimitada por la estación que lleva el mismo nombre.
- Cuenca 2. Cuenca río San Francisco antes junta estero Yerba Loca, nombrada así por la estación que se encuentra en dicha subcuenca.
- Cuenca 3. Cuenca Estero Yerba Loca antes junta río San Francisco delimitada por la estación que lleva el mismo nombre.
- Cuenca 4. Cuenca río Mapocho entre confluencia río San Francisco y Los Almendros, delimitada por la estación río Mapocho en los Almendros.
- Cuenca 5. Cuenca río San Francisco entre confluencia estero Yerba Loca y confluencia río Molina.

3.2.1. Hidrología y Estaciones de Monitoreo

A la salida de la cuenca estudiada se tiene la estación río Mapocho en los Almendros, allí se observa el comportamiento hidrológico nivo-pluvial a través de la curva de variación estacional de la Figura 3-9. Para todas las probabilidades de excedencia los caudales máximos se alcanzan durante los meses de octubre, noviembre y diciembre producto del derretimiento del manto nival que se acumula en el sector alto de la cuenca. Durante los meses de invierno, en los meses de junio, julio y agosto también se observan incrementos en el caudal, pero en menor medida comparado con el incremento durante la primavera.

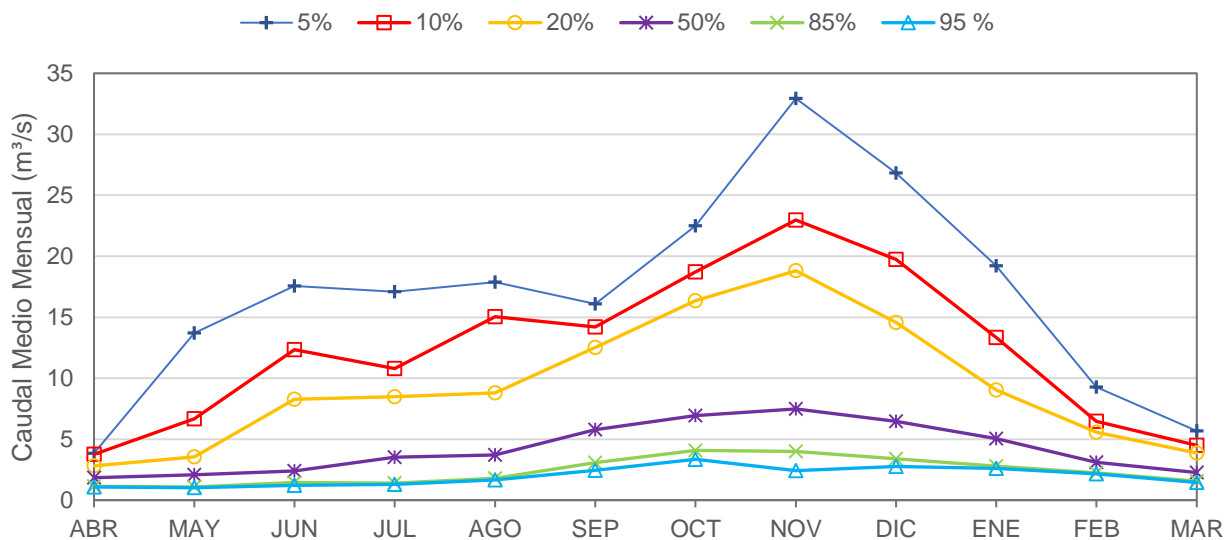


Figura 3-9. Curva de variación estacional del caudal medio mensual en la estación río Mapocho en los Almendros. (Modificado de: Comte, 2017).

Dentro de la zona de estudio se tienen una serie de estaciones de monitoreo a cargo de la DGA, la Tabla 3-2 indica el detalle de ellas. La distribución espacial de las estaciones se presenta en la Figura 3-10.

Tabla 3-2. Estaciones de monitoreo en la cuenca del río Mapocho en los Almendros. (Fuente: DGA)

Estación	Código	Latitud [°]	Longitud [°]	Cota [msnm]	Vigencia	
					Fluviométrica	Meteorológica
Río San Francisco antes junta Estero Yerba Loca	SFaYL	-33.309	-70.357	1550	2009 – Vigente	2009 – Vigente
Estero Yerba Loca antes junta río San Francisco	YLaSF	-33.341	-70.364	1350	1986 – Vigente	2004 – Vigente
Río Molina antes junta San Francisco	MaSF	-33.373	-70.396	1158	1987 – Vigente	2009 – Vigente
Río Mapocho en Los Almendros	MeLA	-33.370	-70.451	966	1948 – Vigente	1999 – Vigente
Valle Nevado	VN	-33.352	-70.247	3036	–	2013 – Vigente

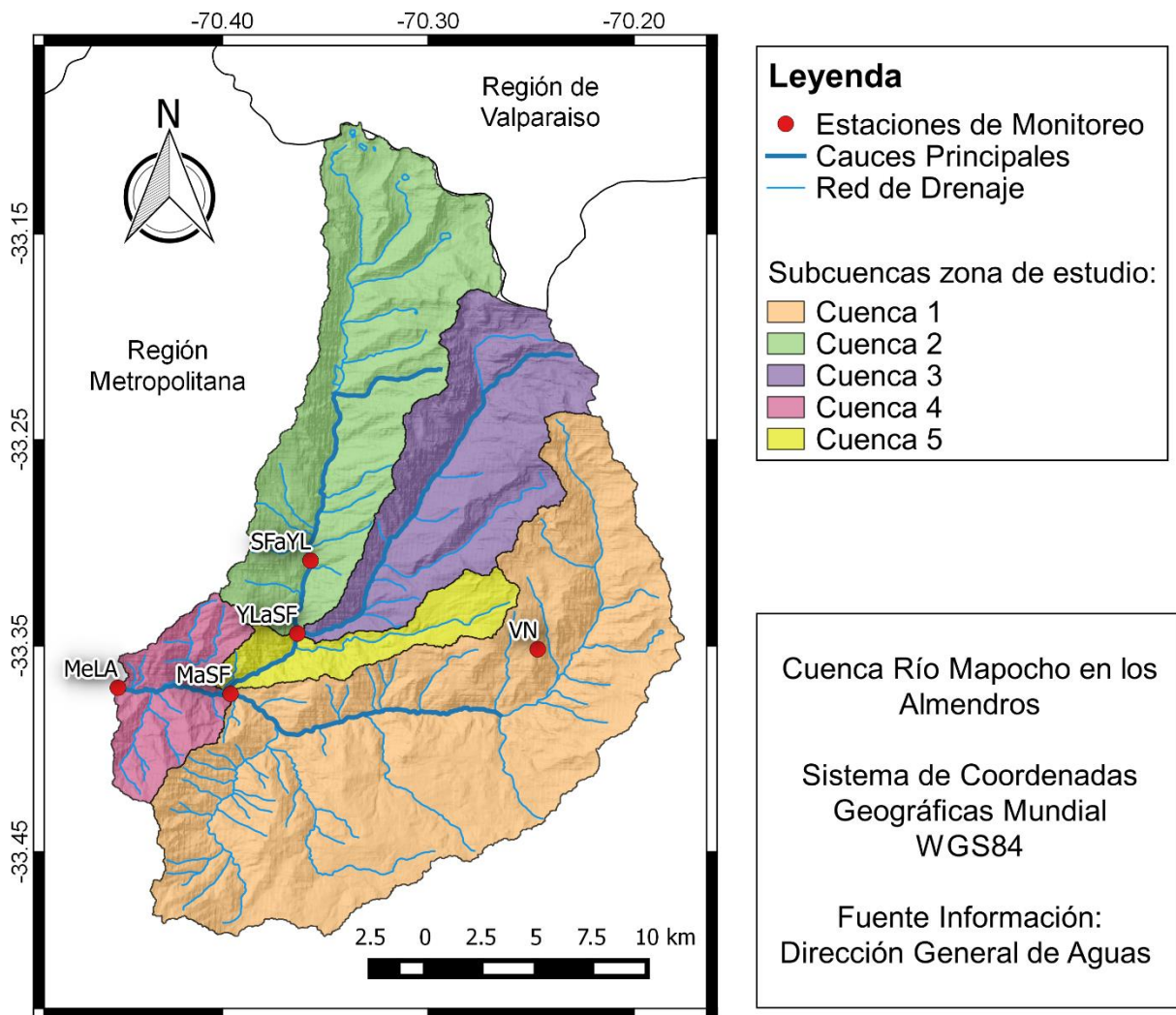


Figura 3-10. Subcuencas al interior de la cuenca del río Mapocho en los Almendros y ubicación de estaciones de monitoreo.

Las 4 estaciones de la DGA tienen registro de las precipitaciones ocurridas en la zona, mientras que las estaciones SFaYL, YLaSF y MeLA cuentan además con el registro de temperatura.

Dentro de las estaciones de monitoreo, destaca la meteorológica-nival Valle Nevado, operada por el departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Se ubica en las coordenadas $33^{\circ}21' \text{ S}$ y $70^{\circ}14' \text{ O}$, al interior del centro de ski Valle Nevado, a una altura aproximada de 3038 m.s.n.m.

Se encuentra vigente desde el 7 de agosto del año 2013 y cuenta con una serie de equipos especializados para medir en forma automatizada variables meteorológicas y condiciones del manto de nieve, como la temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación, radiación, SWE, profundidad de la nieve, etc. (Comte, 2017).

3.2.2. Clima

Según la regionalización climática de Chile Continental (Sarricolea et al., 2017), la clasificación de Köppen-Geiger en la cuenca indica que en la parte baja del área domina la presencia de los climas templados mediterráneos, específicamente del tipo Csb(h) y Csc, que corresponden a un clima mediterráneo de lluvia invernal de altura y un clima mediterráneo frío de lluvia invernal, respectivamente. Estos se caracterizan por presentar una marcada sequía estival, por tener el mes más frío con una temperatura media comprendida entre 18° C y -3° C y la media del mes más cálido sobre los 10° C. (Inzunza, 2005).

En el resto del área, en la parte alta de la cuenca, se tiene el clima de tundra con lluvia invernal, ET(s), este destaca por sus bajas temperaturas y por presentar precipitaciones en forma sólida, permitiendo la acumulación de nieve (Comte, 2017).

Los registros de las estaciones meteorológicas (Figura 3-11) muestran para las temperaturas un comportamiento similar en las tres estaciones, con los valores más altos durante los meses de diciembre, enero y febrero y las temperaturas más bajas en los meses de junio, julio y agosto. En general, la estación MeLa es la que registra las mayores temperaturas si se compara de manera mensual con las otras dos, con un valor promedio anual de 14.5°C; mientras que SFaYL y YLaSF promedian 13.3°C y 12.1°C, respectivamente.

Sobre las precipitaciones, según la Figura 3-11, se tiene que se presentan con mayor intensidad en los meses de invierno, con junio como el mes más lluvioso para todas las estaciones (valores entre 60-80 mm), excepto para SFaYL. En esta estación, los meses más lluviosos son agosto y septiembre, a causa de un año en particular (2015) que registra precipitaciones de 261 mm (agosto) y 313 mm (septiembre), valores extremos que, sumados a la poca cantidad de años promediados, resultan en este comportamiento distinto. Es importante señalar que, con excepción de las mediciones en MeLA, las estaciones meteorológicas en el área de estudio poseen un periodo de información disponible muy reducido.

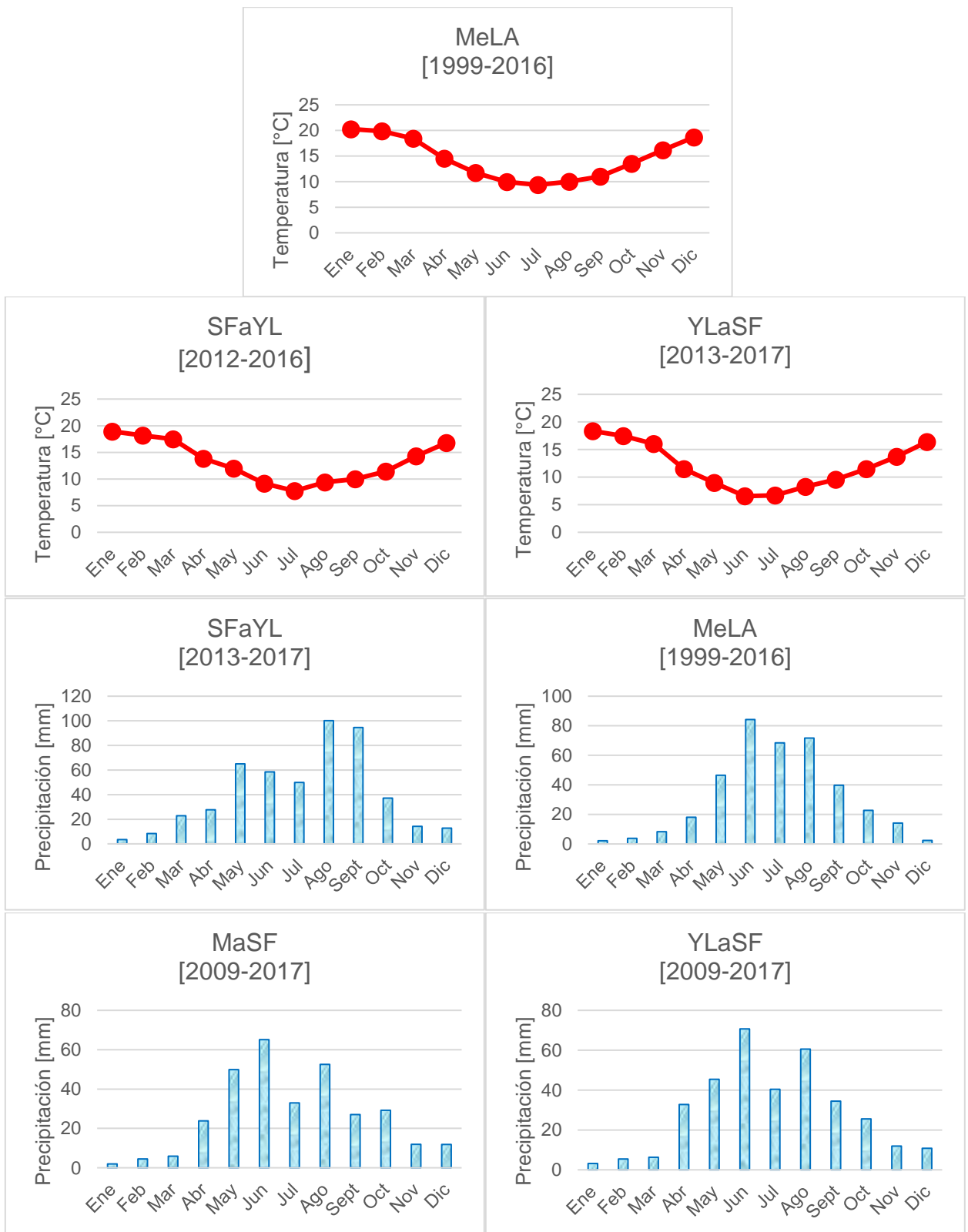


Figura 3-11. Valores mensuales de temperatura y precipitación en estaciones meteorológica de la cuenca Mapocho en los Almendros, donde en cada caso se indica el periodo de datos utilizados. (Fuente: DGA).

3.2.3. Características del Terreno

La cuenca está ubicada en la cordillera de los Andes y presenta elevaciones entre los 970 m.s.n.m. y los 5415 m.s.n.m., según el DEM del sensor SRTM de 1 arc-second. La cuenca alta completa posee un área total de 637 km², la cuenca 1 300 km², la cuenca 2 155 km², la cuenca 3 109 km², la cuenca 4 40 km² y la cuenca 5 33 km².

La curva hipsométrica de la Figura 3-12 muestra que la cuenca 4 posee las menores elevaciones, donde el 20% del área se encuentra sobre los 2000 m.s.n.m.; la cuenca 5, cuenca 1, cuenca 2 y cuenca 3 presentan cada vez mayores elevaciones en ese mismo orden, para prácticamente todos los porcentajes de área. Las cuencas 1 y 3 son las que sobrepasan los 5000 m.s.n.m. mientras que la cuenca 2 solo supera por poco los 4800 m.s.n.m.

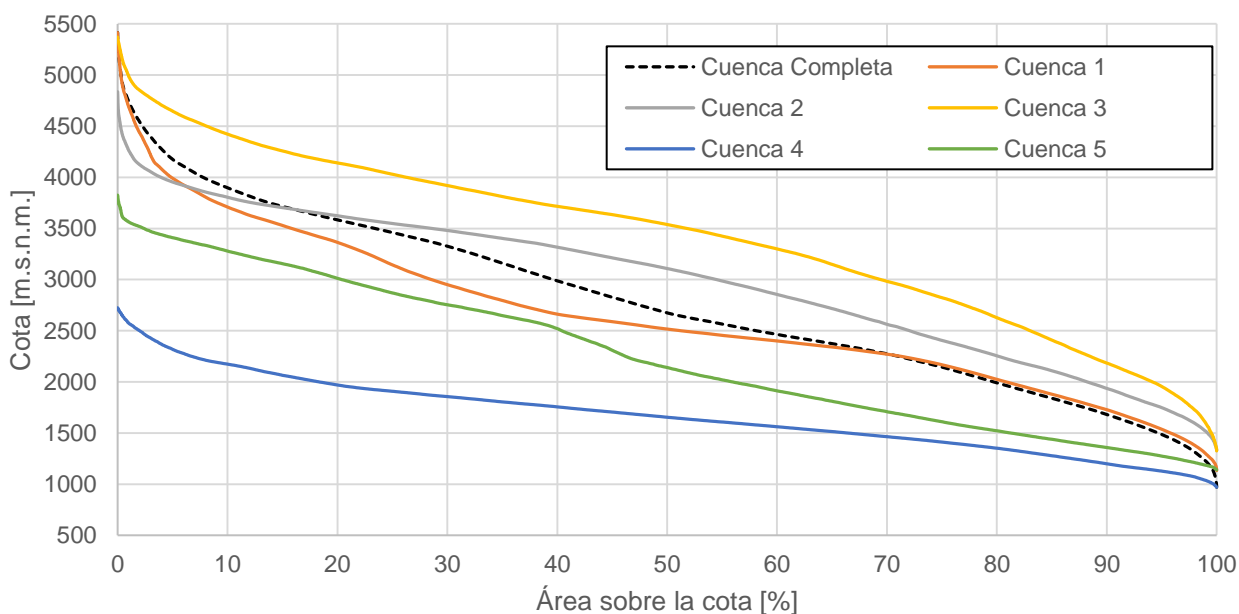


Figura 3-12. Curvas hipsométricas de la cuenca Mapocho en los Almendros y las cinco subcuencas que la componen.

La clasificación vegetacional de la cuenca corresponde a la región de estepa altoandina, lugar donde los factores determinantes son la altitud y el relieve. Es posible resumir la existencia de tres tipos biológicos fundamentales: plantas pulvinadas o en cojín, las gramíneas cespitosas, pastos duros o “coirones” y, los arbustos bajos de follaje ducido (“tolas”). Dentro de esta región, se encuentra la sub-región de los Andes Mediterráneos, caracterizada por precipitaciones en el invierno y el relieve abrupto y montañoso, factores que conceden un aspecto general de desierto de altitud. Se tiene una zonación altitudinal de las comunidades vegetales marcada; fisonómicamente la forma de vida dominante son las plantas bajas, herbáceas o arbustivas, de carácter pulvinado, aunque en muchos lugares predominan las gramíneas en mechón (CADE-IDEPE, 2004). En la parte baja dominan los matorrales andinos y subandinos, hasta aproximadamente lo 2000 m.s.n.m. (Comte, 2017).

En la cuenca también se cuenta con una superficie glaciaria de aproximadamente 20 km² para el periodo 2013-2014. Los glaciares descubiertos de la cuenca del río Maipo alcanzan su mayor concentración en torno a los 5000 m.s.n.m. (Castillo, 2015).

3.2.4. Geología e Hidrogeología

En la cuenca se distingue una importante influencia volcánica. Las unidades geológicas presentes corresponden a: complejos volcánicos parcialmente erosionados acompañados de secuencias volcánicas, en la zona alta; depósitos de remoción en masa, en sectores puntuales y, por último, secuencias volcanosedimentarias en la parte baja de la zona (Fernández, 2016).

Arcadis (2008) a nivel regional define dos unidades estratigráficas, definidas sobre la base de las características granulométricas de los rellenos, presentes en la zona de estudio: la unidad B y C. La unidad B está constituida por sedimentos de granulometría gruesa y media conformada por una fracción clástica mayor de gravas, arenas gruesas y ripios subordinados y una matriz de arena media a fina con escasas proporciones de limos y arcillas. A lo largo de la extensa zona, estos sedimentos experimentan algunas variaciones relativas de sus fracciones gruesas, manteniendo en todo caso una conductividad hidráulica media variable entre 10⁻² y 10⁻⁴ m/s. La unidad C está constituida por una fracción clástica mayor de arenas gruesas a medias, con gravas ocasionales y una matriz abundante de arenas finas con altos porcentajes de arcillas; se estima para esta unidad una conductividad media entre 10⁻³ y 10⁻⁵ m/s.

En el mismo estudio (Arcadis, 2008) pero a escala más local, en el área del proyecto minero Los Bronces (ubicado al norte de la cuenca, en la zona alta), se identifican dos unidades hidrogeológicas: los depósitos cuaternarios y la roca fundamental. Sobre la primera se establece que corresponde a formaciones periglaciares, no constituyendo formaciones acuíferas, en el sentido de tener la capacidad suficiente de retención de agua. Con respecto a la roca fundamental (granodioritas, tonalitas, granitos, monzonitas y dioritas), constituiría una unidad hidrogeológica en la medida que su fracturamiento permita la circulación preferencial del agua subterránea.

En general, la conductividad de los suelos de fundación del área de los Bronces varía entre 10⁻⁴ m/s y 10⁻⁸ m/s. Los depósitos fluvio-glaciales, fluviales y coluviales, presentan una mayor conductividad (10⁻⁴ – 10⁻⁵ m/s), mientras que los suelos morrénicos y glaciolacustres presentan conductividades menores (10⁻⁶ - 10⁻⁸ m/s). La roca basal está constituida predominantemente por granodioritas y cuarzomonzonitas, que en general presentan un moderado grado de meteorización en superficie y un fracturamiento medio. En profundidad la roca se presenta sana, con escaso fracturamiento y con fracturas cerradas. En general, el macizo rocoso presenta características asociadas a una baja conductividad hidráulica.

4. Condiciones Hidrológicas a Simular

Las dos zonas de estudio presentadas anteriormente, pueden dividirse a su vez en cuatro situaciones hidroclimáticas distintas que son detalladas en este capítulo. Cada una de ellas se obtiene de un modelo ya desarrollado en el programa CRHM.

En la cuenca del río Mapocho en los Almendros se tienen las dos siguientes condiciones hidrológicas a escala de sitio: Manto de nieve estacional (condición A) y solo precipitación líquida (condición B). De la cuenca alta del río Copiapó se tiene, también a escala de sitio: un manto de nieve efímero (condición C) y solo precipitación líquida (condición D). Es importante señalar, que todas las condiciones son representativas de un año en específico y no corresponde a un promedio o una climatología del comportamiento de la nieve.

Para considerar en las simulaciones el efecto del cambio climático, se realiza un análisis de sensibilidad en los modelos de CRHM en las forzantes meteorológicas temperatura y precipitación. Se plantean dos escenarios combinados:

- Escenario Moderado. Aumento de la temperatura en 2°C y disminución en la precipitación en un 10% (-10% Pp).
- Escenario Severo. Aumento de la temperatura en 4°C y disminución en la precipitación en un 30% (-30% Pp).

El caso moderado considera las variaciones esperadas en el mediano plazo para ambas zonas según Rojas (2012), mientras que el caso severo se emplea para analizar que tan sensible son los resultados en respuesta a cambios importantes en las variables. Además, idénticos escenarios son empleados en trabajos de modelación hidrológica en las zonas de estudios (Jara, 2017; Comte, 2017).

4.1. Condición A

Esta condición corresponde al manto de nieve estacional, ocurre en la cuenca Mapocho en los Almendros y el modelo puntual fue desarrollado en el trabajo de Comte (2017). Más específicamente, el modelo SNOBAL de CRHM es construido con datos de la estación meteorológica nival Valle Nevado donde se ingresan las observaciones de:

- Temperatura del aire [°C]
- Precipitación [mm/hora]
- Humedad relativa [%]
- Velocidad del viento [m/s]
- Radiación solar incidente [$W \cdot m^{-2}$]
- Radiación de onda larga incidente [$W \cdot m^{-2}$]
- Albedo [-]

Las cuatro primeras variables mencionadas se obtienen directamente de la estación Valle Nevado, mientras que el resto se obtiene mediante fórmulas. El relleno de datos faltantes, para completar el año hidrológico a simular, se lleva a cabo con una serie de métodos y con la información del resto de las estaciones en la cuenca.

Las principales variables de entrada se presentan en la Figura 4-1 y Figura 4-2 para la temperatura y precipitación, respectivamente. Durante el año de modelación, la temperatura presenta el comportamiento esperado, con los valores altos durante los meses de verano, alcanzando un máximo de casi 25°C; los meses de invierno registran las menores temperaturas llegando a un mínimo de -11.74°C. Las temperaturas bajo los 0°C se presentan desde fines de mayo hasta fines de octubre, aun cuando todavía se ocurren a mediados de noviembre, pero en menor grado.

La mayoría de los eventos de precipitación ocurren en los meses de julio (130 mm), agosto (249 mm), septiembre (100 mm) y octubre (133 mm), lo que es esperable en cuanto a la presencia de lluvias durante el invierno. Las lluvias en los meses de octubre, noviembre y enero se explican debido a que corresponden a información rellena, por lo que posiblemente existe una sobreestimación de ellas. La precipitación anual es de 668 mm.

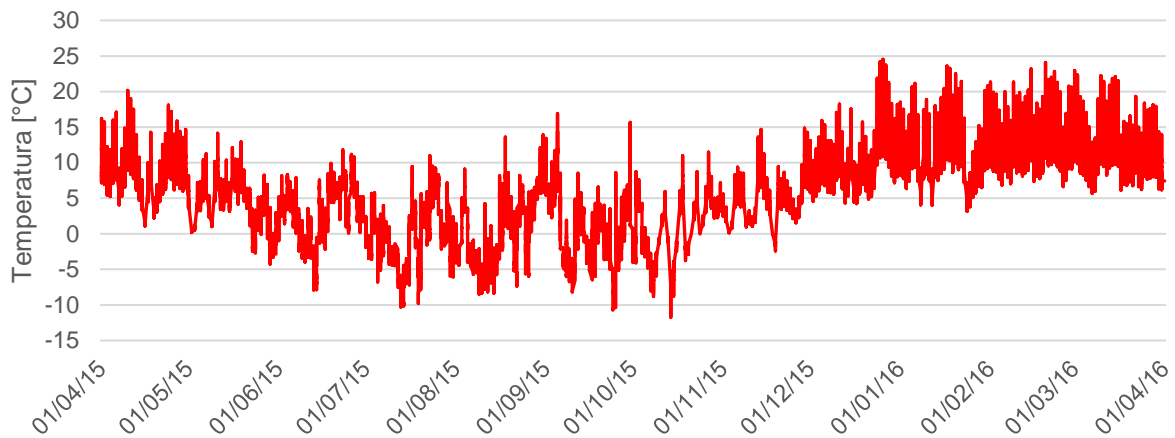


Figura 4-1. Temperatura horaria en Valle Nevado para año hidrológico 2015-2016.

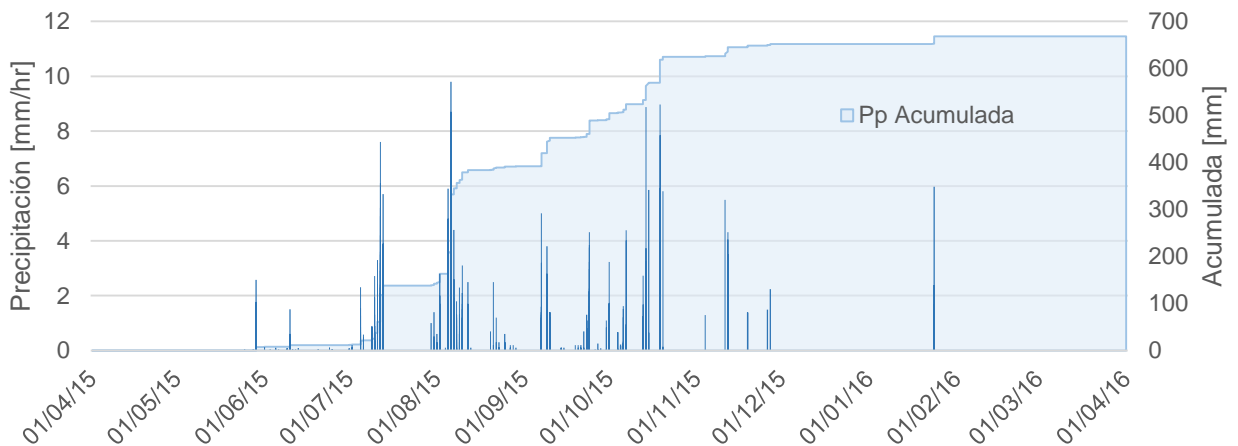


Figura 4-2. Precipitación horaria en Valle Nevado para año hidrológico 2015-2016.

Los resultados de la modelación entregan como principal variable el equivalente en agua de la nieve (Snow water equivalent, SWE), para validarlo se compara con datos medidos en la estación, calicatas en terreno e imágenes satelitales. El resultado relevante para efectos del presente trabajo corresponde a la tasa de derretimiento que se tiene en la base del manto de nieve, pues es la variable de entrada para el modelo en HYDRUS. Los resultados para el SWE se presentan en la Figura 4-3 y las tasas de derretimiento en la Figura 4-4, para cada escenario de cambio climático.

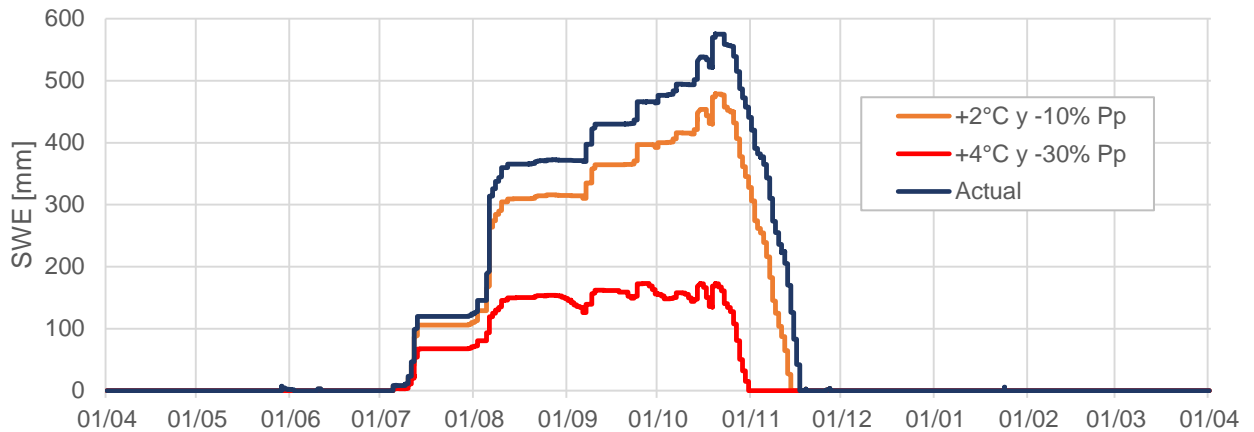


Figura 4-3. SWE modelado en Valle Nevado y su variación para distintos escenarios de cambio climático.

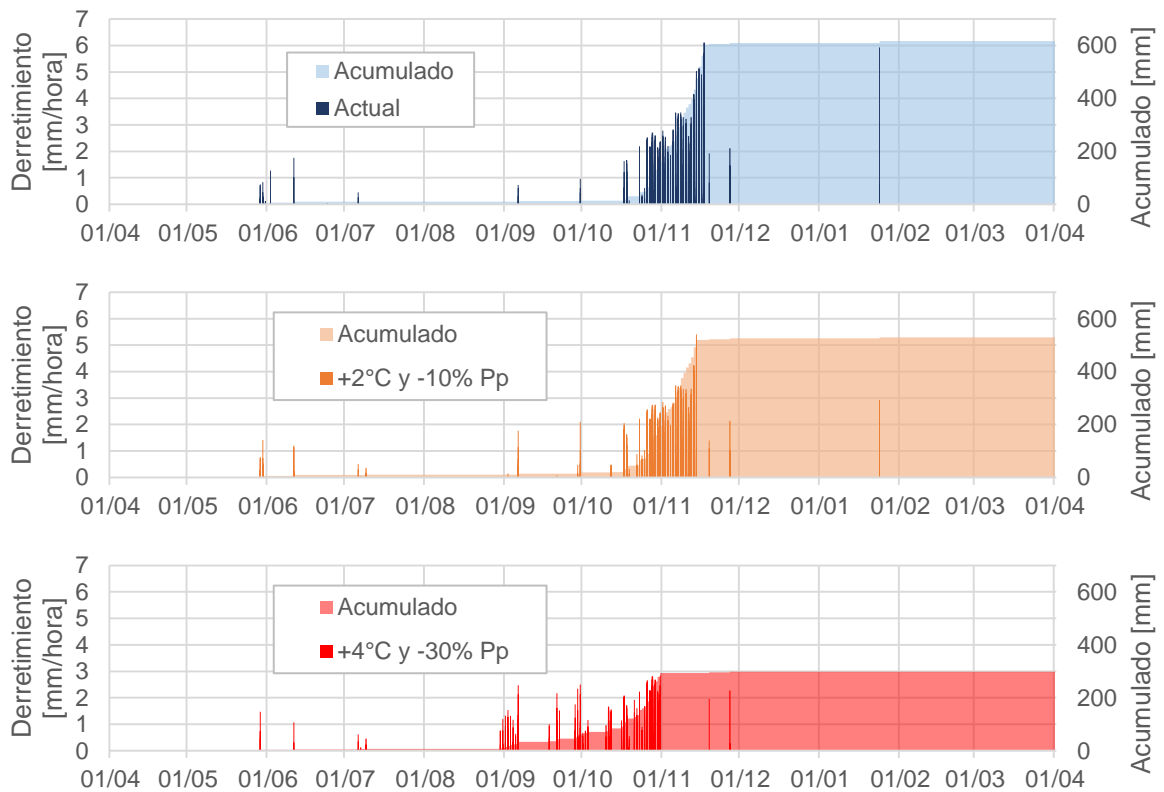


Figura 4-4. Tasas de derretimiento en Valle Nevado. Escenario actual y cambio climático.

Los derretimientos más significativos (Figura 4-4) ocurren entre los meses de octubre y noviembre. Para el escenario actual un 26% del derretimiento total del año ocurre hasta fines de octubre y a fines de noviembre se alcanza casi el 99% del total de 616.5 mm acumulados. En el escenario moderado el comportamiento es similar, con un 37% del total acumulado a fines de octubre y a fines de noviembre más de un 99% del total de 529.2 mm. En el escenario severo el derretimiento importante ocurre antes, a fines de septiembre se tiene cerca de un 21% del derretimiento anual acumulado y ya a fines de octubre se tiene más del 98% del total de 298 mm anuales.

4.2. Condición B

Esta condición también se tiene en la cuenca Mapocho en los Almendros y corresponde a la ocurrencia de solo precipitación líquida en un sustrato rocoso desnudo. Esta situación se fabrica de manera artificial aumentando la temperatura en un valor igual al valor mínimo horario para todo momento, de forma que la temperatura mínima sea cero. Lo anterior se cumple con un aumento en 11.74 °C para todo el año hidrológico y empleando el modelo de nieve puntual en Valle Nevado se genera un SWE ínfimo con un valor máximo de menos de 24 mm que ocurre en unos pocos días.

La nueva serie horaria de temperatura se muestra en la Figura 4-5 y la serie de precipitación se mantiene inalterada (Figura 4-2). Ahora es necesario considerar la evaporación desde el material, la cual se obtiene mediante la ecuación de Penman-Monteith a nivel horario (Anexo A). Los valores de evaporación potencial para el escenario actual se presentan en la Figura 4-6.

El ejercicio anterior posiblemente sobreestima los valores de la evaporación, pues el aumento de la temperatura, en general, ocurre en mayor medida en los valores mínimos y no de manera equitativa para toda la serie de datos.

Durante este año de modelación, la temperatura presenta valores por sobre los 35 °C durante el verano, con un valor máximo de 36.28°C; los meses de invierno registran las menores temperaturas con un mínimo de 0°C, debido a las características de construcción de la serie. Para la evaporación potencial, se observa que posee un comportamiento muy similar al de la temperatura, con los valores más elevados durante los meses de diciembre a febrero, alcanzando un peak de casi 1 mm como valor máximo; los valores menores se dan en el invierno, entre los meses de junio, julio y agosto.

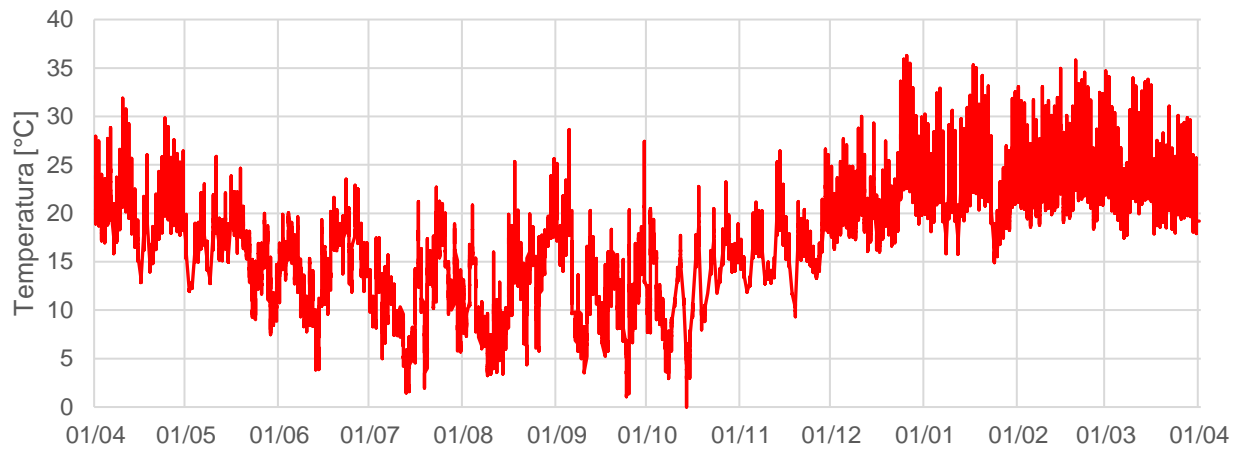


Figura 4-5. Temperatura horaria modificada para condición B en Valle Nevado.

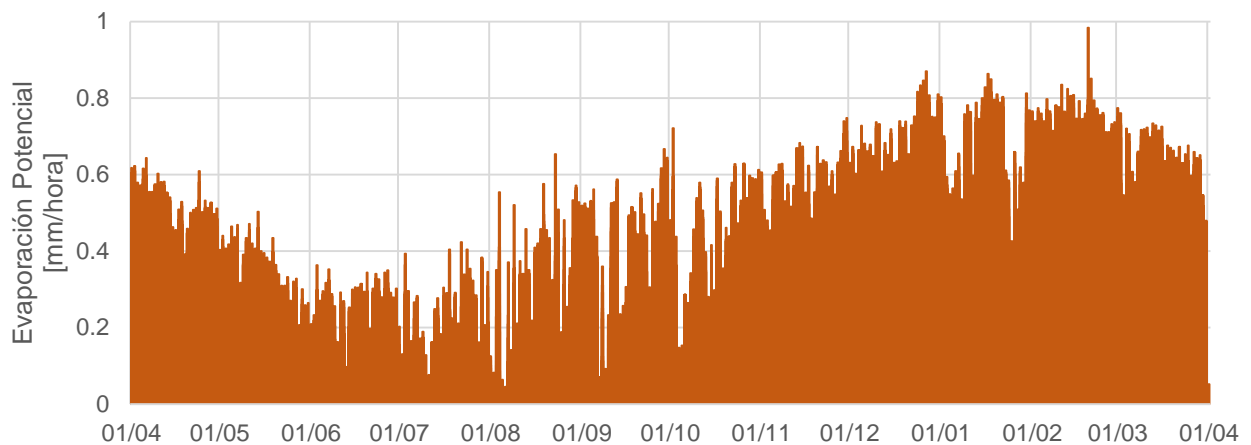


Figura 4-6. Tasas de evaporación potencial en Valle Nevado para condición B. Escenario actual.

4.3. Condición C

Este caso corresponde a un manto de nieve efímero en la cuenca alta del río Copiapó, el modelo puntual fue desarrollado en el trabajo de Jara (2017) y al programa computacional CRHM se ingresan las observaciones de:

- Temperatura del aire [°C]
- Precipitación [mm/hora]
- Humedad relativa [%]
- Velocidad del viento [m/s]
- Radiación solar incidente [$W \cdot m^{-2}$]

Las variables mencionadas se obtienen de las mediciones de los instrumentos de la estación La Ollita promediadas horariamente. En caso de falta de información, ya sea por falla o registro incompleto de los sensores, se emplean los datos distribuidos del reanálisis Era-Interim.

Las principales variables de entrada se presentan en la Figura 4-7 y Figura 4-8 para la temperatura y precipitación, respectivamente. La serie de temperatura presenta los mayores valores en los meses de diciembre, enero y febrero, con un valor máximo de 16.1°C; las temperaturas más bajas (bajo cero) se dan principalmente entre fines de marzo y fines de septiembre, alcanzando un mínimo de -12.76°C.

En cuanto a la precipitación, esta ocurre mayoritariamente en los meses abril (76 mm), mayo (41 mm) y agosto (73 mm). Se tiene la presencia de una temporada húmeda entre abril-agosto y una temporada seca para el resto de los meses, con valores nulos de precipitación, exceptuando marzo (menos de 3 mm) y octubre (20 mm). La lluvia de octubre corresponde a un evento puntual en solo dos días y puede estar sobreestimada debido a que se encuentra dentro del periodo sin datos (completado con reanálisis). La precipitación anual es de 237 mm.

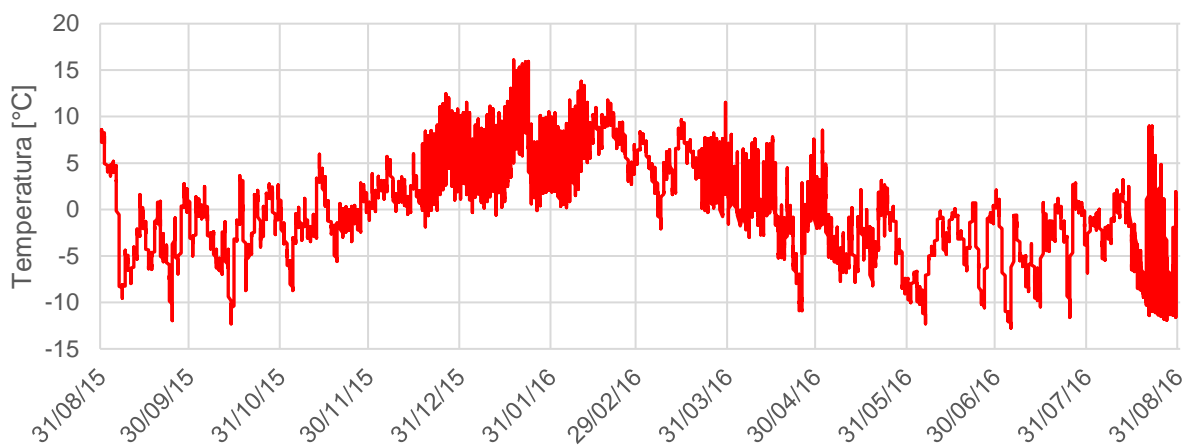


Figura 4-7. Temperatura horaria en La Ollita para año 2015-2016.

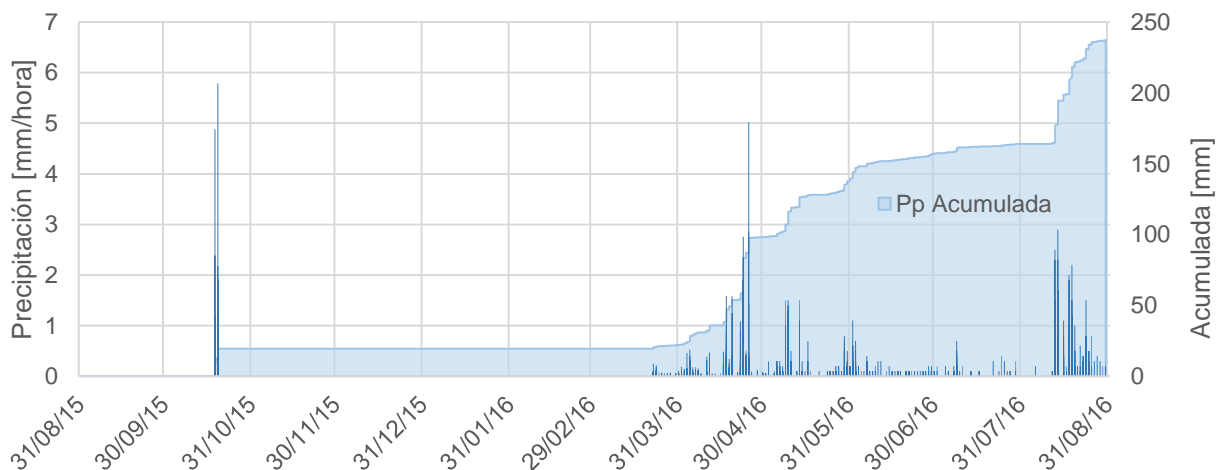


Figura 4-8. Precipitación horaria en La Ollita para año 2015-2016.

Los resultados del modelo de nieve entregan el SWE (Figura 4-9) y para validarlo se compara con datos medidos en la estación por el snowscale. Las tasas de derretimiento generadas que se tiene en la base del manto de nieve se presentan en la Figura 4-10 para cada escenario de cambio climático.

Los derretimientos para el escenario actual, ocurren principalmente en los meses abril y mayo con casi un 40% del derretimiento total anual alcanzado a fines de este periodo, el mes de agosto presentan cerca del 53% del total de 73 mm. En el escenario moderado se tiene un 49% del total de derretimiento acumulado a fines de mayo y solo en agosto ocurre el 46% del total de 76 mm. Para el escenario severo, a fines de mayo se tiene un derretimiento acumulado de cerca del 61% y en el mes de agosto se concentra un 34% del total de 65 mm anuales.

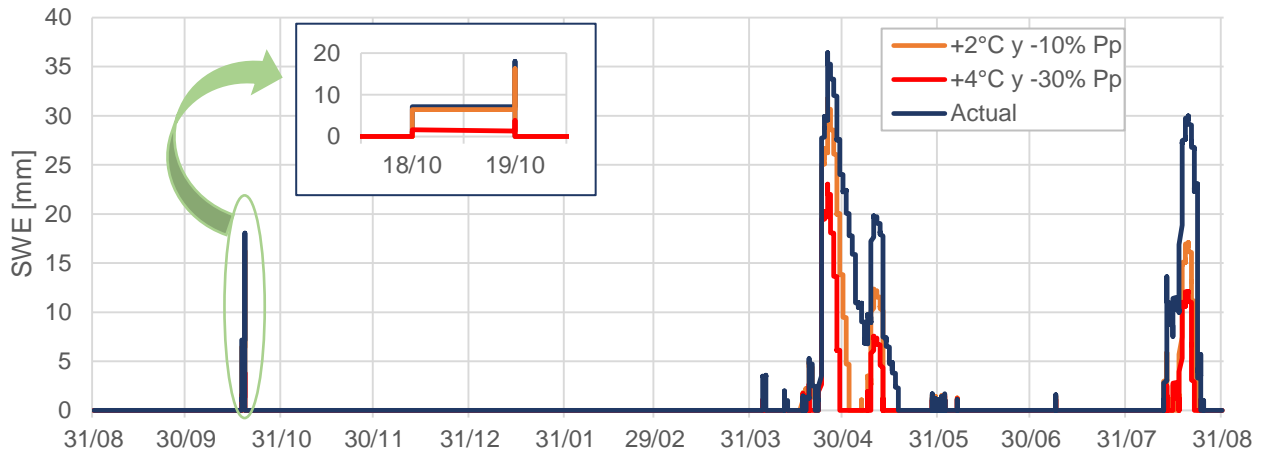


Figura 4-9. SWE modelado en La Ollita y su variación para distintos escenarios de cambio climático.

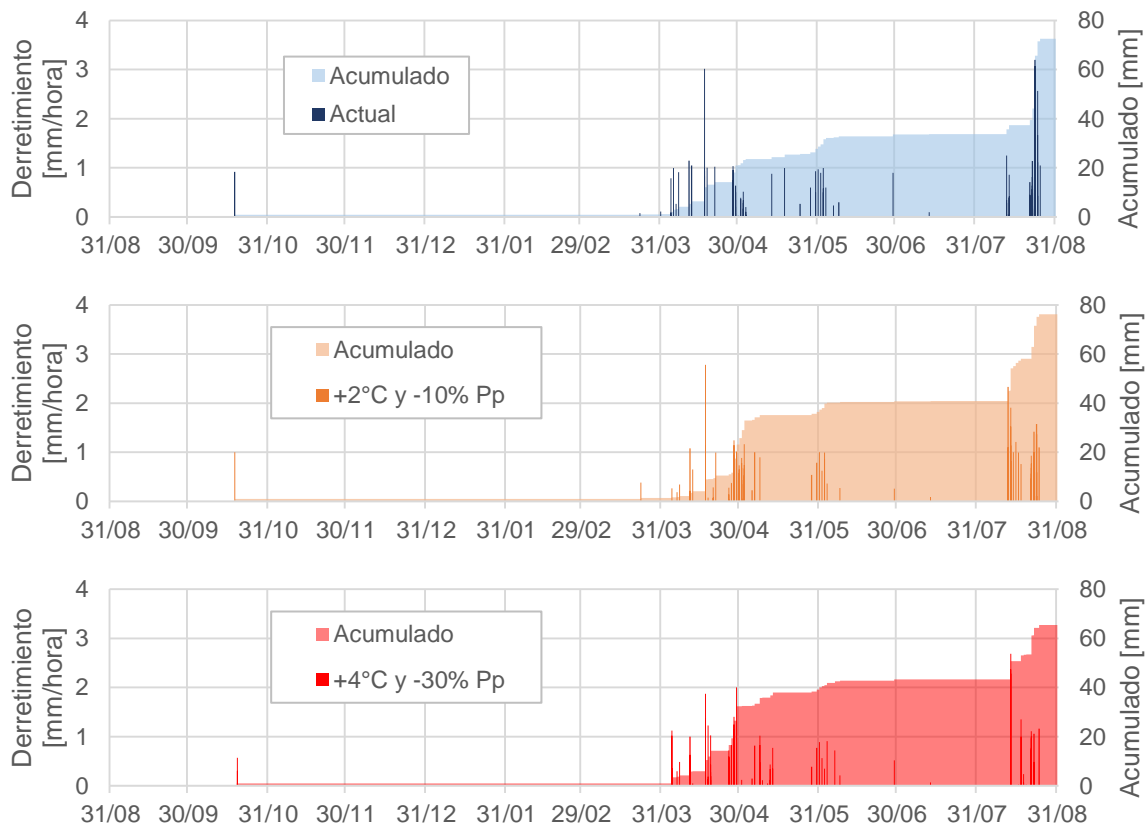


Figura 4-10. Tasas de derretimiento en La Ollita. Escenario actual y cambio climático.

4.4. Condición D

Esta condición también se obtiene de la cuenca alta del río Copiapó y corresponde a la ocurrencia de solo precipitación líquida en un sustrato rocoso desnudo. Esta situación también se fabrica de manera artificial aumentando la temperatura en un valor igual al valor mínimo horario para todo momento, lo que se cumple con un aumento en 12.76 °C para todo el año. Al emplear el modelo de nieve puntual en La Ollita, se genera un SWE despreciable con un valor máximo de menos de 4 mm.

La nueva serie horaria de temperatura se muestra en la Figura 4-11 y la serie de precipitación se mantiene igual al de la condición C (Figura 4-8). En este caso es necesario considerar la evaporación desde el material, la cual se obtiene mediante la ecuación de Penman-Monteith a nivel horario (Anexo A). Los valores de evaporación potencial para el escenario actual se presentan en la Figura 4-12.

En la modelación de esta condición, los valores de la temperatura alcanzan casi los 29°C durante el mes de enero; los meses de invierno presentan las menores temperaturas con un mínimo evidente de 0°C. Para la evaporación potencial, se observa que sigue el comportamiento de la temperatura, con los valores más elevados durante los meses de diciembre a febrero, alcanzando un peak de más de 1 mm como valor máximo; los valores menores se dan entre los meses de mayo y septiembre.

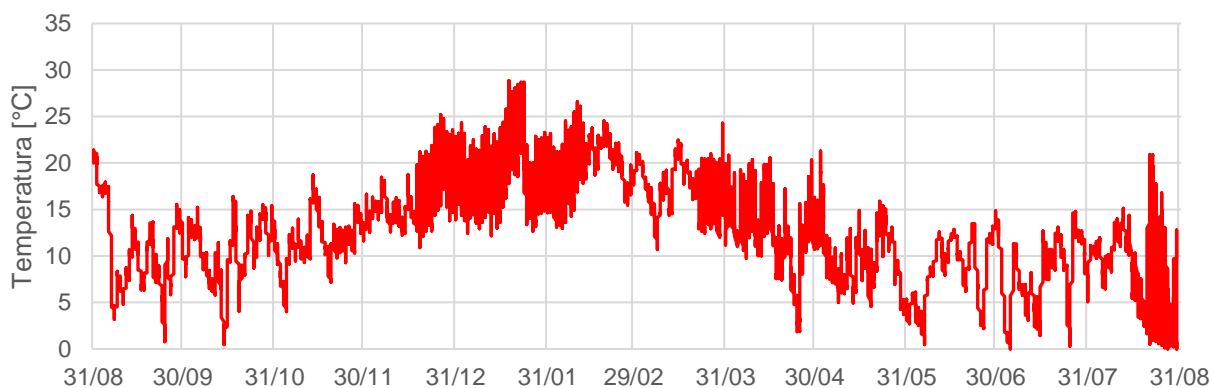


Figura 4-11. Temperatura horaria modificada para condición D en Valle Nevado.

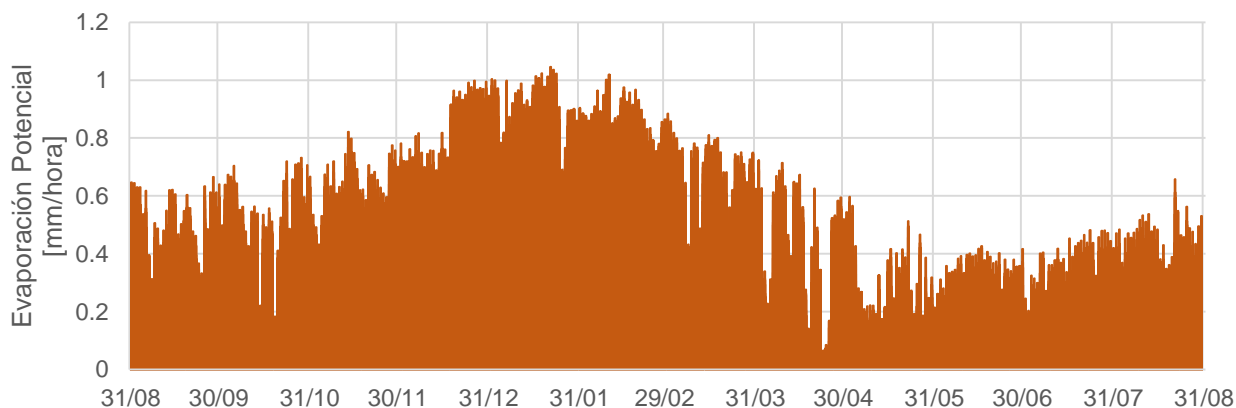


Figura 4-12. Tasas de evaporación potencial en La Ollita para condición D. Escenario Actual.

5. Construcción Modelo en HYDRUS-1D

Para estudiar el comportamiento de los flujos no saturados en medios porosos se emplea el programa HYDRUS-1D, que resuelve numéricamente la ecuación de Richards (Ecuación (2.12)).

En el menú principal de pre-procesamiento del programa existen una serie de submenús que se despliegan, si es que solamente se considera flujo de agua. A continuación, se detalla cada uno.

- *Main Processes*: En este menú se escoge el proceso a simular, se da la posibilidad de escoger entre flujo de agua, transporte de solutos, transporte de calor, etc. Para fines de este trabajo se escoge la primera opción.
- *Geometry Information*: Se ingresan las principales características geométricas del modelo, la unidad en que se va a trabajar (mm), el número de materiales (1, homogéneo), número de capas para el balance de masa (1), inclinación del flujo (vertical) y finalmente la profundidad del perfil del material. Para este último dato, se ingresan profundidades (H) de 30, 60 y 90 m.
- *Time Information*: Se ingresa la información del tiempo del modelo, la unidad (hora) y la discretización temporal (tiempos de inicio y termino de la simulación, pasos de tiempo). En este menú se selecciona también que las condiciones de borde sean variables a lo largo del tiempo, indicando el número de registros que se posee (de la precipitación, por ejemplo). El conjunto de condiciones de borde puede ser repetido n veces, por lo que se escoge un valor de 40 para simular el mismo año hidrológico por todo ese periodo.
- *Print Information*: Se escogen los tiempos que son de interés para entregar resultados de la simulación, estos pueden ser cada cierto paso de tiempo o en tiempos específicos.
- *Iteration Criteria*: Es posible modificar los criterios de iteración del modelo numérico para la precisión de la solución (máximo número de iteraciones, tolerancia del contenido de agua o de la altura de presión), especificar parámetros para el control del paso del tiempo y especificar límites para las tablas de interpolación interna. Los valores son dejados por defecto, como lo recomienda el manual del programa.
- *Soil Hydraulic Model*: Se selecciona el modelo hidráulico a ser usado para las obtener las propiedades hidráulicas del material y se especifica que no se considerará el fenómeno de histéresis. El modelo seleccionado corresponde al de van Genuchten (1980), que resuelve las ecuaciones (2.13), (2.14), (2.15) y (2.16) para determinar el contenido de humedad volumétrico (θ) y la conductividad hidráulica (K).

- *Water Flow Parameters*: Se ingresan los distintos parámetros que requiere el modelo de van Genuchten. Corresponden al contenido de humedad residual (θ_r), contenido de humedad saturado (θ_s), los parámetros del modelo de van Genuchten (n y α), la conductividad hidráulica saturada (K_s) y el parámetro que representa el grado de conectividad de los poros (l). Se ingresan estos parámetros para tres materiales distintos, los cuales se presentan en la sección siguiente (Sección 5.1. Materiales Simulados).
- *Water Flow Boundary Conditions*: El usuario especifica el tipo de condiciones de borde (CB) a emplear en la simulación. Como CB superior están las opciones de flujo, contenido de humedad o altura de presión constante/variable y CB controlada por condiciones atmosféricas, donde esta última es la seleccionada. Como CB inferior se tienen las opciones de flujo, contenido de humedad o altura de presión constante/variable; drenaje profundo, drenajes horizontales y drenaje libre.

Se trabaja con la CB inferior de drenaje libre, situación que ocurre a menudo en estudio en terreno de flujos de agua y drenaje en la zona no saturada. Esta condición es apropiada donde el nivel freático se encuentre muy por debajo del dominio de interés (Šimůnek et al., 2013) o para reproducir el efecto de una capa de material grueso, que usualmente se encuentra en la base de los depósitos de estériles de manera natural (Fala et al., 2013). Además, se selecciona en este menú si la condición inicial se ingresa en altura de presión o contenido de humedad, donde se opta por la última.

- *Time Variable Boundary Condition*: Se ingresan los tiempos, los datos de precipitación/derretimiento y evaporación para el año completo según corresponda a la condición climática. En las condiciones A y C, donde existe nieve, CRHM estima evaporación/sublimación, por lo que la evaporación ingresada a HYDRUS es igual a cero durante todo el periodo (evaporación ya considerada en CRHM). En este módulo, se puede limitar el valor absoluto del mínimo valor permitido para la altura de presión en la superficie (h_{crit}).
- *Soil Profile – Graphical Editor*: En este menú gráfico se ingresa la discretización espacial, donde se selecciona el mayor número de nodos permitido por el programa (1001). Esta ventana permite modificar también la distribución de los materiales, factores de escala para las variables hidráulicas y la ubicación de subregiones para el balance de masa, pero como se trabaja con un perfil homogéneo estas opciones son pasadas por alto. Finalmente se completa el valor de las condiciones iniciales del contenido de humedad, fijándolo en un valor igual a θ_r (o cercano) para todo el dominio.

5.1. Materiales Simulados

Se simulan tres tipos de materiales distintos, clasificándose como muy grueso (gravelly-GRV), grueso (Sandy-SBL) y fino (silty-SLT). Los parámetros de estos materiales se presentan en la Tabla 5-1 y se obtienen de ensayos de laboratorio y terreno de un depósito de estériles (Dawood & Aubertin, 2014; Fala et al. 2013).

Tabla 5-1. Parámetros requeridos por el modelo de van Genuchten para los tres materiales simulados. (Modificado de Dawood & Aubertin, 2014; Fala et al., 2013).

Material	θ_r	θ_s	α [1/m]	n	K_s [m/s]	l
GRV	0	0.39	14960	1.45	$4.7 \cdot 10^{-3}$	0.5
SBL	0.01	0.29	3	3.72	$5.1 \cdot 10^{-5}$	0.5
SLT	0.034	0.46	1.6	1.37	$6.9 \cdot 10^{-7}$	0.5

La elección anterior, se justifica en que han sido ampliamente utilizados en trabajos de modelación de botaderos, variando la conductividad hidráulica ligeramente entre ellos, en no más de un orden de magnitud (Ver Sección 2.3, sobre revisión bibliográfica de botaderos). Además, los valores de la conductividad encontrados en estudios previos, varían entre los 10^{-7} y 10^{-2} m/s, por lo que los materiales seleccionados cubren de buena forma el rango encontrado.

Los materiales presentan propiedades muy distintas, como lo ilustra la SWCC de la Figura 5-1 y las conductividades hidráulicas graficadas en la Figura 5-2. La K_s ($h=0$) es mayor para el material más grueso, disminuyendo su valor hasta el más fino; sin embargo, esto no ocurre para las conductividades no saturadas, donde para el material GRV el valor disminuye abruptamente a medida que la altura de presión disminuye (succión aumenta). Una disminución, pero en menor medida, ocurre con SBL; mientras que el material más fino, SLT, que tiende a retener más agua dada una altura de presión (como se ve en la SWCC), presenta los menores cambios en su conductividad hidráulica. En general, los materiales más finos son los que presentan las más altas conductividades, bajo condiciones no saturadas.

Al comparar las conductividades hidráulicas de los materiales simulados, con las condiciones naturales encontradas en las zonas de estudio, se puede ver que para la cuenca alta del río Copiapó (Sección 3.1.4. Geología e Hidrogeología) los valores de las unidades geológicas son del orden de los 10^{-7} m/s, similar al material SLT; pero en otras mediciones de infiltración se encuentran valores cercanos a los 10^{-5} m/s del material SBL. Para la cuenca alta del río Mapocho (Sección 3.2.4. Geología e Hidrogeología) a nivel regional se tienen conductividades del orden de 10^{-2} y 10^{-5} m/s, asemejándose a los dos materiales gruesos simulados, GRV y SBL; a escala más local, los suelos de fundación presentan valores entre los 10^{-4} y 10^{-8} m/s, por lo que se mueven en el rango de los materiales SBL y SLT.

En cuanto a condiciones reales encontrados en la literatura, se tiene el caso del proyecto el Morro, donde según el EIA, se declaran conductividades hidráulicas del depósito de estériles del orden de 10^{-5} m/s, es decir valores muy cercanos al material SBL. León (2010) modela en HYDRUS-2D el mismo depósito de estériles, empleando el idéntico valor anterior como principal, pero agregando otros materiales con conductividades entre 10^{-3} – 10^{-5} para evaluar el efecto de la heterogeneidad espacial y los flujos preferenciales.

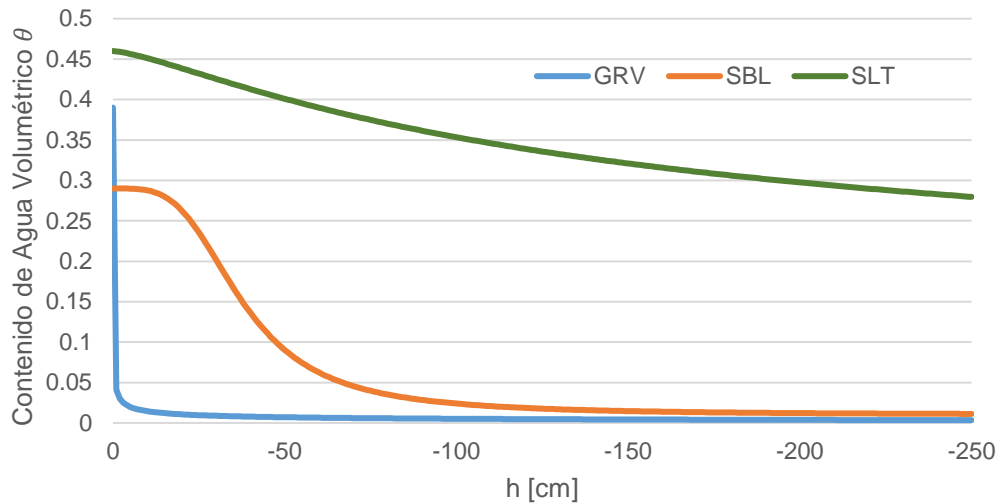


Figura 5-1. Curva característica Suelo-Agua (SWCC) para los tres materiales simulados.

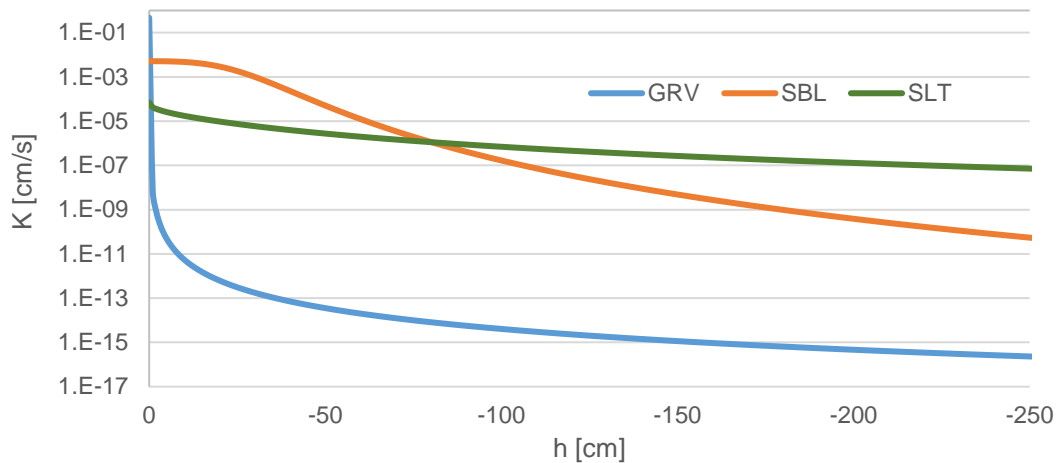


Figura 5-2. Conductividad hidráulica (K) para los tres materiales simulados.

Si se refiere a otros tipos de materiales geológicos y a su similitud con las conductividades hidráulicas de los materiales simulados, es posible señalar, por ejemplo, los valores para la limolita (siltstone) y el shale, que varían entre 10^{-12} y 10^{-10} m/s (roca no fracturada) y entre 10^{-10} y 10^{-7} m/s (roca fracturada), valores más cercanos al material SLT. La arenisca (sandstone) presenta valores dentro del rango 10^{-9} - 10^{-6} m/s (no fracturada) y entre los 10^{-8} - 10^{-4} m/s (roca fracturada) asemejándose al material SLT en su mayoría, pero pudiendo alcanzar los valores de SBL. La caliza (limestone) y dolomita tienen conductividades del orden de 10^{-11} - 10^{-7} m/s y 10^{-7} - 10^{-3} m/s (formaciones kársticas, es decir, existe disolución química y erosión del agua en estas rocas), por lo que en un extremo podrían alcanzar la conductividad del material GRV. Por último, se puede nombrar el basalto no fracturado con valores entre 10^{-11} - 10^{-7} m/s y el basalto fracturado con conductividades de 10^{-8} - 10^{-4} m/s, logrando entonces valores en su mayoría cercanos al STL, pero de todas formas puede llegar a tomar la conductividad hidráulica de SBL. Las fracturas pueden incrementar la conductividad hidráulica varios ordenes de magnitud y su valor depende fuertemente de la densidad, tamaño e interconexión de las fracturas (Singhal & Gupta, 2010).

6. Resultados de las Simulaciones

Los resultados de las distintas simulaciones se entregan por condición hidrológica (A, B, C y D). A su vez, los resultados se dividen según material y se subdividen en el caso base, que corresponde a un perfil de sustrato rocoso de 30 m. de profundidad con las condiciones climáticas actuales, en el impacto que tiene el cambio climático (escenario moderado y severo) y finalmente el impacto que tiene solo cambios en la profundidad del perfil del material aplicando el escenario actual.

Las tasas de percolación para el periodo de simulación completo (40 años) solo se entrega para el caso base del material GRV, mientras que para el resto solo se muestra un año completo una vez que no existen cambios de un año a otro (régimen estacionario). Los principales resultados de las simulaciones obtenidos son: tasas máximas, mínimas, desviación estándar, promedio, coeficiente de variación y tiempo de inicio de la percolación en la base; valores que se entregan detalladamente en el Anexo B. En el Anexo C se presenta el balance de masa para cada simulación.

6.1. Condición A (Nieve en Mapocho en los Almendros)

6.1.1. Material: GRV

Para el caso base y material GRV, la percolación en la base del perfil del sustrato comienza a partir del cuarto año (Figura 6-1). La información para un año hidrológico completo se muestra en la Figura 6-2, donde se tiene un máximo de casi 0.25 mm/hora, un mínimo de 0.027 mm/hora y un promedio de 0.07 mm/hora. Las tasas más bajas se encuentran durante el verano entre los meses de diciembre y febrero, mientras que los valores más altos se encuentran entre fines de febrero y comienzos de marzo.

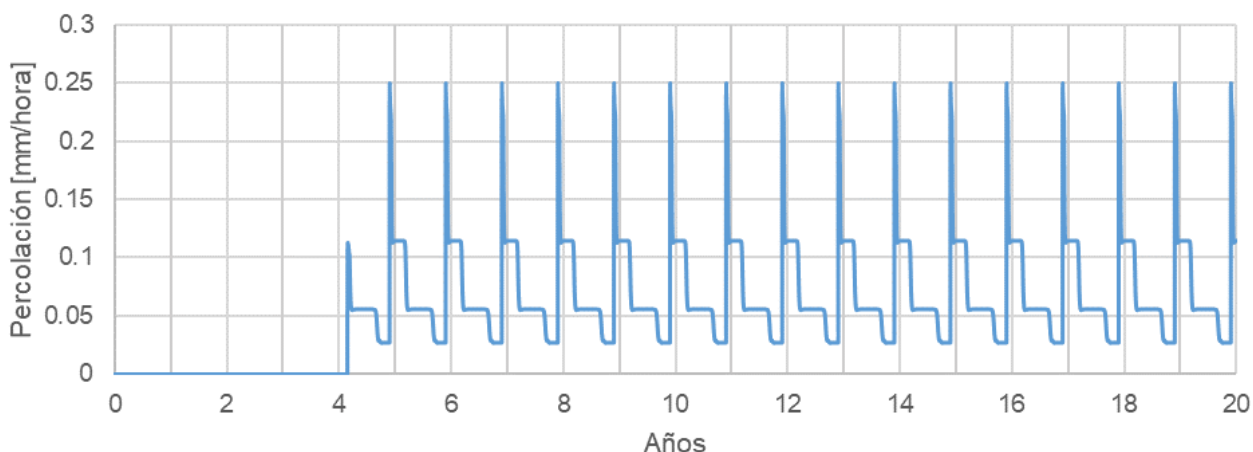


Figura 6-1. Tasas de percolación en la base del material GRV, caso base, condición A, 20 años de simulación.

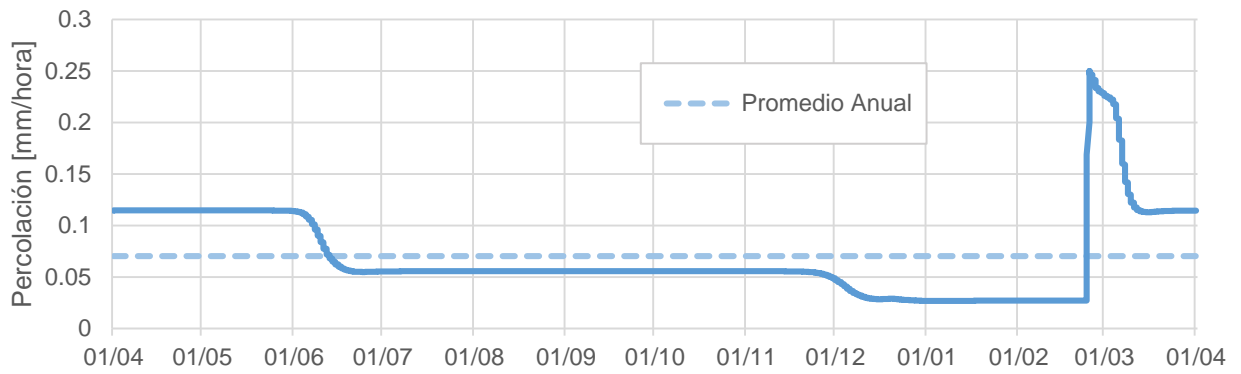


Figura 6-2. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición A.

Los cambios que genera una variación debido al cambio climático se presentan en la Figura 6-3. Para el escenario moderado se tiene un comportamiento similar al caso base, con los valores mínimos entre los meses de diciembre a marzo y las tasas máximas desde mediados de marzo hasta mediados de junio. En el escenario severo se presenta un periodo continuo y casi constante con las mayores tasas entre los meses de agosto a noviembre, mientras que para el resto del año se tiene prácticamente la tasa mínima.

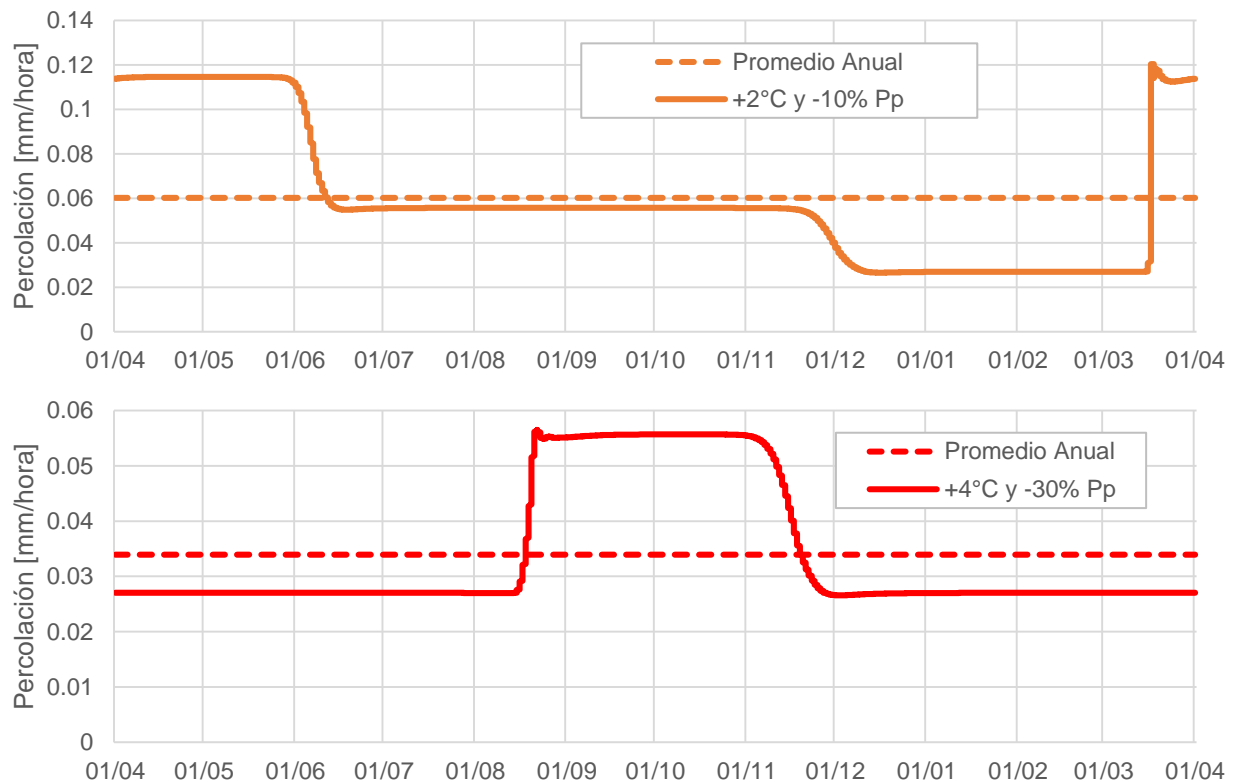


Figura 6-3. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición A.

Tanto los valores máximos como los promedios anuales disminuyen considerablemente, siendo más notable el cambio para el escenario severo, donde el promedio disminuye aproximadamente a la mitad. Las tasas mínimas no varían de un caso a otro. En cuanto a los tiempos de inicio de la percolación, estos aumentan a 4.9 y 7.9 años para el caso moderado y severo, respectivamente.

Al variar la profundidad del perfil del sustrato (Figura 6-4), las simulaciones indican que el valor máximo equivale 0.12 mm/hora en los dos casos, pero los valores altos se encuentran desplazados, ocurriendo entre los meses de octubre a diciembre para H igual a 60 m. y desde mediados de abril a julio para H igual a 30 m. El valor mínimo aumenta a aproximadamente 0.055 mm/hora en ambos casos, pero el promedio se mantiene igual al caso base.

Un importante impacto que tiene el cambio de H corresponde al del tiempo inicial de la percolación, pasando a 8.6 años para H igual a 60 m. y 13.1 años para H igual 30 m.

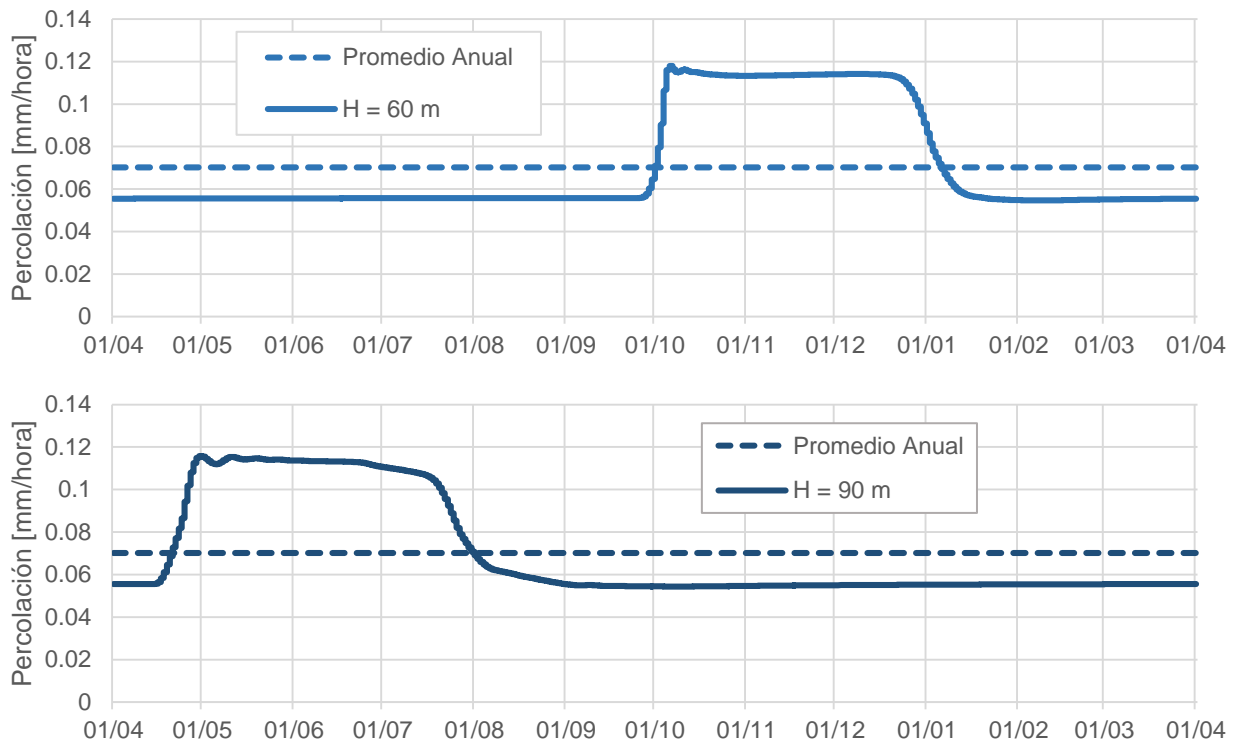


Figura 6-4. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material GRV, condición A.

6.1.2. Material: SBL

Para el material SBL y el caso base (Figura 6-5), la percolación inicia poco después del primer año, con un máximo de casi 0.44 mm/hora, los valores más elevados se concentran en solo un mes, mientras que el resto se tiene el promedio de 0.07 mm/hora y poco más de dos meses con una percolación casi nula.

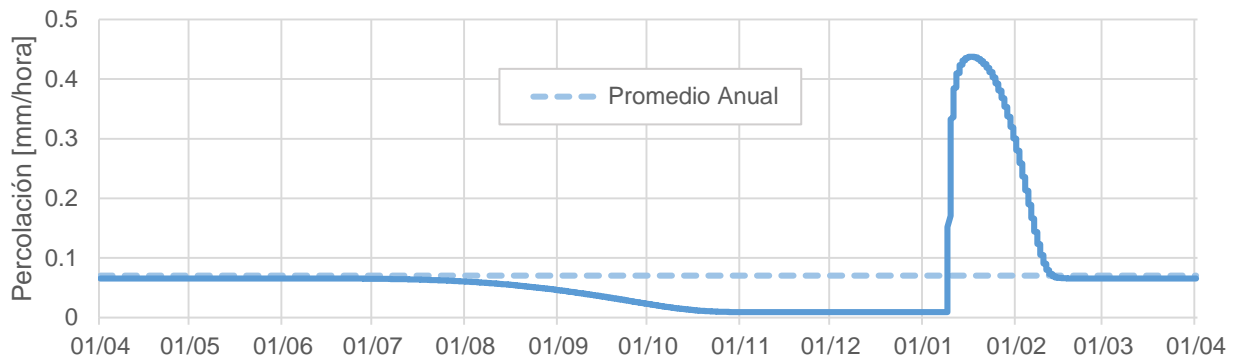


Figura 6-5. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición A.

El efecto que tiene el cambio climático se observa en la Figura 6-6. Para el caso del escenario moderado, se tiene prácticamente el mismo comportamiento que en el caso base, disminuyendo levemente el valor máximo (0.04 mm/hora) y el promedio (0.06 mm/hora), la percolación inicia a los 1.2 años.

En el escenario severo, el comportamiento cambia a uno donde cinco meses presentan la tasa mínima mientras en el resto se tienen tasas mayores, alcanzando un máximo aproximado de 0.07 mm/hora y un promedio anual de 0.03 mm/hora. En este caso, la percolación inicia poco después de los 2 años simulación.

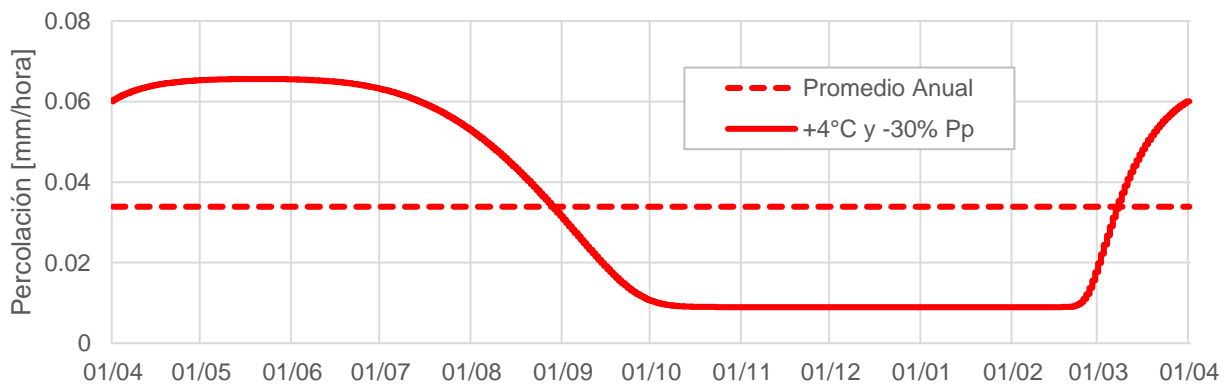
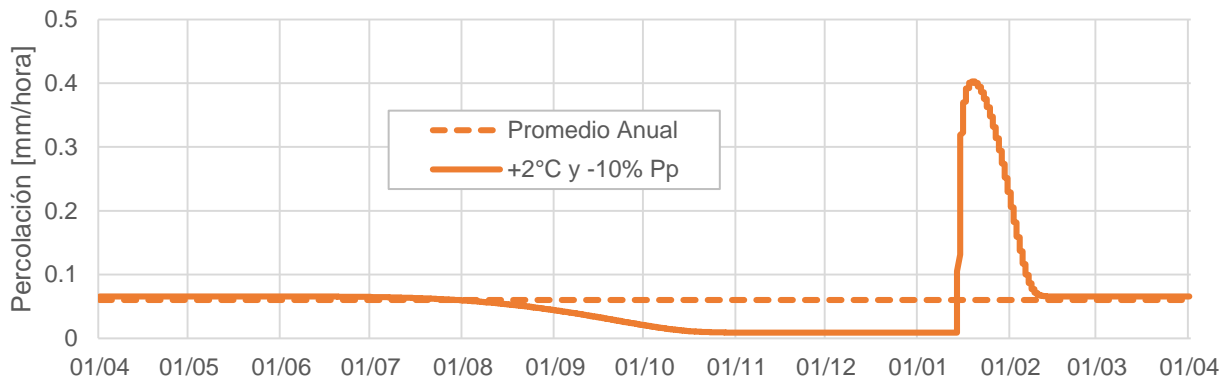


Figura 6-6. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición A.

El efecto del cambio en la profundidad (Figura 6-7), indica una disminución en el caudal máximo para H igual a 60 m y 90 m, siendo más importante el cambio en este último. Se presenta solo un peak en todo el año, mientras que para el resto se tiene el valor mínimo. El valor promedio en ambos casos sigue siendo igual al del caso base y los tiempos de inicio de la percolación son de 2.52 (H=60 m) y 3.98 años (H=90 m).

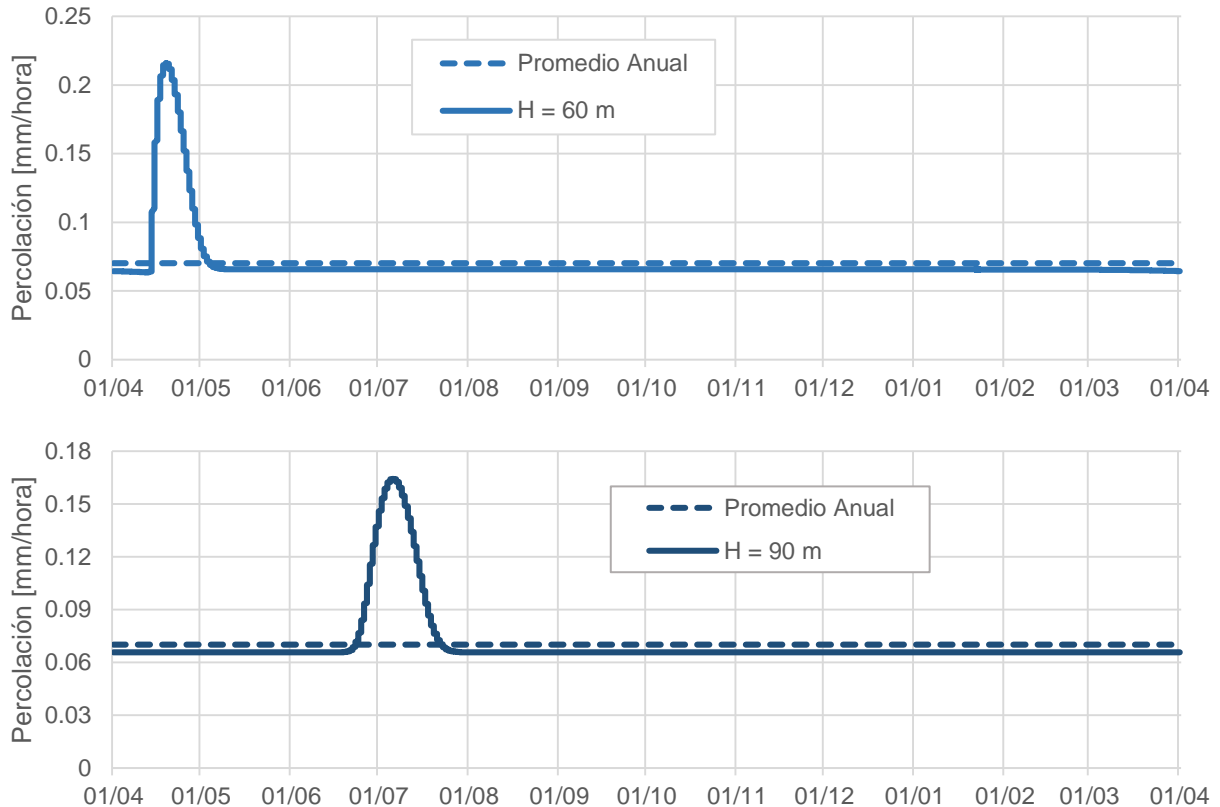


Figura 6-7. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición A.

6.1.3. Material: SLT

El comportamiento de la percolación en el material SLT, frente al caso base de la condición A, se presenta en la Figura 6-8. En ella se observan valores máximos de casi 0.07 mm/hora y mínimos cercanos a los 0.05 mm/hora, las variaciones ocurren de manera muy suave. El promedio es de 0.06 mm/hora y el inicio de la percolación en la base ocurre a los 18.57 años.

El impacto del cambio climático se observa en la Figura 6-9, donde el comportamiento es similar al caso base, pero los valores disminuyen ligeramente para el escenario moderado y de manera más importante para el severo, llegando a disminuir en casi la mitad el valor máximo y el promedio. Los tiempos de inicio de percolación son de 20.03 (moderado) y 31.37 años (severo).

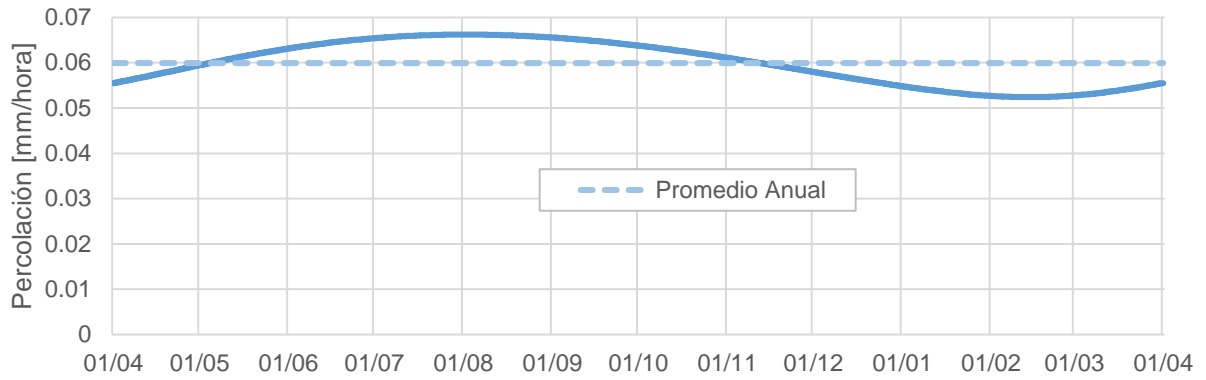


Figura 6-8. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SLT, caso base, condición A.

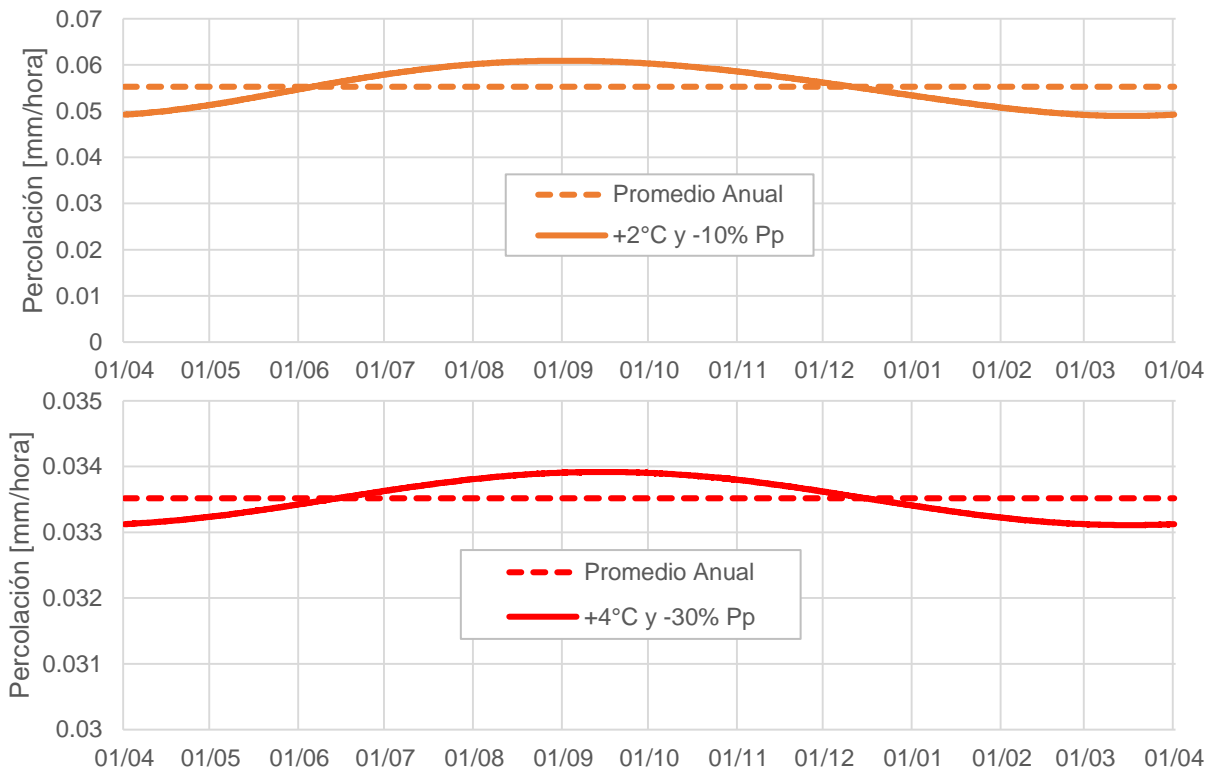


Figura 6-9. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SLT, condición A.

El efecto en el cambio de la profundidad (Figura 6-10) para el caso H igual 60 m indica una leve disminución en el valor máximo y un aumento en el mínimo, pero se mantiene el valor promedio; un cambio importante corresponde al inicio de tiempo de la percolación que pasa a 37.62 años. En el caso H igual 90 m el agua no llega a la base del perfil, por lo que se muestra el contenido volumétrico de agua para el final de la simulación, donde se observa que los flujos alcanzan una profundidad de 64 m en 40 años.

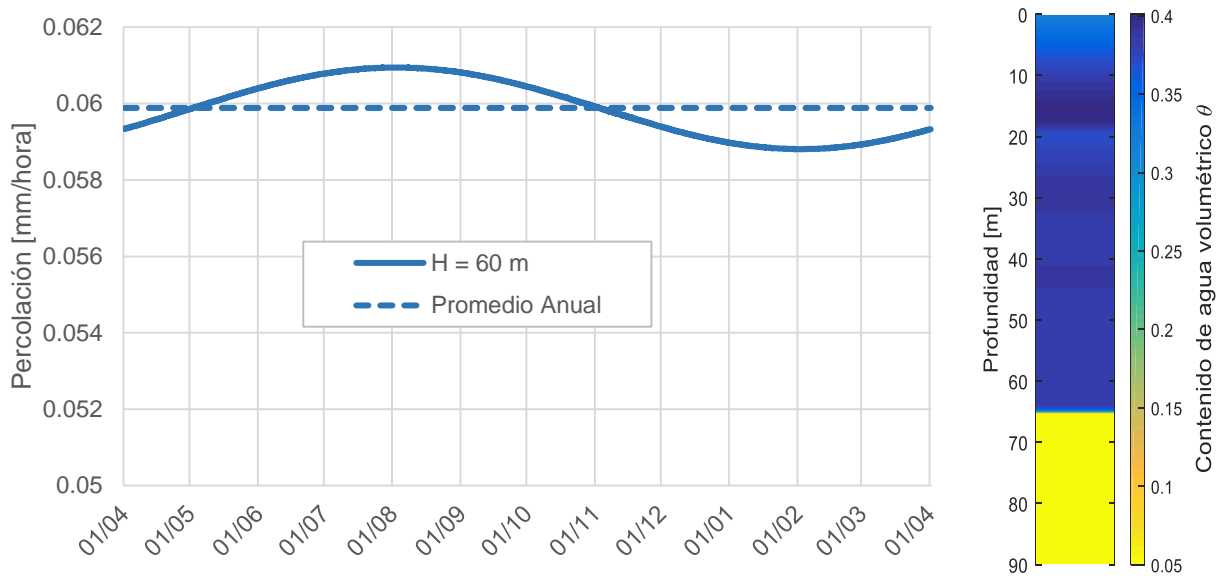


Figura 6-10. Percolación con una profundidad igual a 60 m a la izquierda. A la derecha se presenta el perfil del sustrato y el contenido de humedad para H igual a 90 m. Material SLT, condición A.

6.2. Condición B (Precipitación en Mapocho en los Almendros)

6.2.1. Material: GRV

Para el caso base y el material más grueso se tiene la percolación de la Figura 6-11, se observa una peak máximo de poco más de 0.2 mm/hora y un mínimo aproximado de 0.03 mm/hora durante poco más de dos meses. El promedio es de 0.07 mm/hora y la percolación comienza a partir de los 4.25 años.

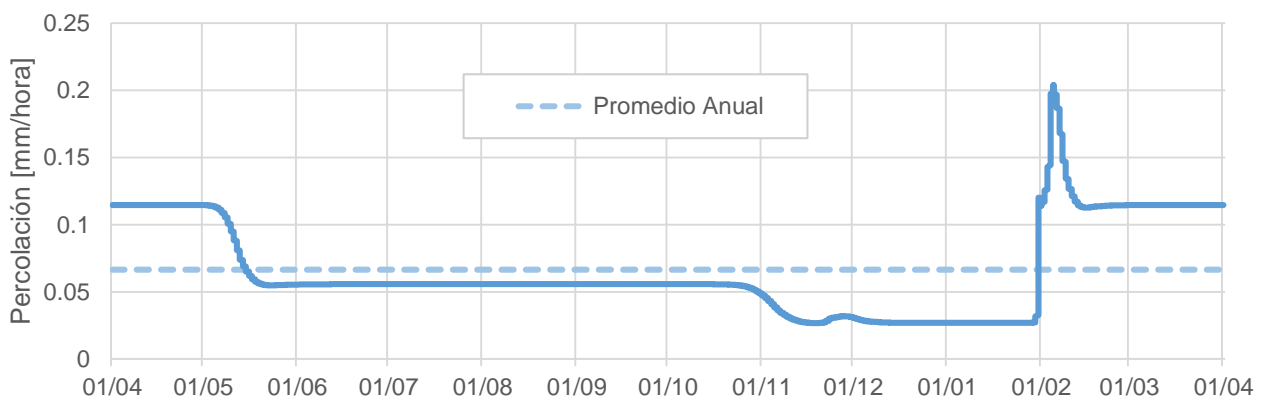


Figura 6-11. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición B.

El impacto del cambio climático (Figura 6-12) para el caso moderado, significa una disminución del valor máximo (0.12 mm/hora) y del promedio (0.06 mm/hora), pero el comportamiento sigue siendo básicamente el mismo. En el caso severo, el valor máximo es de 0.12 mm/hora, pero ocurre en menos de un mes, para que el resto del año las tasas generadas se muevan cercanas al promedio de aproximadamente 0,04 mm/hora. La llegada del agua a la base se retrasa a 4.91 y 6.36 años para el caso moderado y severo, respectivamente.

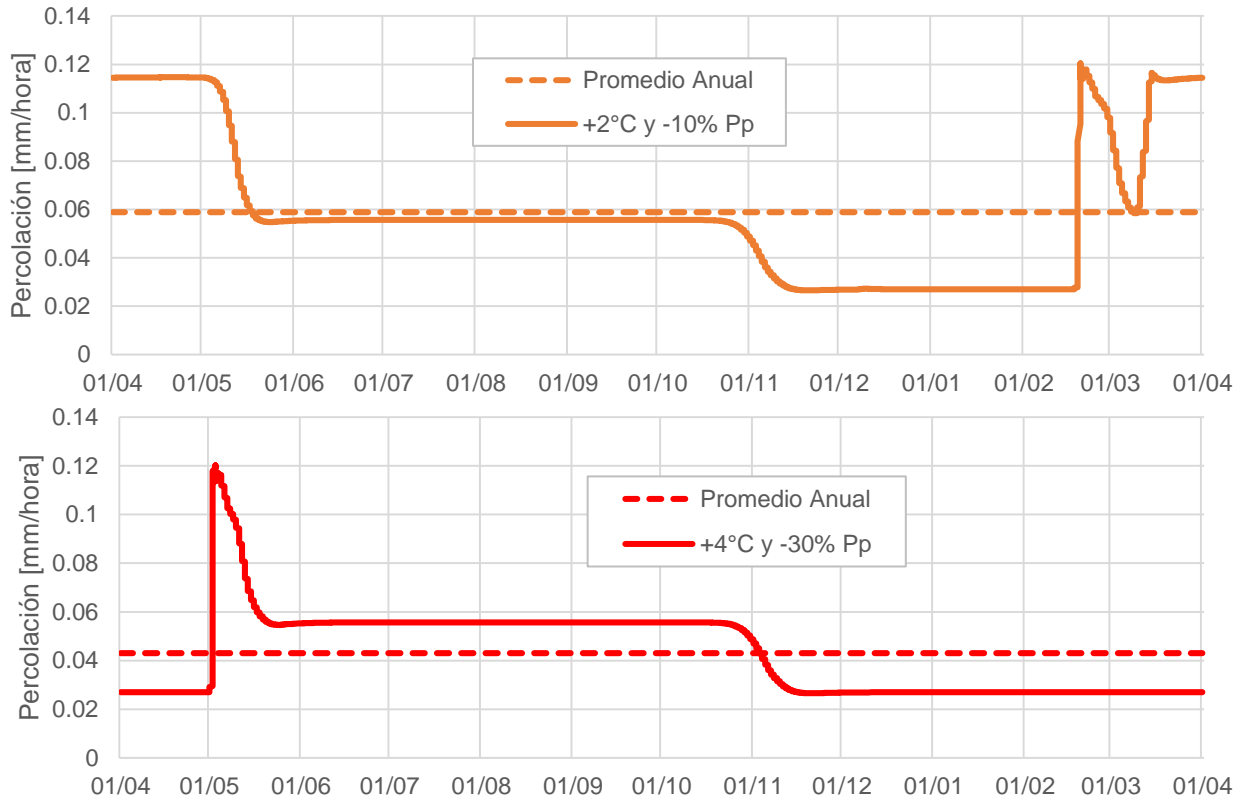


Figura 6-12. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición B.

Al aumentar la profundidad (Figura 6-13) tanto para un H de 90 y 60 m, la forma de las gráficas es muy similar, con valores máximos casi alcanzando los 0.12 mm/hora durante dos meses, mientras que el resto del tiempo se tienen tasas más bien bajas, en torno al mínimo de 0.05 mm/hora. La diferencia principal entre estas dos simulaciones corresponde al tiempo de inicio de la percolación, donde para una profundidad de 60 m el agua tarda 8.9 años y para 90 m el tiempo aumenta a 13.54 años.

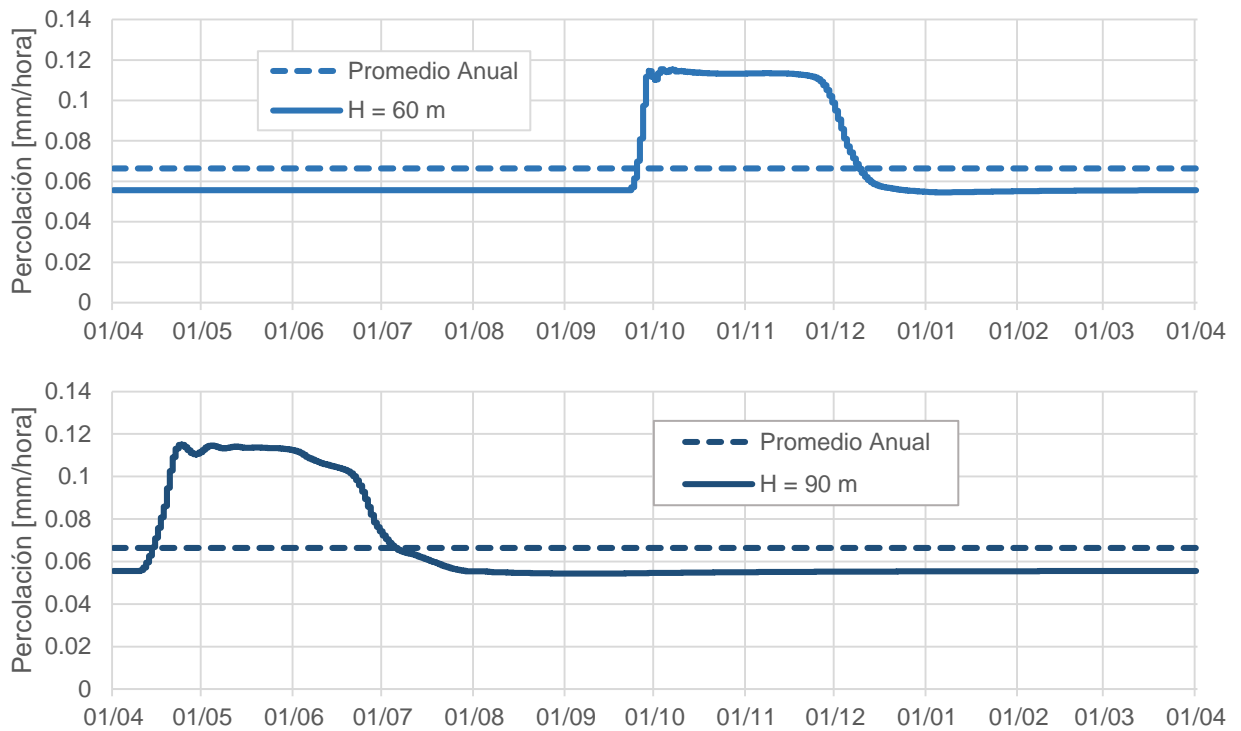


Figura 6-13. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material GRV, condición B.

6.2.2. Material: SBL

Para el caso base y material SBL se tiene el resultado de la Figura 6-14, donde se observa el caudal promedio aproximado de 0.06 mm/hora durante 5 meses, luego una disminución hasta el mínimo de menos de 0.01 mm/hora, para después dar lugar a valores más elevados que van hasta el máximo de 0.24 mm/hora. El fluido alcanza la base a los 1.12 años.

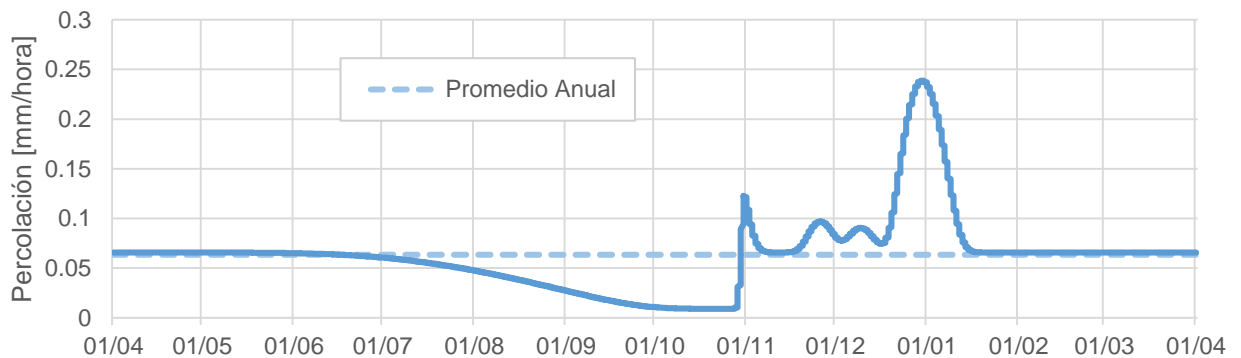


Figura 6-14. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición B.

El efecto del cambio climático se aprecia en la Figura 6-15. En el escenario moderado se tiende suavizar el comportamiento del caso base, pues ya no se observan cambios bruscos a lo largo del año, además el valor máximo (0.21 mm/hora) y el promedio (0.056 mm/hora) disminuyen levemente. En el escenario severo se da un cambio mucho más importante, donde para 5 meses se tienen los valores más elevados (0.06 mm/hora) y durante tres los valores mínimos (0.01 mm/hora). La percolación inicia a los 1.24 años para el cambio moderado y a los 1.81 años para el cambio severo.

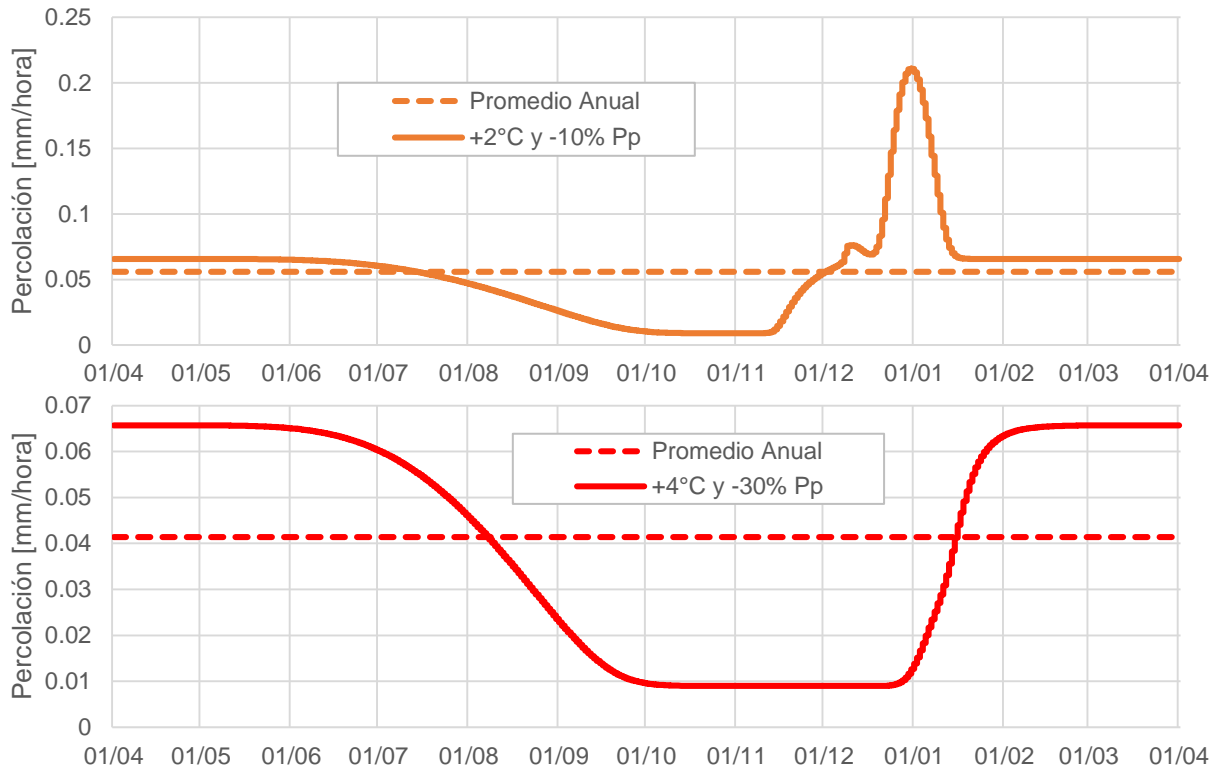


Figura 6-15. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición B.

Al modificar la profundidad (Figura 6-16) se observa que los valores permanecen muy cercanos al promedio en todo momento, a excepción de un mes donde se observa una baja al valor mínimo, más pronunciada en el caso H igual a 60 m. En ambas situaciones el promedio es de 0.063 mm/hora y el agua comienza a salir por la base a los 2.67 años, para H igual 60 m, y a los 4.22 años para una profundidad de 90 m.

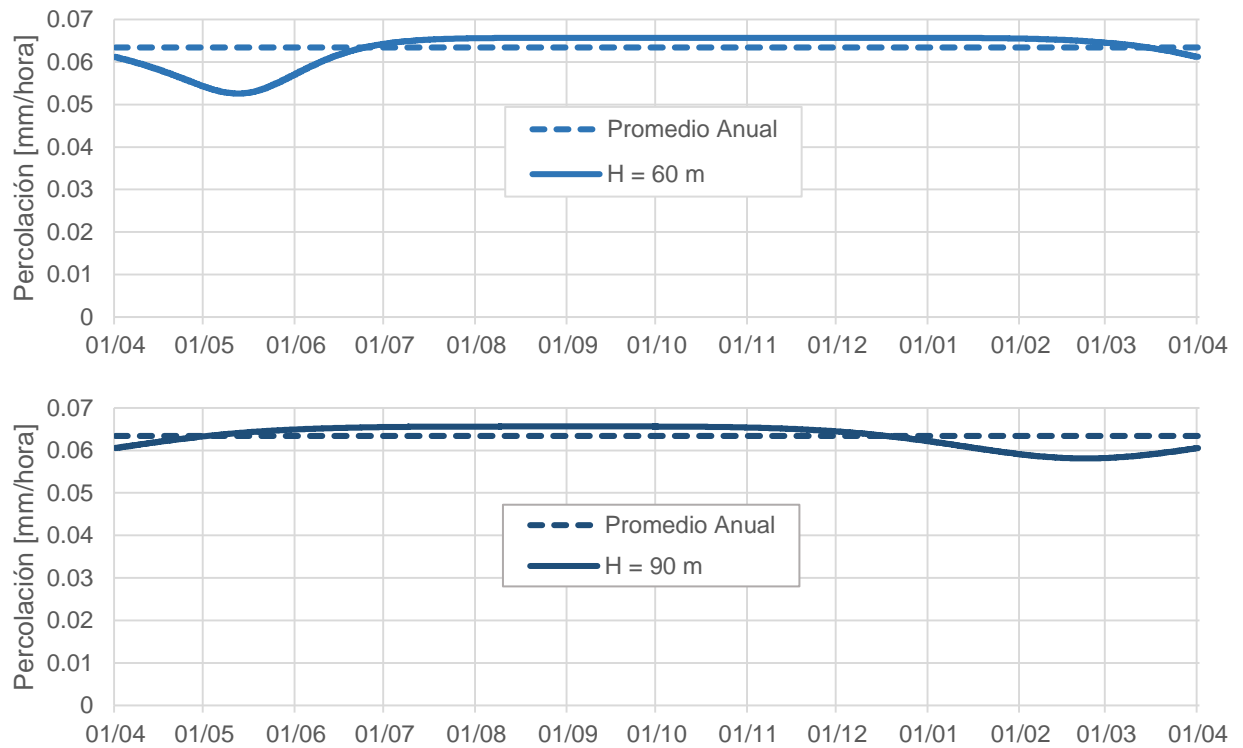


Figura 6-16. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición B.

6.2.3. Material: SLT

Para la combinación condición B y material fino, el agua no alcanza la base del sustrato modelado en todo el tiempo de simulación, para ningún escenario climático. Se presenta entonces, el perfil del sustrato y el contenido volumétrico de agua hacia el fin de los 40 años de simulación para el escenario actual en la Figura 6-17(a), donde se aprecia que el agua alcanza una profundidad de 22.92 m; para el escenario moderado (Figura 6-17(b)) el agua logra infiltrar hasta los 18.75 m y en el caso severo, los flujos alcanzan una profundidad de solo 11.82 m, como se advierte en la Figura 6-17(c).

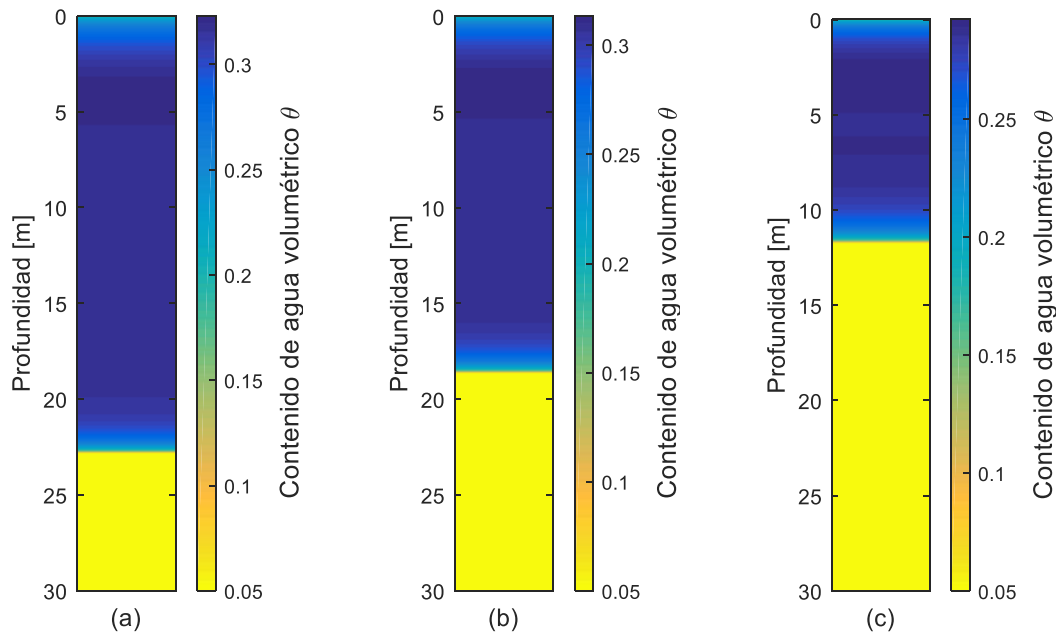


Figura 6-17. Perfil del sustrato y contenido de agua volumétrico para el tiempo final de simulación de 40 años. (a) Caso base, (b) escenario moderado y (c) escenario severo. Material SLT, condición B.

6.3. Condición C (Nieve en cuenca alta Río Copiapó)

6.3.1. Material: GRV

Para el caso base y el material GRV (Figura 6-18), se tienen los caudales más altos durante 3 meses, con un máximo de 0.013 mm/hora y el resto del tiempo se tienen valores cercanos o iguales al mínimo de casi 0.006 mm/hora. El promedio es de 0.0083 mm/hora y el agua llega a la base a los 27.61 años.

El efecto del cambio climático se muestra en la Figura 6-19. Para el caso moderado, el máximo y el mínimo se mantienen igual al caso base, las tasas elevadas se dan cerca de 4 meses continuos para dar paso, el resto del año, al valor mínimo. El promedio es levemente mayor y los flujos llegan a la base a los 26.58 años. En el escenario severo, la tasa máxima es un poco menor y los valores altos se dan durante solo dos meses, el resto del tiempo se tiene la misma tasa mínima que en el caso base. El promedio disminuye ligeramente, pero la percolación en la base inicia a los 30.77 años.

El efecto del cambio en la profundidad no puede ser analizado, ya que luego de los 40 años, el agua solo alcanza los 43.44 m, como se ve en la Figura 6-20.

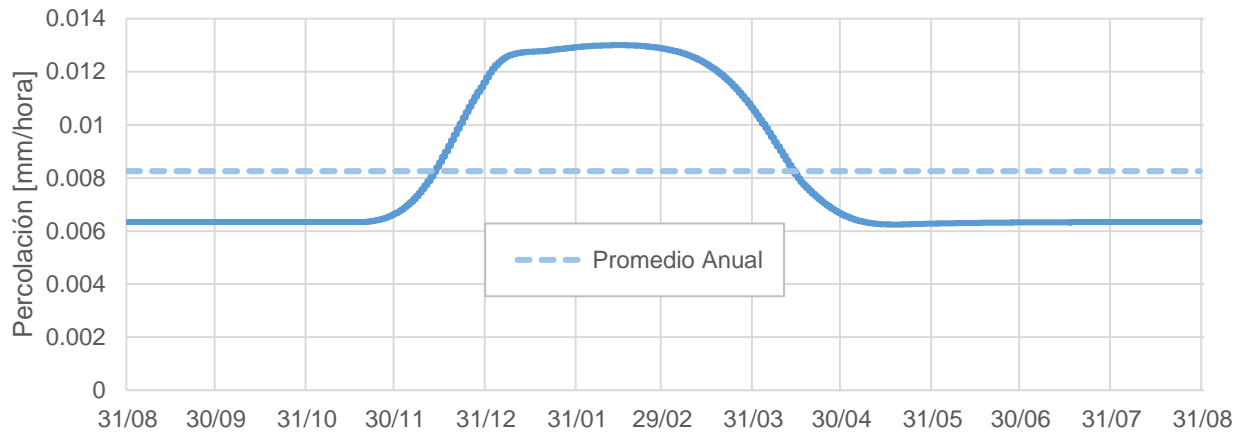


Figura 6-18. Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición C.

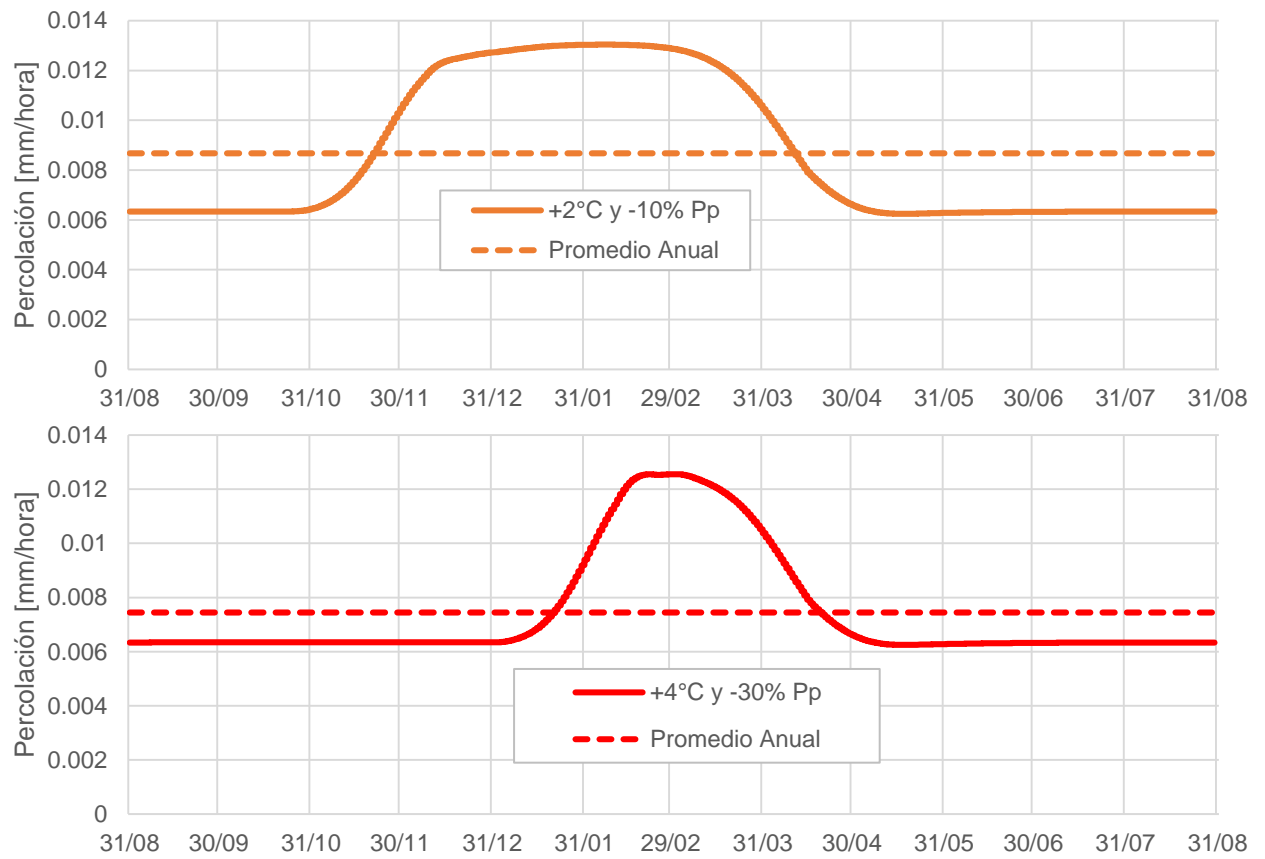


Figura 6-19. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición C.

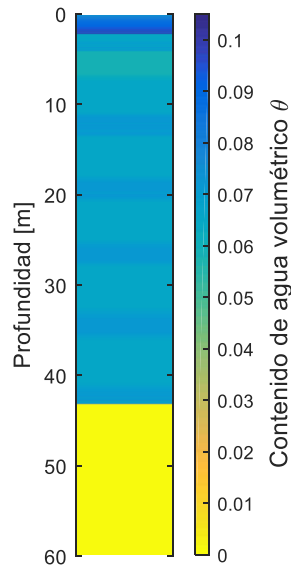


Figura 6-20. Perfil del sustrato y contenido volumétrico de agua al término de los 40 años de simulación, escenario actual, material GRV, condición C.

6.3.2. Material: SBL

Para el caso base y el material SBL, la percolación en la base se muestra en la Figura 6-21, ésta inicia a partir de los 6.27 años y las tasas varían sutilmente en torno al promedio de 0.008 mm/hora.

En cuanto al cambio climático, se tiene la Figura 6-22, donde para el escenario moderado el promedio aumenta un poco, al igual que los valores máximos y mínimos, pero el principal cambio es en el inicio de la percolación, que disminuye a los 6.07 años. En el escenario severo los valores máximo, mínimo y promedio disminuyen, las variaciones se vuelven más importantes (mayor coeficiente de variación) y los flujos alcanzan la base a los 6.62 años.

Al evaluar el impacto de cambios en la profundidad (Figura 6-23), se nota que la variación es nula a lo largo del año y la percolación es constante, alcanzando un promedio igual al del caso base (levemente menor para $H=90$ m). Los cambios ocurren en la llegada del agua a la base, lo que sucede a los 12.5 años para un perfil de sustrato igual a 60 m y a los 18.73 años para un sustrato de 90 m.

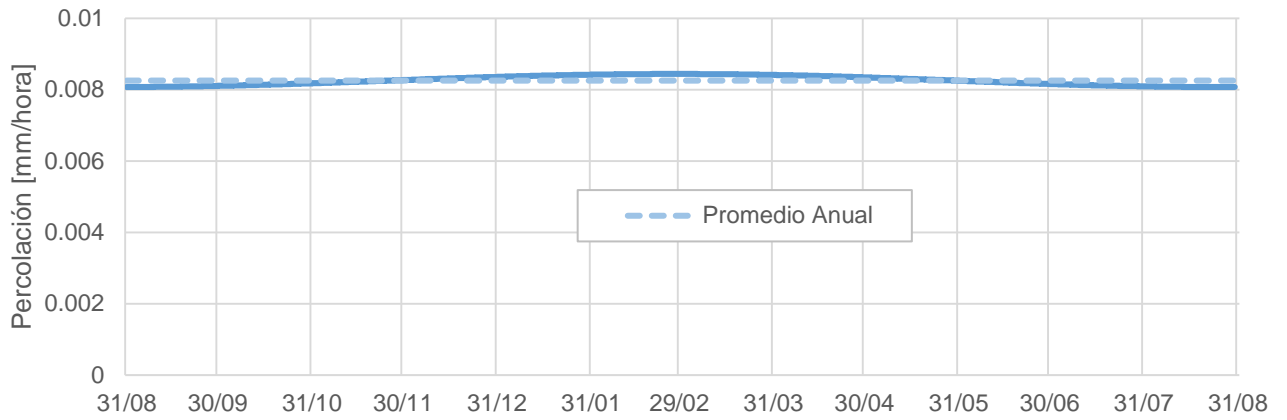


Figura 6-21. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición C.

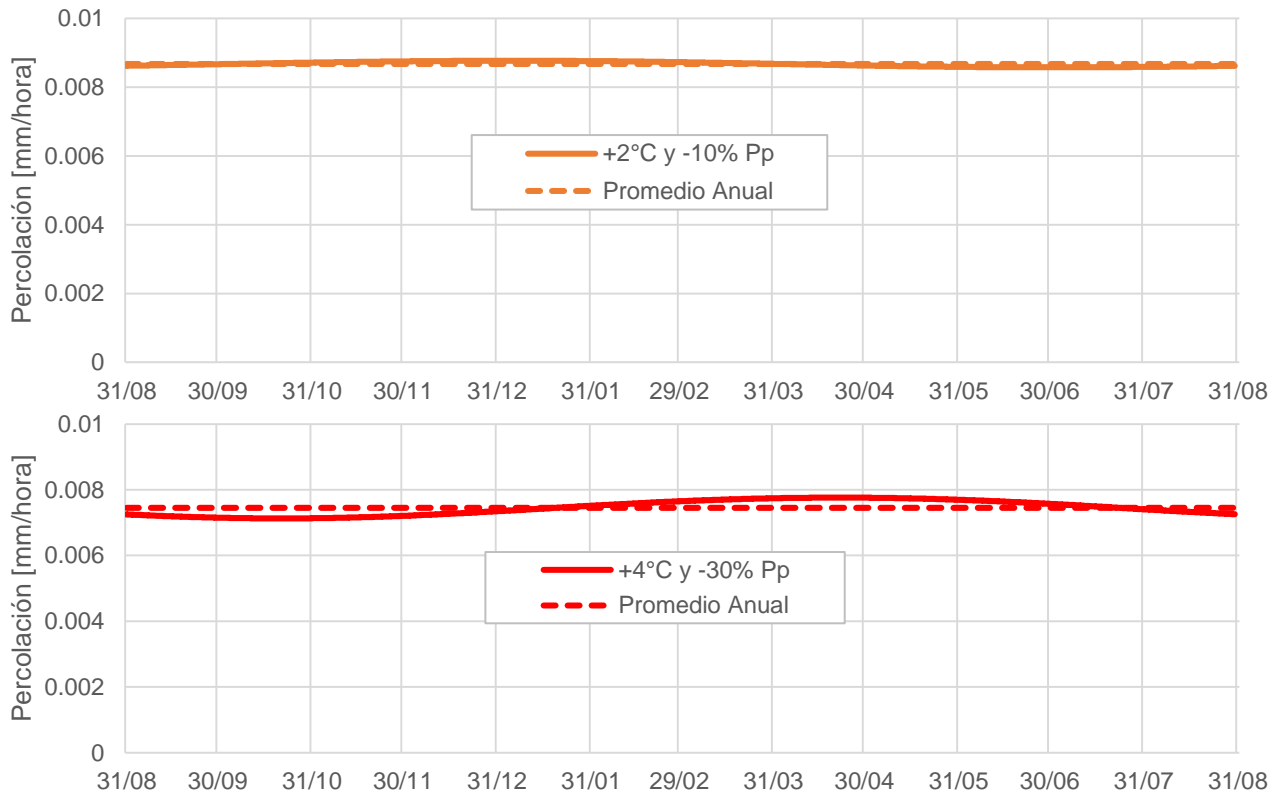


Figura 6-22. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición C.

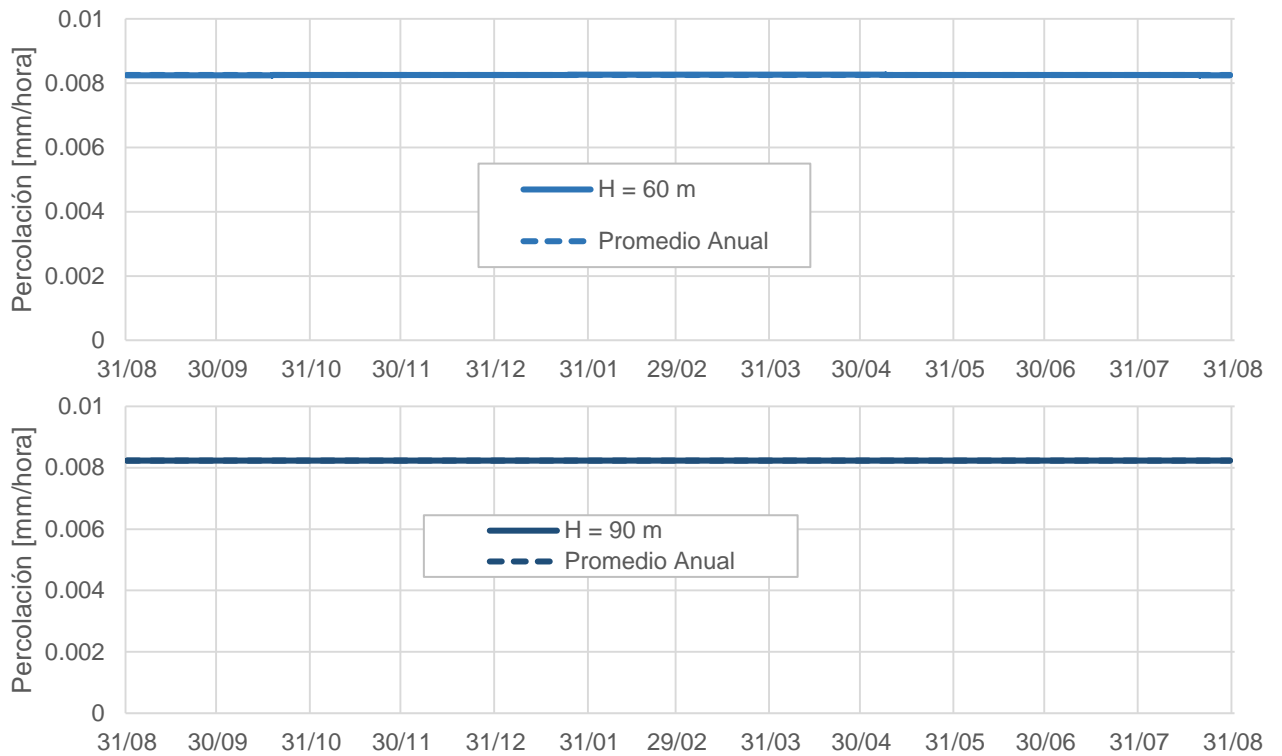


Figura 6-23. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición C.

6.3.3. Material: SLT

Para la combinación condición C y material fino, el agua no alcanza la base del sustrato modelado en los 40 años de simulación, bajo ningún escenario climático. Se presenta el perfil del sustrato y el contenido volumétrico de agua para el fin del periodo de simulación. El escenario actual se muestra en la Figura 6-24(a), donde se aprecia que el agua alcanza una profundidad de 11.22 m; para el escenario moderado (Figura 6-24 (b)) el agua logra infiltrar hasta los 11.73 m y en el caso severo, los flujos alcanzan una profundidad de solo 10.35 m, como es posible observar en la Figura 6-24 (c).

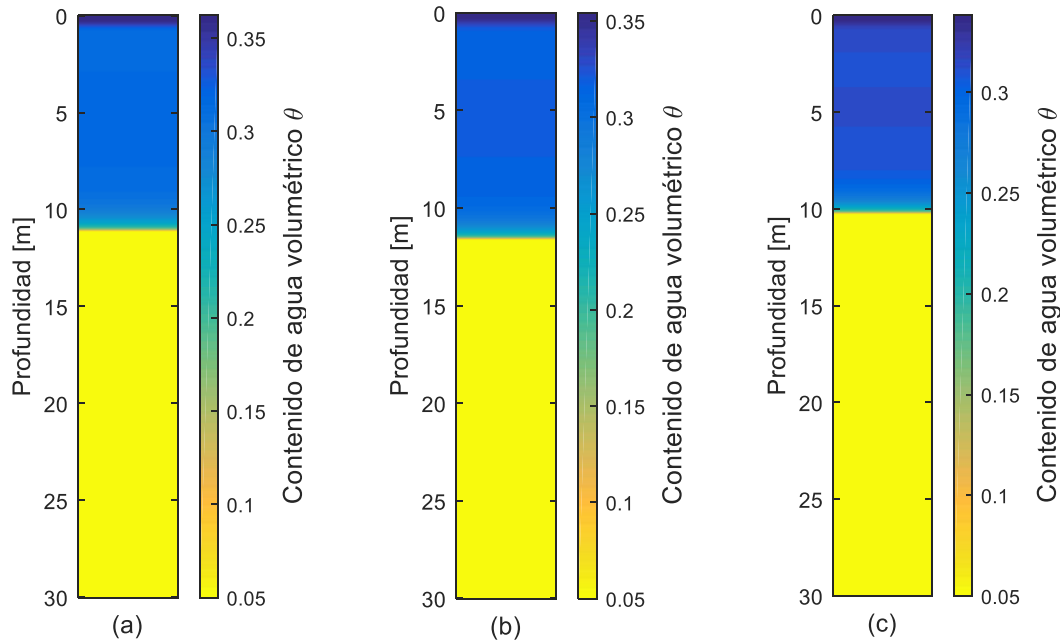


Figura 6-24. Perfil del sustrato y contenido de agua volumétrico para el tiempo final de simulación de 40 años. (a) Caso base, (b) escenario moderado y (c) escenario severo. Material SLT, condición C.

6.4. Condición D (Precipitación en cuenca alta Río Copiapó)

6.4.1. Material: GRV

Para el caso base de la condición B, la percolación ocurrida en el material GRV se muestra en la Figura 6-25. Ésta se da a partir de los 17.28 años, con cerca de un mes con las tasas por sobre el promedio de 0.014 mm/hora, se alcanza un peak de 0.026 mm/hora y un mínimo de 0.013 mm/hora.

El efecto del cambio climático se ve en la Figura 6-26, donde para el escenario moderado el comportamiento varía y cerca de 8 meses presenta una tasa casi constante cercanas al máximo de 0.013 mm/hora, en los meses restantes, los valores disminuyen alcanzando un mínimo de casi 0.01 mm/hora; el promedio disminuye con respecto al caso base a un valor de 0.012 mm/hora y la percolación a la base se retrasa a los 19.51 años.

En el caso del escenario severo, se puede advertir una mayor variación a lo largo del año, se cuentan tres máximos locales en todo el periodo, donde el mayor llega a un valor de 0.012 mm/hora, el valor mínimo supera los 0.006 mm/hora y el promedio disminuye a 0.008 mm/hora. En esta situación, el flujo de agua llega a la base a los 27.64 años.

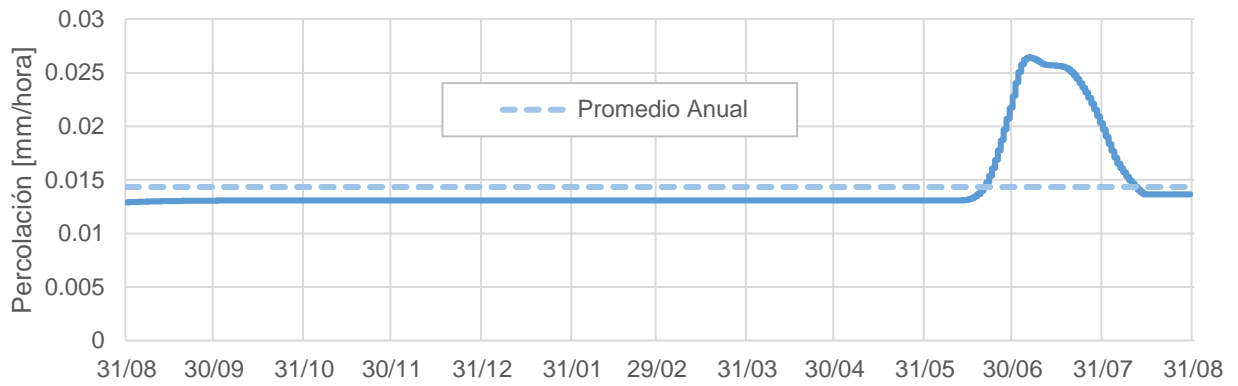


Figura 6-25 Percolación en la base del perfil para un año completo, material GRV, caso base, condición D.

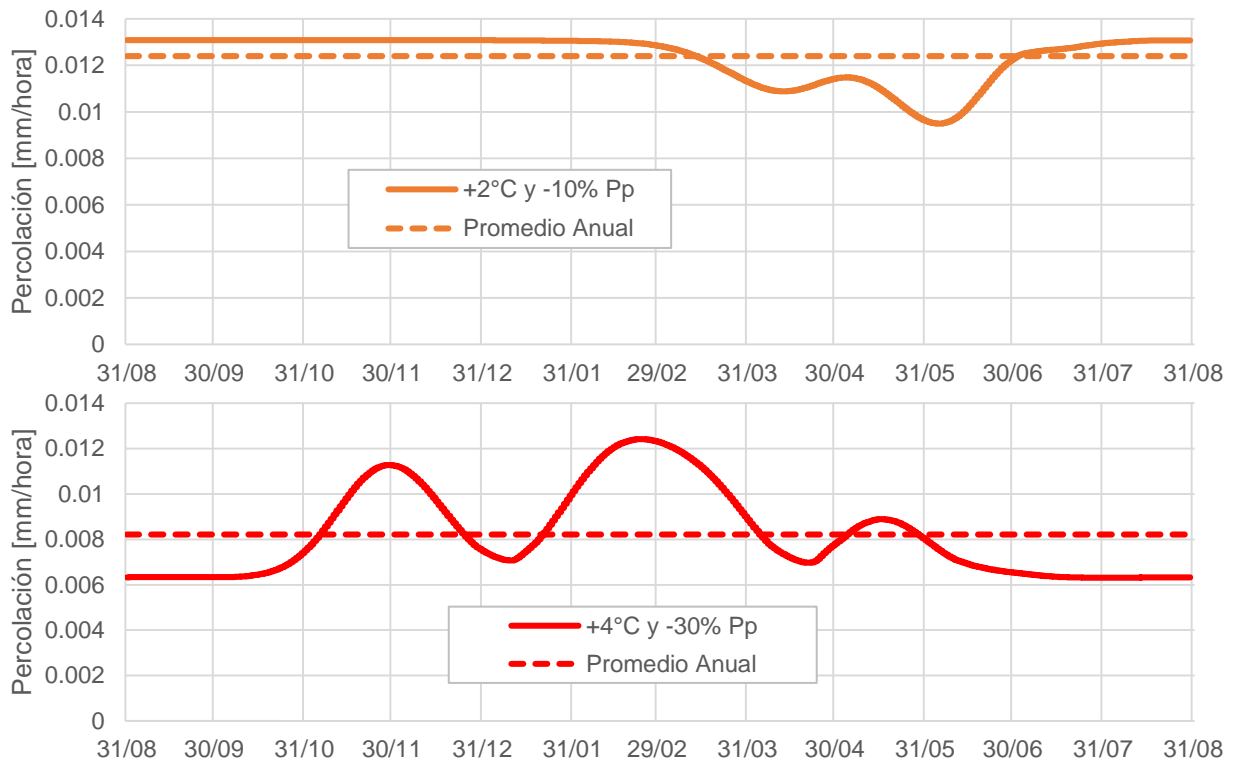


Figura 6-26. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material GRV, condición D.

Los cambios al modificar la profundidad se entregan en la Figura 6-27. En el caso H igual 60 m, se tiene el mismo valor mínimo y promedio que en el caso base, una disminución leve en la tasa máxima (0.024 mm/hora) y un aumento en el tiempo de inicio del paso del fluido por la base a 34.62 años. En la simulación con una profundidad de 90 m, el agua no alcanza la base y se muestra el contenido volumétrico de agua para el final de la simulación, donde se observa que los flujos alcanzan una profundidad de 69.5 m en 40 años.

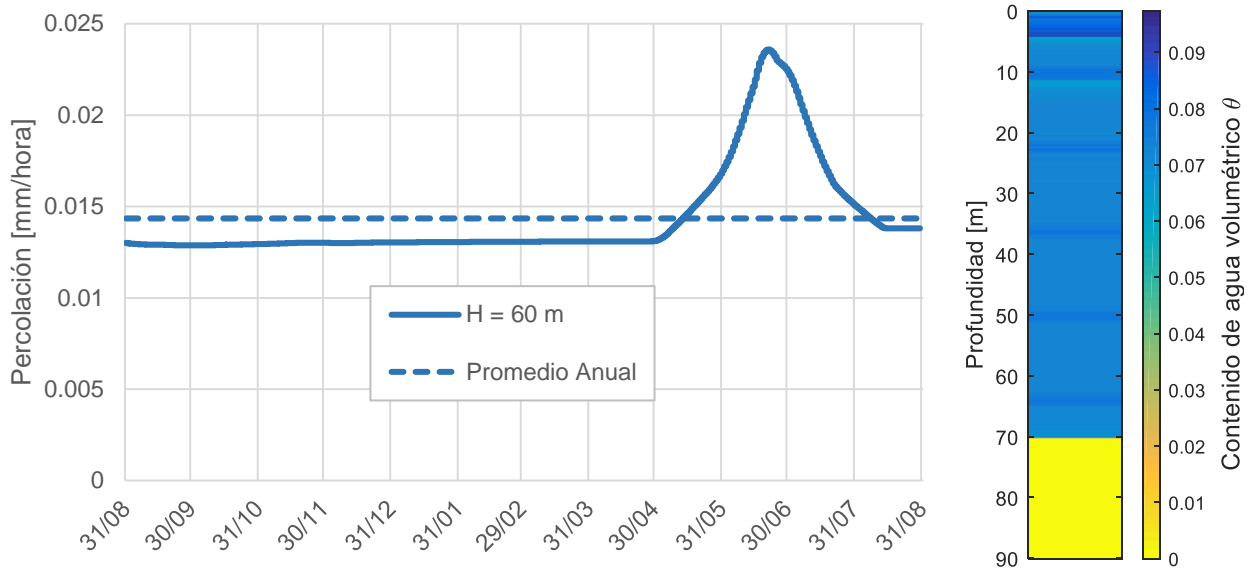


Figura 6-27. Percolación con una profundidad igual a 60 m a la izquierda. A la derecha se presenta el perfil del sustrato y el contenido de humedad para H igual a 90 m. Material GRV, condición D.

6.4.2. Material: SBL

Para el material SBL, el caso base (Figura 6-28) presenta dos aumentos claros a lo largo del año, la tasa máxima es de 0.026 mm/hora para el aumento más importante y el resto del año se tienen los valores mínimos cercanos a los 0.009 mm/hora. El promedio es de aproximadamente 0.014 mm/hora y el inicio de la percolación es a los 4.31 años.

Al evaluar el impacto del cambio climático (Figura 6-29) se advierte en el escenario moderado el comportamiento básicamente igual al del caso base, con dos máximos locales. El mínimo se mantiene igual, pero el valor máximo y el promedio disminuyen a 0.021 y 0.012 mm/hora, respectivamente. El agua alcanza la base a los 4.84 años.

Para el escenario severo, ya no es posible notar los dos aumentos previamente mencionados, y la tasa permanece oscilando suavemente en torno al promedio de 0.0076 mm/hora durante todo el año. El valor máximo es de 0.0078 mm/hora, el mínimo de 0.0073 mm/hora y el flujo de agua llega a la base a los 6.52 años.

Al analizar los cambios que producen aumentos en la profundidad (Figura 6-30), se vuelve a apreciar la presencia de los dos aumentos durante el año y en ambos casos el mínimo y el promedio se mantiene prácticamente igual al caso base. Para H igual 60 m el valor máximo disminuye a 0.021 mm/hora y la percolación en la base inicia a los 8.49 años. Para la profundidad de 90 m, la tasa máxima es de 0.02 mm/hora y el flujo llega a la base a los 12.64 años.

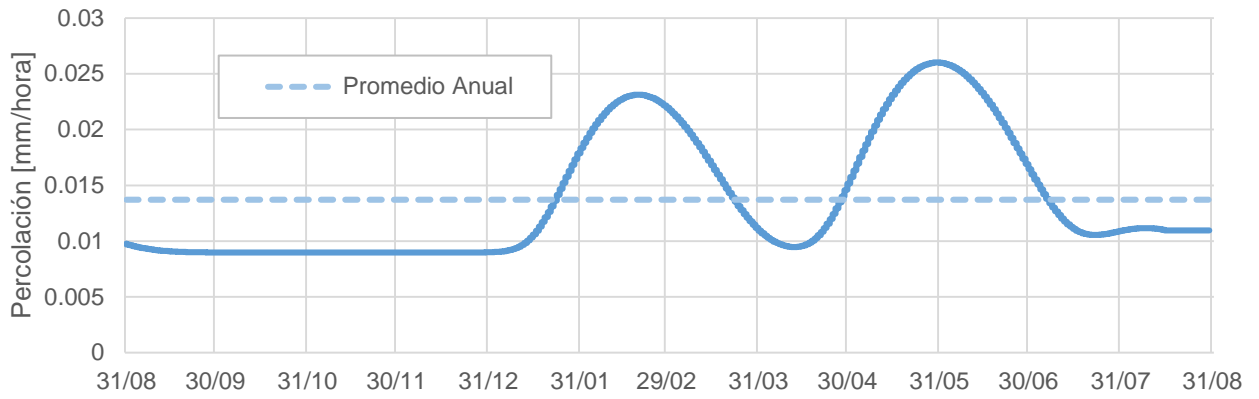


Figura 6-28. Percolación en la base del perfil para un año completo, material SBL, caso base, condición D.

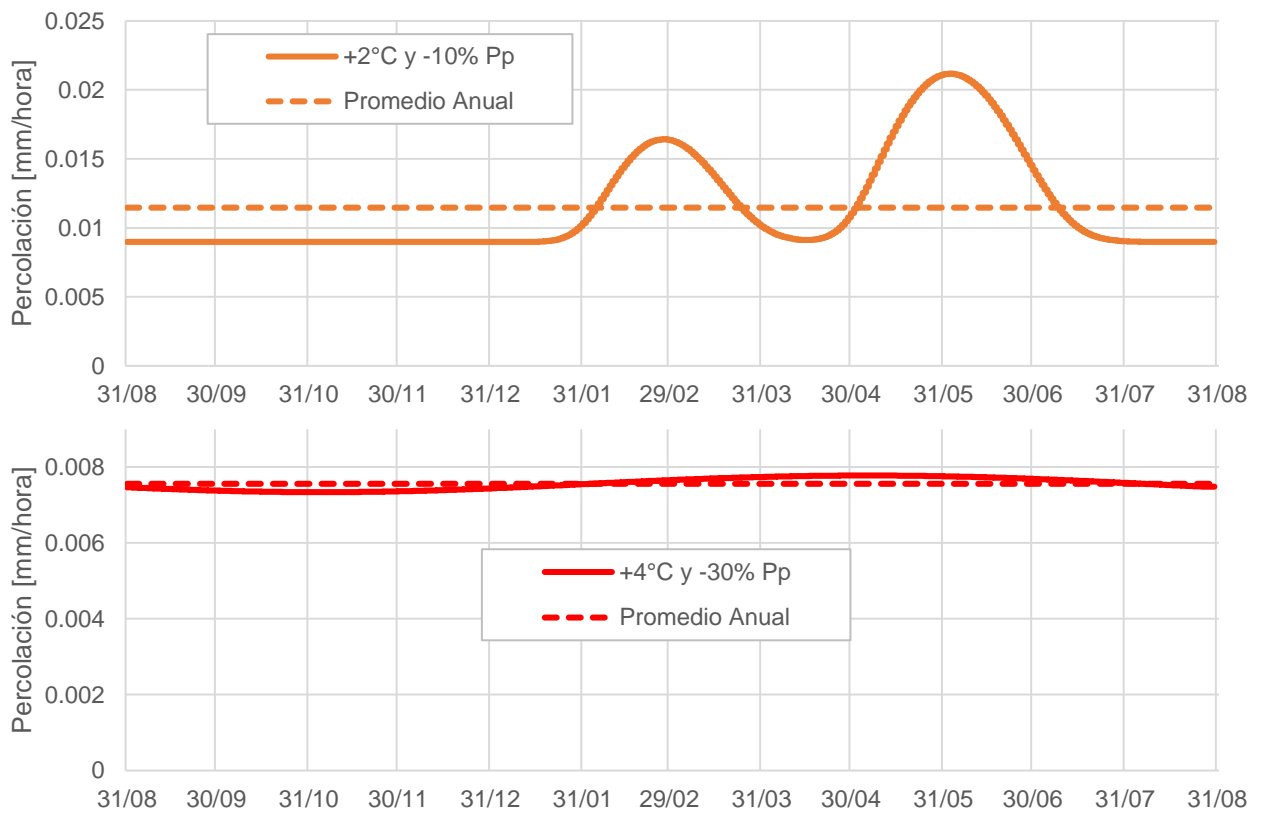


Figura 6-29. Percolación para escenarios climáticos moderado (arriba) y severo (abajo), material SBL, condición D.

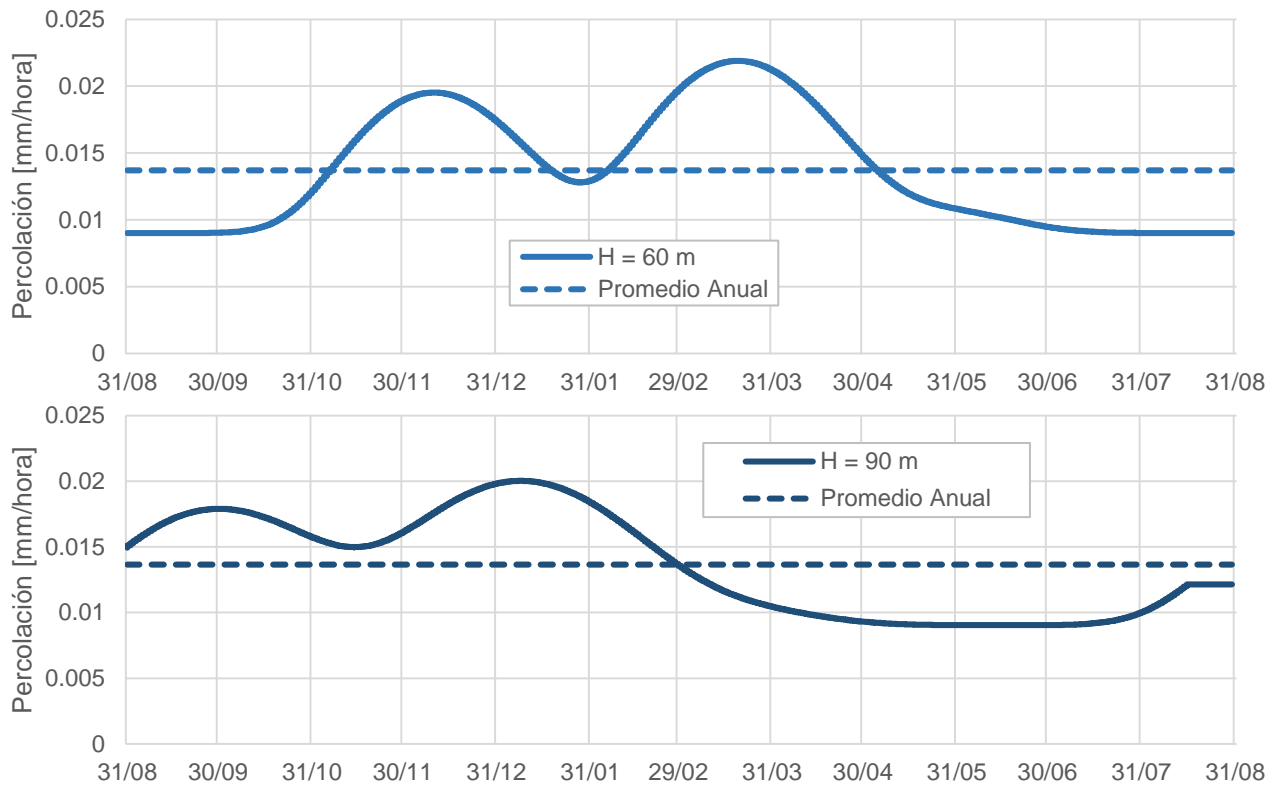


Figura 6-30. Percolación frente a variaciones en la altura del sustrato. Profundidad igual a 60 m. (arriba) y 90 m. (abajo), material SBL, condición D.

6.4.3. Material: SLT

Para el material más fino y la condición climática D, los flujos no llegan a la base del sustrato en los 40 años de simulación, bajo ningún escenario climático. En lugar de las tasas en la base, se entrega el perfil del sustrato y el contenido volumétrico de agua para el fin del tiempo de simulación. El agua en el escenario actual llega a los 2.13 m, como se muestra en la Figura 6-31(a); para el escenario moderado el flujo de agua infiltrar hasta los 1.8 m y en el caso severo, se llega a una profundidad de solo 1.29 m, como es posible notar en la Figura 6-31(c).

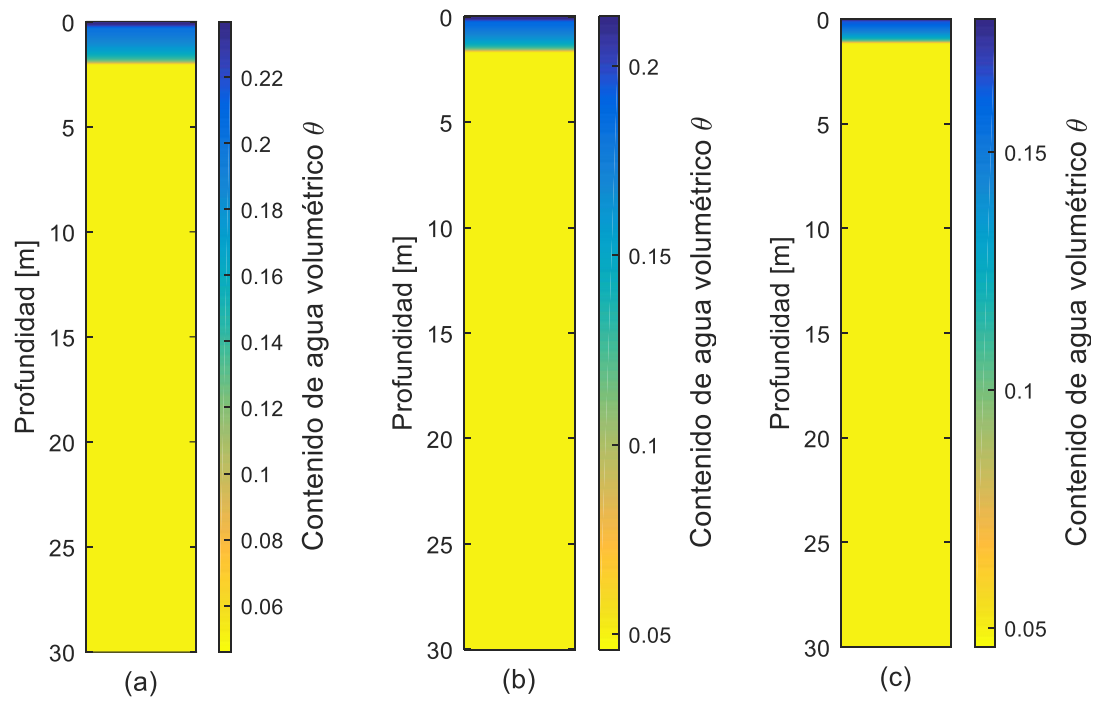


Figura 6-31. Perfil del sustrato y contenido de agua volumétrico para el tiempo final de simulación de 40 años. (a) Caso base, (b) escenario moderado y (c) escenario severo. Material SLT, condición D.

7. Discusión y Conclusiones

7.1. Discusión de los resultados

A continuación, se realiza un análisis de los resultados presentados en el Capítulo 6, el Anexo B y en el Anexo C. La discusión se divide según condición hidrológica y termina con comentarios sobre los resultados y el modelo.

- Condición A (Nieve en cuenca Mapocho en los Almendros)

Si se refiere sobre los resultados para la condición hidrológica A, es posible señalar que el material que más tempranamente inicia la percolación en la base es el SBL (entre 1 y 4 años), luego GRV (entre 4 y 13 años) y por último SLT (entre 18 años e incluso no alcanza la base en los 40 años). Para cada material, si se ordenan de forma ascendente los tiempos de llegada de los flujos a la base, las simulaciones quedan: caso base, escenario moderado, escenario severo, aumento a H=60 m y aumento a H=90 m.

Los caudales máximos anuales más elevados se encuentran en el material SBL (sobre los 0.4 mm/hora) para el caso base y el escenario moderado; en seguida se tiene el caso base para el material GRV (0.25 mm/hora) y luego nuevamente el material SBL para el escenario actual, pero con variaciones en la altura (0.22 mm/hora para H=60 m y 0.16 mm/hora para H=90 m). De manera ordenada, sigue el material GRV en el escenario moderado, GRV con H igual 60 y GRV con H igual 90 m; para finalmente dar paso a los caudales máximos más bajos, que corresponden al escenario climático severo y al material SLT.

Los mínimos anuales encontrados son, en general, más elevados para el escenario climático actual y las simulaciones con profundidades aumentadas. En estos casos los mínimos están por sobre los 0.05 mm/hora. Si la profundidad se limita solamente al caso base (H=30 m), el material fino es el que posee las tasas mínimas más elevadas, luego GRV y en último lugar el material SBL, para todos los escenarios climáticos modelados.

Las tasas promedio más elevadas (del orden de 0.07 mm/hora) se dan en el escenario actual, con valores muy similares para los materiales GRV y SBL. Nuevamente la excepción es el material más fino, que presenta tasas promedio de 0.06 mm/hora, al igual que los materiales más gruesos, pero para el escenario climático moderado. SLT tiene un promedio levemente menor (0.055 mm/hora) para el caso moderado. Por último, el escenario severo es el que provoca los promedios más bajos, del orden de 0.034 mm/hora.

La variabilidad de la percolación durante el año se estudia a través del coeficiente de variación. Según este parámetro, los materiales más gruesos son los más variables, mientras que el material SLT tiene los coeficientes de variación incluso un orden menor. Este coeficiente también se ve afectado por los cambios en la profundidad, siendo mucho mayor para las simulaciones con H=30 m.

Sobre la percolación acumulada para un año completo, en el periodo que se ha alcanzado el régimen estacionario (sin variaciones de un año a otro), el valor está directamente relacionado con las tasas de derretimiento que son impuestas en la superficie del sustrato. Así, para el escenario climático actual, frente a derretimientos de 616.5 mm que potencialmente ingresan al material al año, los valores acumulados de las tasas en la base entregan valores entre 616 y 617 mm, independiente de las profundidades del perfil de sustrato. Para el escenario moderado y severo, el derretimiento anual suma 529 y 298 mm, correspondientemente, mismos valores de percolación observados en la base para los materiales GRV y SBL. El material SLT es la excepción a lo anterior, entregando una percolación acumulada de 526 mm para el escenario actual, 485 mm para el moderado y 294 mm para el severo.

Al analizar el balance de masa (Figura C-1), se observa que en esta condición las variables evaporación y escorrentía superficial son prácticamente nulas para los materiales gruesos. En el caso del material más fino, existe un porcentaje más importante de escorrentía que disminuye la infiltración total al sustrato. El volumen de agua almacenado es otra variable importante de comentar, pues en el material fino se tienen entre 10-11 m de agua, en el material GRV entre 2-3 m y para el material SBL el volumen almacenado no supera el metro. Sobre el agua total que alcanza la base en todo el periodo de simulación, se tiene que el valor acumulado mayor se da para el material SBL, seguido de GRV y en último lugar SLT.

Al comparar la percolación en la base con las tasas de derretimiento impuestas en la superficie, se observa que de un máximo de cerca de 6 mm/hora para el caso base, se pasa a tasas máximas de cerca del 7% de este valor (para SBL) e incluso menores para GRV y SLT, disminuyendo a cerca de un 4% y 1%, respectivamente. Para el material SLT la disminución es mayor a causa de la menor infiltración al sustrato por la evaporación y escorrentía, como ya fue mencionado. Para el escenario moderado, de un máximo de 5.4 mm/hora, se tiene una tasa de percolación máxima del 7% para SBL, del 2% GRV y 1% para SLT (2% si se considera el máximo valor de infiltración efectiva, que es 3 mm). En el escenario severo, tanto el derretimiento máximo en superficie como la infiltración total es de 2.8 mm/hora, lo que genera tasas máximas en la base del 2% para los materiales gruesos y del 1% para SLT.

- Condición B (Precipitación en cuenca Mapocho en los Almendros)

Para la condición hidrológica artificial B, si se refiere a los tiempos de llegada del flujo a la base, en primer lugar destaca el material SBL con tiempos entre 1 y 4 años; el material GRV por su parte, demora entre 4 y 13 años. Al ordenar las simulaciones se tiene, al igual que en la condición anterior, que los tiempos más bajos ocurren para el caso base, escenario moderado, severo, H=60 m y H=90 m, en ese orden específico. El material SLT no logra alcanzar la base.

En cuanto a los caudales máximos, los valores más elevados se tienen en el caso base y moderado para el material SBL, seguido muy de cerca por el caso base del material GRV, donde todos superan los 0.2 mm/hora. Más atrás se tiene el resto de las simulaciones del material GRV, con valores que rondan los 0.12 mm/hora y ya como

valores más bajos se tiene el resto de las simulaciones con el material SBL, con tasas cercanas a los 0.06 mm/hora.

Las tasas mínimas más elevadas se dan en los casos donde el perfil del sustrato es aumentado (H=60 m y H=90 m) y están por sobre los 0.05 mm/hora. Ahora, si se limita el análisis a una altura de 30 m, el material GRV tiene caudales mínimos de aproximadamente 0.027 mm/hora y el material SBL menores a 0.01 mm/hora, para todos los escenarios.

Los valores promedios anuales más altos se dan para el escenario actual, sin importar la altura del perfil del sustrato. En el material GRV el promedio es aproximadamente 0.066 mm/hora, seguido muy de cerca por los 0.063 mm/hora del material SBL. El promedio se ve disminuido al orden de 0.05 mm/hora para el escenario moderado y a 0.04 mm/hora en el severo, para ambos materiales.

La variación anual de los caudales en general es mayor para la altura del sustrato igual a 30 m y el material SBL. El coeficiente de variación disminuye para H=60 m y H=90 m.

A diferencia de la condición A, donde la percolación anual acumulada era prácticamente igual a las tasas de derretimiento, en la condición B se tiene un valor de 583 mm para el material GRV y de 556 mm para el material SBL, bajo el escenario actual que presentaba una precipitación anual de 668 mm. En el escenario moderado la precipitación anual es de 601 mm, la percolación acumulada para GRV es de 517 mm y la de SBL de 491 mm. Para el escenario severo la precipitación anual impuesta es de 468 mm, el flujo anual acumulado en la base del material más grueso es de 378 mm y para SBL es de 363 mm.

Las discrepancias anteriores, son explicadas si se observa el balance de masa de la Figura C-2. En la gráfica se aprecia que las diferencias se deben a la mayor evaporación ocurrida en el material SBL, que es alrededor de un metro mayor si la variable se acumula en los 40 años. A pesar de lo anterior, si se discute sobre el valor acumulado de la percolación en la base, el material SBL sigue siendo el que más caudal genera. El material más fino es el único que genera escorrentía superficial y se caracteriza por las elevadas cantidades de aguas evaporadas y almacenadas en su interior, si se compara con los otros materiales.

Si se compara la percolación en la base con la precipitación impuesta en la superficie, se tiene que de un máximo de 9.8 mm/hora en el caso base, se pasa a tasas de percolación en la base máximas de un 2% para GRV y 2.4% para SBL. Para el escenario moderado, de una precipitación máxima de 8.8 mm/hora, se pasa a 1.4% para GRV y 2.4% para SBL. En el escenario severo se tiene un máximo en la superficie de 6.9 mm/hora y pasan a percolaciones en la base de un 1.7% para GRV 1% para SBL.

Realizando el mismo ejercicio anterior, pero esta vez comparando con la infiltración total en la superficie, es decir, considerando la disminución por escorrentía y evaporación, se observa que de una infiltración máxima de 9 mm/hora la percolación máxima en la base es de un 2.2% y un 2.6% para GRV y SBL, respectivamente. Para el

escenario moderado y severo, la infiltración máxima coincide con la precipitación máxima por lo que los valores son los mismos presentados previamente.

- Condición C (Nieve en cuenca alta del Río Copiapó)

La condición hidrológica con un manto de nieve efímero, al tener potencialmente menor cantidad de agua que puede infiltrar al sustrato a causa del derretimiento anual, con 72 mm en el escenario actual, 76 mm en el moderado y 65 mm en el severo, entrega percolaciones en la base para solo 8 de 15 simulaciones.

Los tiempos de llegada de los flujos a la base del perfil de sustrato siguen siendo menores para el material SBL (entre 6 y 18 años) y es el único material que logra alcanzar la base para todos los casos. El material GRV demora entre 26 y 30 años para H=30 m, mientras que en el resto de los casos el agua no llega más allá de los 44 m. El material SLT en ningún caso genera percolación en la base y los flujos logran superar levemente los 10 m de profundidad.

En esta condición, las tasas máximas más elevadas las genera el material GRV (0.013 mm/hora aprox.) y SBL genera tasas máximas del orden de 0.008 mm/hora. En ambos materiales, en orden decreciente los valores máximos son para el escenario moderado, actual y severo.

En cuanto a los valores mínimos anuales, los valores elevados los posee el material SBL (0.008 mm/hora aprox. Para todos los casos exceptuando los 0.007 mm/hora para el escenario severo). El material GRV tiene tasas mínimas levemente inferiores (0.006 mm/hora aprox.).

Los promedios obtenidos en las simulaciones para la condición C son muy similares (entre 0.007 y 0.008 mm/hora). Los promedios más altos se dan para el escenario moderado; luego para el actual, donde no existen grandes diferencias dadas por variaciones en la profundidad, y los menores para el escenario severo.

La heterogeneidad de las percolaciones en la base dentro del año, según el coeficiente de variación, es mayor para el material GRV. Disminuye para el material SBL y dentro de este, el aumento de la profundidad genera tasas prácticamente constantes durante el año.

El comportamiento de la percolación anual acumulada vuelve a ser igual a la condición A. Al no ocurrir evaporación, para el escenario actual se tiene un valor acumulado de la percolación igual a 72 mm, para el escenario moderado 76 mm y para el escenario severo 65 mm.

Al analizar el balance de masa Figura C-3, se advierte la nula evaporación. La escorrentía es varios ordenes de magnitud menor a las otras variables y la percolación total acumulada en la base en los 40 años vuelve a ser la más alta para el material SBL. Para SLT, otra vez se tienen altos volúmenes almacenados y cero infiltración en la base.

Al comparar la tasa de derretimiento máxima impuesta en la superficie, se tiene que de un máximo de 3.2 mm/hora en el caso base, la percolación máxima generada en la base del sustrato es de un 0.4% de este valor para GRV y un 0.3% para SBL. En los escenarios moderado y severo los derretimientos máximos son de 2.8 y 2.7 mm/hora, correspondientemente, lo que significa una percolación de cerca de 0.5% para GRV y 0.3% para SBL en ambos casos. En esta condición, la escorrentía y evaporación es prácticamente nula, por lo que la infiltración total coincide con las tasas de derretimiento.

- Condición D (Precipitación en cuenca alta del Río Copiapó)

En la condición artificial D, 9 de las 15 simulaciones logran llegar a la base del sustrato en los 40 años de simulación. El material SBL es el que lo consigue en menos tiempo, iniciando la percolación entre 4 y 12 años; por su parte el material GRV demora entre 17 y 34 años. Las simulaciones que generan tasas en la base de manera más rápida son el escenario actual, moderado y luego el severo; las variaciones de la profundidad lo retrasan aún más, siendo el caso H=90 m el que más tiempo demora.

En cuanto a los caudales máximos, los valores más altos ocurren para el escenario actual (H=30 y H=60 m) en ambos materiales, donde se superan los 0.02 mm/hora. El escenario severo disminuye a cerca de 0.01 mm/hora estas tasas máximas.

Los caudales mínimos son, en general, más elevados para el material GRV que para SBL, aun cuando las diferencias son muy bajas (todos del orden de 0.01 mm/hora). Los mínimos más bajos ocurren para el escenario severo con valores menores a 0.007 mm/hora en ambos materiales.

Los promedios anuales más altos para esta condición se dan para el escenario actual, sin distinción en la altura del sustrato. Para el material GRV y SBL el promedio es aproximadamente 0.014 mm/hora. Este valor se ve disminuido levemente para el escenario moderado a 0.012 mm/hora para GRV y 0.011 mm/hora para SBL. Ya en el escenario severo el promedio baja de los 0.01 mm/hora en ambos materiales.

El coeficiente de variación en este caso, indica una mayor heterogeneidad de las tasas para el material SBL y H=30 m. El valor en general, se ve disminuido ante aumentos de la profundidad del material del sustrato.

La percolación anual acumulada en este caso, tiene un valor de 126 mm para el material GRV y 120 mm para el material SBL, en el escenario actual, donde se ingresa una precipitación anual de 237 mm. Para el caso moderado se tienen 109 y 101 mm para GRV y SBL, respectivamente, comparado con una precipitación anual de 213 mm. En el escenario severo, donde la precipitación impuesta es de 166 mm, se da una percolación anual acumulada de 72 mm para GRV y 66 mm para SBL.

Las discrepancias una vez más se explican con el balance de masa de la Figura C-4, ya que se observa una mayor evaporación en el material SBL, que es alrededor de 0.2-0.3 m mayor si la variable se acumula en los 40 años. Sin embargo, el valor acumulado de la percolación en la base es notablemente más grande para el material SBL, debido al tiempo de inicio de la percolación más temprano. El material SLT en esta

condición, destaca por las dominantes cantidades de aguas evaporadas, lo que explica que los flujos apenas superen los 2 m de profundidad.

Al relacionar la precipitación máxima impuesta en la superficie (5.8 mm/hora, en el caso base) con la percolación máxima generada en la base del sustrato, se tiene que existe una disminución al 0.4% de este valor para los materiales gruesos. Para el escenario moderado, de una precipitación máxima de 5.2 mm/hora, se pasa a un 0.25% de este valor para el material GRV y a un 0.4% para SBL. En el escenario severo, de un máximo de precipitación igual a 4.1 mm/hora se pasa a un 0.3% para GRV y 0.2% para SBL. En esta condición, la evaporación no afecta la infiltración máxima.

- Comentarios sobre resultados y modelo.

Los resultados obtenidos se consideran adecuados, debido principalmente al uso de la discretización más fina posible por el programa HYDRUS (1001 nodos), donde para la zona cercana a la superficie se refina el espaciado, generando una discretización espacial del orden de centímetros (valor recomendado por el manual del programa para la discretización temporal empleada en las condiciones de borde).

Lo anterior se refuerza al evaluar el valor del error relativo en el balance masa, que para toda simulación fue menor al 1%. De acuerdo al manual del programa, la estimación del valor relativo no se relaciona con el volumen total en el dominio (lo que en general entrega bajos errores), si no que se expresa en términos del valor máximo de dos cantidades: la sumatoria de los cambios en el contenido de humedad en todos los elementos de la grilla y la suma del valor absoluto de todos los flujos que entran y salen del dominio. Lo anterior significa que el criterio es mucho más estricto, lo que asegura que la precisión de la solución numérica es aceptable.

7.2. Conclusiones y recomendaciones

Como resultados generales, se puede concluir que la condición que más percolación en la base genera, es la condición A, seguida por B, D y finalmente la condición C. Esto está directamente relacionado con la ocurrencia de mayores precipitaciones en la zona de la cuenca alta del río Mapocho que en la cuenca alta del río Copiapó.

En cuanto a los materiales, SBL resulta ser el que más rápido transporta el fluido a través del sustrato simulado, ya que es más permeable que GRV bajo las condiciones no saturadas impuestas. Lo anterior es congruente con lo revisado en otros trabajos donde se emplean estos dos materiales gruesos (Dawood & Aubertin, 2012). El material SLT, al ser el material más fino, es el que tiende a acumular mayor volumen de agua en su interior, debido a su más alta capacidad de retención.

En la mayoría de los casos el cambio climático implica una disminución en las tasas de percolación en la base del sustrato, ya que por lo general significa una baja en la variable de entrada del programa HYDRUS-1D (menores precipitaciones y derretimientos). En las condiciones B y D el efecto es claro, pues en los escenarios se

impone directamente un porcentaje menor de precipitación y un aumento en la evaporación potencial (debido al aumento de la temperatura).

Para la condición A, el aumento en las temperaturas implica más pérdidas por evaporación o sublimación del manto de nieve en el modelo puntual (CHRM), lo que sumado a la disminución de la precipitación y menor acumulación de nieve, resulta en una disminución del derretimiento total en los escenarios futuros planteados.

La excepción a lo anterior es la condición C, ya que el escenario moderado presenta un mayor derretimiento que el escenario actual. El aumento de 2°C y disminución al 90% de la precipitación resulta en una baja en la evaporación del manto y un aumento en el derretimiento, lo que se explica por el incremento en la energía del manto (que depende de la temperatura) y una menor duración del manto nival (Jara, 2017).

El efecto principal de un aumento en la altura del sustrato, es la tendencia a disminuir las tasas máximas y aumentar las mínimas, es decir, disminuir las variaciones extremas a lo largo del año, logrando un caudal más estable durante los 365 días del año. Esto es claro al observar los menores valores en el coeficiente de variación para cada caso. Otro efecto importante que ocurre al variar la profundidad, es el alto impacto sobre los tiempos de inicio de percolación en la base, donde un aumento de H al doble (60 m), significa poco más del doble de tiempo con respecto al caso H=30 m; mientras que un aumento de H al triple (90 m), equivale a poco más de 3 veces el tiempo base.

Los resultados presentados en este trabajo muestran el comportamiento hidrogeológico de distintos materiales bajo condiciones hidroclimáticas muy diferentes, se estudia el movimiento de los flujos de agua en una dimensión, para una serie climática de precipitación/derretimiento y evaporación de un año con detalle horario reiterado por un periodo de 40 años.

Las numerosas simulaciones llevadas a cabo son de gran utilidad como un primer paso para comprender el complejo comportamiento de los flujos subsuperficiales en la zona no saturada de botaderos o suelos naturales. La investigación elaborada puede ser aprovechada para evaluar en una primera instancia y sin información detallada del terreno, el posible rango de valores alcanzados por los caudales generados, los valores mínimos o bases, los máximos, su duración y las variaciones durante el año.

Como recomendaciones finales para mejoras en el trabajo es posible nombrar la incorporación del fenómeno de histéresis al estudio, si es que se detecta que es un factor relevante para el tipo de suelo analizado. Otra mejora importante, sería llevar a cabo el análisis en 2D, para poder visualizar el efecto de las zonas con flujos preferenciales, que como se ha demostrado en numerosas investigaciones (Fala et al. 2013; Dawood & Aubertin, 2014; León, 2010) tienen un alto impacto en el movimiento de los flujos de agua al interior del suelo natural o botadero.

Bibliografía

- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12), 1139-1145.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Serie Riego y Drenaje 56, Roma.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., ... & Smith, M. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1), 1-22.
- Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Segeo, D. C., Smith, L., & Ritchie, A. I. M. (2015). Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 57, 140-156.
- Arcadis (2008). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Desarrollo Los Bronces. Servicio de Evaluación Ambiental, Chile. Recuperado de: http://seia.sea.gob.cl/seia-web/ficha/fichaPrincipal.php?modo=ficha&id_expediente=1737662.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R., Chouteau, M., Wilson, W. (2005).  valuation du comportement hydrog ologique et g ochimique des haldes   st riles. In *Proceedings of the Symposium sur l'Environnement et les Mines*, Rouyn-Noranda, CD-Rom, CIM.
- Azam, S., Wilson, G. W., Herasymuik, G., Nichol, C., & Barbour, L. S. (2007). Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(3), 259-268.
- Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639-662.
- Bay, D. (2009). Hydrological and hydrogeochemical characteristics of neutral drainage from a waste rock test pile. M.A.Sc. thesis. Faculty of Graduate Studies, Geological Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Buckingham, E. (1907). Studies on the movement of soil moisture. Bulletin 38. USDA, Bureau of Soils, Washington D.C.
- CADE-IDEPE (2004). Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Maipo. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

- CADE-IDEPE (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Copiapó. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- Castillo, Y. (2015). Caracterización de la hidrología glaciaria de la cuenca del Río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T., & Zarba, R. L. (1990). A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water resources research*, 26(7), 1483-1496.
- Comte, M. (2017). Modelación hidrológica de la cuenca del Río Mapocho en los Almendros usando el modelo Cold Regions Hydrological Model. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Dawood, I., & Aubertin, M. (2012). Influence of internal layers on water flow inside a large waste rock pile. Technical Report EPM-RT-2012-01. École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada. Recuperado de: <http://www.polymtl.ca/biblio/epmrt/rapports/rt2012-01.pdf>.
- Dawood, I., & Aubertin, M. (2014). Effect of dense material layers on unsaturated water flow inside a large waste rock pile: A numerical investigation. *Mine Water and the Environment*, 33(1), 24-28.
- Dawood, I., Aubertin, M., Intissar, R., & Chouteau, M. (2011). A combined hydrogeological–geophysical approach to evaluate unsaturated flow in a large waste rock pile. In: Proceedings of the 14th Pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering (PCSMGE), 64th Canadian geotechnical conference (CGC), and 5th Pan-American conference on teaching and learning of geotechnical engineering (PCTLGE), Toronto, ON, Canada, p 8.
- Fala, O., Aubertin, M., Molson, J. W., Bussiere, B., Wilson, G. W., Chapuis, R., & Martin, V. (2003). Numerical modelling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. In Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia, Publication Series 3/2003, pp. 895– 902.
- Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., & Bussière, B. (2005). Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water and the Environment*, 24(4), 172-185.
- Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2006). Numerical simulations of long term unsaturated flow and acid mine drainage at waste rock piles. In Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), St. Louis MO. American Society of Mining and Reclamation (ASMR), 582-597.

- Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., Dawood, I., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2013). A numerical modelling approach to assess long-term unsaturated flow and geochemical transport in a waste rock pile. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 27(1), 38-55.
- Fernández, S. (2016). Respuesta hidrológica de la Cuenca Mapocho en Los Almendros y su relación con variables de almacenamiento. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Fitts, C. R. (2012). *Groundwater science*. Academic press.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Fuenzalida, H., Falvey, M., Rojas, M., Aceituno, P., & Garreaud, R. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe para CONAMA. Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.
- García, S. (2013). Modelación del Potencial de Drenaje  cido de Botaderos. Calibración a partir de celdas húmedas y granulometría. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro*–INIA, 93, 13-19.
- Hillel, D. (1971). *Soil and Water: Physical Principles and Processes*, Academic Press, Inc., New York, 288 p.
- Hyman, D.M. & Watzlaf, G.R. (1995). Mine drainage characterization for the successful design and evaluation of passive treatment systems. In *Proceedings of the 17th Annual Conference of the National Association of Abandoned Mine Lands*, French Lick.
- INE (2016). Medio Ambiente, Informe Anual (2015). Instituto Nacional de Estad sticas: Subdirecci n T cnica, Unidad de Estad sticas del Medio Ambiente, Departamento de Comunicaciones e Imagen Corporativa.
- Inzunza, J. (2005). Clasificaci n de los climas de Köppen. *Ciencia ahora*, 15(8), 131-156.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jara, F. (2017). Influencia de la sublimación nival en el balance hídrico de la cuenca alta del Río Copiapó, Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the total environment*, 338(1), 3-14.
- Juliá, C., Montecinos, S., & Maldonado, A. (2008). Características climáticas de la Región de Atacama. Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Ediciones Universitarias de La Serena, La Serena, Chile, 25-42.
- Knight Piésold (2008). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto El Morro. Sociedad contractual Minera El Morro. Servicio de Evaluación Ambiental, Chile. Recuperado de: <https://www.e-seia.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3344443>.
- Lahmira, B., & Lefebvre, R. (2015). Numerical modelling of transfer processes in a waste rock pile undergoing the temporal evolution of its heterogeneous material properties, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(6), 499-520.
- Lahmira, B., Lefebvre, R., Aubertin, M., & Bussière, B. (2007). Modeling the influence of heterogeneity and anisotropy on physical processes in ARD-producing waste rock piles. In *Proceedings of Ottawa Geo2007, 60th Canadian Geotechnical Conference and 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Ottawa, ON, Canada, pp. 21-24.
- Lahmira, B., Lefebvre, R., Aubertin, M., & Bussière, B. (2016). Effect of heterogeneity and anisotropy related to the construction method on transfer processes in waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 184, 35-49.
- Lahmira, B., R. Lefebvre, M. Aubertin, & Bussière B. (2007). Modeling the influence of heterogeneity and anisotropy on physical processes in AMD-producing waste rock piles. In: *Proceedings of Ottawa Geo2007: 60th Canadian Geotechnical Conference and 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Ottawa, ON, Canada. 21–24 Oct. 2007. Can. Geotech. Soc., Calgary, AB, Canadá.
- León, J. (2010). Modelación hidrogeológica de depósitos de estériles. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- López-Acosta, N. P., & Mendoza-Promotor, J. A. (2016). Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow-Slope Stability. In *Groundwater-Contaminant and Resource Management*. InTech.
- McPhee, J., Fuente, A., Herrera, P., Niño, Y., Olivares, M., Sancha, A. M., Tamburrino, A., & Vargas, X (2012). "El sector del agua en Chile: su estado y sus retos," *Diagnóstico del Agua en las Américas*, edited by Blanca Jiménez Cisneros and José Galizia Tundisi, 169-193.
- Meza, V. E. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 23-38.

- Molson, J. W., Fala, O., Aubertin, M., & Bussière, B. (2005). Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78(4), 343-371.
- Namaghi, H. H., Li, S., & Jiang, L. (2015). Numerical simulation of water flow in a large waste rock pile, Haizhou coal mine, China. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(1-2), 5.
- Namaghi, H. H., Luo, M., & Li, S. (2014). Assessment of Unsaturated Flow for a Large Coal Mine Waste Rock Pile. *Advanced Materials Research*. Vols. 955-959, pp. 1179-1183.
- Newman, L. L., Herasymuik, G. M., Barbour, S. L., Fredlund, D. G., & Smith, T. (1997). The hydrogeology of waste rock dumps and a mechanism for unsaturated preferential flow. In *Proceedings of Fourth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, Vancouver, BC, vol. 2. Natural Resources Canada, Ottawa, pp. 551–564.
- Peterson, H. E. (2014). Unsaturated hydrology, evaporation, and geochemistry of neutral and acid rock drainage in highly heterogeneous mine waste rock at the Antamina mine, Peru. PhD Thesis. Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences. University of British Columbia, Vancouver, BC, Canadá.
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J., & Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*, 21(19), 2650-2667.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.
- Rojas, M. (2012). Consultoría para la elaboración de un estudio sobre el Estado del Arte de Modelos para la Investigación del Calentamiento Global. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Sarmiento, A. M. (2007). Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España). Universidad de Huelva.
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.
- Schlumberger Water Service (2008). Modelo numérico hidrogeológico proyecto Caserones. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Caserones, Anexo V-7 Hidrogeología. Servicio de Evaluación Ambiental, Chile. Recuperado de: <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3281062>.
- SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería (2002). Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera.

- SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería (2015). Anuario de la Minería de Chile.
- SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería (2015). Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras.
- Šimůnek, J., M. Šejna, & M. Th. van Genuchten (1998). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 2.0. IGWMC-TPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 202 pp.
- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, & M. Th. van Genuchten (2013). The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 343.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2016). Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7).
- Singhal, B. B. S., & R. P. Gupta (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Second edition. Springer, New York.
- Sitac (2008). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Caserones, Anexo VI-4, modelo hidrogeológico. Servicio de Evaluación Ambiental, Chile. Recuperado de: <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3281062>.
- United States Geological Survey USGS. (2013). *Unsaturated Flow Basics*. Recuperado de: <https://www.camnl.wr.usgs.gov/uzf/unsatflow/unsatflow.html>.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Zapata, C. (2016). Relación entre la cobertura nivosa y la respuesta hidrológica de la parte alta de la cuenca del río Copiapó. Memoria para optar al título de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Anexos

Anexo A. Determinación evaporación horaria

La determinación de la evaporación para las condiciones B y D se obtiene mediante la ecuación de Penman-Monteith descrita en FAO56 (Allen et. al., 2006). La ecuación (A.1) muestra la modificación a la ecuación estándar para realizar los cálculos a nivel horario.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (A.1)$$

Donde,

R_n : Radiación neta en la superficie [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

G : Densidad del flujo del calor del suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].

T_{hr} : Temperatura media del aire cada hora [$^{\circ}\text{C}$].

Δ : Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor en T_{hr} [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

γ : Constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

V_t : Volumen total del material [L^3].

$e^0(T_{hr})$: Presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} [kPa].

e_a : Promedio horario de la presión real de vapor [kPa].

u_2 : Promedio horario de la velocidad del viento [m s^{-1}].

El resto de las ecuaciones para las distintas variables son omitidas, pero se describen detalladamente, también para su aplicación a nivel horario, en FAO56. Esta fórmula considera una resistencia superficial constante (r_s) de 70 s/m durante todos los periodos, lo que puede causar alguna subpredicción de la ETo horaria durante el día, mientras que puede causar alguna sobreestimación de la ETo horaria durante la noche.

Para solucionar lo anterior, se sigue la recomendación del trabajo de Allen et al. (2006), que propone emplear un r_s igual a 50 s/m durante el día y un r_s de 200 s/m para el periodo nocturno. Esto significa cambiar el valor 0.34 en la ecuación (A.1) por 0.24 para el día y 0.96 para la noche.

Los resultados obtenidos para los casos bases fueron presentados en la Figura 4-6 y Figura 4-12, para Valle Nevado y La Ollita, respectivamente. El resto de los escenarios se muestra en la Figura A-1.

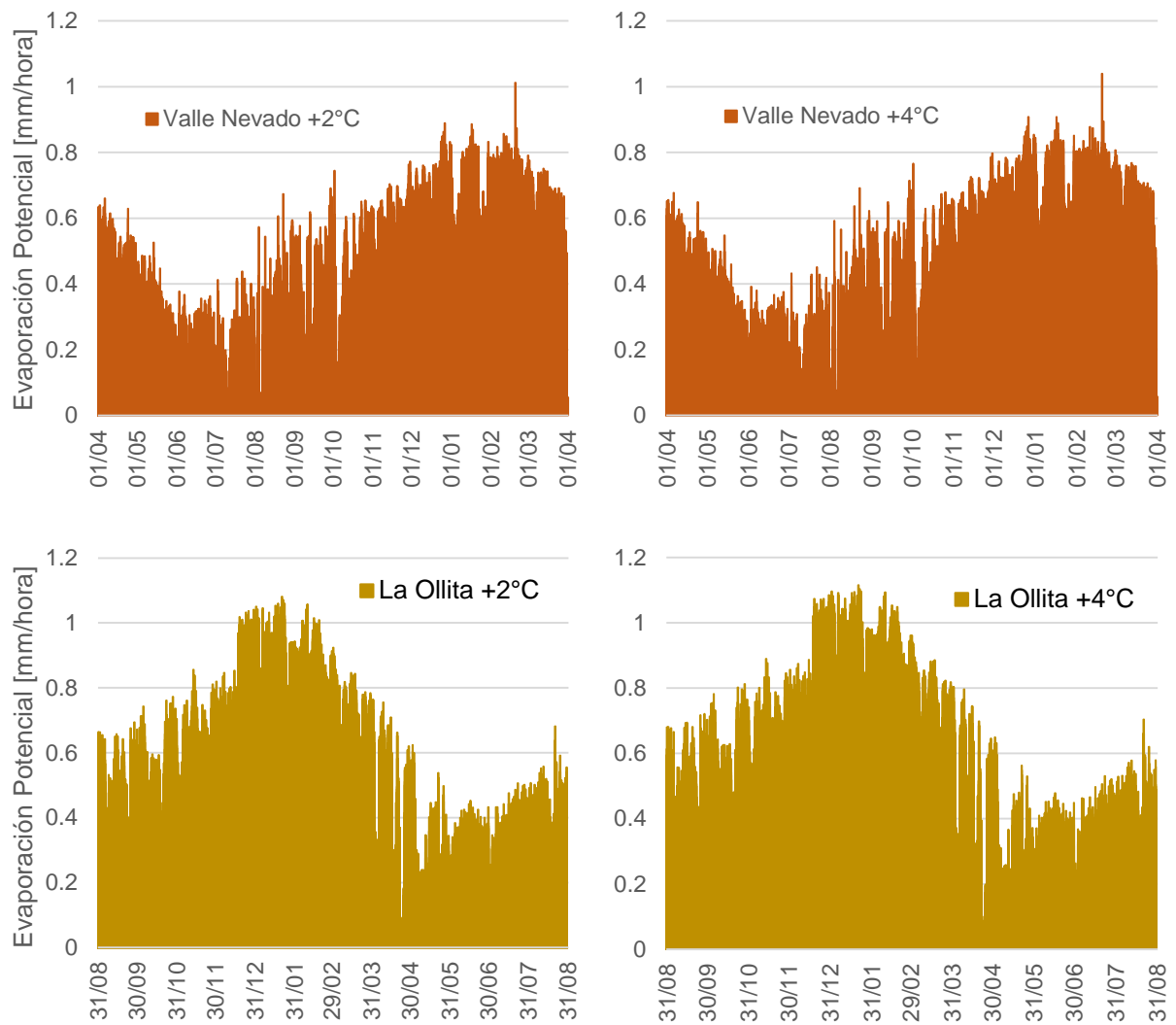


Figura A-1. Tasas de evaporación potencial a utilizar en las condiciones B (Gráficos de arriba) y D (Gráficos de abajo) en los escenarios climáticos moderado y severo.

Anexo B. Principales valores de las simulaciones

En este anexo se entrega el detalle de los principales resultados obtenidos en las simulaciones con el programa HYDRUS-1D. La Tabla B-1 muestra los valores máximos, mínimos, desviación estándar, promedio, coeficiente de variación y la percolación anual acumulada en la base del sustrato (Perc Acum) para el año en que se ha alcanzado el régimen estacionario; además se indica el tiempo que tarda en iniciar el flujo en la base del sustrato rocoso (ΔT Perc).

Tabla B-1. Principales valores obtenidos de las simulaciones según condición (Cond.), material (Mat.), profundidad del perfil del sustrato (H) y escenario climático. (-) Simulaciones sin percolación.

Cond	Mat	H [m]	Escenario	Máx mm [hora]	Mín mm [hora]	Desv Estandar	Prom	Coef Variación	Perc Acum [mm]	ΔT Perc [Años]
A	GRV	30	Actual	0.2499	0.0268	0.0423	0.0702	0.6020	616.477	4.15
A	GRV	30	Moderado	0.1205	0.0266	0.0311	0.0602	0.5156	529.232	4.88
A	GRV	30	Severo	0.0565	0.0266	0.0119	0.0339	0.3506	298.006	7.92
A	GRV	60	Actual	0.1180	0.0547	0.0246	0.0702	0.3499	616.519	8.62
A	GRV	90	Actual	0.1158	0.0544	0.0240	0.0702	0.3419	616.546	13.09
A	SBL	30	Actual	0.4377	0.0090	0.0898	0.0702	1.2799	616.485	1.08
A	SBL	30	Moderado	0.4030	0.0090	0.0698	0.0602	1.1583	529.235	1.23
A	SBL	30	Severo	0.0656	0.0090	0.0244	0.0339	0.7196	298.005	2.06
A	SBL	60	Actual	0.2159	0.0636	0.0223	0.0702	0.3182	616.570	2.52
A	SBL	90	Actual	0.1644	0.0657	0.0176	0.0702	0.2502	616.814	3.98
A	SLT	30	Actual	0.0662	0.0524	0.0048	0.0599	0.0807	526.091	18.57
A	SLT	30	Moderado	0.0609	0.0489	0.0042	0.0553	0.0761	485.326	20.03
A	SLT	30	Severo	0.0339	0.0331	0.0003	0.0335	0.0085	294.427	31.37
A	SLT	60	Actual	0.0609	0.0588	0.0008	0.0599	0.0126	526.060	37.62
A	SLT	90	Actual	–	–	–	–	–	–	–
B	GRV	30	Actual	0.2040	0.0267	0.0348	0.0664	0.5239	583.359	4.25
B	GRV	30	Moderado	0.1204	0.0266	0.0293	0.0589	0.4981	517.068	4.91
B	GRV	30	Severo	0.1202	0.0266	0.0176	0.0431	0.4079	378.470	6.36
B	GRV	60	Actual	0.1155	0.0545	0.0218	0.0664	0.3288	583.293	8.90
B	GRV	90	Actual	0.1150	0.0543	0.0212	0.0664	0.3192	583.257	13.54
B	SBL	30	Actual	0.2388	0.0090	0.0394	0.0634	0.6207	556.986	1.12
B	SBL	30	Moderado	0.2109	0.0090	0.0357	0.0559	0.6383	491.048	1.24
B	SBL	30	Severo	0.0657	0.0090	0.0245	0.0414	0.5917	363.700	1.81
B	SBL	60	Actual	0.0657	0.0526	0.0038	0.0634	0.0601	556.904	2.67
B	SBL	90	Actual	0.0656	0.0581	0.0026	0.0634	0.0409	556.830	4.22
B	SLT	30	Actual	–	–	–	–	–	–	–
B	SLT	30	Moderado	–	–	–	–	–	–	–
B	SLT	30	Severo	–	–	–	–	–	–	–
B	SLT	60	Actual	–	–	–	–	–	–	–

<i>Cond</i>	<i>Mat</i>	<i>H [m]</i>	<i>Escenario</i>	<i>Máx mm [hora]</i>	<i>Mín mm [hora]</i>	<i>Desv Estandar</i>	<i>Prom</i>	<i>Coef Variación</i>	<i>Perc Acum [mm]</i>	<i>Δ T Perc [Años]</i>
<i>B</i>	<i>SLT</i>	90	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>GRV</i>	30	<i>Actual</i>	0.0130	0.0062	0.0027	0.0083	0.3251	72.513	27.61
<i>C</i>	<i>GRV</i>	30	<i>Moderado</i>	0.0130	0.0062	0.0028	0.0087	0.3283	76.195	26.58
<i>C</i>	<i>GRV</i>	30	<i>Severo</i>	0.0126	0.0062	0.0021	0.0075	0.2762	65.456	30.77
<i>C</i>	<i>GRV</i>	60	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>GRV</i>	90	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>SBL</i>	30	<i>Actual</i>	0.0084	0.0081	0.0001	0.0083	0.0156	72.525	6.27
<i>C</i>	<i>SBL</i>	30	<i>Moderado</i>	0.0088	0.0086	0.0001	0.0087	0.0078	76.206	6.07
<i>C</i>	<i>SBL</i>	30	<i>Severo</i>	0.0078	0.0071	0.0002	0.0075	0.0300	65.454	6.62
<i>C</i>	<i>SBL</i>	60	<i>Actual</i>	0.0083	0.0083	0.0000	0.0083	0.0006	72.525	12.5
<i>C</i>	<i>SBL</i>	90	<i>Actual</i>	0.0082	0.0082	0.0000	0.0082	0.0000	72.278	18.73
<i>C</i>	<i>SLT</i>	30	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>SLT</i>	30	<i>Moderado</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>SLT</i>	30	<i>Severo</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>SLT</i>	60	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>C</i>	<i>SLT</i>	90	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>D</i>	<i>GRV</i>	30	<i>Actual</i>	0.0264	0.0129	0.0034	0.0143	0.2338	125.955	17.28
<i>D</i>	<i>GRV</i>	30	<i>Moderado</i>	0.0131	0.0095	0.0010	0.0124	0.0827	108.864	19.51
<i>D</i>	<i>GRV</i>	30	<i>Severo</i>	0.0124	0.0063	0.0019	0.0082	0.2359	72.150	27.64
<i>D</i>	<i>GRV</i>	60	<i>Actual</i>	0.0236	0.0129	0.0027	0.0143	0.1858	125.937	34.62
<i>D</i>	<i>GRV</i>	90	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>D</i>	<i>SBL</i>	30	<i>Actual</i>	0.0260	0.0090	0.0056	0.0137	0.4101	120.467	4.31
<i>D</i>	<i>SBL</i>	30	<i>Moderado</i>	0.0212	0.0090	0.0037	0.0115	0.3201	100.598	4.84
<i>D</i>	<i>SBL</i>	30	<i>Severo</i>	0.0078	0.0073	0.0002	0.0076	0.0205	66.405	6.52
<i>D</i>	<i>SBL</i>	60	<i>Actual</i>	0.0219	0.0090	0.0044	0.0137	0.3198	120.322	8.49
<i>D</i>	<i>SBL</i>	90	<i>Actual</i>	0.0200	0.0090	0.0038	0.0136	0.2819	119.851	12.64
<i>D</i>	<i>SLT</i>	30	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>D</i>	<i>SLT</i>	30	<i>Moderado</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>D</i>	<i>SLT</i>	30	<i>Severo</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>D</i>	<i>SLT</i>	60	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>D</i>	<i>SLT</i>	90	<i>Actual</i>	–	–	–	–	–	–	–

Anexo C. Balance de masa

Este anexo presenta los balances de masa realizados para el total de las simulaciones, considerando los valores acumulados hasta el final del periodo de 40 años. Las variables presentadas son el volumen acumulado en el sustrato (Vol), la infiltración (infil), la percolación en la base del perfil de sustrato (Perc), la escorrentía superficial (Escor) y la evaporación (Evap). Los valores son presentados en metros, siendo positivos las entradas al dominio (Vol e Infil) y con valores negativos el resto, ya que corresponden a pérdidas o salidas del volumen de control.

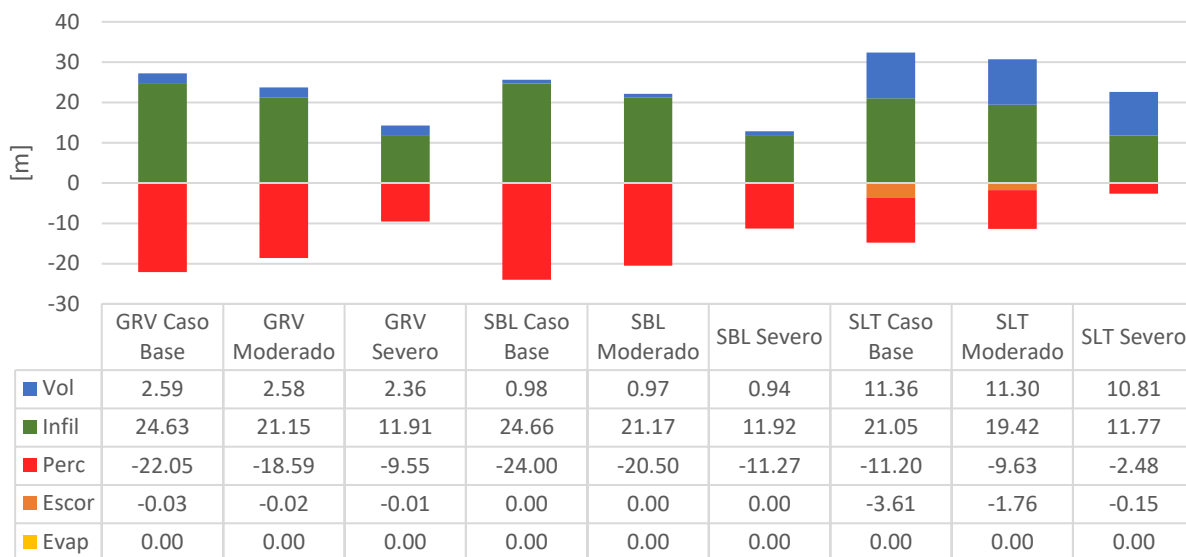


Figura C-1. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición A, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).

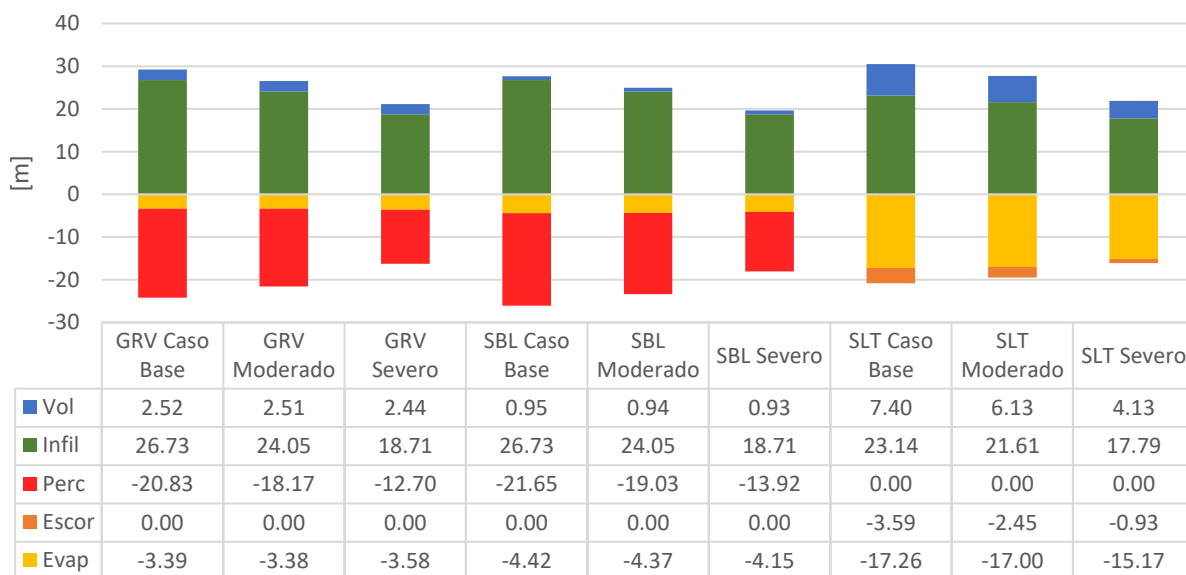


Figura C-2. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición B, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).

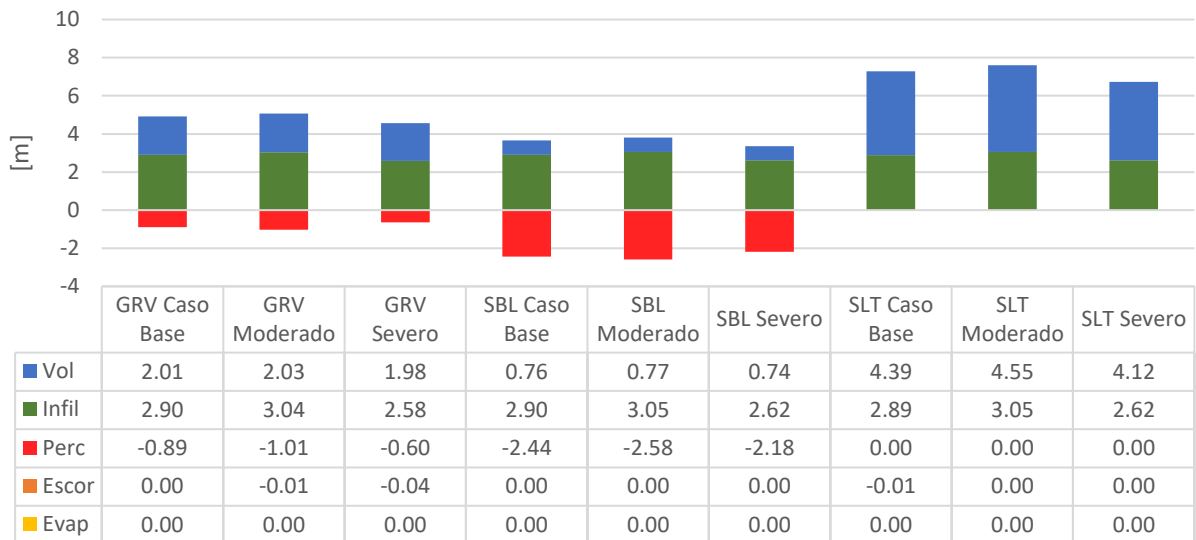


Figura C-3. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición C, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).

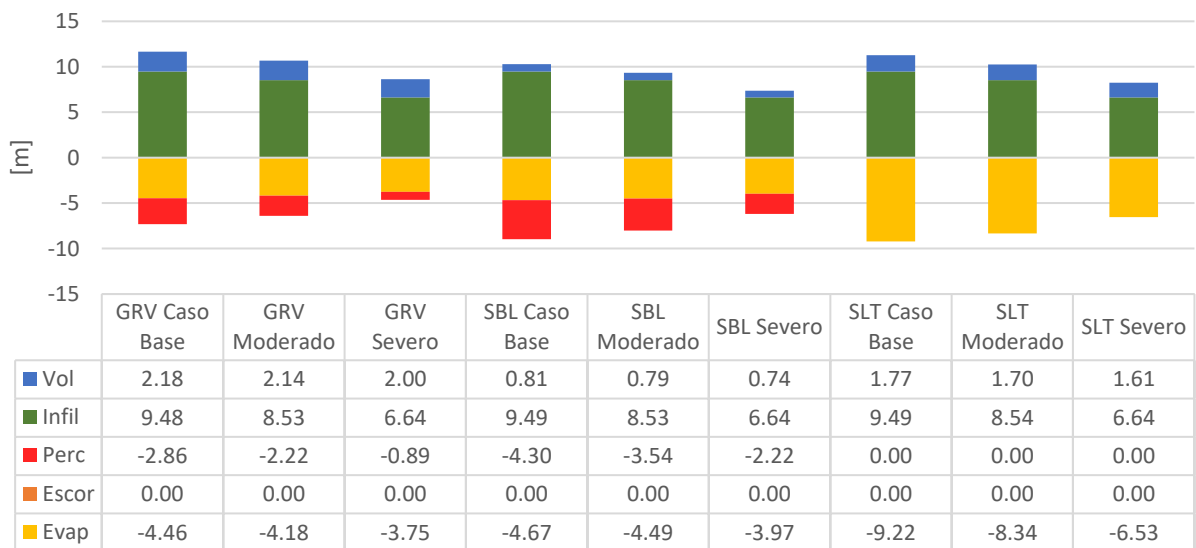


Figura C-4. Balance de masa para simulaciones llevadas a cabo con la condición D, para los tres materiales (GRV, SBL y SLT) y los tres escenarios (actual o caso base, moderado y severo).