



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL

MODELO DE LA ZONA NO SATURADA DE LA VEGA ALTOANDINA DE JACHUCOPOSA, I REGIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

LIZBETH ALEJANDRA MORALES DINAMARCA

PROFESORA GUÍA:

CLAUDIA MELLADO TIGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PAULO HERRERA RICCI

CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil
POR: Lizbeth A. Morales Dinamarca
Fecha: 11/09/2012
Profesora Guía: Claudia Mellado Tigre

MODELO DE LA ZONA NO SATURADA DE LA VEGA ALTOANDINA DE JACHUCOPOSA, I REGIÓN

El sistema de Jachucoposa, ubicado en el sector sureste del Salar de Coposa, ha sido afectado por la explotación de las aguas subterráneas del salar desde 1998, observándose una disminución de los niveles freáticos del acuífero somero, del caudal de la vertiente Jachucoposa y de la vegetación existente en la zona. Dado esto se han aplicado en la zona medidas de mitigación, entre las cuales se encuentran: cambio del sector de explotación de aguas subterráneas, riego y recarga artificial de la vertiente. Estas medidas han generado una recuperación paulatina del sistema, la que se ve reflejada en la recuperación de los niveles freáticos y en la respuesta de la vegetación.

Se desarrolla en este trabajo un modelo unidimensional de la zona no saturada en Hydrus 1D, para comprender y cuantificar los patrones de humedad en el sistema y cómo éstos son afectados bajo distintos escenarios de modelación. Se modelan 17 perfiles distribuidos en las zonas de vegetación de interés. De éstos, se escogen los perfiles más representativos para los distintos sectores, simulando para los distintos escenarios 7 perfiles en total. En los escenarios, se simulan los procesos existentes en la vega y las forzantes del nivel y la humedad, correspondientes a: evaporación, flujos de entrada como precipitación y riego y variaciones de nivel (descenso y recuperación).

Como resultados se obtiene que el comportamiento del perfil de humedad depende fuertemente del tipo de suelo, existiendo diferencias notorias para suelos más arenosos y franco arcillosos. En general, las zonas que poseen suelos más arenosos son más críticas y susceptibles a sufrir daños por la explotación del sistema. Se observa que el contenido de humedad responde casi proporcionalmente al descenso o recuperación de nivel. Además, pequeñas precipitaciones o una tasa de riego en torno a los 3 mm/día no genera cambios significativos en el perfil, no así una tasa de riego promedio de 5 mm/día, que sería altamente efectiva para el aumento de la humedad, y por ende, la recuperación de la vegetación.

El modelo desarrollado se considera una herramienta para el mejor manejo ambiental del sistema, el que se puede utilizar para simular distintos casos asociados a las medidas de mitigación instauradas para la recuperación del sistema.

*A Luz del Valle Dinamarca,
por su fuerza y valentía. Q.E.P.D.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos los que me han acompañado en este largo proceso, el cual tuvo momentos muy difíciles, y que gracias a la gente que estuvo a mi lado, pudo salir adelante.

En primer lugar, agradecer a toda mi familia, por su apoyo incondicional y por sus palabras de ánimo en cada momento. A mis primos que siempre me hicieron reír y lograron sacarme una sonrisa. A mi hermana y su familia, por ser mi principal apoyo y alegría, y por siempre estar ahí y a mi mamá, por enseñarme a ser una persona tenaz, con fuerza y salir adelante a pesar de todas las dificultades.

A mis amigos, gente que he conocido este último tiempo y que se ha vuelto muy valiosa para mí, especialmente a Patricio Pastenes, por ser el partner que siempre me entiende y a quien le puedo contar todas mis locuras. Gracias por todas esas conversaciones y todos los consejos que me han permitido llegar a donde estoy. Gracias también a Freddy, a la Mar, a Jaime y a la Evelyn, por estar ahí y por apoyarme, y también por darme esa distracción que tanto se necesita a veces. También a Pancho, que me ha apoyado y alegrado enormemente estas últimas semanas, y por haber aportado su granito de arena.

También quisiera agradecer enormemente a Pamela Reyes, por ser un pilar estos últimos dos años y por darme las herramientas para salir adelante y cerrar este proceso. Gracias por tus enseñanzas.

Agradecer también a mis profesores, especialmente por su paciencia en este largo proceso. Gracias por su exigencia y por sacarle a este trabajo su máximo potencial. Agradecer al Centro de Ecología Aplicada y a Minera Doña Inés de Collahuasi, por permitir el desarrollo de esta memoria y facilitarme todos los datos necesarios para ello.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 ÁREA DE ESTUDIO.....	2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.	6
2.1 CONCEPTOS GENERALES DE HUMEDALES ALTOANDINOS.....	6
2.2 ASPECTOS CONCEPTUALES DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA ...	13
2.2.1 Condiciones de borde y condición inicial	16
2.3 MODELOS NUMÉRICOS DE SIMULACIÓN DE FLUJO EN MEDIOS POROSOS NO SATURADOS	17
CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	21
3.1 REVISIÓN DE ESTUDIOS E INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	21
3.1.1 Modelación Ecosistémica Vega Jachucoposa, Salar de Coposa (CEA, 2010) 21	
3.1.2 Seguimiento variables hídricas del sistema Jachucoposa (GP Consultores, 2007-2008).	21
3.1.3 Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa (DICTUC, 2005).....	22
3.1.4 Sistema de riego y recuperación bofedal de Jachucoposa, Salar de Coposa. Informe final temporada 2009-2010 (Tecknoriego, 2010).....	22
3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACION DISPONIBLE.....	23
3.2.1 Área modelo conceptual.....	23
3.2.2 Medidas de mitigación aplicadas.....	24
3.2.3 Vegetación.....	27
3.2.4 Componentes físicas del sistema	32
CAPÍTULO 4: MODELO DE SIMULACIÓN DE LA VEGA DE JACHUCOPOSA	64
4.1 RESUMEN E INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN.....	64
4.2 MODELO CONCEPTUAL	65
4.2.1 Condiciones de Borde	70
4.2.2 Condición inicial.....	70
4.3 ELECCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A UTILIZAR.....	70
4.4 CONSTRUCCIÓN MODELO NUMÉRICO	71
4.4.1 Modelo matemático	71

4.4.2	Modelo físico.....	71
4.4.3	Propiedades hidrogeológicas	72
4.4.4	Condiciones de borde.....	74
4.4.5	Condición inicial.....	76
4.4.6	Calibración.....	77
4.4.7	Escenarios de modelación.....	86
4.5	RESULTADOS DEL MODELO	91
4.5.1	Escenario 1: caso base	91
4.5.2	Escenario 2: caso con riego	100
4.5.3	Escenario 3: caso con descenso y recuperación.....	104
4.5.4	Escenario 4: caso con riego, descenso y recuperación (combinación escenario 2 y 3)	112
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		118
5.1	Sobre los escenarios modelados y la eficacia de las medidas de mitigación..	118
5.2	Con respecto a la utilidad del modelo desarrollado.....	121
5.3	Con respecto a la validez del modelo desarrollado.....	121
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS.....		123
ANEXOS		126
Anexo A: Registro de riego aplicado en sistema de Jachucoposa.....		127
Anexo B: Registros de variables meteorológicas en estaciones Salar Coposa y Coposa		127
Anexo C: Mediciones de perfiles de humedad bimensuales en sistema Jachucoposa		127
Anexo D: Perfiles de humedad calibrados		127
Anexo E: Series de datos de entrada para escenarios de modelación perfiles representativos.....		127
Anexo F: Contenido de humedad v/s tiempo en el perfil de suelo para escenarios de modelación.....		128
Anexo F.1 Perfil D-5.....		128
Anexo F.2 Perfil D-21		134
Anexo F.3 Perfil A-10.....		140
Anexo F.4 Perfil A-11		146
Anexo F.5 Perfil B-16.....		152
Anexo F.6 Perfil C-19.....		158
Anexo F.7 Perfil E-27		164
Anexo G: Perfiles de humedad representativos en los distintos escenarios para tiempos específicos.		170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 . Ubicación regional de zona de estudio. Salar de Coposa, I región de Tarapacá.....	3
Figura 1.2 Zona de estudio y pozos de bombeo en Salar de Coposa.....	4
Figura 1.3. Zoom área de estudio y zonas de vegetación. Área de análisis para modelo local de la zona no saturada.....	4
Figura 2.1 Componentes que determinan la presencia de los diferentes tipos de sistemas vegetacionales.	9
Figura 2.2 Esquema de afloramiento de aguas subterráneas, recarga y descarga del sistema.....	10
Figura 2.3 Subdivisiones de zona no saturada. (a) Vegetación con bajo requerimientos de agua que capta el recurso hídrico desde la humedad del suelo. (b) Vegetación hidrófila en zonas de afloramiento que capta agua directo de la napa.....	11
Figura 2.4 Agua subterránea cerca de la superficie del suelo. (a) Zonas saturada y no saturada. (b) Perfil del contenido de humedad en profundidad.....	11
Figura 2.5 Curva de retención de humedad y volúmenes de agua disponible para la vegetación.....	12
Figura 2.6 Perfil de suelo unidimensional (z). Contenido de humedad y conductividad hidráulica no saturada.....	14
Figura 2.7 Esquema curva de retención de humedad Θ (h) y función de conductividad hidráulica K (h) dadas por modelo de Van Genuchten según ecuaciones (2.7) y (2.8)..	16
Figura 2.8 Condición inicial	16
Figura 3.1 Zonas de riego para mitigación en zonas de Vegetación.....	25
Figura 3.2 Tasas de riego aplicadas en distintos sectores.....	26
Figura 3.3 Cartografía con tipos vegetacionales (SVAHT) y transectos en zona de estudio.....	28
Figura 3.4 Comparación entre valores de cobertura total registrada en los meses de octubre 2009 y marzo 2010 para los distintos transectos.	30
Figura 3.5 Ubicación estaciones meteorológicas	33
Figura 3.6 Precipitación diaria estación Salar Coposa.....	34
Figura 3.7 Evaporación de bandeja y evapotranspiración potencial diaria en estación Salar Coposa.....	35
Figura 3.8 ET_0 media mensual en estaciones de cuencas vecinas y Salar Coposa	35
Figura 3.9: Distribución mensual de temperatura en las estaciones Coposa y Salar Coposa.....	36
Figura 3.10: Registro de Aforo en la Vertiente Jachucoposa, caudal natural y total. Líneas punteadas indican fechas en que se aplicaron medidas de mitigación nombradas.....	38
Figura 3.11 Esquema unidades acuíferas sistema Jachucoposa.....	40
Figura 3.12 Curvas características de humedad de suelos según clase textural.....	41
Figura 3.13 Pozos de producción y observación en Salar de Coposa	43
Figura 3.14 Piezómetros disponibles para la medición de niveles freáticos. Piezómetros CMA y CPS miden nivel en acuífero somero y pozos alrededor miden nivel en acuífero profundo.....	44
Figura 3.15 Sectorización de pozos según comportamiento de niveles observados.	47

Figura 3.16 Curvas de isopropfundidad en sistema Jachucoposa para enero en distintos años.	48
Figura 3.17 Cotas piezométricas y líneas de flujo para septiembre 2007.	50
Figura 3.18 Curvas de isopropfundidad para septiembre 2007 Curvas se realizan con piezómetros con información disponible y se corrigen y/o corroboran con los perfiles de humedad modelados.	51
Figura 3.19 Nivel freático piezómetros someros CMA para sectores de Influencia laguna y cabecera definidos por GP Consultores (2007).	52
Figura 3.20 Nivel freático piezómetros someros CMA para sectores de Drenaje y Salar definidos por GP Consultores (2007).	53
Figura 3.21 Resultados principales estudio CEA (2010) con respecto a las principales variables que afectan los niveles freáticos en la zona de Jachucoposa.	55
Figura 3.22 Punteras de humedad en Jachucoposa para las distintas zonas de vegetación.	57
Figura 3.23 Análisis de humedad en el tiempo para puntera D4.	58
Figura 3.24 Perfiles de humedad promedio en el tiempo para las punteras, en los sectores A y D.	58
Figura 3.25. Perfiles de humedad promedio en el tiempo para las punteras en los sectores C y E.	59
Figura 3.26 Humedad promedio y rango de variación por sector.	60
Figura 3.27 Calicatas, punteras de humedad y cartografía de suelos de Jachucoposa.	61
Figura 4.1. Ubicación de punteras de humedad a modelar en distintas zonas de vegetación.	67
Figura 4.2 Modelo conceptual zona no saturada de la vega de Jachucoposa. Esquema corresponde al perfil tipo a desarrollarse en las cinco zonas de vegetación.	68
Figura 4.3 Hitos relevantes en el tiempo y periodos con registros de nivel, humedad y precipitaciones.	69
Figura 4.4 Comparación humedad de saturación en punteras de humedad y retención de humedad a 33 KPa (CC) en calicatas.	73
Figura 4.5 Condiciones de borde del sistema. Evapotranspiración y nivel freático variable en el tiempo para año tipo (caso base).	76
Figura 4.6 Condición inicial de presión para perfil tipo.	76
Figura 4.7 Ajuste de humedades de saturación medidas en terreno con datos bibliográficos.	78
Figura 4.8 Perfil de humedad D-5 medido con sonda de neutrones para invierno (julio 2007), verano (enero 2008) y promedio.	79
Figura 4.9 Resultados de contenido de humedad en perfil vertical de suelo en puntera D-5 simulados en Hydrus. Se muestran tres casos de ajuste de los parámetros de suelo en el proceso de calibración.	80
Figura 4.10 Perfil D-5 modelado y calibrado. Se presentan las curvas para invierno y verano por variaciones de nivel supuestas como condición de borde.	81
Figura 4.11 Humedad medida v/s humedad simulada para Perfil D-5 para invierno y verano.	81
Figura 4.12 Perfiles verticales de humedad calibrados en Hydrus v/s medidos en terreno para sector de vegetación D. Se muestran datos medidos por sonda de neutrones y ajustados un 20%.	83

Figura 4.13 Perfiles verticales de humedad calibrados en Hydrus v/s medidos en terreno para sectores A y B de vegetación. Se muestran datos medidos por sonda de neutrones y ajustados un 20%	84
Figura 4.14 Perfiles verticales de humedad calibrados en Hydrus v/s medidos en terreno para sectores C y E de vegetación. Se muestran datos medidos por sonda de neutrones y ajustados un 20%	85
Figura 4.15 Esquema escenarios de modelación según hitos relevantes en la zona de estudio. Se consideran registros de descenso y recuperación de niveles, riego y precipitaciones.	87
Figura 4.16 Escenarios de modelación con su respectivo análisis de sensibilidad	90
Figura 4.17 Ordenamiento de los perfiles simulados desde suelos arenosos a suelos arcillosos	91
Figura 4.18 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para caso base, perfil E27.	92
Figura 4.19 Contenido de humedad en el perfil de suelo A11, resultado caso base con nivel promedio. Caso representativo de alteraciones al gradiente típico de humedad...93	93
Figura 4.20 Resultados de humedad en el perfil de suelo para caso base, mes de diciembre. Se grafica el perfil de humedad para los tres niveles distintos modelados...95	95
Figura 4.21 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para caso con precipitaciones perfil D21	98
Figura 4.22 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para escenario con precipitaciones perfil B16, representativo de suelos arcillosos en superficie.	99
Figura 4.23 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para caso con riego perfil C19.....	101
Figura 4.24 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para caso con riego perfil A11.	102
Figura 4.25 Contenidos de humedad previo al riego y en temporada de riego, a 20 cm de profundidad en distintos puntos modelados, para escenario 2 con tasa de riego de 5 mm/día	104
Figura 4.26 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para escenario con descenso promedio de 20 cm/año, en perfil D5	105
Figura 4.27 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para escenario con descenso promedio de 20 cm/año, en perfil A10	106
Figura 4.28 Resultados de humedad en el perfil de suelo para caso con descenso, para tiempo inicial, intermedio y final.....	108
Figura 4.29 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para caso con descenso y recuperacion promedio en perfil C19.	110
Figura 4.30 Resultados de humedad en el perfil de suelo para caso con descenso y recuperación, para tiempo inicial, intermedio y final.....	111
Figura 4.31 Comparación de contenidos de humedad en el perfil de suelo para el caso del perfil D5.	113
Figura 4.32 Comparación de contenidos de humedad en el perfil de suelo para el caso del perfil H10.	114
Figura 4.33 Comparación de contenidos de humedad en el perfil de suelo para el caso del perfil D21.	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clases de humedales en sistemas andinos para ecotipo “humedal continental”.....	7
Tabla 2.2 Tipos de vegetación azonal del altiplano.....	7
Tabla 2.3 Comparación de modelos de flujo y transporte.	20
Tabla 3.1 Zonas de riego para mitigación.	25
Tabla 3.2 Descripción de los sectores de vegetación, área suroeste Salar de Coposa.	27
Tabla 3.3 Riqueza de especies y cobertura total y promedio en sectores de vegetación, medida en 20 transectos, para octubre 2009 y marzo 2010.	29
Tabla 3.4 Ubicación estaciones meteorológicas en la zona.....	32
Tabla 3.5: Velocidad Media Mensual del Viento [km/h].....	37
Tabla 3.6: Área Lagunas Permanentes.....	38
Tabla 3.7: Promedio y mínimo del área por temporada.	39
Tabla 3.8 Parametros de retención de humedad según modelo de Van Genuchten.	41
Tabla 3.9 Humedad de saturación determinada para suelos particulares en el norte de Chile.....	41
Tabla 3.10 Conductividades hidráulicas saturadas K_{sat} (cm/día) según distintas fuentes.	42
Tabla 3.11 Registros de nivel freático disponibles en piezómetros CMA de febrero 2005 a mayo 2010 en zona de estudio.	45
Tabla 3.12. Registros de nivel freático disponibles en piezómetros CPS de enero 2006 a mayo 2010 en zona de estudio	46
Tabla 3.13 Tasas de descenso y recuperación para pozos someros.....	54
Tabla 3.14 Humedad de saturación en punteras de aluminio de Jachucoposa	60
Tabla 3.15 Parámetros de suelo muestras analizadas.....	62
Tabla 4.1 Perfiles a modelar y calicatas asociadas.....	66
Tabla 4.2 K_c según unidad vegetacional y temporada	74
Tabla 4.3 Evapotranspiración mensual promedio sistema de Jachucoposa.	75
Tabla 4.4 Resultados calibración para perfiles de humedad modelados. Parámetros finales de las curvas características para cada estrato y NRSM respectivos.....	82
Tabla 4.5 Perfiles representativos para cada zona de vegetación	86
Tabla 4.6 Volumen equivalente al final de temporada de riego según tasas de riego utilizadas	88
Tabla 4.7 Contenidos de humedad para distintas zonas de vegetación antes y durante la temporada de riego para una tasa aplicada de 5 mm/día	103
Tabla 4.8 Contenidos de humedad observados en distintos tiempos para las diferentes zonas de vegetación a los 50 cm y 100 cm de profundidad.....	109
Tabla 4.9 Contenidos de humedad observados en distintos tiempos para las diferentes zonas de vegetación a los 50 cm y 100 cm de profundidad.....	112
Tabla 4.10 Contenidos de humedad en escenario con riego de 3 mm/día y descenso de 20 cm/año para distintas zonas de vegetación, antes y durante el periodo de riego. ...	115
Tabla 4.11 Contenidos de humedad en escenario con riego de 3 mm/día, descenso de 20 cm/año y recuperación de 15 cm/año para distintas zonas de vegetación, antes y durante el periodo de riego.....	117

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos hídricos y del medio ambiente es un tema relevante, tanto a nivel mundial como nacional. La preocupación de la autoridad ambiental por preservar los ecosistemas y evitar que sean afectados antrópicamente va en aumento, por lo que se han incrementado las exigencias ambientales para las diversas industrias y actividades. Además, en los últimos años se han actualizado varias normativas relativas al medio ambiente, mediante modificaciones en el Código de Aguas, la ley General de Bases del Medio Ambiente, entre otras, para promover la conservación de los sistemas naturales.

En el norte del país, a pesar de la extrema aridez, existe una gran variedad de ecosistemas ricos en flora y fauna. En particular, en el norte grande, zonas con un ambiente marcadamente árido, la presencia de un suministro más o menos constante de agua, condiciona la existencia de sistemas vegetacionales característicos, conocidos con el nombre de vegas y bofedales (DGA, 2001).

Los humedales son ecosistemas únicos con una alta vulnerabilidad o un equilibrio biológico sumamente frágil. Debido a sus altos niveles de nutrientes, son ecosistemas muy productivos que mantienen grandes cantidades de comunidades de plantas, las que a su vez sustentan la vida silvestre (DGA, 2001). Dado esto es que la intervención humana, en especial el manejo del recurso hídrico debe ser controlado, de modo de minimizar el impacto sobre ellos y permitir conservarlos. En este marco, es que actualmente se han estado desarrollando modelos de funcionamiento ecosistémico de distintos sistemas altoandinos, de modo de entender las interacciones entre sus principales componentes, tales como agua, suelo y vegetación (Ahumada & Faúndez, 2009; CEA, 2010).

El presente estudio se centra en la vega asociada a la quebrada de Jachucoposa, ubicada en el salar de Coposa, I región de Tarapacá. La altura media de la cuenca del salar es de 3.730 m.s.n.m. y su vegetación es principalmente del tipo azonal, asociada al área de las vertientes y lagunas, y determinada por condiciones extremas del suelo y del sustrato geológico (CEA, 2010).

Según Ahumada & Faúndez (2009), la presencia de humedales en el altiplano responde a patrones azonales, es decir, la forma de distribución de una formación vegetal o especie responde a condiciones locales, las que normalmente están acotadas a características de suelo o sustrato, humedad, o a cualquier característica particular que determine su presencia, sin observarse un patrón continuo de distribución.

En el año 2010, el Centro de Ecología Aplicada (CEA), desarrolló en la vega de Jachucoposa un modelo ecosistémico conceptual del funcionamiento integrado del sistema, con énfasis en la componente vegetacional y sus forzantes. Se estudió el comportamiento temporal y espacial de las diferentes variables (nivel freático, humedad, meteorología, hidrología, calidad de aguas), su interacción y su grado de influencia sobre la vegetación del sistema.

El presente trabajo consiste en un complemento a dicho estudio, en el que se desarrolla un modelo numérico de la zona no saturada del sistema, el cual permitirá conocer y cuantificar las características del flujo y los gradientes de humedad del suelo, los que afectan y determinan la vegetación de la zona.

El modelo a realizar se considera una herramienta de gestión ambiental del sistema, ya que permitirá evaluar la disponibilidad hídrica para la vegetación bajo distintos escenarios de interés, los que representan las variaciones naturales y antrópicas en las variables forzantes del sistema.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es comprender y cuantificar los patrones de flujo y humedad de la vega de Jachucoposa, bajo distintos escenarios de interés ambiental, para entender a posteriori su relación con la vegetación de la zona.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la zona de estudio, desarrollando un modelo conceptual para estudiar la distribución de la humedad en la vega de Jachucoposa.
- Modelar la zona no saturada mediante un modelo numérico para estimar los perfiles verticales de humedad del suelo en zonas características de la vega.
- Modelar distintos escenarios, considerando variaciones tanto naturales como inducidas en las variables forzantes del sistema, como el nivel freático, precipitaciones, riego, etc.
- En base a los resultados obtenidos para los distintos escenarios, concluir sobre la utilidad del modelo desarrollado y su relación con la vegetación existente en la zona.

1.2 ÁREA DE ESTUDIO

La vega de Jachucoposa se encuentra en el borde suroeste del Salar de Coposa, asociada a la vertiente de Jachucoposa y al sistema lagunar que ésta genera. Su vegetación es principalmente del tipo azonal, respondiendo a las condiciones locales de disponibilidad hídrica y sustrato.

El salar de Coposa se ubica en la Primera Región de Tarapacá, en la zona del Altiplano o Puna. Se encuentra a 154 km al noreste de la ciudad de Pozo Almonte y 160 km al sureste de Iquique. Las montañas más altas que rodean la cuenca alcanzan los 5.260 m.s.n.m., con una altura promedio en la base de la cuenca de 3.730 m.s.n.m. (Gobernación provincia del Tamarugal, 2012).

En la Figura 1.1 se muestra un mapa regional de la zona con la ubicación del Salar de Coposa y en la Figura 1.2 y 1.3 la zona de estudio asociada a la vega de Jachucoposa en torno al sistema lagunar. Se muestra primero una vista general con los pozos de bombeo en el salar, pertenecientes a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), los que han sido explotados desde 1998 afectando la zona de estudio.

Luego, se observa en la Figura 1.3 un zoom al área de estudio, con las zonas de vegetación a estudiar para el desarrollo del modelo local de la zona no saturada.

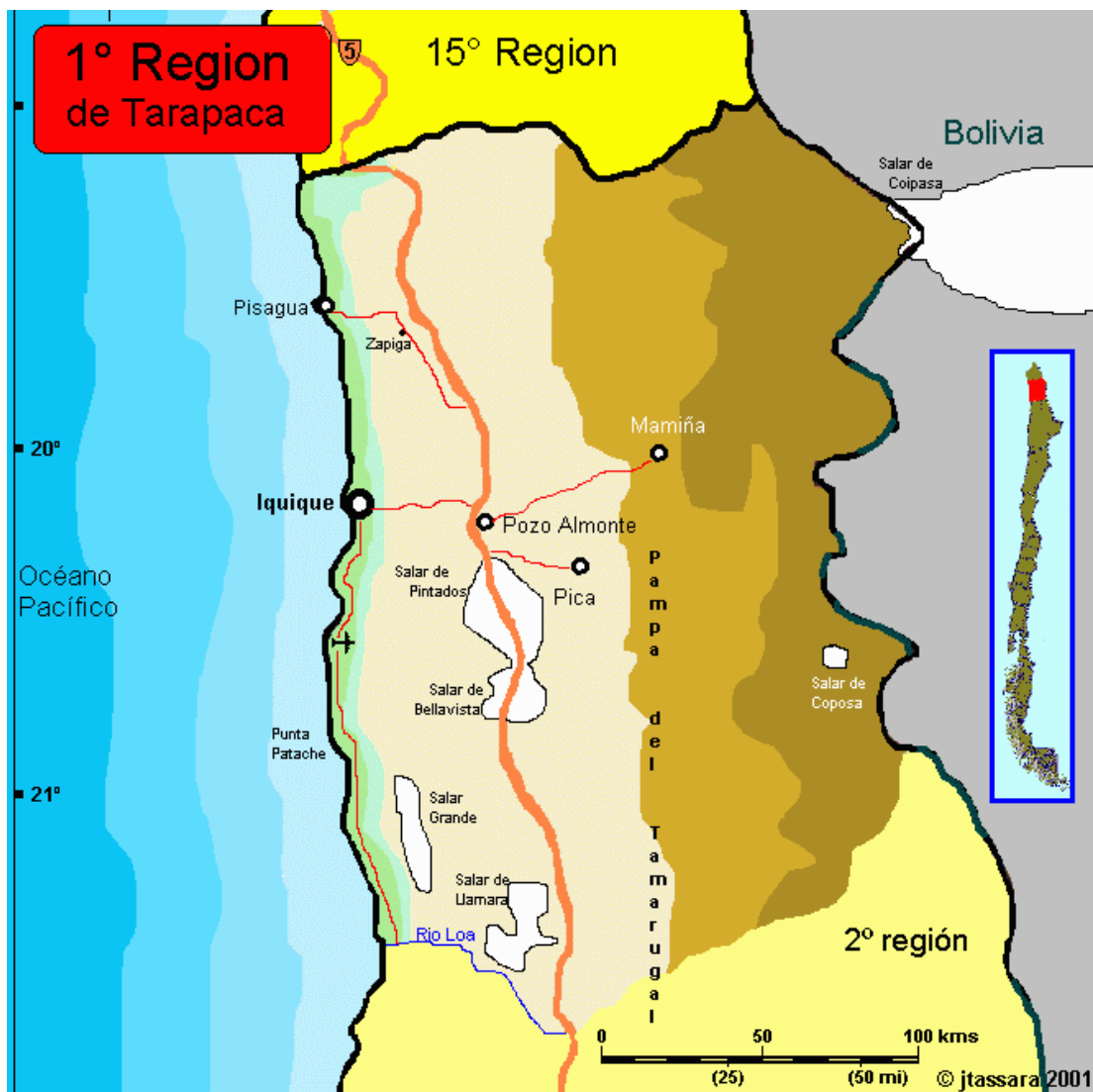


Figura 1.1 . Ubicación regional de zona de estudio. Salar de Coposa, I región de Tarapacá.
Fuente: www.avesdechile.cl

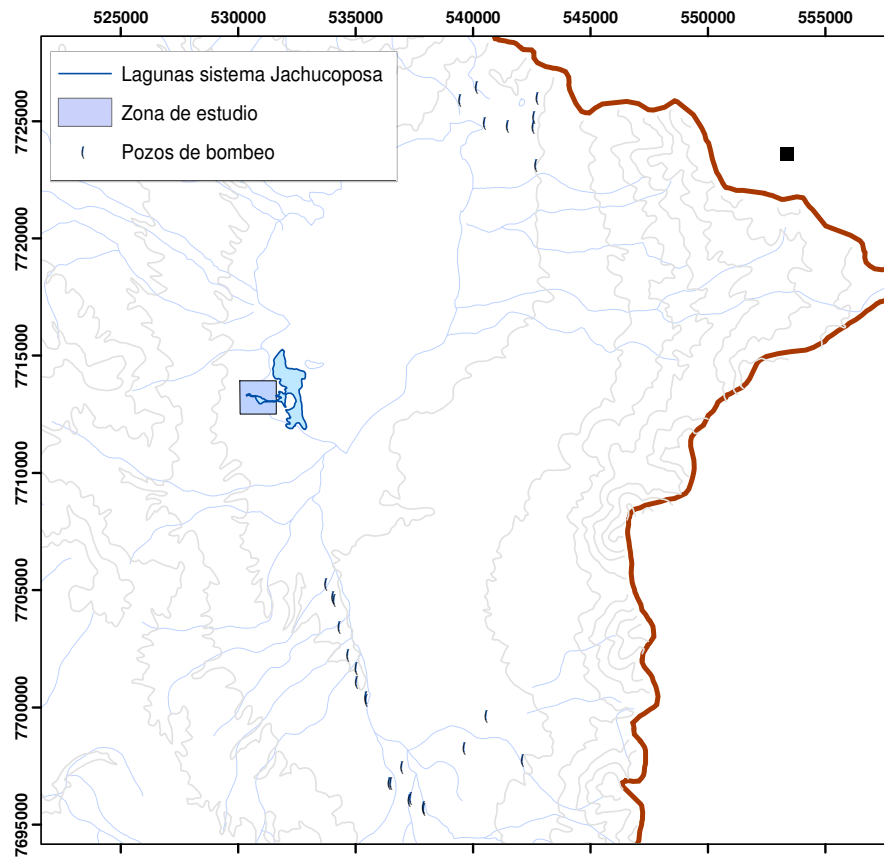


Figura 1.2 Zona de estudio y pozos de bombeo en Salar de Coposa.
Fuente: Elaboración propia en base a CEA (2010)

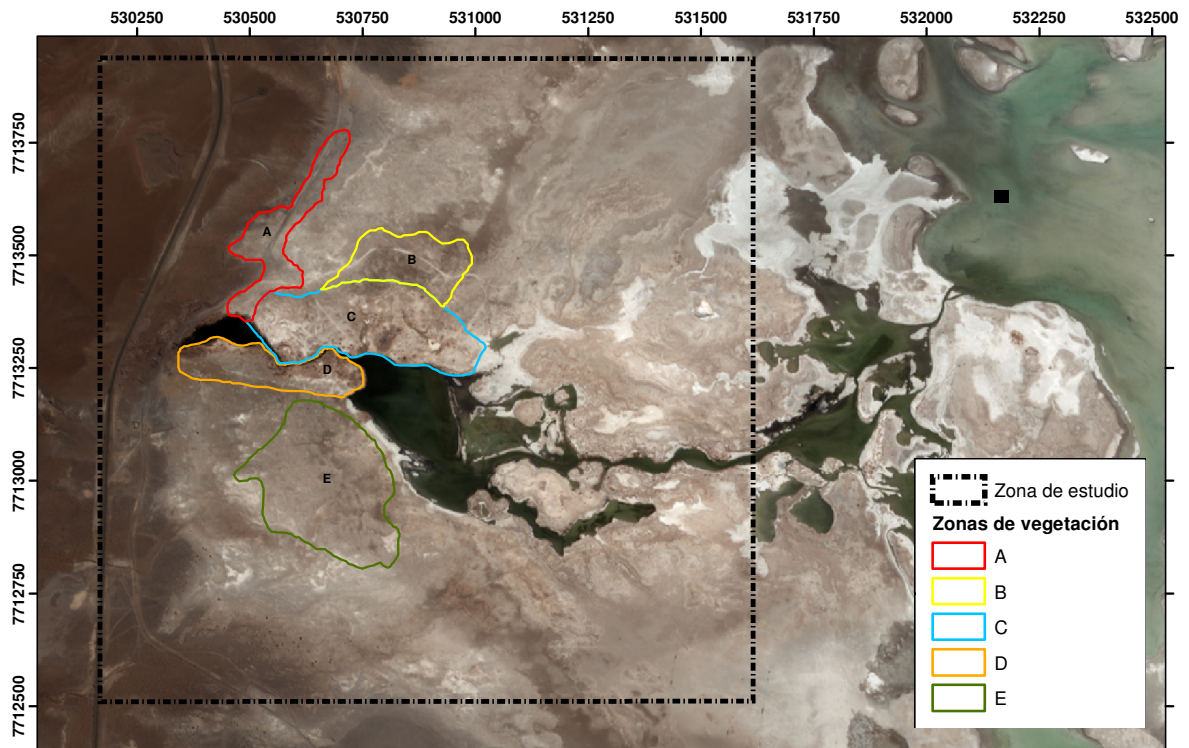


Figura 1.3. Zoom área de estudio y zonas de vegetación. Área de análisis para modelo local de la zona no saturada. Fuente: Elaboración propia

1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

En el Capítulo I de este informe se presenta la motivación al tema junto con los objetivos. Se muestra la zona de estudio y se define el área de análisis para el desarrollo del modelo de la zona no saturada de la vega de Jachucoposa.

En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico, describiendo los conceptos generales asociados a los humedales y vegas altoandinas, estudiando su relación con las componentes físicas del sistema, especialmente aquellas asociadas a la disponibilidad del recurso hídrico para la vegetación. Por otro lado, se estudian las ecuaciones que gobiernan el flujo no saturado en medios porosos, mediante las cuales se modela el flujo y la humedad del sistema, y se realiza una revisión bibliográfica de los modelos numéricos existentes para la simulación del flujo en la zona no saturada.

Se presenta en el Capítulo III, la caracterización física de la zona de estudio, con la recopilación de los antecedentes necesarios para el modelo a desarrollar.

En el Capítulo IV se desarrolla el modelo de la zona no saturada de la vega, partiendo desde el modelo conceptual para la zona, hasta los resultados obtenidos bajo los distintos escenarios.

Finalmente se presentan las conclusiones y análisis crítico en el Capítulo V.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1 CONCEPTOS GENERALES DE HUMEDALES ALTOANDINOS

El estudio de los humedales altoandinos en el Norte de Chile se ha venido desarrollando desde hace más de 10 años (DGA, 2001; Calvo *et al.*, 2000). Distintas instituciones gubernamentales se han preocupado de publicar una serie de guías para su entendimiento, protección y conservación. Entre ellas se encuentran: “*Guía Descriptiva de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altiplánica (SVAHT)*” (Ahumada & Faúndez, 2009), “*Delimitación de acuíferos que alimentan Vegas y Bofedales, de la I y II región*” desarrollado por la Dirección General de Aguas (DGA) en 1999 y su actualización en 2001 (DGA, 2001), “*Protección de humedales (vegas y bofedales)*” (Calvo *et al.*, 2000) realizado para la DGA y “*Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales andinos*” publicada en mayo de 2011 por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA), el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) y la DGA (MMA *et al.*, 2011).

En general, los objetivos de los estudios citados son aumentar el conocimiento sobre estos particulares sistemas y generar metodologías para su conservación, ya que el uso de los recursos hídricos, en especial por parte de la minería, los ha ido afectando a lo largo de los años.

Según la Convención Ramsar se define humedal como “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas” considerando así, todos los cursos y cuerpos de agua (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010).

En la “*Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales andinos*” (MMA *et al.*, 2011) los humedales se clasifican en ecotipos, los cuales corresponden a una familia de humedales que comparten propiedades, atributos e incluso amenazas. Para los humedales andinos se identifican los siguientes ecotipos:

- Evaporación: humedales controlados por gradiente de salinidad, donde altos niveles de radiación y escasas precipitaciones provocarían la evaporación gradual del agua.
- Afloramientos subterráneos: sistemas alimentados por agua subterránea con bajo contenido de sólidos disueltos y que dependiendo de la topografía, alimentan sistemas de evaporación.
- Escorrentía: sistemas que a pesar de estar localizados en zonas de alta radiación, no alcanzan niveles elevados de salinidad por la influencia de las precipitaciones, las que lavan permanentemente el sistema.

En la Tabla 2.1 se aprecia la clasificación para los humedales altoandinos, considerando su nombre común y ejemplos en Chile (MMA *et al.*, 2011). Según estos ejemplos, se observa que el sistema de Jachucoposa corresponde una vega alimentada por afloramientos subterráneos.

Tabla 2.1 Clases de humedales en sistemas andinos para ecotipo “humedal continental”.
Fuente: MMA *et al.*, 2011

Clase	Nombre común	Ejemplos en Chile
Evaporación	Salar	Salar de Atacama Salar de Huasco
Afloramientos subterráneos	Vega, bofedal, humedal	Parinacota Jachucoposa
Escorrentía	Río, arroyo, esteros, lagos	Río Lluta Río Lirima, Río Collacagua Río Lauca Río y lago Chungará Río Choapa Río Cachapoal Río Teno Río Maule

Además de los ecotipos, se han definido criterios de clasificación de los sistemas vegetacionales altiplánicos, los que determinan los siguientes tipos de vegetación (MMA *et al.*, 2011):

Tabla 2.2 Tipos de vegetación azonal del altiplano. Fuente: MMA *et al.*, 2011

Tipo	Características principales
Bofedal no Salino	Las especies vegetales que se desarrollan se caracterizan por presentar crecimiento en cojines en forma semiglobosa, formando cuerpos compactos en superficie. Son plantas muy compactas, y entre cojines, es posible encontrar especies que crecen formando césped corto.
Bofedal salino	
Pajonal Hídrico no salino	Especies vegetales de crecimiento cespitoso con desarrollo de follaje aéreo alto (mayor a 40 cm de altura), desarrollando cojines herbáceos de tamaño medio a grandes.
Pajonal Hídrico Salino	
Vega No Salina.	Presentan especies vegetales de crecimiento no cespitoso, desarrollando un césped parejo o con desarrollo de pequeños cojines herbáceos.
Vega Salina	

Según Ahumada y Faúndez (2009), entre los agentes forzantes que determinan la presencia de humedales andinos, el aporte hídrico es el más importante, existiendo una clara dependencia entre éste y la vegetación azonal, la que es sustentada por una serie de interrelaciones esquematizadas en la Figura 2.1, que pueden explicarse a través de las siguientes formas de suministro :

1. Suministro por acuífero subterráneo. Esta forma de alimentación permite dos tipos de aporte a través de:
 - 1.1. Surgencias: Corresponden a distintos afloramientos de agua subterránea como los que se describen a continuación. Dependiendo del tiempo que permanece el agua de estos afloramientos en el suelo, es decir cuan permanentes o estacionales son, es la presencia de vegetación más o menos hidrófila, variando desde la composición de bofedal (con menor requerimiento de agua) a pajonal hídrico salino (con requerimiento de agua permanente).
 - Vertientes. Éstas permiten la presencia de lagunas de agua dulce, que en algunos casos son sucedidas de lagunas de agua salada (lagunas someras de evaporación)
 - Afloramientos canalizados. Éstos alimentan, después de un largo tramo, lagunas de agua dulce y/o salada.
 - Surgencias difusas. Corresponden a afloramientos de bajo caudal que escurren lentamente irrigando la superficie del suelo.
 - 1.2. Ascenso capilar desde el acuífero: en este caso, el factor que determina la presencia del humedal está dado por la cercanía de la napa a la superficie del sustrato, sin embargo las variaciones inter e intra-anales del nivel freático, están determinadas principalmente por la conjugación de variables climáticas (temperatura, humedad y precipitación). Mientras más cercana la napa a la superficie, más hidrófilo es el sistema vegetacional.
2. Suministro por cursos de aguas superficiales: aporte dado por ríos superficiales que atraviesan planicies en las que se desarrolla vegetación hidromorfa en las proximidades, ya sea por inundación o por infiltración lateral. Ejemplos de vegetación azonal dada por el aporte de cursos superficiales es la existente en los bofedales en torno a los ríos Collacagua y Lirima.

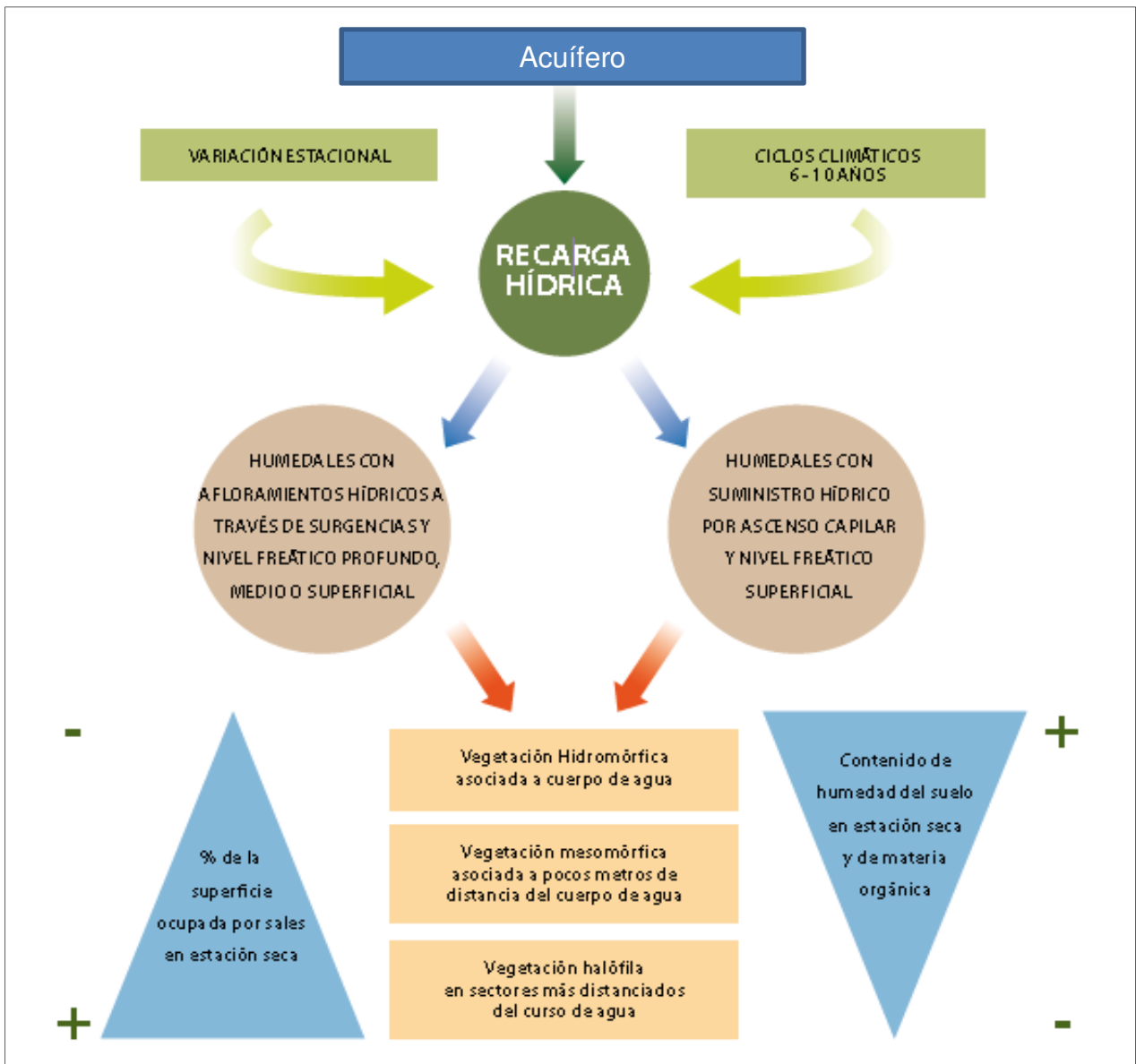


Figura 2.1 Componentes que determinan la presencia de los diferentes tipos de sistemas vegetacionales. Fuente: Ahumada & Faúndez, 2009

La cuenca del salar de Coposa corresponde a una cuenca endorreica, donde el agua que precipita escurre superficial o subterráneamente hasta el salar, ubicado en la parte baja de la cuenca. Dada la alta evaporación de estos sistemas, los flujos superficiales son escasos y el agua se transporta principalmente de forma subterránea (CEA, 2010). En la Figura 2.2 se muestra un esquema del comportamiento hídrico de este tipo de sistemas, donde existen afloramientos de agua subterránea en el salar, los que generan lagunas y humedales con vegetación asociada.

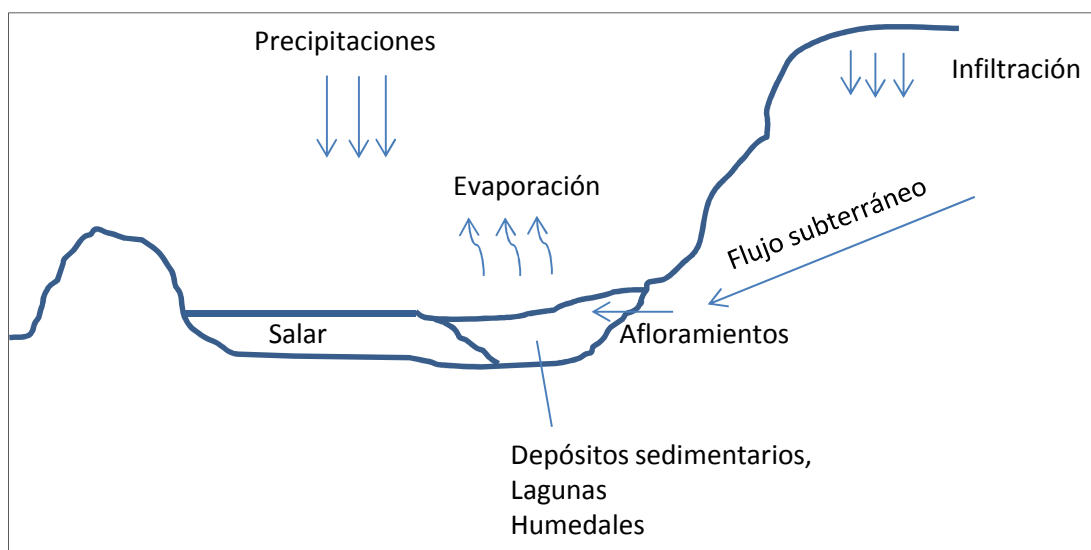


Figura 2.2 Esquema de afloramiento de aguas subterráneas, recarga y descarga del sistema.
Fuente: Modificado de Kampf & Tayler, 2006.

Según MMA, *et al.* (2010), los humedales altoandinos ubicados en cuencas endorreicas, se caracterizan por presentar zonas de acumulación de sales por la elevada evaporación, proceso que constituye la principal pérdida de agua del sistema. Este proceso genera gradientes espaciales, desde los puntos de afloramiento de aguas subterráneas –surgencias- hacia los sectores de menor altitud -lagunas terminales- dando como resultado humedales con una reducida extensión areal debido a la escasez hídrica y los gradientes de salinidad.

Los tipos de vegetación presentes en el salar dependen de la disponibilidad agua. Por un lado, existen especies estrechamente relacionadas con el recurso (hidrófilas), ya sea por la necesidad de captar agua desde el suelo saturado, bajo el nivel freático, o directamente desde el escurrimiento superficial. En el primer caso la vegetación desarrolla sus raíces hasta la profundidad de la napa, mientras que en el segundo, se limita a una angosta franja en torno al escurrimiento. Por otro lado, existen otras especies que necesitan menos agua y pueden captar el recurso desde la lluvia o desde la humedad del suelo sobre el nivel freático. De este modo, la distribución de la vegetación depende directamente de la posición del nivel freático y cuerpos de agua superficiales, ya sea por su captación directa de agua de la napa o por la humedad presente en el suelo (CEA, 2010).

En la Figura 2.3 se muestra un esquema de las primeras capas de suelo y de su vegetación asociada, haciendo la distinción entre las distintas secciones de la zona no saturada.

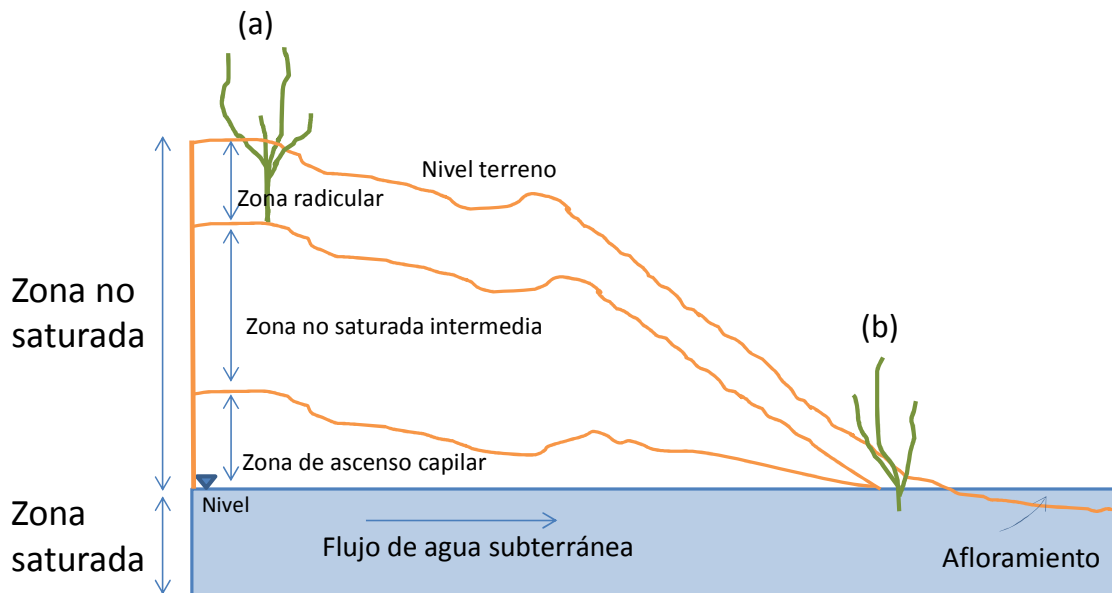


Figura 2.3 Subdivisiones de zona no saturada. (a) Vegetación con bajo requerimientos de agua que capta el recurso hídrico desde la humedad del suelo. (b) Vegetación hidrófila en zonas de afloramiento que capta agua directo de la napa. Fuente: Elaboración propia

El contenido de humedad en el suelo depende de la ubicación del nivel freático, del tipo de suelo y de las condiciones meteorológicas. Estas forzantes determinan el límite entre la zona saturada y no saturada, la recarga y descarga del sistema, y la capacidad de drenaje y almacenamiento del suelo, los que definen finalmente la distribución de la humedad en el perfil de suelo.

En la Figura 2.4 se observa la humedad en la vertical para un perfil de suelo, la cual disminuye desde el nivel freático, donde el contenido de humedad corresponde a la porosidad del material (saturación), hacia la superficie (Espinoza, 2005).

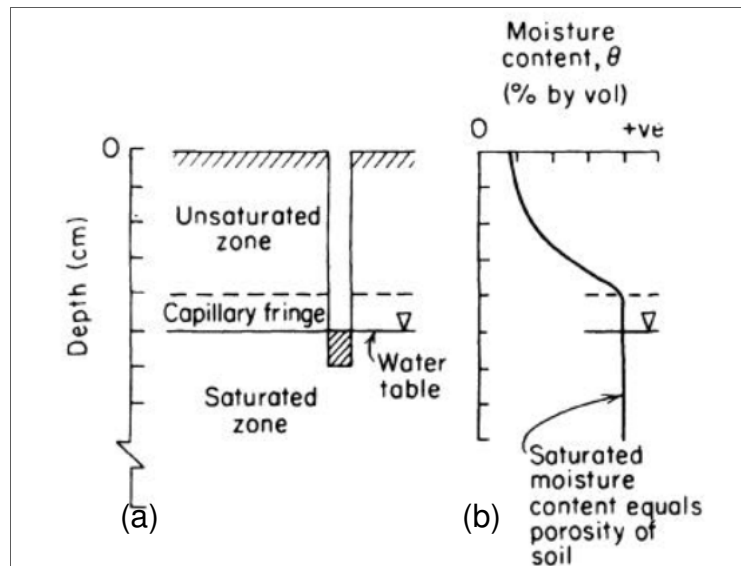


Figura 2.4 Agua subterránea cerca de la superficie del suelo. (a) Zonas saturada y no saturada. (b) Perfil del contenido de humedad en profundidad. Fuente: Espinoza, 2005

Las curvas que definen el comportamiento de la humedad del suelo se denominan “curvas de retención de humedad” o bien, “curvas características del suelo”. Éstas entregan la relación entre el contenido de humedad y la succión o presión asociada para alcanzar dicho estado. En la Figura 2.5 se presenta una curva de retención de humedad tipo, indicándose las humedades de capacidad de campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP), junto con los volúmenes de agua disponibles (Lajos, 2008).

La capacidad de campo (CC) corresponde a la humedad después de 2 o 3 días que el suelo ha sido saturado por precipitación o infiltración, es decir, a la humedad después de que el suelo ha drenado gravitacionalmente. El punto de marchitez permanente (PMP) es la humedad a la cual las plantas ya no pueden recuperar su vigorosidad cuando el suelo se seca. El volumen de agua disponible para la vegetación, corresponde entonces al volumen en CC menos el volumen de agua en PMP, como se observa en el perfil de la Figura 2.5. El coeficiente de higroscopicidad corresponde a la humedad que el suelo toma del aire húmedo, la cual no se puede remover del suelo naturalmente.

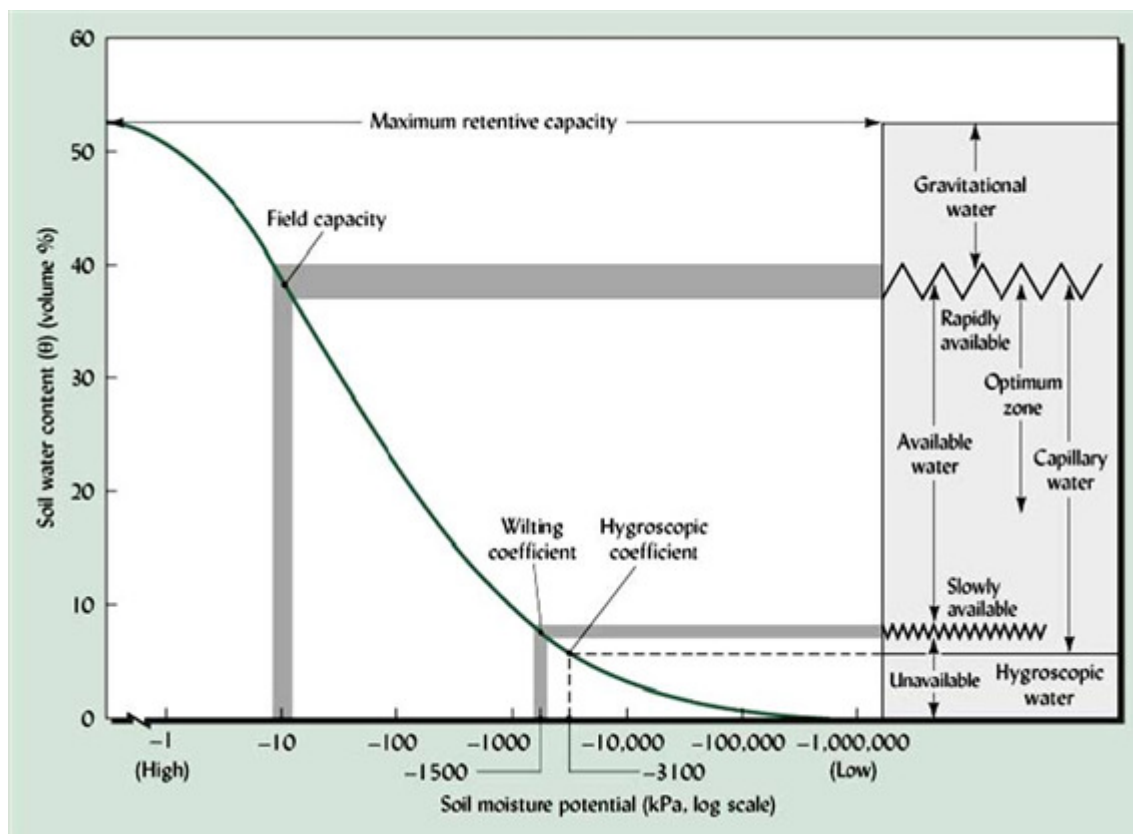


Figura 2.5 Curva de retención de humedad y volúmenes de agua disponible para la vegetación.
Fuente: Lajos, 2008

2.2 ASPECTOS CONCEPTUALES DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA

Para representar correctamente los fenómenos que ocurren en las primeras capas de suelo, específicamente el comportamiento de la humedad en la zona no saturada, es importante conocer las ecuaciones que describen el flujo en un medio poroso no saturado. En general, estas ecuaciones son válidas sólo en la zona radicular y en la zona no saturada intermedia. Sin embargo, en general se asume que la zona capilar se comporta como la zona saturada.

La ecuación que describe el flujo en medios porosos no saturados, corresponde a la Ecuación de Richards (2.1), donde la masa de fluido almacenada en el medio depende de la humedad presente, la cual puede expresarse en función de la porosidad del medio (n) y de su grado de saturación (S_w).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\theta = S_w n \quad (2.2)$$

O en forma vectorial:

$$\nabla \cdot (\bar{K}(h) \cdot \nabla H) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.3)$$

Donde:

H [L] Carga hidráulica, correspondiente a altura de presión (h), más la cota geométrica (z), más la altura de velocidad ($v^2/2g$). Esta última se considera despreciable con respecto a las anteriores.

\bar{K} Tensor de conductividad hidráulica no saturada

$\nabla \cdot$ Operador divergencia

∇ Operador gradiente

Θ [L^3/L^3] Humedad volumétrica del medio, que corresponde a la razón entre el volumen del fluido almacenado y el volumen total.

Las Ecuaciones (2.1) y (2.3) son válidas para fluidos incompresibles, por lo que se considera que la densidad no varía.

En el caso de flujo unidimensional en la dirección vertical (z), la Ecuación (2.1) puede ser escrita de la siguiente forma, donde la carga hidráulica H se expresa en función de la cota (z).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial (h+z)}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.4)$$

Expandiendo los términos, se obtiene la ecuación de Richards para una dimensión, expresada en su forma mixta, es decir, en función de la humedad (Θ) y la altura de presión (h).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial(h)}{\partial z} + K(h) \right) = \quad (2.5)$$

La conductividad hidráulica saturada viene dada por:

$$K(h, z) = K_s(z)K_r(h, z) \quad (2.6)$$

Donde K_r es la conductividad hidráulica relativa [-] y K_s la conductividad hidráulica saturada [LT^{-1}].

La relación funcional entre la humedad y la altura de presión - $\Theta(h)$ - permite escribir la Ecuación (2.5) en función sólo de la humedad, o bien en función sólo de la altura de presión.

El estudio de los flujos en la zona no saturada consiste básicamente en la resolución de la ecuación de Richards en cualquiera de sus formas, las que determinan el comportamiento de las soluciones numéricas encontradas para dicha ecuación. En el caso de la forma en función de la humedad, los métodos numéricos encuentran problemas en la discontinuidad de $\Theta(h)$, la que ocurre para la interfaz de suelos con distintas curvas de retención de humedad. La representación basada en la altura de presión h , resuelve el problema anterior, sin embargo presenta un balance de masa pobre y una gran incertidumbre en la precisión de los resultados. La forma mixta (2.5) presenta los beneficios de las otras dos formas evitando sus inconvenientes, por lo que se ha adoptado en la mayoría de los modelos de simulación desarrollados (Herrera, 2000).

En la Figura 2.6 se observa un esquema del perfil de suelo, donde se presentan los distintos parámetros y variables de la Ecuación de Richards (2.5).

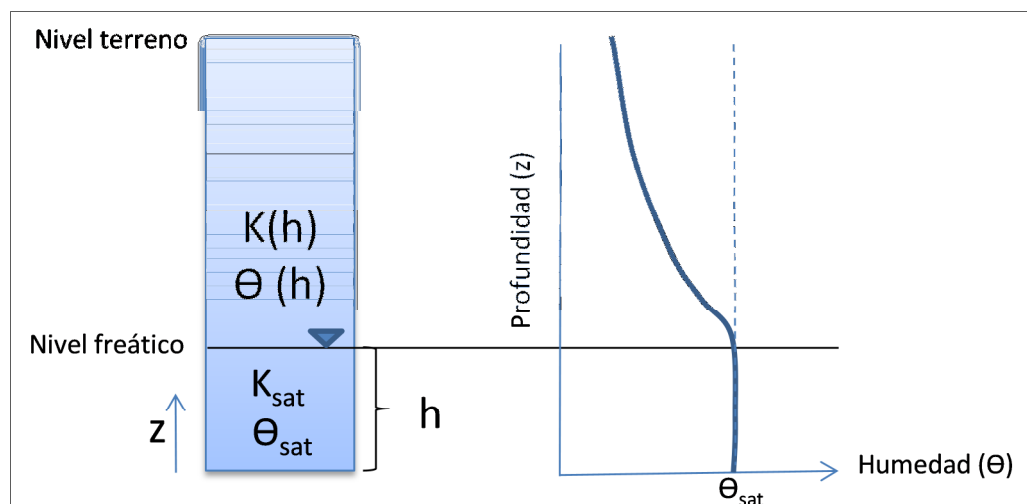


Figura 2.6 Perfil de suelo unidimensional (z). Contenido de humedad y conductividad hidráulica no saturada. Fuente: Elaboración propia en base a Espinoza (2005).

Para determinar las propiedades hidráulicas del suelo no saturado, $\theta(h)$ y $K(h)$ en (2.5), que son funciones altamente no lineales de la altura de presión, y que son imposibles de determinar completamente a través de métodos experimentales (Anabalón, 1988), se recurre a modelos analíticos que permiten combinar los resultados experimentales con los modelos de comportamiento del suelo, lo que da origen a relaciones funcionales entre los diversos parámetros.

Existen diversos modelos de comportamiento para las curvas características de los suelos, tales como: Brusaert, Haverkamp, Van Genuchten, Brooks & Corey (Herrera, 2000; Simunek *et al.*, 2008).

El modelo a implementar en el presente estudio, considera el modelo analítico de Van Genuchten (1980)¹, el que utiliza el modelo estadístico de distribución de tamaños de poros de Mualem (1976)² para obtener una ecuación para la conductividad hidráulica no saturada en término de los parámetros de retención de agua del suelo. Las expresiones dadas por Van Genuchten son:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (2.8)$$

Donde

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (2.9)$$

S_e es la saturación efectiva:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.10)$$

θ_r y θ_s denotan los contenidos de agua residual y saturado respectivamente, α es el inverso de la presión de propagación, n es el índice de distribución del tamaño de poro y l el parámetro de conectividad de los poros. Los coeficientes α , n y l son coeficientes empíricos que afectan la forma de las funciones hidráulicas. El parámetro l fue estimado por Mualem (1976)² como 0.5, como promedio para muchos suelos.

En la Figura 2.7 se presentan esquemáticamente las funciones de conductividad hidráulica y de retención de humedad dadas por el modelo de Van Genuchten. Se

¹ Y ² En Simunek *et al.*, 2008.

destacan las humedades CC y PMP, que se pueden medir fácilmente en laboratorio y que generalmente se utilizan para la determinación de las curvas.

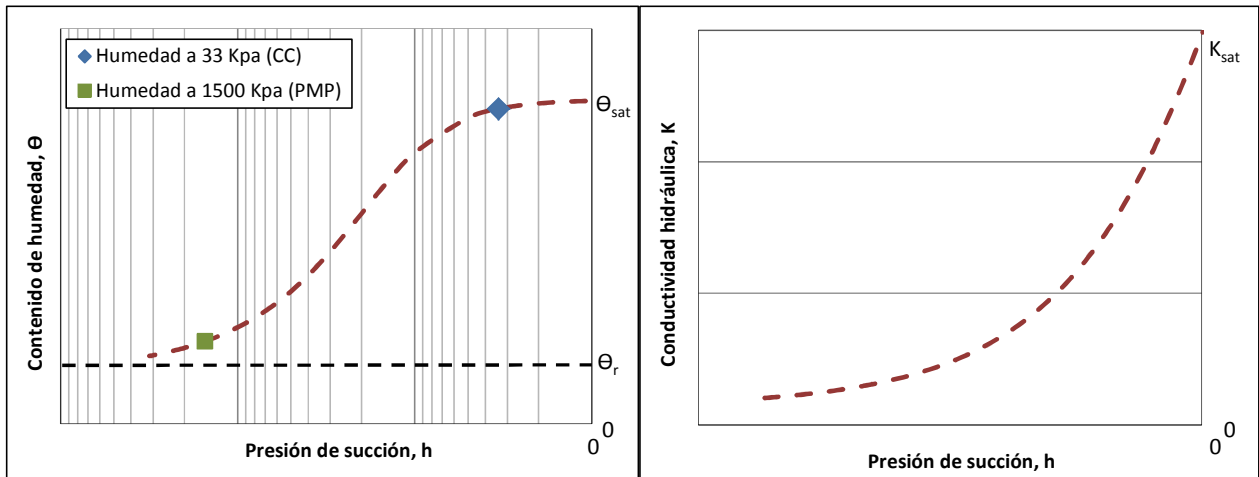


Figura 2.7 Esquema curva de retención de humedad Θ (h) y función de conductividad hidráulica K (h) dadas por modelo de Van Genuchten según ecuaciones (2.7) y (2.8). Fuente: Elaboración propia en base a ŠIMŮNEK & ŠEJNA (2011).

2.2.1 Condiciones de borde y condición inicial

La solución de la Ecuación (2.5) requiere una condición inicial y dos condiciones de borde, aguas arriba y aguas abajo.

Como condición inicial se tiene la distribución de altura de presión en todo el dominio del flujo:

$$h(z, t = t_0) = h_i(z) \quad (2.11)$$

Donde $h_i(z)$ es una función conocida de z, y t_0 el tiempo cuando comienza la simulación.

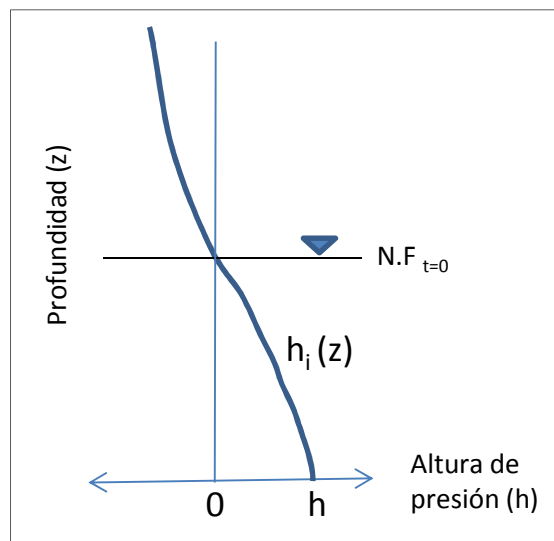


Figura 2.8 Condición inicial

Como condición de borde para el flujo, existen tres tipos:

- a) Altura de presión conocida (o Dirichlet)

$$h(z, t) = h(t) \quad \text{para } z \in \Gamma \quad (2.12)$$

con Γ como el contorno o borde en que aplica la condición.

- b) Flujo o gradiente conocido (Cauchy o Neuman)

$$q(z, t) = -K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{para } z \in \Gamma \quad (2.13)$$

Con $q(z,t)$ [L/T] el flujo de agua en z para un tiempo t . Para el caso 1D corresponde a la velocidad calculada con la ley de Darcy.

- c) Condición mixta

$$q_0(t) = -K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{para } t < t_c \quad (2.14)$$

$$h(z, t) = h(t) \quad \text{para } t > t_c \text{ y } z \in \Gamma \quad (2.15)$$

2.3 MODELOS NUMÉRICOS DE SIMULACIÓN DE FLUJO EN MEDIOS POROSOS NO SATURADOS

Como se menciona anteriormente, el estudio del flujo y la humedad en la zona no saturada se acota a la resolución de las ecuaciones planteadas en Capítulo 2.2. Para la modelación del flujo subterráneo se han desarrollado una serie de modelos numéricos comerciales, algunos de los cuales abordan el problema de flujo en la zona no saturada y el transporte de masa.

Los modelos de flujo han sido ampliamente usados y probados, sin embargo, la zona estudio posee particularidades- extrema aridez y salinidad- que han hecho difícil encontrar casos similares de estudios públicos en la literatura. A continuación se hace una breve descripción de los modelos estudiados.

MODFLOW corresponde a la herramienta 3D más utilizada en el mundo para la modelación numérica de flujo subterráneo saturado, desarrollada por el U.S. Geological Survey. El flujo de agua subterránea a través del acuífero es modelado usando una aproximación de diferencias finitas, permitiendo la creación de capas, que pueden ser simuladas como confinadas o no confinadas, o como una combinación de ambas. Los flujos externos como el flujo desde pozos, áreas de recarga, evaporación, precipitaciones y flujos a través de ríos también pueden ser simulados (Scientific Software Group, 2012). Dado que es una herramienta estándar (Kumar, 2003), su principal ventaja es la familiaridad para el usuario y que ha sido probado para diversas

aplicaciones. MODFLOW incorpora en sus últimas versiones MT3MS y RT3D, modelos para resolver problemas de transporte de solutos y contaminantes, que incorporan dispersión, advección y reacciones químicas (Scientific Software Group, 2012).

MODFLOW SURFACT es un modelo de diferencias finitas tridimensional para simular problemas de flujo y transporte en medios saturados y no saturados, basado en el código de MODFLOW, que mejora la capacidad y robustez de las simulaciones, presentando avances sustanciales de las versiones anteriores de MODFLOW (Scientific Software Group, 2012).

FEFLOW es un software usado para la modelación del flujo subterráneo, el transporte de contaminantes y el flujo de calor en el subsuelo, desarrollado por DHI-WASY GmbH (FEFLOW, 2012). El modelo está basado en un esquema de elementos finitos y puede ser bidimensional o tridimensional, y trabajar en condiciones saturadas o no saturadas, teniendo la capacidad de generar sus propias mallas. Una ventaja de este programa es que permite mostrar los resultados de forma gráfica, exportar sus resultados a sistemas de información geográfica, tales como ArcView, etc. (Kumar, 2003)

HYDRUS es un programa de modelación para el análisis de flujo y transporte de soluto en medios porosos, que considera variable el grado de saturación en el medio. Es un modelo basado en el esquema de elementos finitos para simular en una, dos o tres dimensiones el movimiento de agua, calor y múltiples solutos. Este posee una presentación gráfica de los resultados y una interfaz que facilita el ingreso de los datos y parámetros (PC-Progress, 2008). El software fue desarrollado por J. Simunek, K. Huang, M. Sejna, y M.Th. Van Genuchten del U.S. Salinity Laboratory, USDA/ARS, Riverside, California (Espinoza, 2005) y sus aplicaciones están principalmente asociadas a la agronomía (ZNS, 2011; ZNS, 2009). HYDRUS incorpora la zona no saturada, incluyendo aspectos relacionados con la captación de agua por la vegetación en la zona de las raíces (Simunek & Sejna, 2011).

SEAWAT fue desarrollado como una combinación de MODFLOW y MT3DMS, y es un modelo que resuelve de manera acoplada las ecuaciones de flujo y transporte. SEAWAT fue creado para simular el flujo de agua subterránea en problemas transientes tridimensionales y con densidad variable. Su ventaja radica en que está basado en MODFLOW (modelo de mayor uso a nivel mundial), por lo que suele ser amigable para el usuario (Scientific Software Group, 2012).

COMSOL Multiphysics es un software enfocado en la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) mediante elementos finitos. Aquí el usuario posee las herramientas para introducir las ecuaciones que definen su modelo. Sin embargo, COMSOL también incorpora sistemas físicos predefinidos con sus ecuaciones (modelos) agrupados en áreas temáticas –módulos- junto con una base de datos para las propiedades físicas relevantes de diversos materiales.. Otro aspecto a destacar, es la posibilidad que brinda de acoplar diferentes físicas en un mismo problema de una forma sencilla, valorando la acción simultánea de solicitaciones de distinta naturaleza sobre el mismo sistema (Torres *et. al.*, 2007). Esto se observa, por ejemplo, en la posibilidad de acoplar flujo, transporte de sales, de calor, entre otros aspectos, a un mismo problema.

El módulo de interés para este estudio corresponde al de flujo sub-superficial (Subsurface Flow Module), el cual incorpora el flujo en medios porosos (saturado y no saturado) y el problema de transporte (COMSOL, 2012).

GMS corresponde a un paquete computacional que permite el desarrollo, caracterización y visualización de modelos de aguas subterráneas en un ambiente tridimensional. Este permite la modelación de flujo y transporte dependiendo de con qué modelos se trabaje, entre los que incluye: MODFLOW, MODPATH, MT3DMS, SEAWAT, FEMWATER, SEEP2D, entre otros (Aquaveo, 2012).

FEMWATER es una implementación de dos modelos: 3DFEMWATER (flujo) y 3DLEWASTE (transporte), donde se resuelven acopladamente las ecuaciones de flujo de densidad variable y de transporte. Su estructura fue modificada para ser integrado a GMS, de modo de tener una interfaz gráfica útil y amigable para el usuario (Aquaveo, 2012).

Se muestra en la tabla a continuación una comparación realizada para los distintos modelos estudiados de modo de resumir la información recopilada.

Tabla 2.3 Comparación de modelos de flujo y transporte. Fuente: Elaboración propia

	MODFLOW (MT3MS + RT3D)	MODFLOW SURFACT	FEFLOW	SEAWAT	FEMWATER	HYDRUS	COMSOL, Subsurface Flow	GMS	
Zona no saturada	no	si	si	no	si	si	si	si	
Densidad Variable	no	si	si	si	si	no	si	si	
Transporte de soluto	Advección	si	si	si	si	si	si	si	
	Dispersión /difusión	si	si	si	si	si	no este modulo	si	
	Adsorción	si	si	si	si	si	no este modulo	si	
	Decaimiento o producción	si	si	si	si	si	no este modulo	si	
	Biodegradación	no	si	no	si	si	no este modulo	si	
	Fuentes/ sumideros	no	si	si	si	si	no este modulo	si	
Aspectos numéricos	Método	Diferencias finitas	Diferencias finitas	Elementos finitos	Diferencias finitas	Elementos finitos	Elementos finitos	Elementos finitos y diferencias finitas	
	Herramientas de malla EF	no	no	si	no	si	si	si	
Precio aproximado	\$ millones	0.8	3.0	2.6	Gratuito	1.9	1.3	7.1	5.0
Requieren GUI adicional	MODFLOW Base GUI's	MODFLOW Base GUI's	no	MODFLOW Base GUI's	GMS	no	COMSOL multiphysics	no	
Origen	U.S Geological Survey	U.S Geological Survey	DHI-WASY GmbH	U.S Geological Survey	EPA	U.S. Salinity laboratory	COMSOL Group	AQUAVEO	
Calibración	Automática- PEST	Automática- PEST	no	Automática- PEST	Automática- PEST	No, tiene sistema de resolución inv.	no	Automática- PEST	
Enfoque	Flujo subterráneo	Flujo subterráneo y transporte	Flujo y transporte en subsuperficie	Flujo y transporte. Intrusión salina	Flujo saturado y no saturado y transporte de residuos. Intrusión salina	Agronómico. Zona vadosa o no saturada	Multi físico	Ambiente para modelos de flujo y transporte (modflow base GUI's)	

*Versión mas completa de GMS: incluye MODFLOW, SEAWAT, FEMWATER, PEST, etc. Hay versiones más económicas pero no incluyen todos los modelos necesarios para modelación del flujo no saturado

CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 REVISIÓN DE ESTUDIOS E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se describe a continuación los distintos estudios consultados para el desarrollo del presente trabajo, de los cuales se obtienen los principales antecedentes de la zona de estudio.

3.1.1 Modelación Ecosistémica Vega Jachucoposa, Salar de Coposa (CEA, 2010)

Este documento se enmarca en una asesoría realizada por el CEA a CMDIC, para estudiar el funcionamiento ecosistémico del sistema de Jachucoposa. Se analizan las posibles interacciones entre sus componentes físicos, químicos y biológicos, y la interacción de éstos con los agentes externos que actúan sobre el ecosistema, como por ejemplo, las condiciones meteorológicas.

Se analizan los diferentes factores que producen alteraciones en el ecosistema, identificando las variables forzantes y respuesta, lo que permite evaluar el plan de manejo ambiental en la zona de estudio.

Este estudio recopila todos los antecedentes hasta la fecha del sistema de Jachucoposa, incorporando también nuevos monitoreos de vegetación.

3.1.2 Seguimiento variables hídricas del sistema Jachucoposa (GP Consultores, 2007-2008).

3.1.2.1 Fase I: Diagnóstico de las variables hídricas relevantes del Sistema Jachucoposa (GP Consultores, 2007)

Este estudio fue desarrollado por GP Consultores por encargo de CMDIC, para evaluar el sistema hídrico del sistema Jachucoposa, con el objetivo de evaluar la condición actual del sistema y de presentar mejoras a los sistemas de mitigación y seguimiento ambiental del sistema.

Las variables hídricas relevantes son aquellas indicadas en la Resolución Exenta N°23 del 2006 de COREMA I región, correspondientes a: nivel freático, caudal de la vertiente, humedad del suelo y área de la laguna de evaporación, además de otras variables útiles para la interpretación de los datos como precipitación, perfil de suelo, etc.

El documento se divide en las siguientes cuatro partes:

- Parte 1: Diagnóstico de las variables relevantes para la vegetación, en los sectores del bofedal identificados por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) de la I región.
- Parte 2: Optimización del sistema de mitigación
- Parte 3: Proposición de la Red de Monitoreo
- Parte 4: Adquisición de Instrumentación para el Seguimiento y Monitoreo.

3.1.2.2 Fase II: Seguimiento del estado de las variables hídricas relevantes del sistema Jachucoposa (GP Consultores, 2008)

Este estudio corresponde a una evaluación mensual del estado de los recursos hídricos del sistema Jachucoposa, la cual abarca los siguientes aspectos:

- Evaluación mensual del estado de humedad en el sistema Jachucoposa, mediante la realización de mediciones de perfiles de humedad.
- Evaluación mensual del estado de los niveles del agua subterránea (acuífero somero), con especial énfasis en el análisis de curvas equipotenciales y de isoprofundidad.

El análisis considerado en este documento comprende los meses entre julio y diciembre de 2007, y se enfoca preferentemente en los sistemas vegetacionales priorizados por el SAG en el año 2006.

3.1.3 Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa (DICTUC, 2005)

Este estudio es encargado por CMDIC al DICTUC en el año 2005, y está orientado a la actualización del modelo conceptual y numérico que permite describir y predecir el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar de Coposa. El modelo constituye una herramienta de análisis, estudio y gestión de la cuenca, que tiene los siguientes objetivos principales:

- Mejorar y complementar el conocimiento hidrogeológico de la cuenca y de su funcionamiento.
- Estudiar los efectos que se han verificado en el sistema hidrogeológico producto de la operación de los pozos de la compañía, es decir, sobre la piezometría del acuífero y sobre los caudales de la vertiente Jachucoposa.
- Analizar y actualizar las predicciones del funcionamiento de la cuenca realizadas en las evaluaciones ambientales a que ha sido sometido el proyecto.
- Generar información con un respaldo adecuado que pueda ser utilizada en la confección de estudios de los ecosistemas y de las medidas de mitigación óptimas a implementar para protegerlos.

3.1.4 Sistema de riego y recuperación bofedal de Jachucoposa, Salar de Coposa. Informe final temporada 2009-2010 (Tecknoriego, 2010)

Este estudio corresponde al análisis del sistema de riego aplicado como medida de mitigación en el sistema Jachucoposa, con el estudio de la recuperación observada en el bofedal. El documento se estructura en cinco capítulos, yendo desde la descripción del sistema de riego, el análisis de la operación, el estudio de la humedad y los suelos, hasta el cierre y la mantención del sistema de riego al fin de la temporada.

- Capítulo I: Descripción y Operación Sistema de Riego
- Capítulo II: Análisis de la Operación del Sistema de Riego
- Capítulo III: Monitoreo Humedad de Suelos

- Capítulo IV: Recuperación de Suelos Bofedal de Jachucoposa
- Capítulo V: Cierre y Mantenimiento Sistema de Riego

3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACION DISPONIBLE

Se analiza en este capítulo, la información disponible de cada uno de los componentes relevantes, para la elaboración del modelo conceptual y posterior modelo numérico de la zona saturada de la vega de Jachucoposa. Esta información es principalmente obtenida de los estudios descritos en el Capítulo 3.1.

Con el objetivo de recabar la información necesaria para el modelo se describen a continuación las siguientes componentes:

- Área modelo
- Medidas de mitigación aplicadas
- Vegetación
- Componentes físicas del sistema
 - Clima y meteorología
 - Hidrología
 - Hidrogeología
 - Suelos

3.2.1 Área modelo conceptual

Dentro del Salar de Coposa, la vertiente Jachucoposa constituye un afloramiento natural del sistema acuífero de la cuenca, la cual genera dos pequeñas lagunas permanentes conectadas superficialmente entre sí, las que finalmente son canalizadas a una gran laguna de evaporación. Estos cuerpos de agua han permitido el desarrollo de un complejo ecosistema acuático de agua dulce y salada, junto con un cinturón de vegetación que dependen directa o indirectamente de los aportes hídricos provenientes de la vertiente, así como de los niveles de agua subterránea y del contenido de humedad en el perfil de suelo (CEA, 2010).

El área de estudio del presente trabajo se presentó en el Capítulo 1.2, la cual se define en base a la vegetación de la vega, asociada a los cuerpos de agua presentes en Jachucoposa. Las zonas mostradas en la Figura 1.3, corresponden a las áreas críticas de vegetación establecidas en la zona por el SAG (SAG Tarapacá Ord. N°1607, 2006), las cuales fueron definidas según la representatividad de formaciones vegetacionales y si éstas eran sensibles o no al proceso de extracción de agua y/o manejo hidrobiológico del sistema (CEA, 2010).

El modelo a desarrollar, corresponde a un modelo local, el cual incorpora las zonas relevantes de vegetación en la vega que han sido afectadas por la extracción de aguas subterráneas a nivel distrital en el Salar de Coposa. El alcance de este estudio corresponde a analizar las alteraciones en la zona no saturada a nivel local, considerando conocidos los efectos distritales en los niveles de aguas subterráneas, causados por la explotación del acuífero de Coposa por parte de CMDIC.

3.2.2 Medidas de mitigación aplicadas

El acuífero del Salar de Coposa ha sido explotado a partir de 1998 desde distintos sectores de producción por CMDIC, lo que ha provocado diferentes impactos en los niveles del acuífero existente bajo el salar, los que a su vez han afectado el afloramiento de la vertiente Jachucoposa, el sistema lagunar y su vegetación asociada.

La principal variable ambiental definida para evaluar los efectos de la explotación de aguas subterráneas en el Salar de Coposa, corresponde al caudal de la vertiente Jachucoposa, siendo el indicador que permite fijar condiciones máximas de estrés sobre el ecosistema aledaño a las lagunas. Para ello, se estableció un caudal umbral de 45 l/s, que en el caso de descender, activaría la aplicación de las medidas de mitigación (GP Consultores, 2007).

En agosto del 2004, la DGA informó la disminución del caudal de la vertiente Jachucoposa, midiéndose 28 l/s, constatando que en el humedal del Salar de Coposa se estarían produciendo impactos negativos por la extracción de aguas subterráneas (CEA, 2010).

En este contexto, el año 2005, CMDIC propuso a la Comisión Regional de Medio Ambiente (COREMA) un plan de acción que contemplaba el estudio hidrogeológico de la cuenca del Salar de Coposa y la implementación de medidas de mitigación. Éstas consistían principalmente en la incorporación artificial de agua suplementaria a la vertiente Jachucoposa, el diseño de un sistema de riego y el traslado de derechos de agua, desde el sector Falla Pabellón a otras áreas de bombeo en el sector norte (CEA, 2010)

Las áreas delimitadas por el SAG en el año 2006 (Figura 1.3), se han utilizado para la elaboración de las medidas de mitigación de riego y seguimiento del sistema, siendo éstas el principal enfoque de su definición.

Según esto, se ha aplicado a la fecha, las siguientes medidas de mitigación (CEA, 2010; GP Consultores, 2008; Tecknoriego, 2010):

- Febrero 2005: Se empieza la incorporación de caudal artificial a la vertiente Jachucoposa, para obtener un caudal total promedio de la vertiente de 60 lt/s.
- Enero 2008: Se trasladan parte de los derechos de agua desde el sector sur hacia el sector norte. El principal campo de pozos en la zona Falla Pabellón del Inca, llamado Coposa Tradicional, suspende sus operaciones, funcionando sólo los pozos provisionales en el sector sur.
- Veranos 2008- 2009 y 2009-2010: Se aplica riego artificial a la vega de Jachucoposa, en las zonas A, C y D de vegetación.

El riego artificial se inicia en diciembre de 2008 y consta con actividades de monitoreo de los caudales aplicados, horas de trabajo de los equipos, monitoreo de humedad del suelo e inspección visual de la vegetación para ver la evolución de ésta (Tecknoriego, 2010).

En la Tabla 3.1 y en la Figura 3.1 se observan las zonas de riego asociadas a las áreas de vegetación definidas por el SAG, con su área y tipo de riego aplicado (Tecknoriego, 2010).

Tabla 3.1 Zonas de riego para mitigación. Fuente: Tecknoriego, 2010

Zona de riego	Área [ha]	Tipo de riego
Zona A	2,81	Aspersión
Zona A1	0,36	Surco
Zona C1	1,17	Aspersión
Zona D	2,74	Aspersión
Zona D1	0,36	Surco

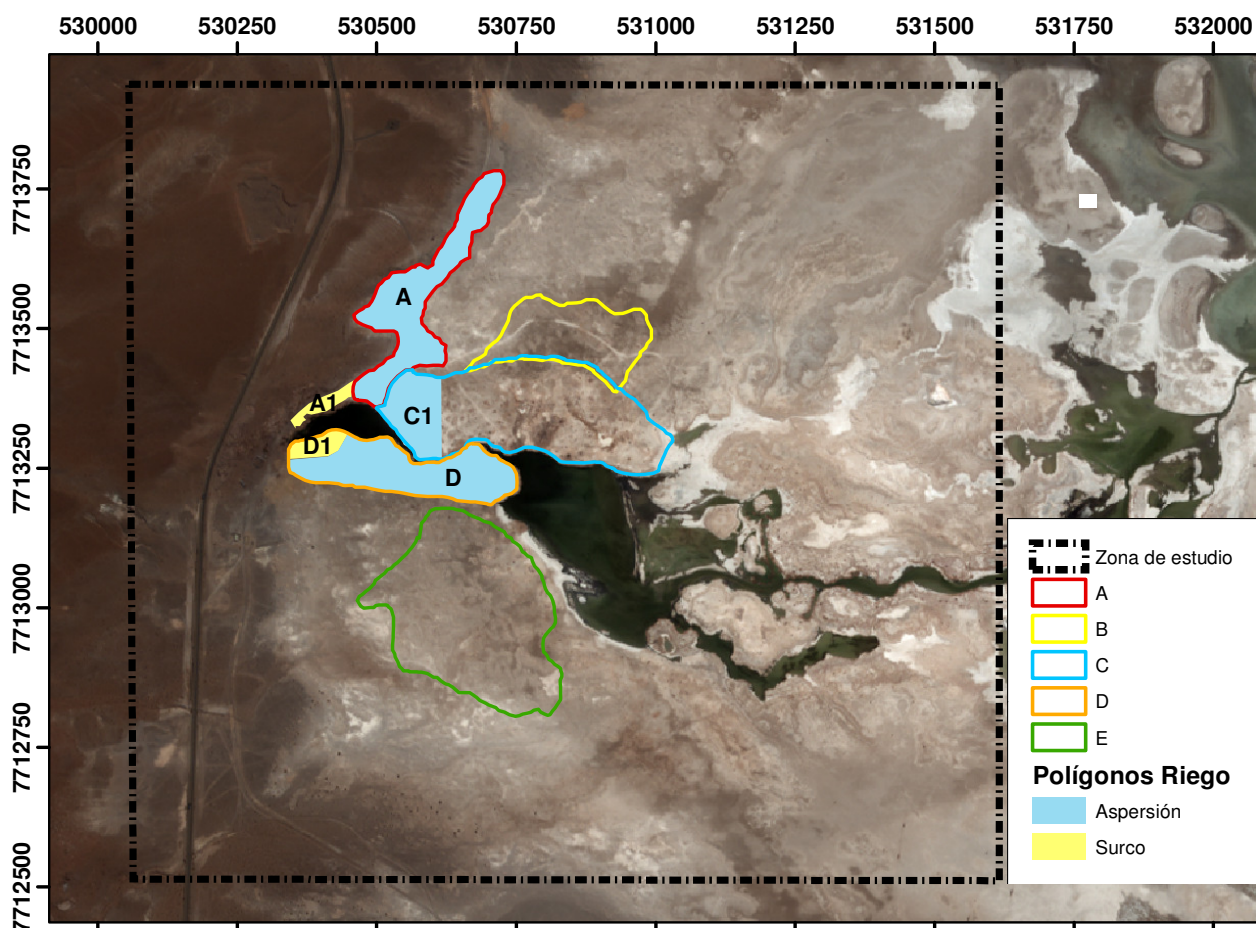


Figura 3.1 Zonas de riego para mitigación en zonas de Vegetación.
Fuente: Elaboración propia en base a Tecknoriego (2010)

En la Figura 3.2 se observan las tasas de riego aplicadas por aspersión y por surco en los distintos sectores de vegetación. S1 corresponde a la zona A1, mientras que S2 y S3 a la zona D1. Los volúmenes de agua aplicados en las distintas zonas de riego para los años 2008-2009 y 2009-2010 se encuentran en el Anexo A.

Se observa que las tasas aplicadas son en promedio cercanas a los 3 mm/día, con máximos sobre los 8 mm/día, con una alta frecuencia de días sin riego. En las zonas

regadas por aspersión, se poseen mayores tasas de aplicación que en los sectores con surco, llegando por ejemplo en el sector D, a una tasa promedio de 4,5 mm/día.

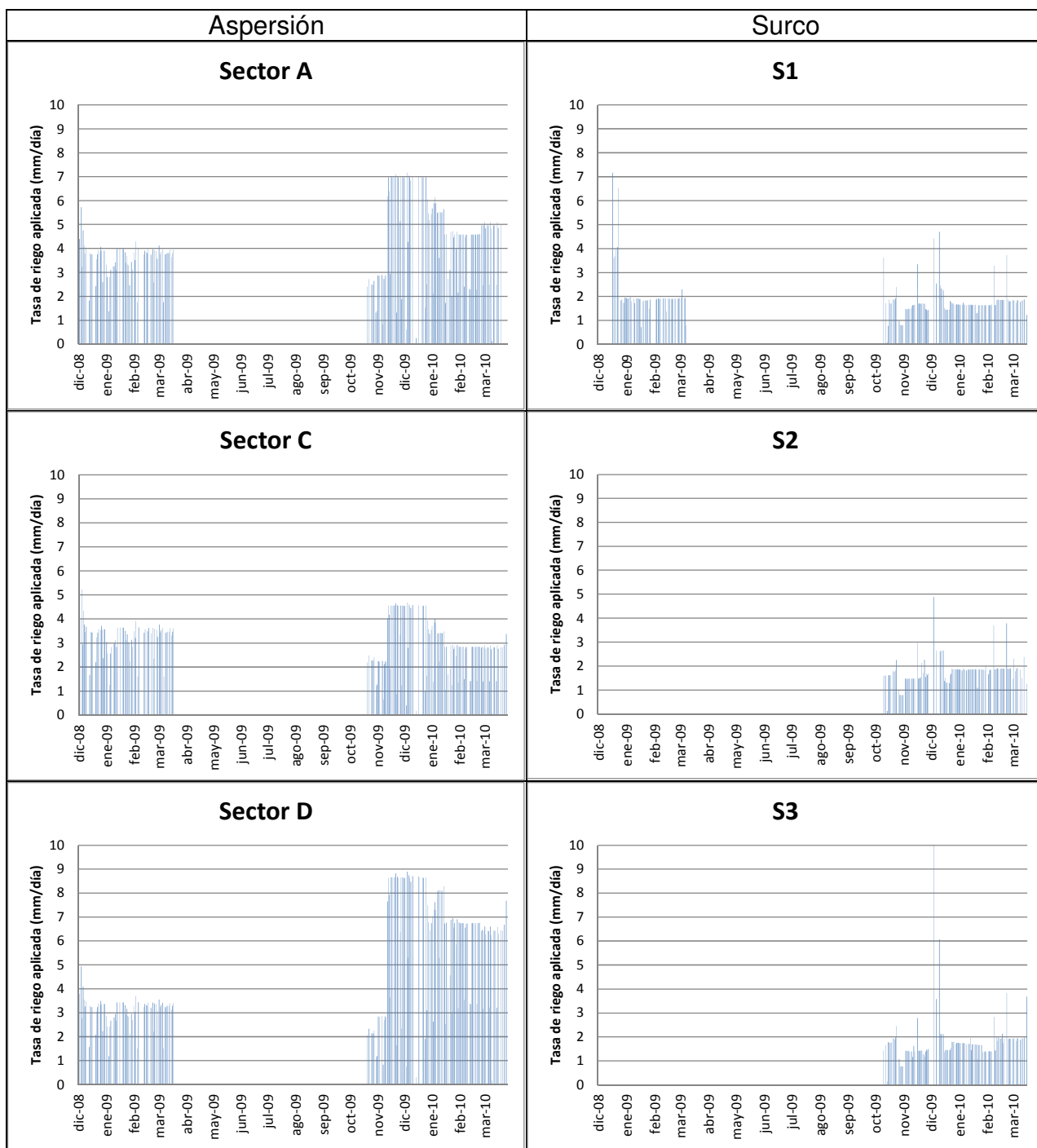


Figura 3.2 Tasas de riego aplicadas en distintos sectores.

En el informe de GEOMIN (2009) se documentó que los cambios de puntos de captación dieron resultados hidráulicos favorables, lográndose superar el caudal de recuperación de la vertiente planificado para el año 2008, obteniéndose mediciones puntuales superiores a 18 l/s y continuando con valores cercanos a los 20 l/s a principio del año 2009 (CEA, 2010).

3.2.3 Vegetación

Como se menciona anteriormente, el SAG define en el año 2006, polígonos críticos de vegetación en la zona de Jachucoposa, en base a los cuales se desarrollan todos los estudios del sistema. En la Tabla 3.2 se observan las zonas definidas con su descripción y área respectiva.

Tabla 3.2 Descripción de los sectores de vegetación, área suroeste Salar de Coposa.
Fuente: Elaboración propia a partir de SAG Tarapacá Ord. N°1607 (2006) y CEA (2010)

Sector	Descripción	Área [ha]
Sector A	Formación de <i>Frankenia triandra</i> (llaretilla) en forma paralela al camino, en las que no se aprecia síntomas evidentes de erosión del terreno.	3,08
Sector B	Área de pajonal hídrico (<i>Festuca hypsophyla</i>), asociado a puntos de surgencias puntuales.	3,00
Sector C	Áreas de pajonal hídrico (<i>Festuca hypsophyla</i>) y <i>Frankenia triandra</i> (llaretilla). En estos sectores hay que diferenciar las formaciones de pajonal y las de llaretilla.	7,32
Sector D		3,24
Sector E	Área de pajonal hídrico en la que se observan plantas de <i>Oxychloe andina</i> muertas.	8,43

En la ecorregión del altiplano se destaca la presencia de vegetación con patrones de distribución azonal que se encuentra asociado a un suministro hídrico estable y/o permanente y corresponde según características de las especies presentes a: bofedal, pajonal húmedo y vega. Este tipo de vegetación azonal, es principalmente la presente en el Salar de Coposa, asociada al área de las vertientes y lagunas, y determinada por condiciones extremas de suelo y del sustrato geológico. La vegetación zonal del salar está principalmente compuesta por la vegetación del pajonal o tolar y se encuentra en los límites del salar (CEA, 2010).

3.2.3.1 Formaciones vegetacionales

En CEA (2010) se generó una distribución espacial (SVAHT) de la vegetación en el sistema de Jachucoposa en base a la guía de Ahumada y Faúndez (2009), según los antecedentes vegetacionales para la temporada verano 2010. Se identificaron áreas cubiertas por:

- Bofedal hídrico
- Pajonal hídrico: salino y no salino
- Vega: salina y no salina
- Salar
- Vegetación zonal

En la Figura 3.3 se pueden identificar los diferentes sistemas vegetacionales presentes en Jachucoposa, junto con las zonas de vegetación definidas por el SAG. Es posible que parte de estos sistemas se fusionen generando sistemas mixtos, sin embargo, se representan los sistemas dominantes de cada área (CEA, 2010).

De la vegetación azonal, el sistema con mayor área detectada es el de vega salina ubicado en el sector E (sur), seguido por la superficie de pajonal hídrico salino en el sector C (norte). En el anillo perimetral de los cuerpos de agua es posible identificar pajonal hídrico no salino y en menor proporción, bofedal no salino, zonas influenciadas por las lagunas. Además, según lo observado se registran sitios definidos como salar (zona A), ya que presentan especies representativas de estas zonas (*F. trianda* y *S. pulvinata*). La vegetación zonal, queda representada por un pequeño parche de *Parastrephia* sp. en el sector noroeste (CEA, 2010).

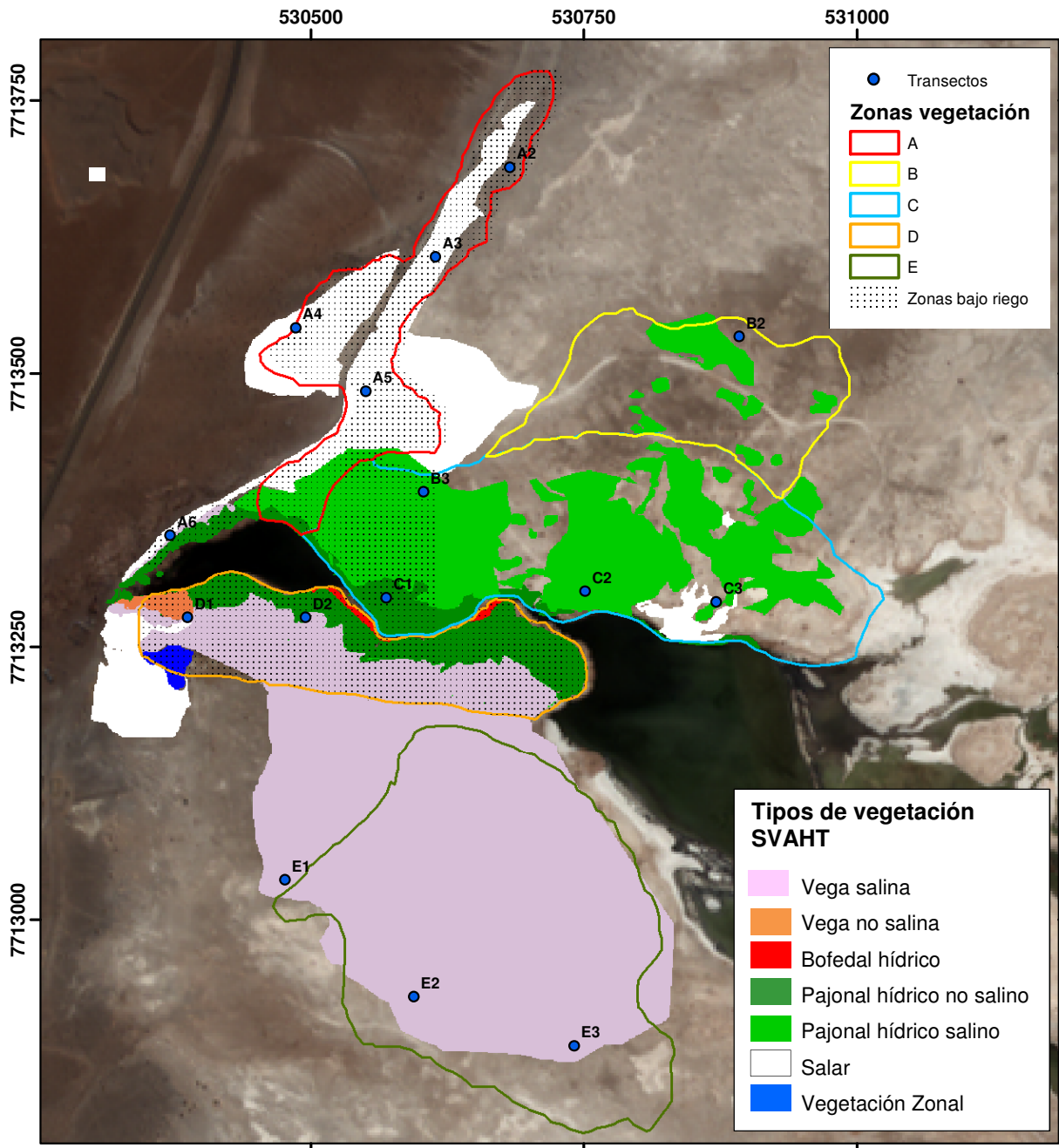


Figura 3.3 Cartografía con tipos vegetacionales (SVAHT) y transectos en zona de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a CEA (2010).

3.2.3.2 Cobertura y riqueza vegetal

Para el estudio realizado por CEA (2010), se controlaron 20 transectos de vegetación en las zonas definidas por el SAG, para determinar riqueza y cobertura vegetal, cuya ubicación se observa en la Figura 3.3. En la Tabla 3.3 se observan los resultados para cobertura de vegetación - total y promedio - y riqueza vegetal, para octubre 2009 y marzo 2010.

Tabla 3.3 Riqueza de especies y cobertura total y promedio en sectores de vegetación, medida en 20 transectos, para octubre 2009 y marzo 2010. Fuente: CEA, 2010

Año	Zona vegetación	Zona A						Zona B			Zona C			Zona D		Zona E		
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E1	E2	E3
oct-09	Transectos																	
	Cobertura total [%]	1.6	0.0	6.8	6.0	2.4	-	0.0	7.2	8.0	42.5	21.8	18.2	43.8	47.3	6.6	2.4	3.2
	Promedio cobertura [%]	3.4						5.1			27.5			45.6		4.1		
mar-10	Riqueza total	1	0	1	1	1	1	0	3	4	6	3	3	2	2	3	3	3
	Cobertura total [%]	1.6	0.0	7.2	6.8	4.0	-	0.0	14.4	18.6	31.9	18.2	42.5	50.3	71.1	10.6	14.0	3.0
	Promedio cobertura [%]	3.9						11.0			30.9			60.7		9.2		
	Riqueza total	1	0	1	1	1	1	0	6	4	-	-	4	2	4	3	4	2

En la vegetación azonal, la riqueza taxonómica es mayor en la franja adyacente a los cursos del agua (0 a 12 m de las lagunas, en transectos D y C) con la presencia de 9 taxas, mientras que la menor riqueza - 2 o 3 taxas - se encuentra en el límite del tolar (entre los 17 y 24 m de las lagunas, en las transectos A, B y E). Cercano al curso del agua, existen especies que sólo se distribuyen en este sitio, mientras otras especies como *Distichlis humile*, se distribuyen a lo largo de todo el sistema (CEA, 2010).

Se presenta en la Figura 3.4 la comparación realizada para la cobertura de vegetación absoluta entre octubre 2009 y marzo 2010. Los resultados indican que del total de 20 transectos, 12 de estos presentaron un aumento de la cobertura absoluta, 4 presentaron una disminución y 4 no registraron variación. La mayor variación positiva se registró en el transecto D2 con un aumento de 23,9%, siguiéndole C1 con un aumento de 13,8%. En tanto, la menor variación negativa se registró en C2 con un descenso de 3,6% (CEA, 2010).

El promedio de cobertura absoluta entre sectores indica que el sector D fue aquel que tuvo un mayor aumento entre los meses de monitoreo, presentando una variación del 15,9 %, presentando todos los sectores, un aumento de su cobertura entre los meses de octubre de 2009 y marzo de 2010 (CEA, 2010).

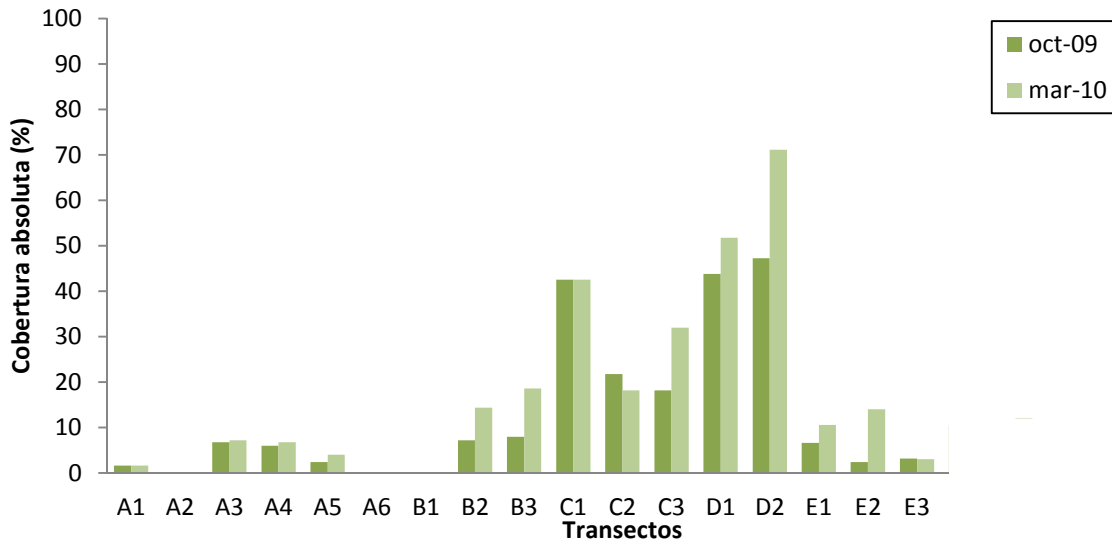


Figura 3.4 Comparación entre valores de cobertura total registrada en los meses de octubre 2009 y marzo 2010 para los distintos transectos. Fuente: CEA, 2010

Por otro lado, en CEA (2010) se evaluó la cobertura y riqueza de taxa existente entre los años de 2007 y 2010. Los resultados por sector indican:

- Sector A: durante los años 2007 y 2008 los valores de cobertura se mantuvieron estables, siendo el año 2009 donde se reportó un aumento de la cobertura absoluta, para descender durante el último monitoreo de 2010.
- Sector B: el transecto B3 presentó valores de coberturas variables. El año 2008 se llegó a su valor más bajo, con un 8,2% de cobertura, para después recuperar cobertura durante 2009 y 2010 (21% y 18%, respectivamente). Este transecto se encuentra bajo riego, por lo tanto, el aumento de cobertura podría estar explicado por este efecto. En tanto, el transecto B2, presentó un descenso de cobertura vegetal desde los años 2007-2008 a los años 2009-2010 (18,4 y 14,4% de cobertura respectivamente). Este transecto no se encuentra asociado a áreas de mitigación, además de encontrarse alejado de los cuerpos de agua.
- Sector C: presentó dos transectos (C2 y C3) estables en cuanto a su cobertura absoluta. el transecto C3 está ubicado en el área sin mitigación, por lo cual registró una claro descenso de los valores de cobertura (56,7 a 31,9%).
- Sector D: los transectos presentaron un aumento de la cobertura de vegetación, lo que se evidencia en el transecto D1 a partir del año 2010, mientras que en el transecto D2, se observa el aumento a partir del año 2009. Además, se observó un aumento de la especie *Distichlis humilis* en el área perimetral de la laguna (0 a 5 m) de un 94% a un 100%, en tanto en el área colindante (5 a 6,7 m), se evidenció una disminución de un 64,7% a un 55,5%, la cual se asocia a presencia de afloramiento salino.
- Sector E: el transecto E3 registró un fuerte descenso de la cobertura vegetal (16% a 3%), en tanto el transecto E1, presentó un aumento de un

8% a un 14%, determinado principalmente por la aparición de la especie *S. pulvinata*, lo cual da cuenta de un cambio de composición de especies además de un cambio de tipo vegetacional, el cual varía desde pajonal hídrico a salar.

En términos de la riqueza vegetacional, sólo el transecto C3 presentó un descenso mayor a 4 taxa, variando desde 9 a 4 taxas entre el periodo de 2007 a 2010. El resto de los transectos presentan la pérdida de no más de 1 taxón, o bien, se mantienen con el mismo número de taxa.

3.2.3.3 Efecto del nivel freático y el riego en la vegetación

En el estudio ecosistémico de Jachucoposa (CEA, 2010), se buscó relacionar el estado de la vegetación con las distintas forzantes del sistema. De interés para este trabajo, se consideraron los efectos asociados a la disminución del nivel freático y al riego, resultados que se detallan a continuación.

En el año 2005, un estudio de profundidad de raíces realizado por el CEA en Jachucoposa, determinó que la distribución de éstas en profundidad es heterogénea, pero que en la parte superior del perfil de suelo (0,0 a 0,9 m.) se concentra el 76,5% de la biomasa de raíces (CEA, 2005)³. Dado esto, se espera, en ausencia de medidas de mitigación como riego, que las raíces de las distintas especies de vegetación obtengan el agua de una profundidad aproximada a 1 m desde el nivel de terreno, o una profundidad levemente mayor, dado el avance del frente de humedad (CEA, 2010).

Con respecto al riego, se concluyó que éste ha generado un aumento de la vigorosidad vegetacional y de la cobertura, lo cual contrasta con áreas sin riego, en las cuales se observa menor vigorosidad y una disminución paulatina de la cobertura de vegetación absoluta (CEA, 2010).

Por otro lado, se obtuvo que el estado vegetacional depende de las condiciones locales de al menos tres semanas anteriores. Se indica que una frecuencia de riego y la mantención del volumen de agua, son fundamentales en la respuesta de la vegetación. Además, se analizó el efecto del riego acumulado, cuyos resultados por sector indican:

- En el sector A y D, a medida que se acumula el volumen de agua aplicada por riego, en el lapso noviembre 2009 a abril 2010, el área fotosintética aumenta, por lo que si las condiciones ambientales son favorables y existe aplicación de riego, se debería esperar un aumento de la vegetación vigorosa.
- Para el sector C, los resultados indican que el sector con riego mantiene el patrón registrado en los sectores A y D, en el cual se evidenció un aumento del área en el tiempo (a su vez del riego acumulado), en tanto, el sector C sin riego,

³ Obtenido de CEA (2010)

tendría una clara respuesta determinada por condiciones ambientales, ya que se observa una respuesta estacional, que vendría dada por un descenso de las temperaturas máximas promedio durante el mes de enero de 2010.

- Los sectores B y E sin riego, presentaron su máximo de cobertura de vegetación cuantificable durante enero de 2010, lo cual podría estar explicado por la disminución de temperaturas máximas, las cuales provocarían una menor demanda hídrica por la menor evapotranspiración, lo que aumenta la eficiencia fotoquímica de la planta y disminuye los potenciales hídricos.

3.2.4 Componentes físicas del sistema

Se describen en este capítulo, las componentes físicas que determinan el funcionamiento del sistema de Jachucoposa, según el modelo ecosistémico conceptual de Jachucoposa realizado en CEA (2010). Estos antecedentes se estudian y analizan para la posterior construcción del modelo de la zona no saturada a desarrollar en este trabajo.

3.2.4.1 Clima y meteorología

Se cuenta con información las de estaciones meteorológicas mostradas en la Tabla 3.4 y Figura 3.5.

Tabla 3.4 Ubicación estaciones meteorológicas en la zona.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA y CMDIC

Nombre	Este [m]	Norte [m]	Altitud [m.s.n.m.]	Código BNA
Collahuasi	527.718	7.679.644	4.250	01080002-1
Coposa	535.914	7.697.202	3.855	CMDIC
Salar Coposa	530.540	7.713.468	3.756	CMDIC
Ujina	536.384	7.681.472	4.200	01080001-3
Collacagua	517.429	7.782.949	3.990	01050007-9

Para el desarrollo del modelo, se utilizarán sólo los antecedentes de la estación Salar Coposa ubicada dentro de la zona de estudio, ya que según los alcances del estudio, se trata de un modelo a escala local. Las demás estaciones quedan disponibles para comparar y corroborar los datos de ser necesario.

La estación meteorológica Salar Coposa cuenta con información pluviométrica, de temperatura del aire, vientos, humedad relativa, entre otras variables, a escala diaria, para el periodo julio 2003 - abril 2011, y a escala horaria, desde enero 2006 a marzo 2008, y para los años 2009 y 2010. Respecto a la evaporación, se tiene información diaria de los años 2003 y 2004 y luego desde julio de 2007 hasta abril de 2010.

Según CEA (2010) las principales forzantes meteorológicas del sistema son, en cuanto a flujo, la evaporación y las precipitaciones, y en cuanto a la vegetación, las temperaturas y el viento. A continuación se detalla la información disponible de estas variables en la zona. Los registros en la estación meteorológica Salar Coposa se encuentran en el Anexo B.

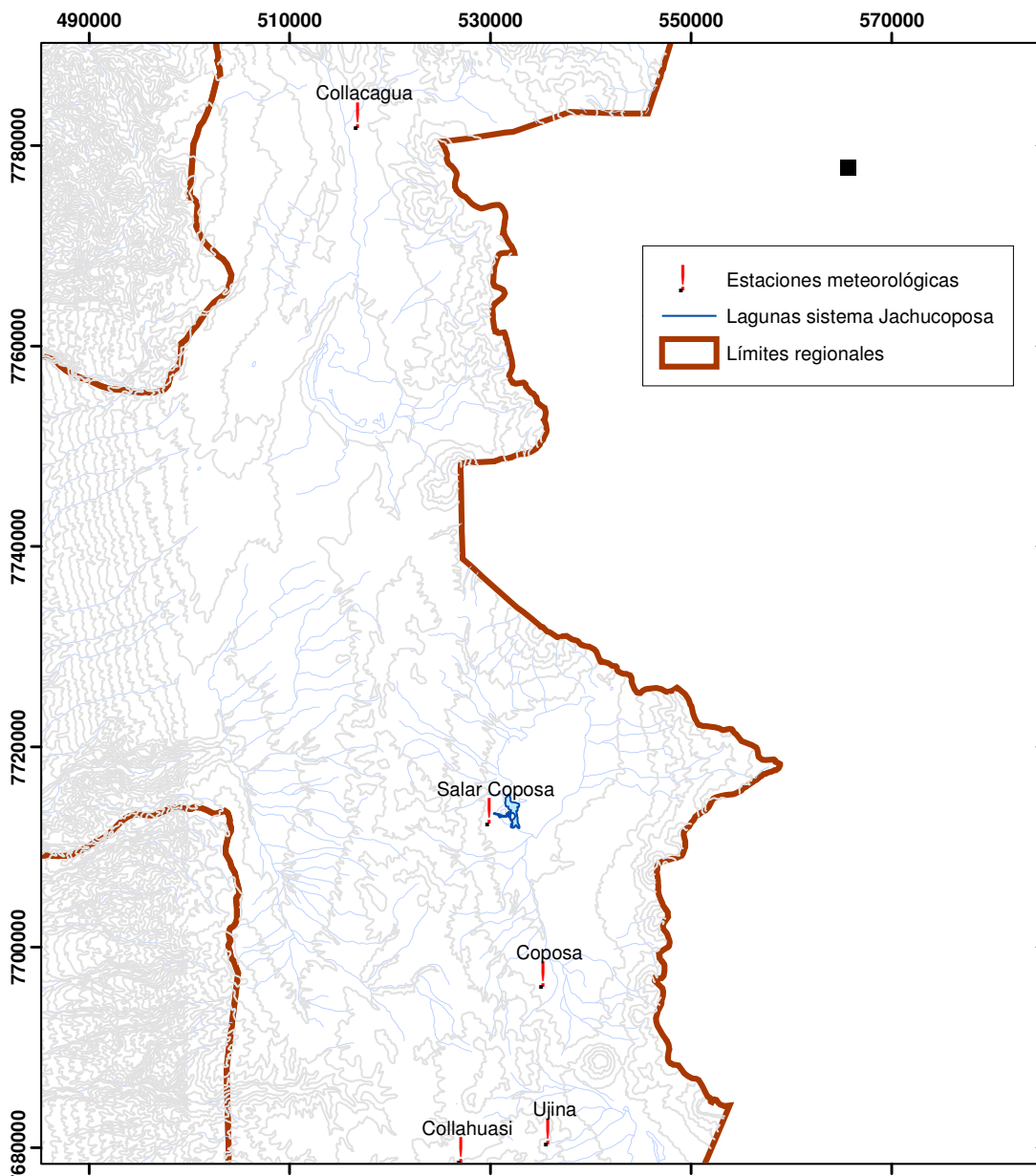


Figura 3.5 Ubicación estaciones meteorológicas

3.2.4.1.1 Precipitaciones

Las zonas altiplánicas del Norte Grande, se encuentran bajo un régimen de precipitaciones conocido como “Invierno Boliviano”, con precipitaciones estivales que pueden superar los 400 mm/año. La ocurrencia de precipitaciones tiene un marcado ciclo diario, presentándose generalmente en la tarde como intensos chubascos y un rápido desarrollo de nubosidad convectiva (DICTUC, 2005)⁴.

⁴ Obtenido de CEA (2010)

En la Figura 3.6 se muestra el registro a nivel diario de precipitaciones en la estación Salar Coposa. Se observa la concentración de las precipitaciones entre enero y marzo (Invierno Boliviano) con máximos de hasta 12 mm diarios en el año 2008, con una precipitación anual desde 23 mm/año a 55 mm/año.

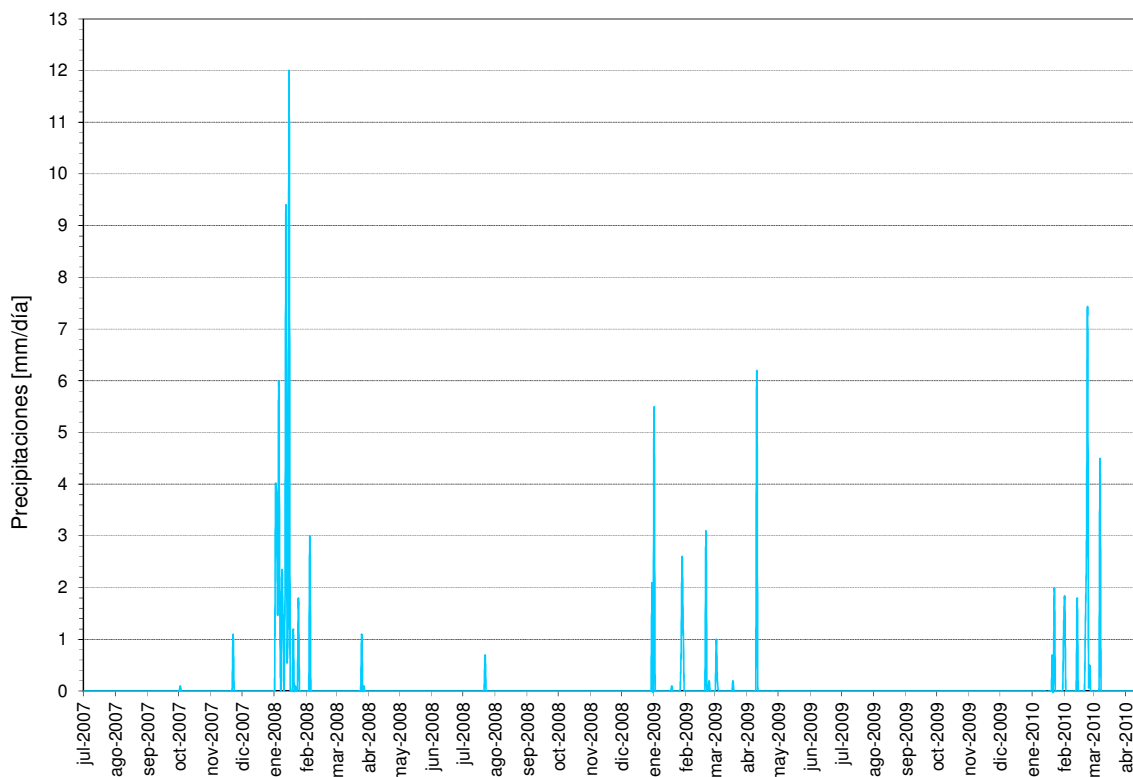


Figura 3.6 Precipitación diaria estación Salar Coposa.

Fuente: Elaboración propia en base a información en estación Salar Coposa CMDIC

3.2.4.1.2 Evaporación y evapotranspiración

Se cuenta con información de evaporación desde julio 2007 a abril de 2010 en la estación Salar Coposa. Sin embargo, ésta debe ser corroborada pues existen datos de diciembre del 2009 a abril del 2010, los que varían en magnitud respecto a los anteriores, desconociendo cuales están corregidos según el coeficiente de bandeja. Ambas series poseen la misma tendencia estacional, con diferencias en el orden de magnitud en una razón de 3:2 aproximadamente por lo que se considera que una es derivada de la otra, mediante la aplicación de factores de corrección, correspondiendo así, el mayor valor a la evaporación de bandeja y el menor a la evapotranspiración potencial (Figura 3.7).

Dado esto, se consideran datos de las cuencas cercanas que poseen este tipo de instrumentación, correspondientes al salar de Huasco y salar de Michincha, las cuales poseen características similares respecto a altitud y ubicación geográfica, de modo de comparar las mediciones y corroborar los órdenes de magnitud obtenidos.

En la Figura 3.7 se observa la evapotranspiración potencial diaria en el salar de Coposa, la cual varía desde 2,5 mm/día en invierno a 7 mm/día en verano, valores

similares a los obtenidos en las estaciones de las cuencas cercanas que se observan en la Figura 3.8.

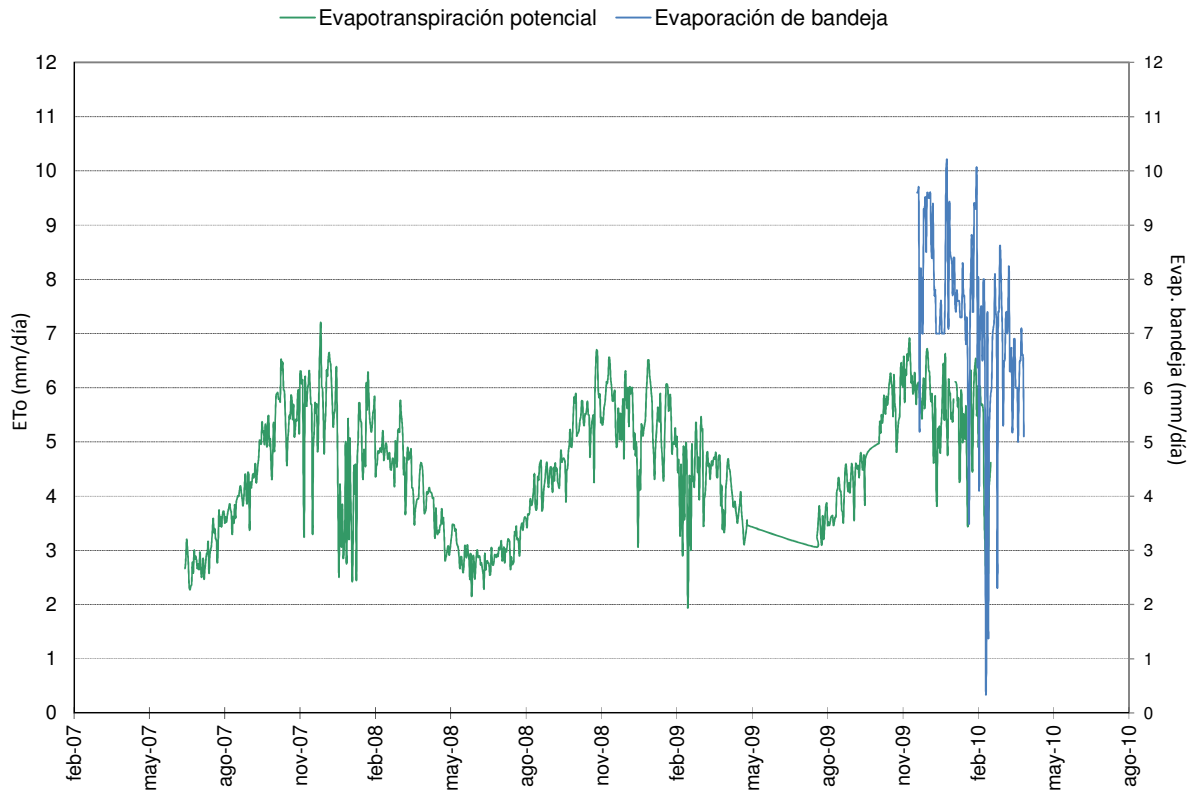


Figura 3.7 Evaporación de bandeja y evapotranspiración potencial diaria en estación Salar Coposa. Fuente: Elaboración propia en base a información en estación Salar Coposa CMDIC.

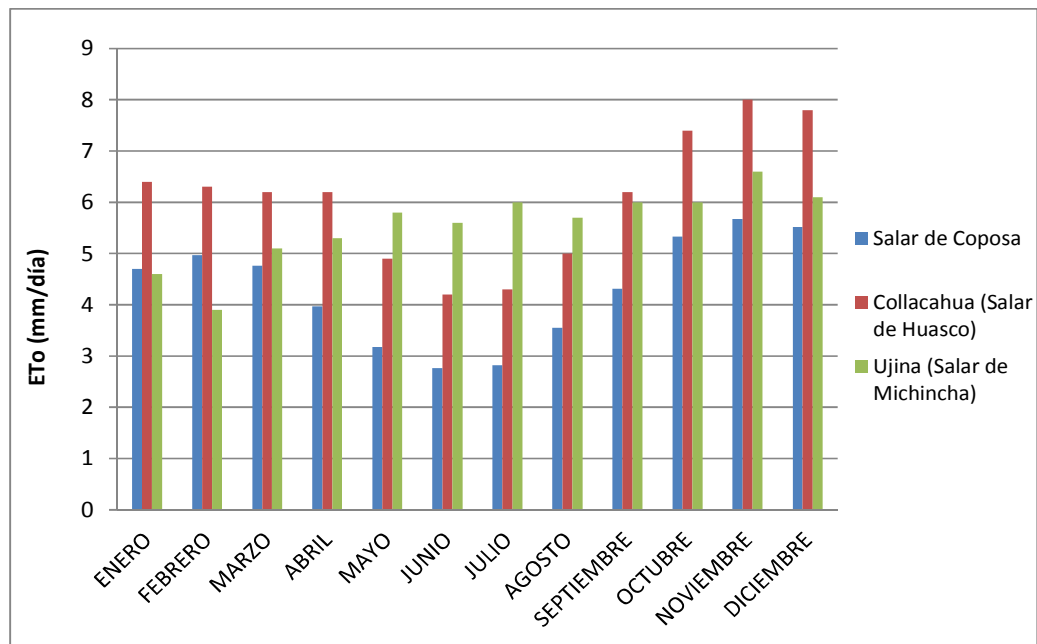


Figura 3.8 ET_0 media mensual en estaciones de cuencas vecinas y Salar Coposa Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC (2005)

3.2.4.1.3 Temperatura y viento

En general, la temperatura media en superficie en el altiplano es baja, constituyendo un factor limitante en el desarrollo de la vegetación. Las temperaturas mínimas son prácticamente todo el año inferiores a 0°C, lo que deriva en el congelamiento de las aguas superficiales. Por otro lado, las máximas temperaturas son coincidentes con los meses de mayores precipitaciones, presentando una amplitud térmica que puede alcanzar los 27°C con una media de 20,9°C y 19,4°C para la estación Salar Coposa y Coposa, respectivamente (CEA, 2010).

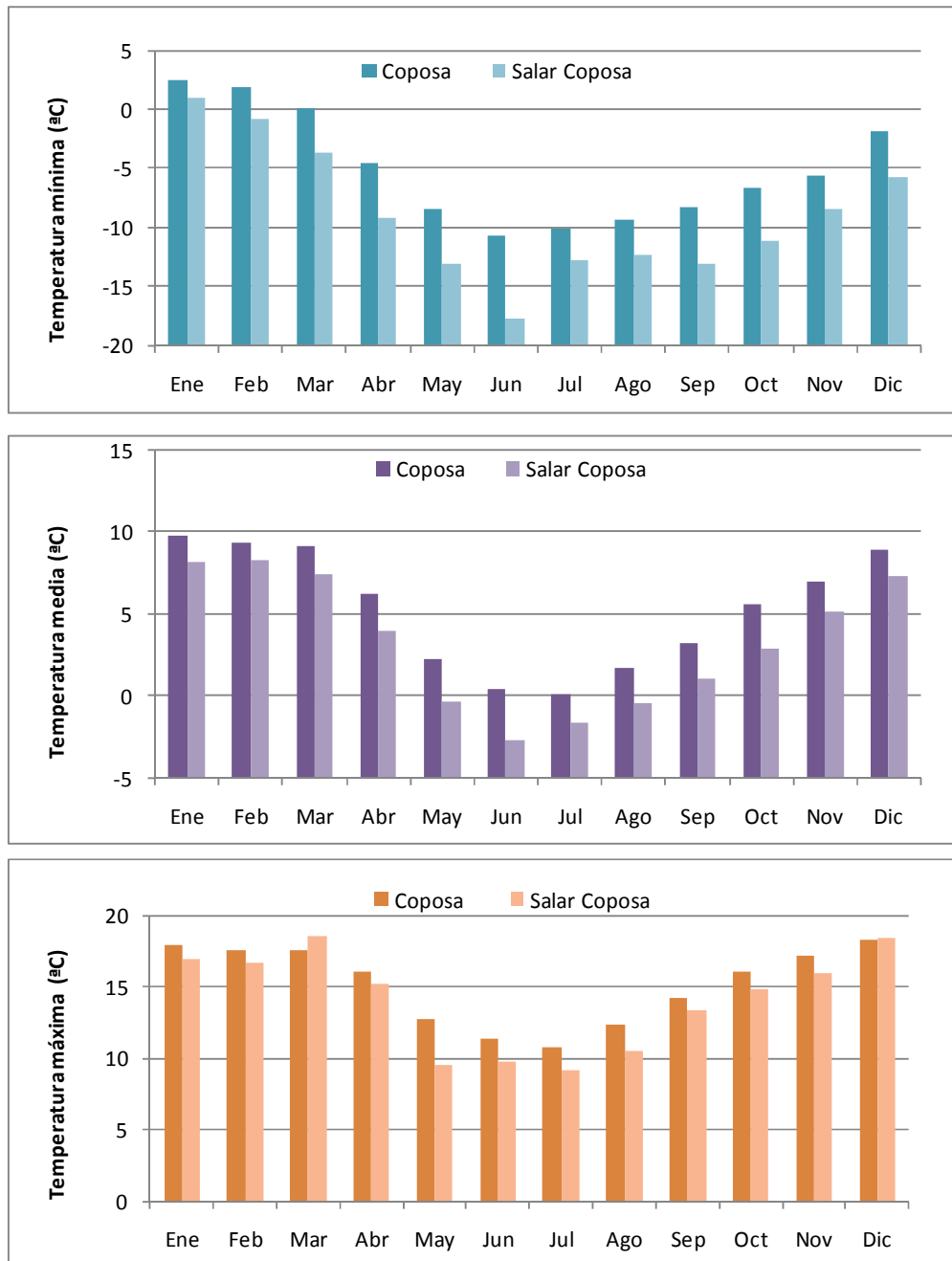


Figura 3.9: Distribución mensual de temperatura en las estaciones Coposa y Salar Coposa.
Fuente: CEA, 2010

El régimen de viento cerca de la superficie terrestre está fuertemente condicionado por la topografía local, desarrollándose brisas de valle-montaña y brisas asociadas a la presencia de lagos y salares (DICTUC, 2010). En la Tabla 3.5 se presentan las variaciones de la velocidad promedio mensual del viento en la estación Coposa y estación Salar de Coposa para los periodos 2007-2009 y 2007-2010, respectivamente.

Tabla 3.5: Velocidad Media Mensual del Viento [km/h].

Fuente: Elaboración propia en base a CEA (2010)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Coposa	13,2	12,8	11,7	10,1	9,7	8,8	10,1	10,0	11,4	11,8	12,8	13,7
Salar Coposa	14,5	13,6	12,1	10,4	9,2	9,7	9,5	10,6	11,3	12,6	13,9	15,1

Es posible observar una variación estacional gradual en la velocidad del viento, donde la menor velocidad corresponde al mes de junio, coincidiendo con el mismo periodo de menor temperatura. Comparativamente, ambas estaciones muestran valores similares en la velocidad del viento, con valores promedio de 12,2 km/h y 11,2 km/h en la estación Salar de Coposa y Coposa, respectivamente (CEA, 2010).

3.2.4.2 Hidrología superficial

La vertiente Jachucoposa corresponde a un afloramiento natural del sistema acuífero de la cuenca, generada por las condiciones topográficas, geológicas e hidrogeológicas del sistema.

Se cuenta con un registro histórico semanal desde 1998, que da cuenta del caudal natural de la vertiente y del caudal mitigado, los que se muestran en la Figura 3.10. Se observa aquí, el descenso pronunciado de los caudales de la vertiente a partir del inicio de la producción desde el campo de pozos en el sector sur. Los caudales históricos previos al bombeo alcanzaron valores en torno a los 80 l/s, llegando el 2010 sólo a valores en torno a 20 l/s. Sin embargo, se puede apreciar una pequeña recuperación del caudal a partir del 2008, año en que se cambia el sector de explotación como medida de mitigación (CEA, 2010).

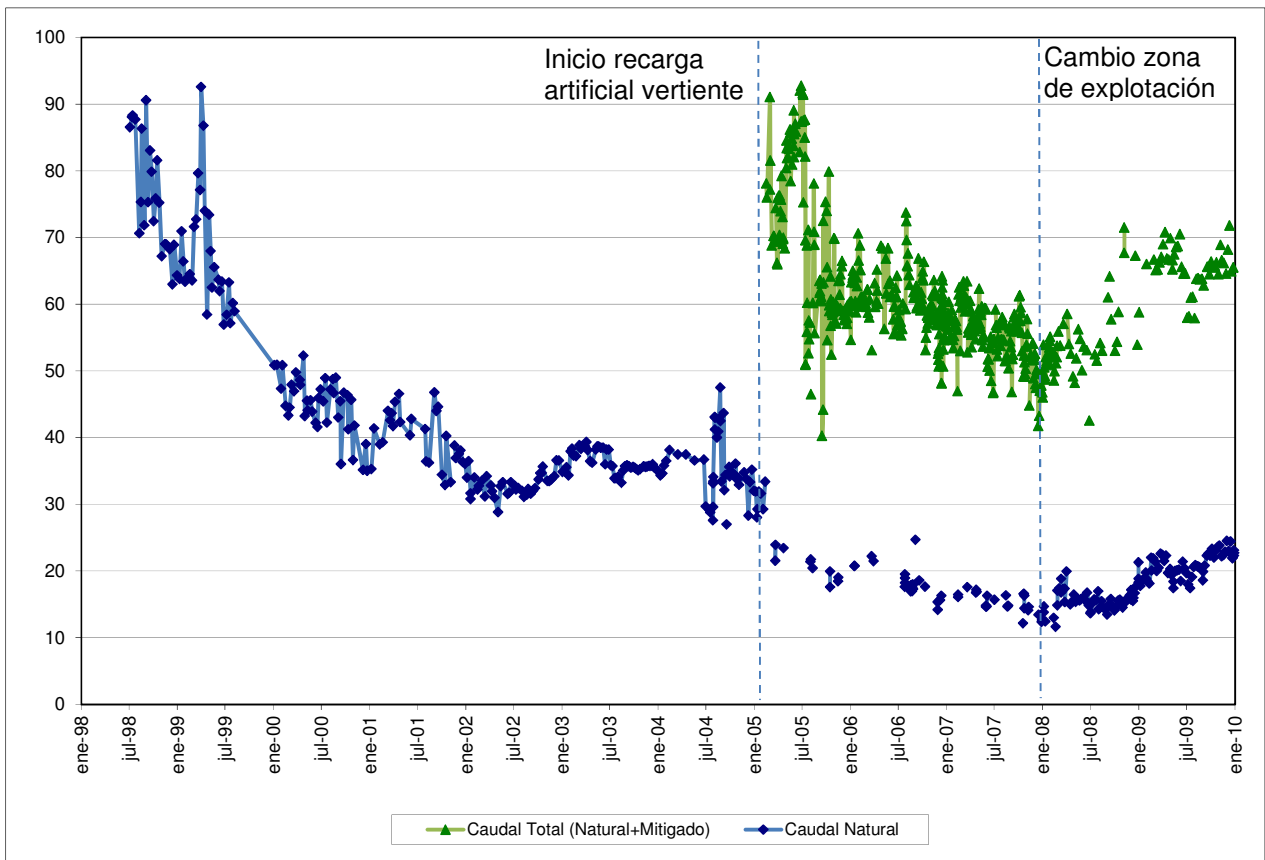


Figura 3.10: Registro de Aforo en la Vertiente Jachucoposa, caudal natural y total. Líneas punteadas indican fechas en que se aplicaron medidas de mitigación nombradas. Fuente: Elaboración propia en base a CEA (2010).

El afloramiento de aguas subterráneas desde la vertiente Jachucoposa alimenta a dos lagunas permanentes conectadas superficialmente entre sí, cuyas áreas de espejo de agua prácticamente no presentan variaciones en el tiempo dada la morfometría de sus cubetas (GP consultores, 2007). En la Tabla 3.6 se presenta el área aproximada del espejo de agua de cada una de las lagunas permanentes

Tabla 3.6: Área Lagunas Permanentes. Fuente: CEA, 2010

Área [ha]	
Laguna 1	0,78
Laguna 2	4,99
Total	5,77

Los excedentes de agua de la Laguna 2, son vertidos por medio de un canal de baja pendiente a una gran laguna terminal de evaporación, cuyo espejo de agua varía en forma significativa tanto estacionalmente como interanualmente (CEA, 2010), con un área promedio de 200 ha. Se presentan en la Tabla 3.7 las áreas de la laguna de evaporación promedio, máximas y mínimas para las estaciones cálida y fría, determinadas mediante imágenes satelitales desde 1973 al 2006 en GP Consultores (2007).

Tabla 3.7: Promedio y mínimo del área por temporada.
Fuente: Elaboración propia a partir de GP Consultores (2007)

	Área Promedio [ha]	Año mínima área	Área Mínima [ha]	Año máxima área	Área Máxima [ha]
Otoño-Invierno	231	2004	165	1989	301
Primavera-Verano	145	2004	59	2006	251

Las mínimas áreas de la laguna ocurrieron durante el año 2004, año en que se constata por parte de la DGA que el caudal de la vertiente había alcanzado valores inferiores al umbral de activación del sistema de mitigación, de 45 l/s. A partir de las medidas de mitigación llevadas a cabo por CMDIC en el año 2005, el área de la laguna ha ido incrementándose.

3.2.4.3 Hidrogeología

3.2.4.3.1 Unidades hidrogeológicas

Según lo planteado por GP Consultores (2007), DICTUC (2005) y CEA (2010), en el sector de la vertiente Jachucoposa existen dos unidades acuíferas con niveles piezométricos distintos: un acuífero superficial somero y un acuífero confinado, con una unidad volcánica confinante intermedia. Las características de estas unidades acuíferas son:

- **Acuífero Inferior:** Acuífero más profundo influenciado por el dúplex Pabellón del Inca sobre la Ignimbrita Huasco que, aunque posee una baja permeabilidad intrínseca, debido al intenso fracturamiento, posee una alta permeabilidad secundaria, siendo un acuífero de alto rendimiento. El basamento rocoso se encuentra a no menos de 300 m.
- **Unidad confinante:** Corresponde a una zona intermedia de depósitos de cenizas y tobas volcánicas sobre la Ignimbrita Huasco y sedimentos no consolidados (limos y arcillas). Debido a las condiciones de compactación y granulometría, es posible suponer que esta capa genera algún nivel de confinamiento en el acuífero inferior. El espesor de este estrato, a partir de los datos estratigráficos, está entre los 10 a 30 m aproximadamente.
- **Acuífero Superior:** El acuífero somero corresponde a depósitos del salar (evaporitas y materia orgánica) y aluviales (arenas y gravas), formando depósitos aterrazados. En esta parte del salar, la capa superior corresponde a un acuífero de baja permeabilidad reflejo de los depósitos anteriormente mencionados. El espesor de este estrato, a partir de los datos estratigráficos, está entre los 15 a 85 m aproximadamente.

En la Figura 3.11 se observa el esquema conceptual del sistema acuífero de Jachucoposa anteriormente descrito.

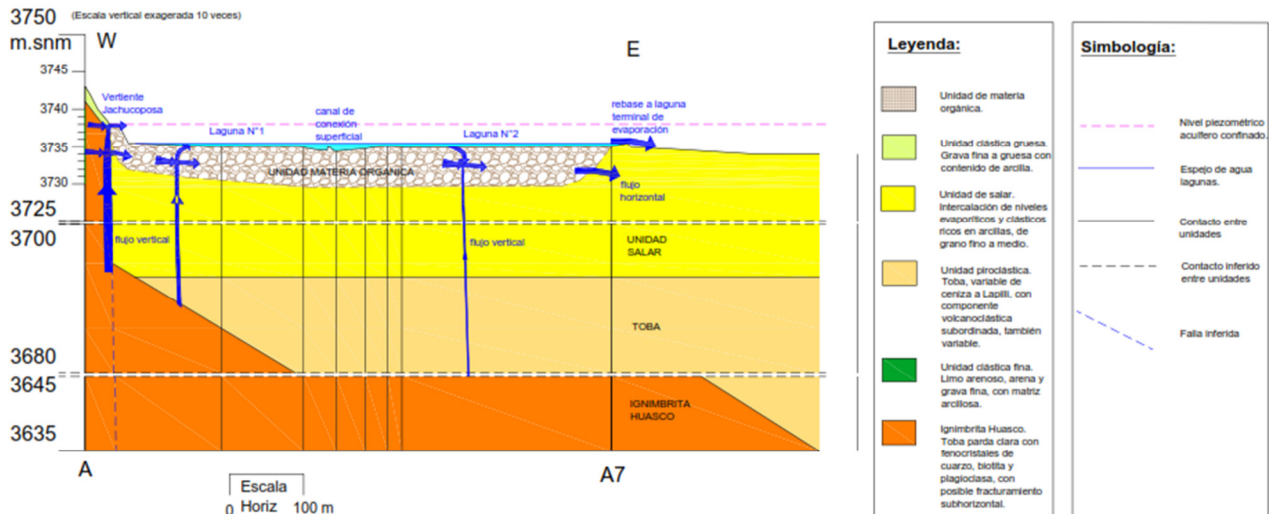


Figura 3.11 Esquema unidades acuíferas sistema Jachucoposa. Fuente: GP Consultores, 2007

Cabe destacar, que para el modelo de la zona no saturada a desarrollar, el interés recae en el acuífero somero, por representar este, la fuente de agua disponible para la vegetación.

3.2.4.3.2 Propiedades hidrogeológicas

Las propiedades hidrogeológicas del acuífero somero no han sido determinadas en los estudios anteriores, por lo que se recurre a los ensayos de laboratorio de las muestras de suelo y a la bibliografía para estimarlas.

Las variables de interés para el modelo, corresponden a los parámetros de las curvas características de humedad - n , l , α , θ_r , θ_s y K_{sat} - dados por el modelo de Van Genuchten, definido según las Ecuaciones (2.7) y (2.8) en el marco teórico. Para estimarlos, se posee como referencia, las curvas promedio generadas para las 12 texturas de la clasificación del Soil Conservation Service (SCS) por Carsel y Parrish (1988), las que consideran más de 15.000 muestras de suelo para su determinación. Se presentan en la Figura 3.12 dichas curvas, y en la Tabla 3.8 los parámetros promedio con su desviación estándar. Estos valores, se complementan con los obtenidos por Rawls *et al.* (1982), de modo de comparar y validar los valores de los parámetros mencionados.

En la Tabla 3.9 se presentan valores de humedad de saturación (θ_s), para dos suelos específicos de otras localidades del norte de Chile (Anabalón, 1988), y en la Tabla 3.10 se tienen los valores de conductividad hidráulica según distintos autores.

Los valores entregados, se utilizan para comparar y ajustar los parámetros hidrogeológicos definitivos del sistema de Jachucoposa, en el proceso de construcción y calibración del modelo, como se verá en el Capítulo 4.4.

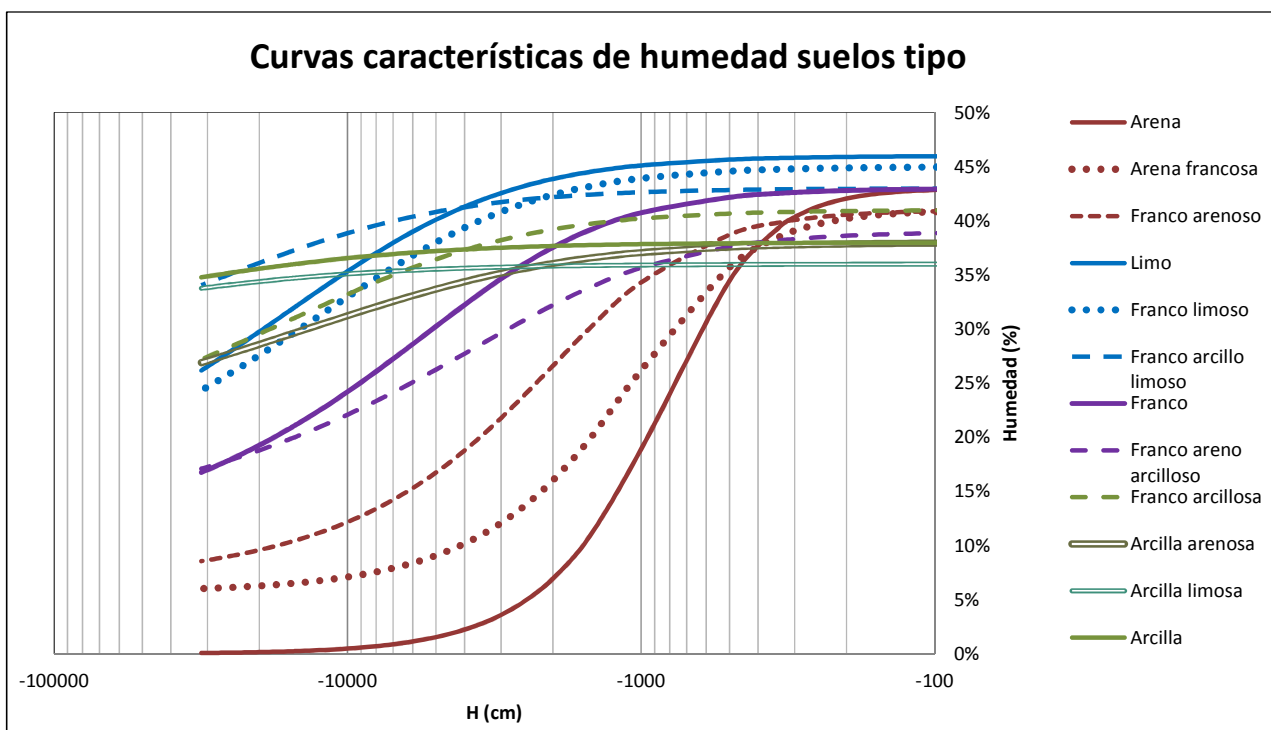


Figura 3.12 Curvas características de humedad de suelos según clase textural.
Fuente: Elaboración propia en base a Carsel y Parrish (1988).

Tabla 3.8 Parametros de retención de humedad según modelo de Van Genuchten.
Fuente: Elaboración propia en base a Carsel & Parrish (1988) y Rawls *et.al.* (1982).

Textura	θ_s				θ_r				α (1/cm)		n	
	Carsel & Parrish (1988)		Rawls et. al. (1982)		Carsel & Parrish (1988)		Rawls et. al. (1982)		Carsel & Parrish (1988)		Rawls et. al. (1982)	
	Promedio	DS	Promedio	DS	Promedio	DS	Promedio	DS	Promedio	DS	Promedio	DS
Arcilla	0.38	0.09	0.385	0.116	0.068	0.034	0.090	0.105	0.008	0.012	1.09	0.09
Franco arcilloso	0.41	0.09	0.390	0.111	0.095	0.010	0.075	0.099	0.019	0.015	1.31	0.09
Franco	0.43	0.10	0.434	0.100	0.078	0.013	0.027	0.047	0.036	0.021	1.56	0.11
Arena francosa	0.41	0.09	0.401	0.072	0.057	0.015	0.035	0.032	0.124	0.043	2.28	0.27
Limo	0.46	0.11	-	-	0.034	0.010	-	-	0.016	0.007	1.37	0.05
Franco limoso	0.45	0.08	0.486	0.092	0.067	0.015	0.015	0.043	0.02	0.012	1.41	0.12
Arcilla limosa	0.36	0.07	0.423	0.089	0.070	0.023	0.056	0.080	0.005	0.005	1.09	0.06
Franco arcillo limoso	0.43	0.07	0.432	0.085	0.089	0.009	0.040	0.078	0.01	0.006	1.23	0.06
Arena	0.43	0.06	0.417	0.063	0.045	0.010	0.020	0.019	0.145	0.029	2.68	0.29
Arcilla arenosa	0.38	0.05	0.321	0.114	0.100	0.013	0.109	0.096	0.027	0.017	1.23	0.1
Franco arcillo arenoso	0.39	0.07	0.330	0.095	0.100	0.006	0.068	0.069	0.059	0.038	1.48	0.13
Franco arenoso	0.41	0.09	0.412	0.129	0.065	0.017	0.041	0.065	0.075	0.037	1.89	0.17

Tabla 3.9 Humedad de saturación determinada para suelos particulares en el norte de Chile.
Fuente: Elaboración propia en base a Anabalón (1998)

Ubicación suelos	Textura	θ_s
Arica	Limo	0.457
Copiapó	Arena arcillosa – Franco arenoso arcilloso	0.326

Tabla 3.10 Conductividades hidráulicas saturadas K_{sat} (cm/día) según distintas fuentes.
Fuente: Mañas *et. al.*, 2005 y Simunek *et. al.*, 2008

Textura	Carsel & Parrish (1989)		Rawls <i>et. al.</i> (1982)	Clapp & Hornberger (1978)	FAO (1979)
	Promedio	DS	Promedio	Promedio	Promedio
Arcilla	4.8	10.08	1.4	4.8	1.2
Franco arcilloso	6.2	16.8	5.5	6.2	19.2
Franco	25.0	43.68	31.7	24.0	31.2
Arena francosa	350.2	272.64	146.6	-	-
Limo	6.0	7.92	-	-	-
Franco limoso	10.8	29.52	16.3	6.0	10.8
Arcilla limosa	0.5	2.64	2.2	0.5	6.0
Franco arcillo limoso	1.7	4.56	3.6	-	-
Arena	712.8	374.4	504.0	-	-
Arcilla arenosa	2.9	6.72	2.9	-	-
Franco arcillo arenoso	31.4	65.76	10.3	-	-
Franco arenoso	106.1	135.12	62.2	105.8	60.0

3.2.4.3.3 Captaciones de agua subterránea

El acuífero del Salar de Coposa ha sido explotado a partir de 1998 por CMDIC. Hasta el año 2007 la explotación se realizó desde la zona sur, principalmente en el campo de pozos Coposa Tradicional, sector donde se emplaza la falla geológica Pabellón del Inca. La explotación del agua subterránea en esta zona, provocó el descenso de los niveles del acuífero, afectando negativamente a la vertiente y la vega de Jachucoposa.

Dado esto, en el año 2008, como parte de las medidas de mitigación del sistema, se trasladaron parte de los derechos de agua de CMDIC, comenzando la explotación en el sector norte en enero 2008, operando en el sur, sólo los pozos provisionales y más alejados (a más de 10 km), suspendiéndose la explotación en el campo de pozos Coposa Tradicional (CEA, 2010).

Al estudiar los caudales de extracción por sector, se tiene que desde 1998 al año 2003, se explotaba en el sector sur un promedio de 500 lt/s, aumentando el caudal de extracción a mediados del 2004 por sobre 800 lt/s, para mantenerse por sobre los 600 lt/s hasta diciembre 2007. En enero del 2008, al cambiar los derechos de agua del sector sur al norte, los caudales extraídos en el sector sur disminuyeron por debajo de los 400 lt/s, explotándose en el sector norte un caudal promedio de 300 lt/s.

En la Figura 3.13 se muestra la ubicación de los pozos de producción en los sectores sur y norte, junto con los pozos de observación, con los que se ha determinado la disminución de los niveles del acuífero en la zona de estudio.

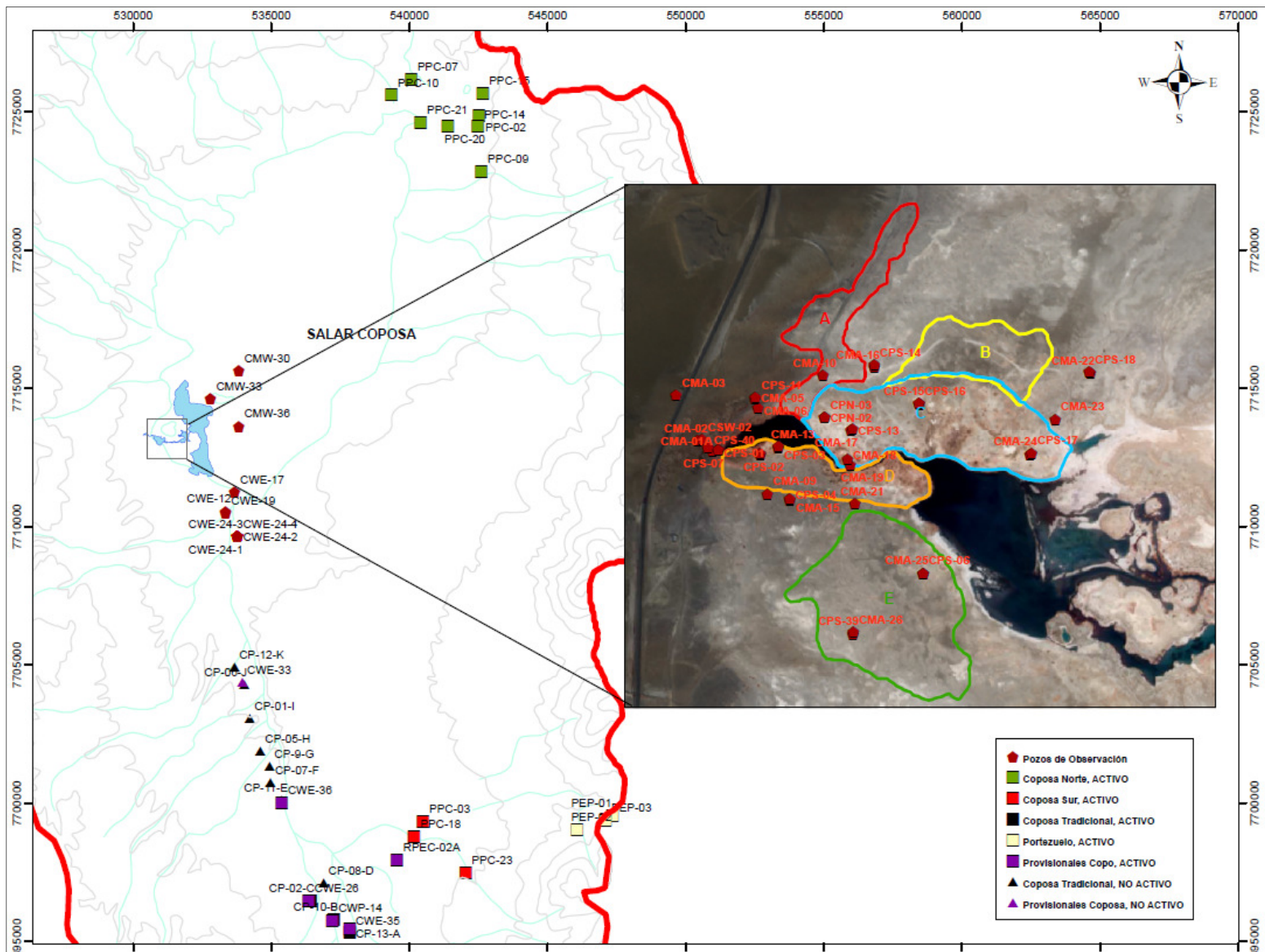


Figura 3.13 Pozos de producción y observación en Salar de Coposa. Fuente: CEA, 2010

3.2.4.3.4 Niveles de agua subterránea

Registros disponibles

Los niveles freáticos del acuífero inferior han sido monitoreados desde el comienzo de la explotación, en pozos profundos alrededor de la zona de las vegas (fuera de la zona de estudio), los cuales tienen una profundidad de entre 100 m y 260 m.

El monitoreo del acuífero somero se ha realizado mediante piezómetros desde febrero 2005 en las denominadas punteras CMA (sólo dos partieron en noviembre 2003) y desde enero 2008 en las punteras CPS. La profundidad mínima de estos piezómetros es de 2 m, con una profundidad promedio de 3 m, alcanzando en las zonas más profundas de nivel, hasta 84 m de profundidad.

En la Figura 3.14 se observa la ubicación de los piezómetros y en las Tablas 3.11 y 3.12 los registros disponibles desde enero 2005 y 2006 para las punteras CMA y CPS, respectivamente.

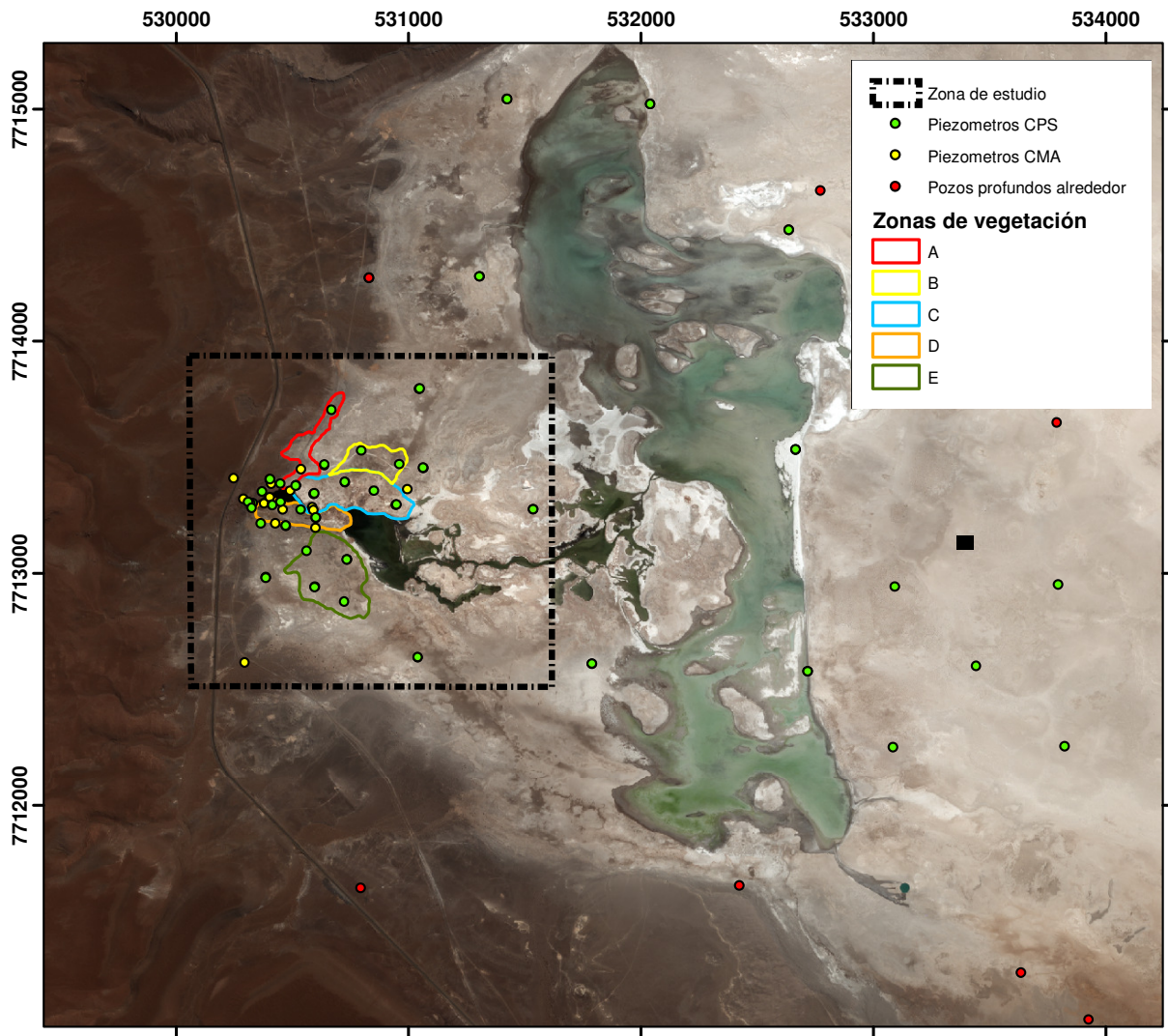


Figura 3.14 Piezómetros disponibles para la medición de niveles freáticos. Piezómetros CMA y CPS miden nivel en acuífero somero y pozos alrededor miden nivel en acuífero profundo.

Tabla 3.12. Registros de nivel freático disponibles en piezómetros CPS de enero 2006 a mayo 2010 en zona de estudio. Fuente: Elaboración propia en base a registros de nivel.

	2006					2007					2008					2009					2010								
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
CPMA-01																													
CPMA-02																													
CPS-01																													
CPS-02																													
CPS-03																													
CPS-04																													
CPS-05																													
CPS-06																													
CPS-07																													
CPS-08																													
CPS-09																													
CPS-10																													
CPS-11																													
CPS-12																													
CPS-13																													
CPS-14																													
CPS-15																													
CPS-16																													
CPS-17																													
CPS-18																													
CPS-19																													
CPS-20																													
CPS-21																													
CPS-22																													
CPS-23																													
CPS-24																													
CPS-25																													
CPS-26																													
CPS-27																													
CPS-28																													
CPS-29																													
CPS-30																													
CPS-31																													
CPS-32																													
CPS-33																													
CPS-34																													
CPS-35																													
CPS-36																													
CPS-37																													
CPS-38																													
CPS-39																													
CPS-40																													
CPS-41																													
CPS-42																													
CPS-43																													
CPS-44																													
CPS-45																													
CPS-46																													
CPS-47																													
CPS-48																													
CPS-49																													
CPS-50																													
CPS-51																													
CPS-52																													
CPS-53																													
CPS-54																													
CPS-55																													
CPS-56																													

Análisis espacial

El análisis espacial de los niveles se lleva a cabo en tres pasos, considerando análisis propios y los estudios anteriores.

En primer lugar, se estudia la sectorización del sistema realizada por GP Consultores (2007), donde se divide la zona de estudio según el comportamiento observado de los

niveles freáticos en los piezómetros someros. Se presenta en la Figura 3.15 la subdivisión realizada y se describen a continuación las características principales observadas en los pozos de cada sector.

- **Pozos de Cabecera:** Pozos que muestran un nivel de aguas directamente relacionado al nivel de aguas del acuífero profundo, pero con una componente de aporte del acuífero libre (del sector Oeste). La ubicación y comportamiento de estos pozos está asociada a la línea (eje N-S) de Ignimbrita, que da origen a la vertiente.
- **Pozos con Influencia de la Laguna:** Pozos que se encuentran en el borde de las lagunas, con niveles freáticos asociados al nivel de agua en éstas.
- **Pozos de Salar:** Sitios que muestran estabilidad durante el año, con ascensos puntuales asociados a las precipitaciones del invierno altiplánico. Por algunas diferencias en sus registros, se hizo la distinción entre el sector norte y sur.
- **Pozos de Drenaje:** Pozos que evidencian grandes oscilaciones estacionales en su nivel de aguas, y muestran una desconexión con el nivel de aguas de la laguna en parte del año.

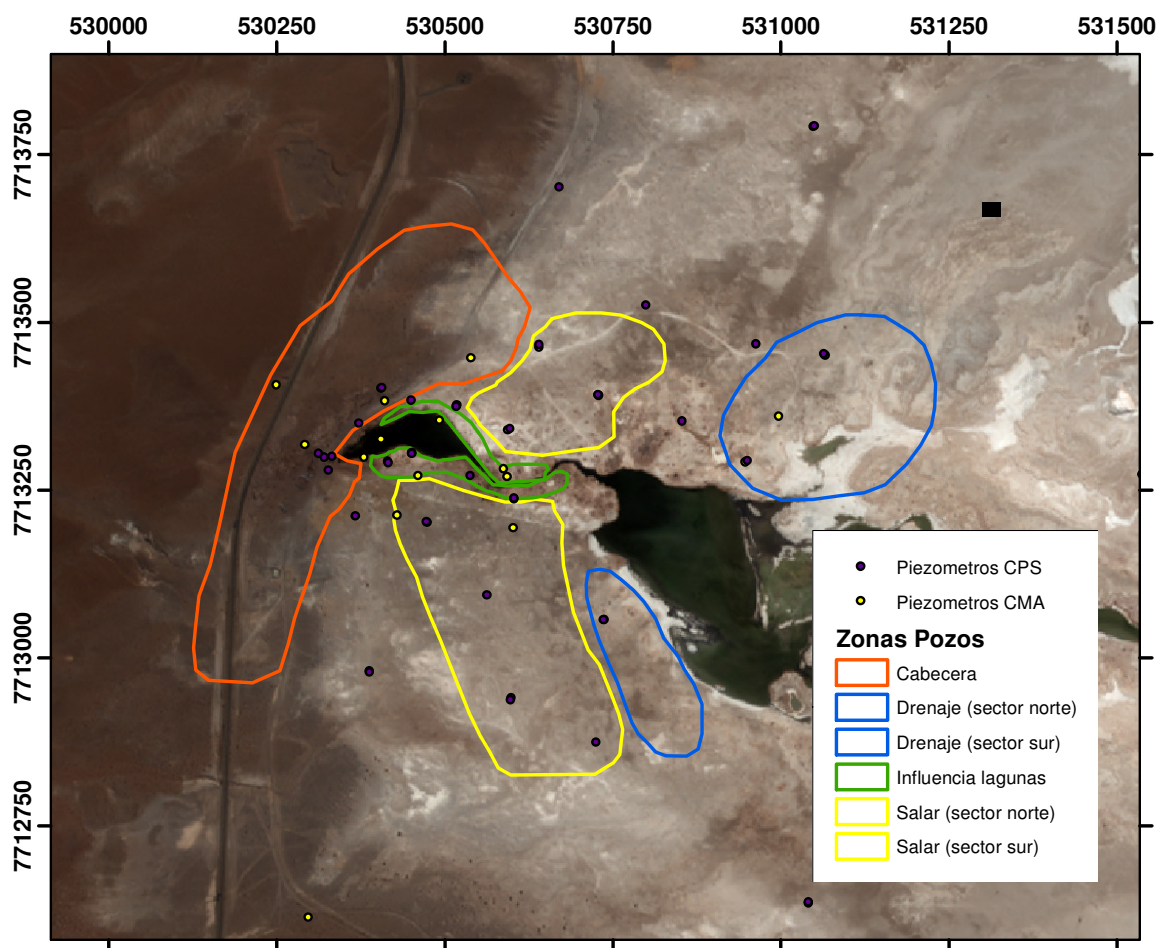


Figura 3.15 Sectorización de pozos según comportamiento de niveles observados.
Fuente: Elaboración propia en base a GP Consultores (2007)

Luego, para cuantificar los niveles en los distintos sectores y analizar su distribución espacial, se recurre al análisis de curvas piezométricas y de isopropfundidad.

Primero se muestran los resultados entregados por CEA (2010), donde se realiza una comparación para enero de los años 2005, 2006, 2008 y 2009. De aquí se obtiene, que en la zona de cabecera los niveles presentan una mayor profundidad debido a la topografía local, ascendiendo a medida que el agua de la vertiente de canaliza hacia las lagunas, presentado profundidades entre los 0,5 y 2 m. A nivel temporal, se menciona que existe una profundización clara del nivel freático, especialmente entre los años 2005 y 2010, observándose profundizaciones del nivel entre 50 cm y 1 m.

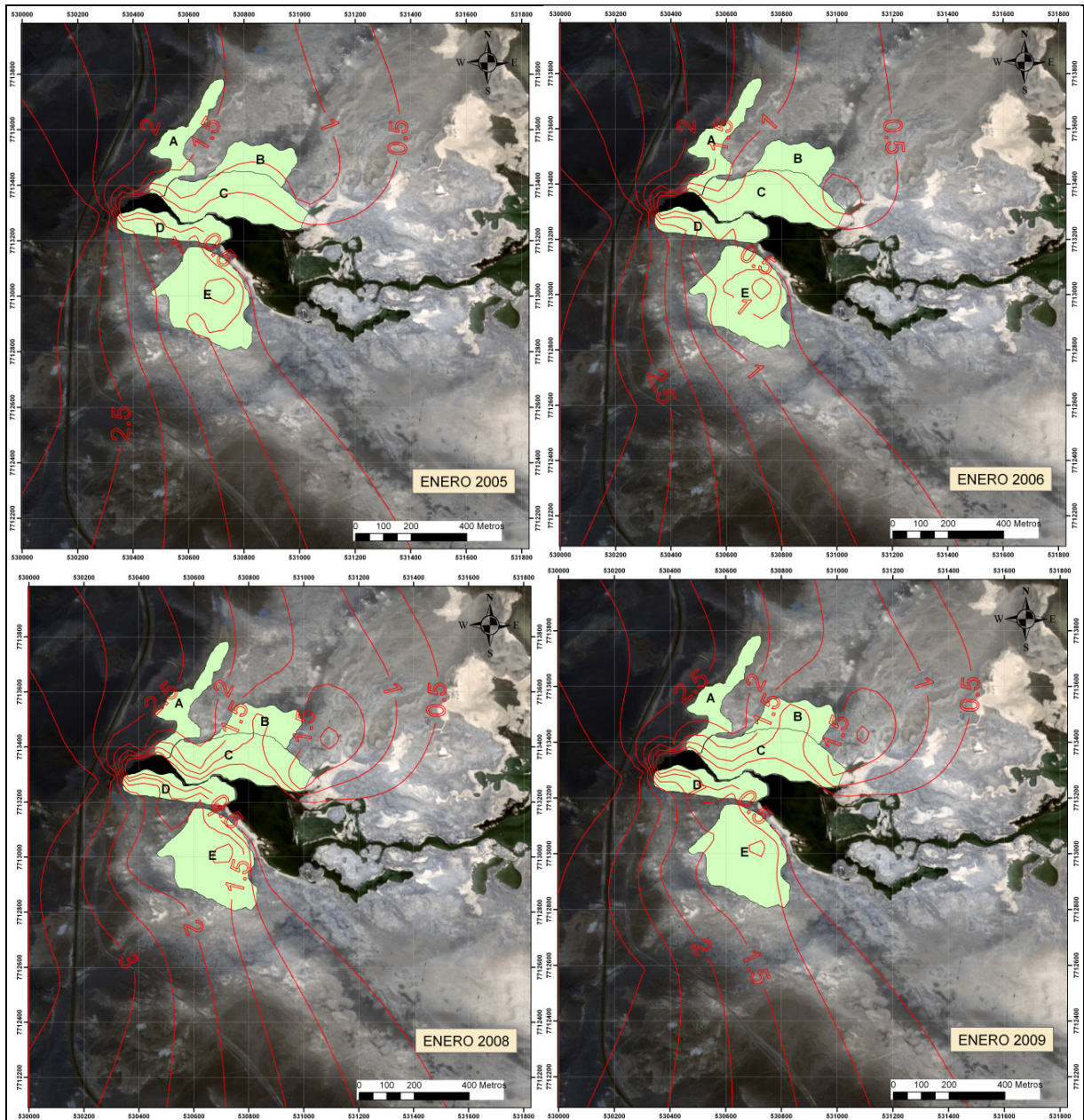


Figura 3.16 Curvas de isopropfundidad en sistema Jachucoposa para enero en distintos años.

Fuente: CEA, 2010

Para complementar este análisis, se elaboran curvas piezométricas y de isoprofundidad en la zona de estudio, con los datos disponibles de nivel en los piezómetros CMA y CPS, interpolando mediante Krigging.

El periodo de mayor interés para la determinación de la distribución espacial del nivel freático, la cual definirá los niveles considerados en el modelo como se explicará posteriormente, corresponde al periodo 2007 – 2008, periodo en que los niveles permanecen estables, sin descenso ni recuperación relevante. Además, este periodo corresponde al tiempo en que se poseen mediciones de humedad en distintos perfiles de suelo, siendo el único periodo donde se poseen mediciones de nivel y humedad simultáneamente.

Dado esto, se elaboran primero las curvas para la fecha con mayor cantidad de datos en los piezómetros para ese periodo, correspondiente a septiembre 2007, de modo de ver la forma de las curvas, y así al no tener todos los datos en otros meses, estimarlas adecuadamente. Para mejorar la estimación del nivel se consideran los perfiles de humedad medidos, donde al alcanzar el nivel freático la humedad debiese ser constante, entregando así, una aproximación de la ubicación del nivel freático. Esta profundidad se utiliza para corroborar o ajustar las curvas realizadas, entregando la posición del nivel freático en zonas donde no hay información.

En la Figura 3.17 se observan las curvas piezométricas en la zona para septiembre 2007, con las que se trazan las líneas de flujo. Se observa que la dirección general del flujo es hacia el sureste, canalizándose hacia la gran laguna de evaporación. En las zonas aledañas a las surgencias se observa cómo el flujo se dirige hacia las lagunas, para luego canalizarse superficialmente hacia el este. Se destaca que la conexión de las lagunas - zona de angostamiento- no recibe aportes laterales directos.

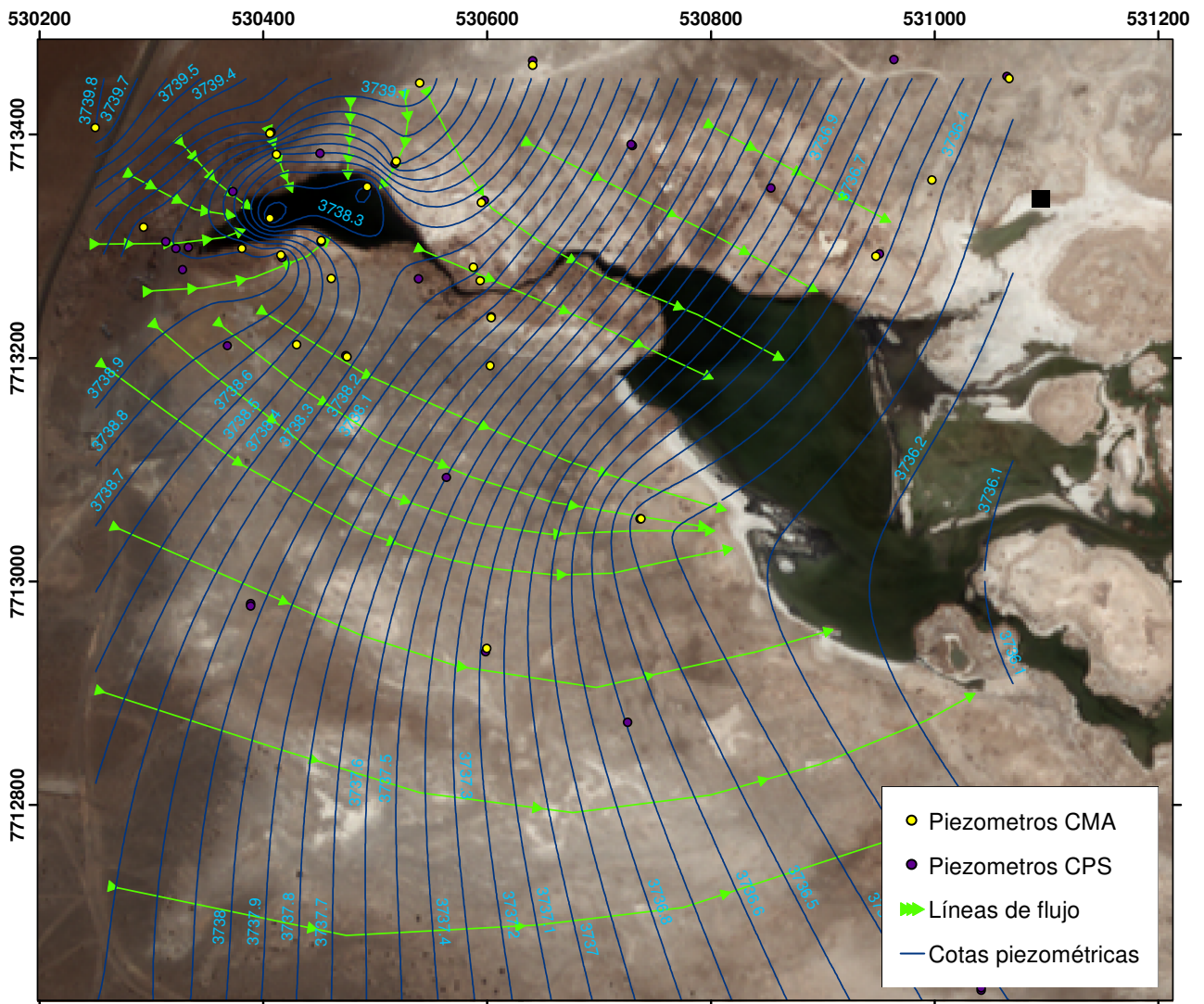


Figura 3.17 Cotas piezométricas y líneas de flujo para septiembre 2007.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de niveles en piezómetros someros.

Las curvas de isopropundidad se muestran en la Figura 3.18, observándose una concordancia con las curvas realizadas por CEA (2010), manteniéndose los niveles más profundos en la zona de cabecera, con un gradiente ascendente hacia las zonas de surgencias.

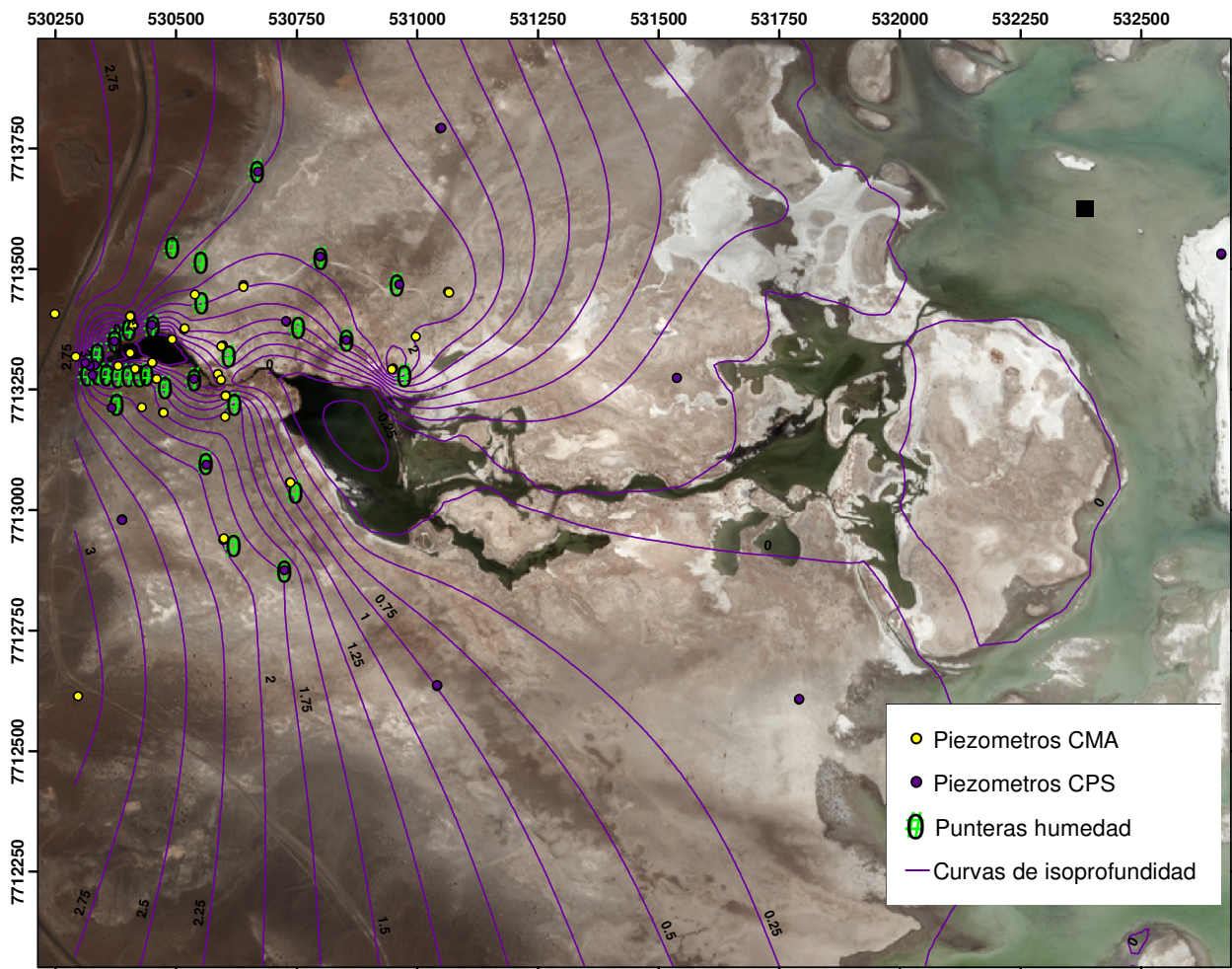


Figura 3.18 Curvas de isopropfundidad para septiembre 2007 Curvas se realizan con piezómetros con información disponible y se corrigen y/o corroboran con los perfiles de humedad modelados. Fuente: Elaboración propia

Análisis temporal

Para estudiar la evolución temporal de los niveles freáticos, se grafican los niveles medidos en los piezómetros CMA a una escala mensual. En las Figura 3.19 y 3.20 se muestran dichos niveles agrupados según los distintos sectores definidos por GP Consultores (2007).

Se observa la tendencia a la disminución por la extracción de aguas subterráneas en el acuífero hasta la puesta en marcha de las medidas de mitigación, las cuales provocan una mantención o recuperación de los niveles. Dado esto, se determinaron en CEA (2010), según los registros desde enero 2005 a mayo 2010, tasas promedio de descenso y recuperación de los niveles freáticos en los distintos pozos de monitoreo, valores que fueron corroborados en este estudio y que se muestran en la Tabla 3.13.

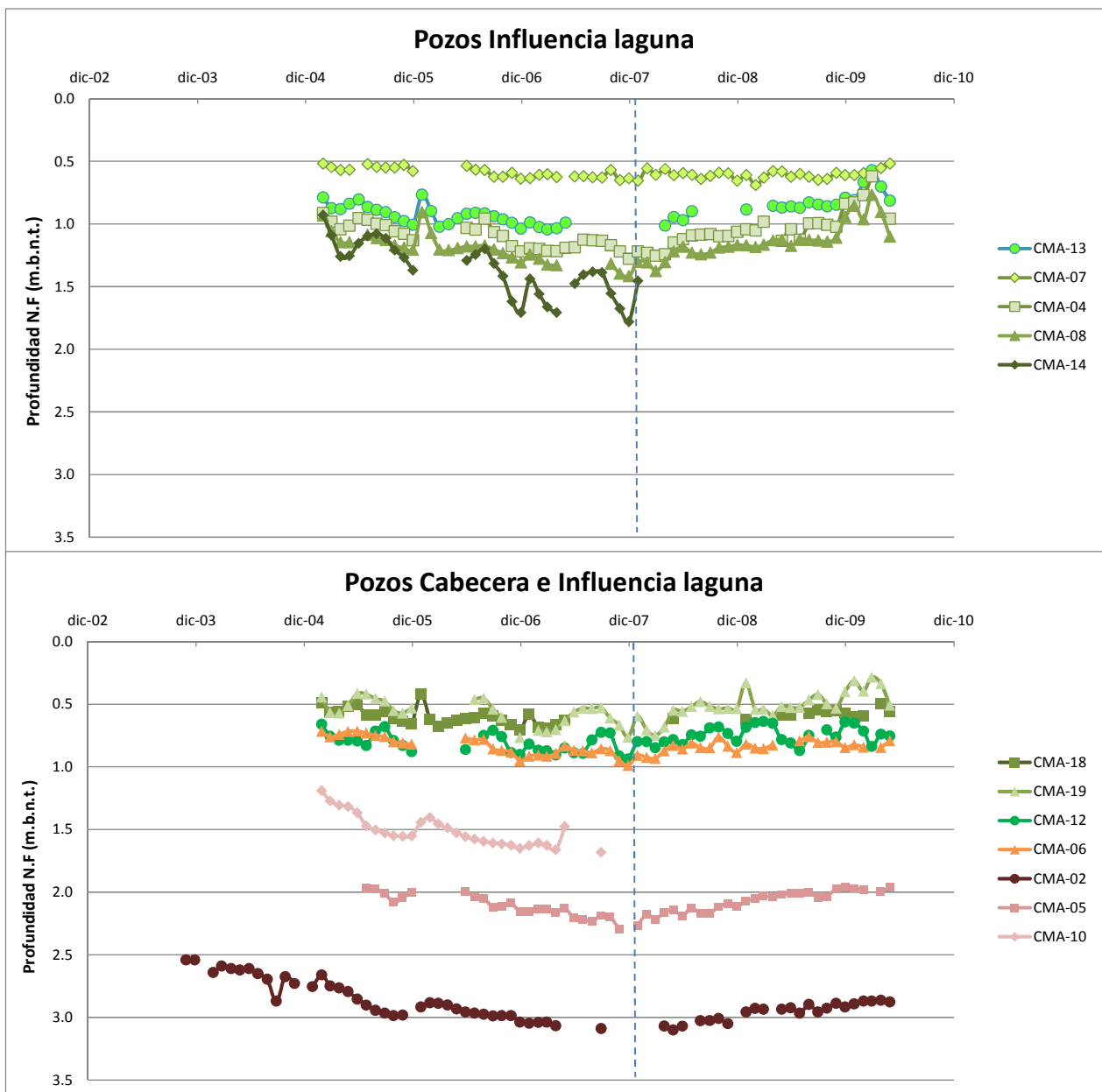


Figura 3.19 Nivel freático piezómetros someros CMA para sectores de Influencia laguna y cabecera definidos por GP Consultores (2007). Tonos verdes corresponden a los pozos de influencia laguna, y tonos rojos a los de cabecera. Línea punteada indica fecha de inicio de las medidas de mitigación (enero 2008)

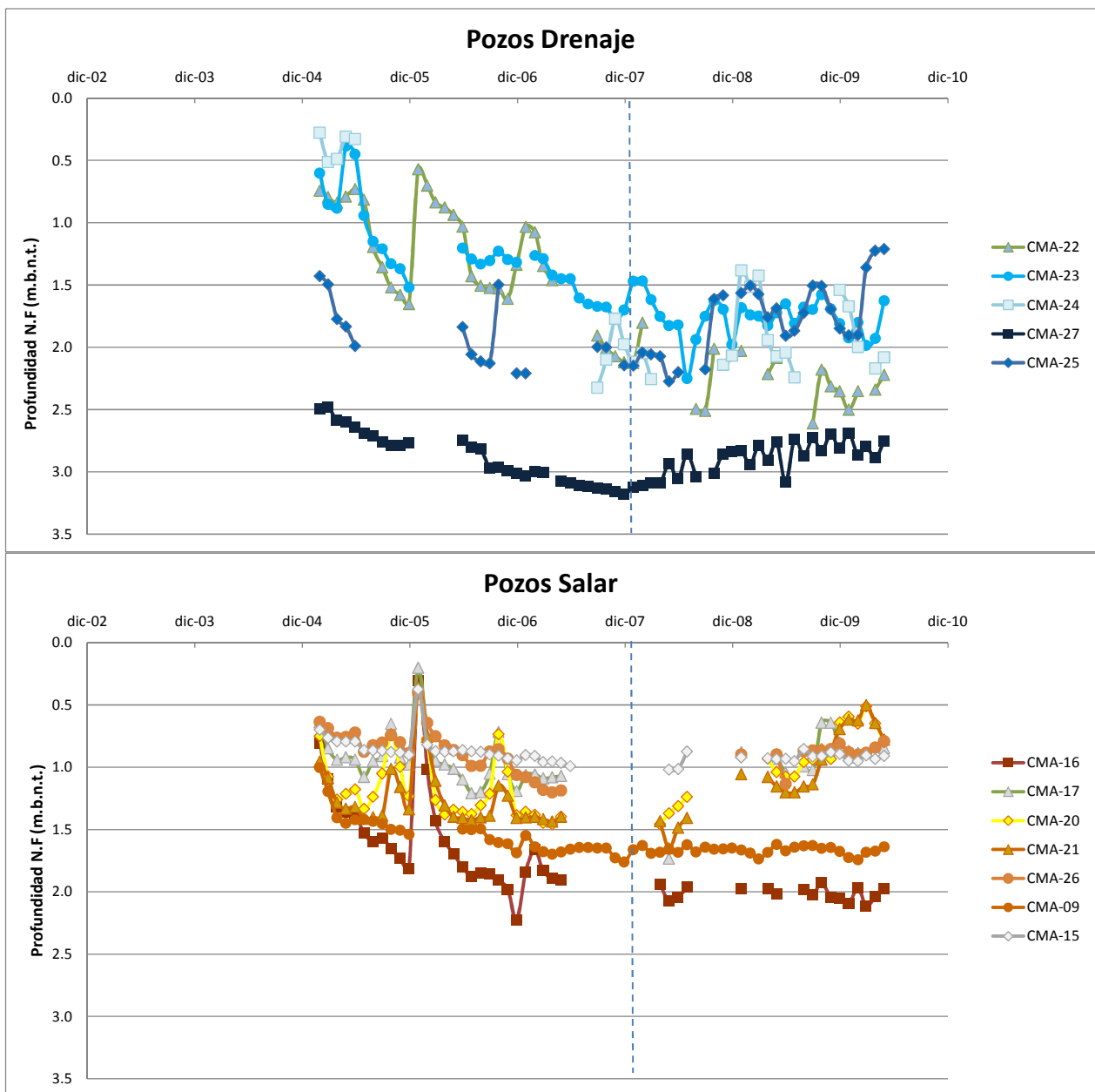


Figura 3.20 Nivel freático piezómetros someros CMA para sectores de Drenaje y Salar definidos por GP Consultores (2007). Tonos azules corresponden a los pozos de Drenaje, y naranjos a los de Salar. Línea punteada indica fecha de inicio de las medidas de mitigación (enero 2008)

Tabla 3.13 Tasas de descenso y recuperación para pozos someros. Fuente: CEA, 2010

Sector	Pozo	Tasa descenso (m/año)	Tasa recuperación (m/año)
De Cabecera	CMA-02	0,2	0,15
	CMA-03	0,2	0,15
	CMA-05	0,2	0,15
	CMA-10	0,2	s/i
Con influencia Laguna	CMA-04	0,15	0,3
	CMA-06	0,1	0,1
	CMA-07	0,15	-0,1
	CMA-08	0,2	0,2
Del Salar norte	CMA-11	0,15	0,2
	CMA-16	1,0	0
	CMA-17	s/i	s/i
Del Salar sur	CMA-09	0,15	0,1
	CMA-27	0,25	0,25
	CMA-14	s/i	s/i
	CMA-15	0,12	0,1
	CMA-21	s/i	s/i
	CMA-20	s/i	s/i
	CMA-26	s/i	0,25
De Drenaje norte	CMA-23	0,4	0
	CMA-24	s/i	s/i
	CMA-22	-0,3	0,75
De Drenaje sur	CMA-25	0,6	0,5

Por otro lado, se observa que los cambios estacionales por evaporación son menores que los cambios provocados por la extracción de aguas subterráneas, por lo que no se aprecian claramente a la escala estudiada. Sin embargo, se puede identificar al analizar en detalle cada registro, que existe cierta variación estacional que hace que los niveles de verano sean más profundos que en invierno, lo que se percibe de forma más clara para los sectores con niveles freáticos más someros, con diferencias estacionales de hasta 15 cm.

En el estudio CEA (2010), se analizaron los distintos factores que determinan el comportamiento de los niveles freáticos en la zona estudio, y se determinó que las principales variables que alteran los niveles son: el bombeo de agua subterránea desde los campos de pozos norte y sur, las precipitaciones sobre el sistema y la recarga artificial de caudal en la vertiente. En Figura 3.21 se muestran los principales resultados de dicho análisis.

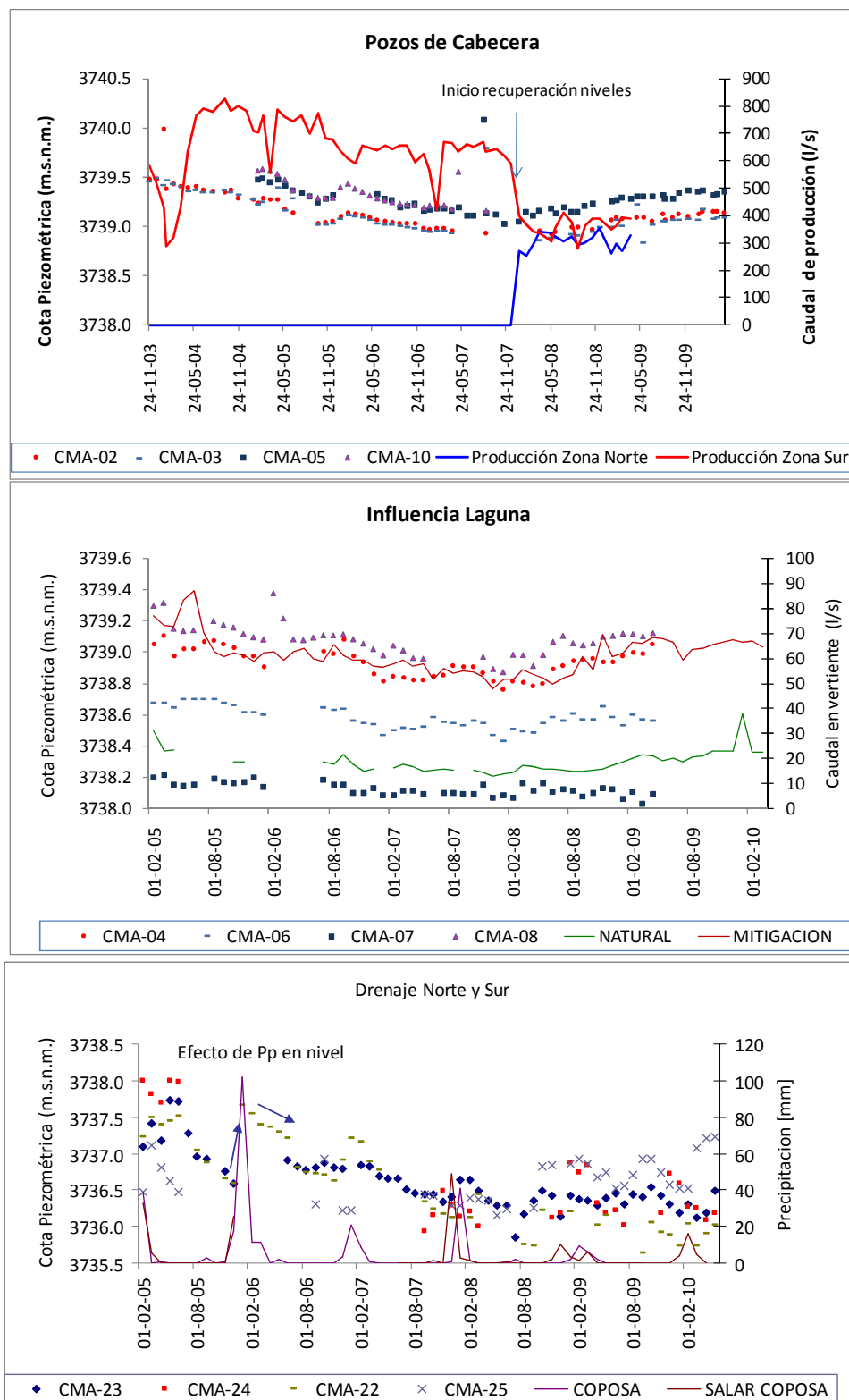


Figura 3.21 Resultados principales estudio CEA (2010) con respecto a las principales variables que afectan los niveles freáticos en la zona de Jachucoposa. Arriba se observa efecto del caudal de bombeo en la cota piezométrica, al medio el efecto de las lagunas y el caudal de la vertiente Jachucoposa, y abajo el efecto de las precipitaciones. Se muestran niveles piezométricos de pozos de las zonas más afectadas por cada variable. Fuente: CEA, 2010.

Como se menciona anteriormente, el efecto más evidente en las variaciones de nivel, corresponde al descenso sostenido de los niveles freáticos desde 2003 hasta finales del 2008, para su posterior recuperación o mantención, al trasladar al norte parte de los derechos de agua de CMDIC, bajando sustancialmente la extracción de agua en la zona sur. Esto habría provocado una recuperación de la cota piezométrica a un nivel similar a la de junio 2006 en el caso de los pozos de la zona de cabecera, y a niveles similares a los registrados inicialmente, en el caso de los pozos en la zona con influencia de la laguna. Para el caso del pozo CMA-16 se observa que el descenso continúa, pero disminuyendo su tasa, lo que se asocia a condiciones locales de topografía (CEA, 2010).

Con respecto al efecto de las lagunas, se plantea que existe un comportamiento particular de los niveles freáticos en los piezómetros cercanos a éstas, con descensos que ocurren a tasas menores respecto a otros sectores, y con una tendencia que se ajusta bastante bien al caudal que aflora por la vertiente (natural más mitigado), el que a su vez regula los niveles de las lagunas permanentes (CEA, 2010).

Por último, se observó acerca de las precipitaciones, que a una escala mensual, solamente se identifica un efecto incremental sobre los niveles de agua subterránea, para un evento de precipitación cercano a los 100 mm en enero del año 2006. La respuesta a este evento es bastante rápida, y la recuperación a niveles anteriores a la precipitación demora unos pocos meses, dependiendo del sector afectado. Se destaca que en el sector de cabecera y de influencia de las lagunas, el efecto de las precipitaciones es menor que en las zonas de salar y de drenaje (CEA, 2010).

3.2.4.4 Suelos

3.2.4.4.1 Humedad del suelo

Para caracterizar la humedad del suelo en la vega de Jachucoposa, se cuenta con punteras de aluminio en 29 puntos de la vega, en los distintos sectores de vegetación, donde se ha medido mediante sonda de neutrones el contenido de humedad en los perfiles de suelo.

La sonda de neutrones puede ser utilizada como un dispositivo para medir la humedad en el suelo, pero necesita ser calibrada para las condiciones locales del mismo cuando se requiere conocer la humedad absoluta. Sin embargo, si el interés es solo medidas relativas o variaciones de humedad de suelos en el tiempo, una calibración específica no es necesaria, ya que la medida servirá sólo para comparar condiciones de humedad de un mismo suelo. Para una calibración de campo, se requiere medir con el instrumento y luego con un muestreador de suelos tomar muestras, sellarlas en bolsas plásticas y determinar su humedad másica en laboratorio.

Se cuenta con mediciones de perfiles de humedad hasta 190 cm de profundidad para julio 2006 y un seguimiento bimensual desde julio 2007 a enero 2008 en los 29 puntos, registro que se encuentra en el Anexo C para los distintos perfiles. En la Figura 3.22 se muestra la ubicación de dichos puntos.

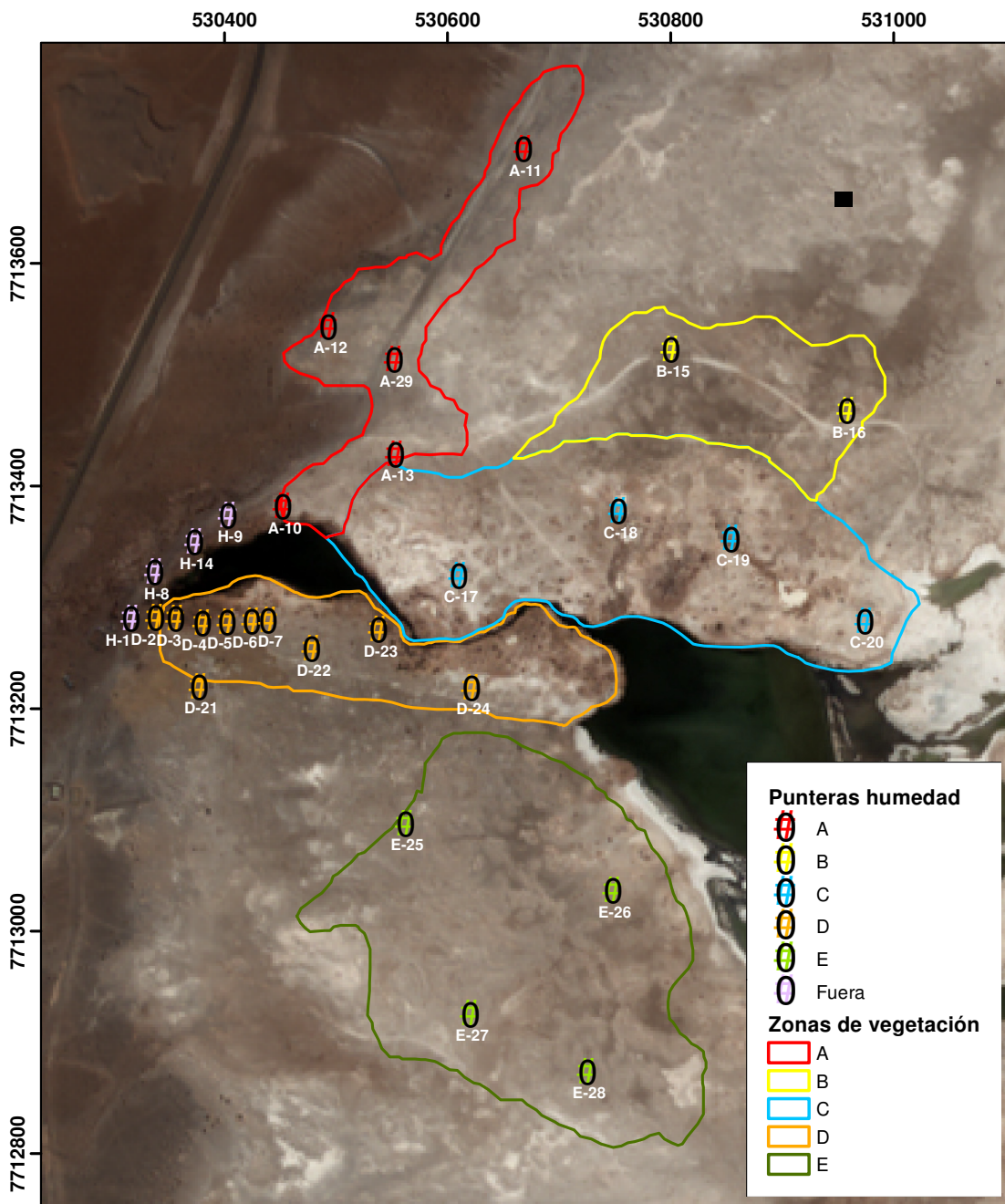


Figura 3.22 Punteras de humedad en Jachucoposa para las distintas zonas de vegetación.

Al estudiar los registros de humedad en el tiempo (periodo 2007-2008), como se ejemplifica en la Figura 3.23 para la puntera D4, se observa que no existe un patrón estacional claro, y que las variaciones entre el máximo y el mínimo observado entre julio 2007 y enero 2008 son menores al 20%, presentando el 80% de las mediciones, variaciones menores a un 5%, incluso al considerar las mediciones de junio 2006. Dado esto, se considera que diferencias mayores en los valores de humedad en el tiempo, corresponden a datos no característicos de la zona, ya que además, estos datos no siguen la tendencia mostrada en el perfil, lo que se condice con las conclusiones de GP Consultores (2008), las que plantean que la humedad se mantiene constante en el tiempo al estudiar los registros existentes.

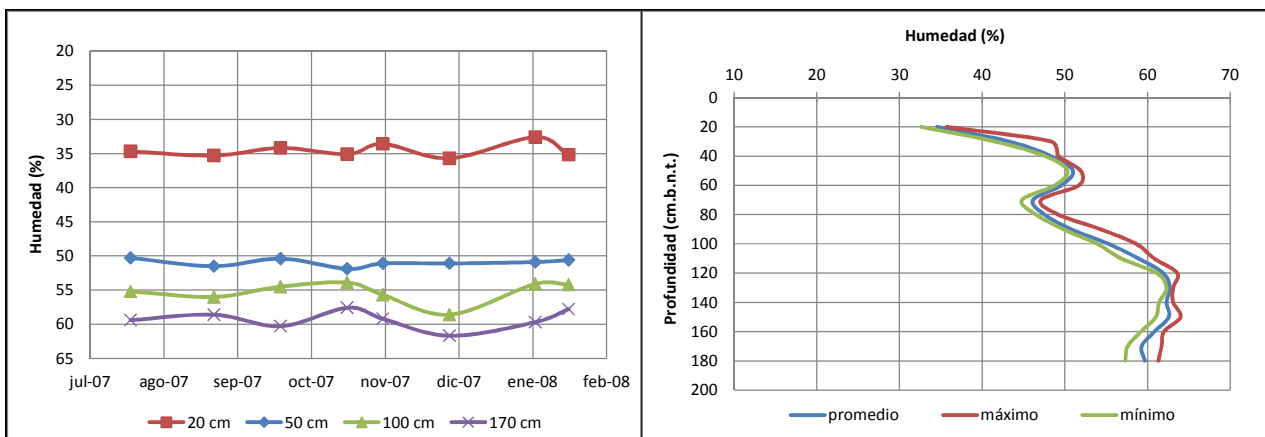


Figura 3.23 Análisis de humedad en el tiempo para puntera D4. A la izquierda se presenta humedad en el tiempo para distintas profundidades y a la derecha, los valores mínimo, promedio y máximo para el perfil de humedad en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la baja variación temporal de los datos registrados, se calcula la humedad promedio en el tiempo para cada perfil de suelo, la cual se considera característica de la zona y periodo estudiado. En las Figuras 3.25 y 3.26 se muestran los perfiles promedio para los 29 puntos analizados, agrupados según las distintas zonas de vegetación.

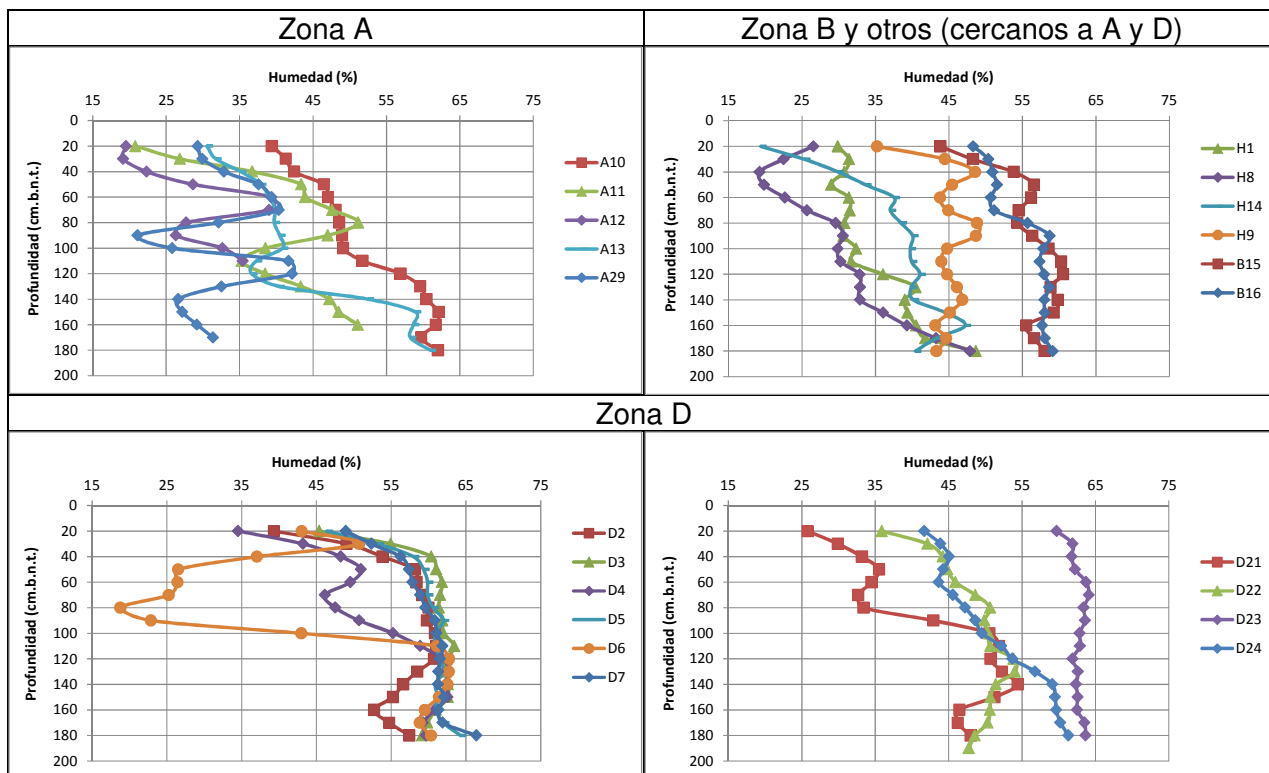


Figura 3.24 Perfiles de humedad promedio en el tiempo para las punteras, en los sectores A y D. Fuente: Elaboración propia en base a registros de humedad

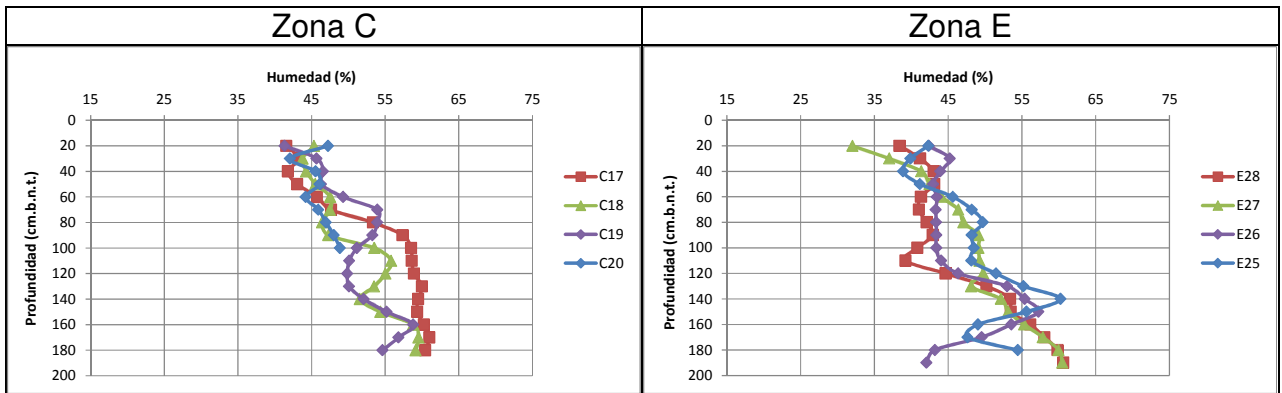


Figura 3.25. Perfiles de humedad promedio en el tiempo para las punteras en los sectores C y E.
Fuente: Elaboración propia en base a registros de humedad.

A modo de resumen, se muestra en la Figura 3.26 el promedio horizontal de las mediciones realizadas para cada sector, con su rango de variación, el cual muestra la heterogeneidad encontrada en las distintas zonas de vegetación.

Se observa que el sector A posee un menor contenido de humedad que los demás sectores, con valores entre 20% y 30% en superficie, excepto en la puntera A10, la cual se encuentra más próxima a las lagunas, presentando valores cerca del 40%. Este sector posee además la mayor variación de humedad en profundidad, lo que indicaría un suelo más arenoso.

Las zonas B, C y D presentan en promedio mayores contenidos de humedad que el sector E, posiblemente asociados a fuentes de agua cercanas, como las lagunas o surgencias puntuales existentes al norte de éstas. Sin embargo, el sector D presenta una alta variabilidad en sus valores de humedad, encontrando perfiles prácticamente saturados como el D23 en el borde la laguna y más secos, como el D21 al alejarse. En esta zona, llama la atención el perfil D6, el cual presentaría una capa intermedia de características particulares sólo en esa ubicación.

Por otro lado, se estudia la humedad de saturación (Θ_{sat}) en las distintas punteras, es decir, los contenidos de humedad bajo el nivel freático en los 29 puntos. Para las punteras en las que existen varias mediciones bajo el nivel freático se considera el promedio de las humedades determinadas. Se muestra en la Tabla 3.14 la humedad de saturación promedio obtenida para cada punto, agrupadas por sector.

Se observa que los valores se encuentran en torno a un 60% para todos los sectores, excepto para aquellas punteras fuera de los sectores de vegetación definidos por el SAG, donde se encuentran humedades de saturación menores, entre 40% y 50%. El sector D es el que mayores humedades de saturación presenta, indicando un suelo un poco más fino que los demás, con mayor capacidad de retención de agua.

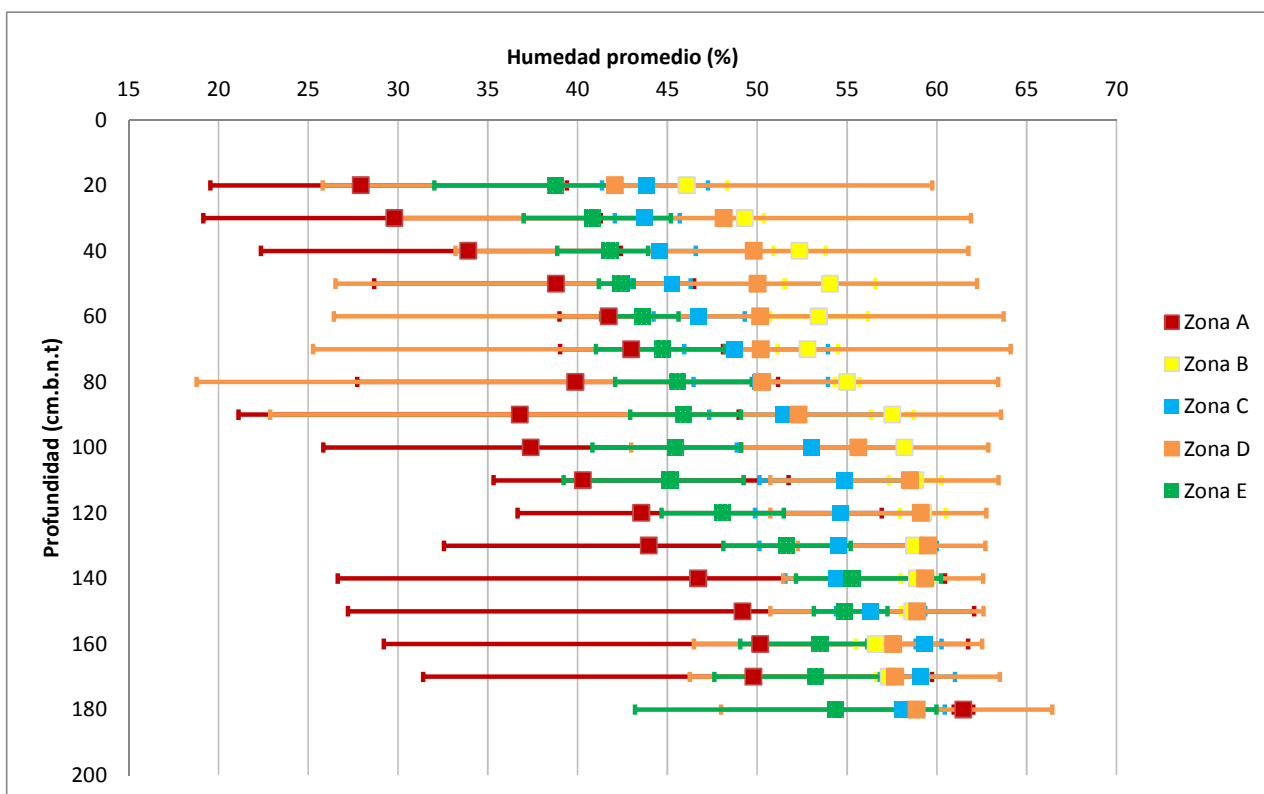


Figura 3.26 Humedad promedio y rango de variación por sector.
Fuente: Elaboración propia en base a registros de humedad periodo 2007-2008.

Tabla 3.14 Humedad de saturación en punteras de aluminio de Jachucoposa

Sector	Puntera	Humedad de saturación [%]
Sector A	A-10	60,9
	A-11	S/I
	A-12	S/I
	A-13	59,2
	A-29	S/I
Sector B	B-15	58,0
	B-16	59,1
Sector C	C-17	60,1
	C-18	59,2
	C-19	57,8
	C-20	S/I
Sector D	D-2	59,3
	D-3	61,6
	D-4	61,3
	D-5	61,6
	D-6	61,1
	D-7	62,0
	D-21	S/I
	D-22	S/I
	D-23	62,9
D-24	60,4	

Sector	Puntera	Humedad de saturación [%]
Sector E	E-25	S/l
	E-26	54,8
	E-27	60,2
	E-28	60,6
Fuera	H-1	48,7
	H-8	47,9
	H-14	43,9
	H-9	45,5

S/l. Punteras que no poseen mediciones de humedad bajo el nivel freático

3.2.4.4.2 Parámetros y textura del suelo

Teknoriego (2010) realizó un estudio de suelos en la vega de Jachucoposa, mediante la descripción de 10 calicatas excavadas en sectores representativos de las diferentes morfologías superficiales y grado de humedad al tacto encontradas en la zona de estudio. En la Figura 3.27 se muestra la cartografía de suelos desarrollada y la ubicación de las calicatas utilizadas.

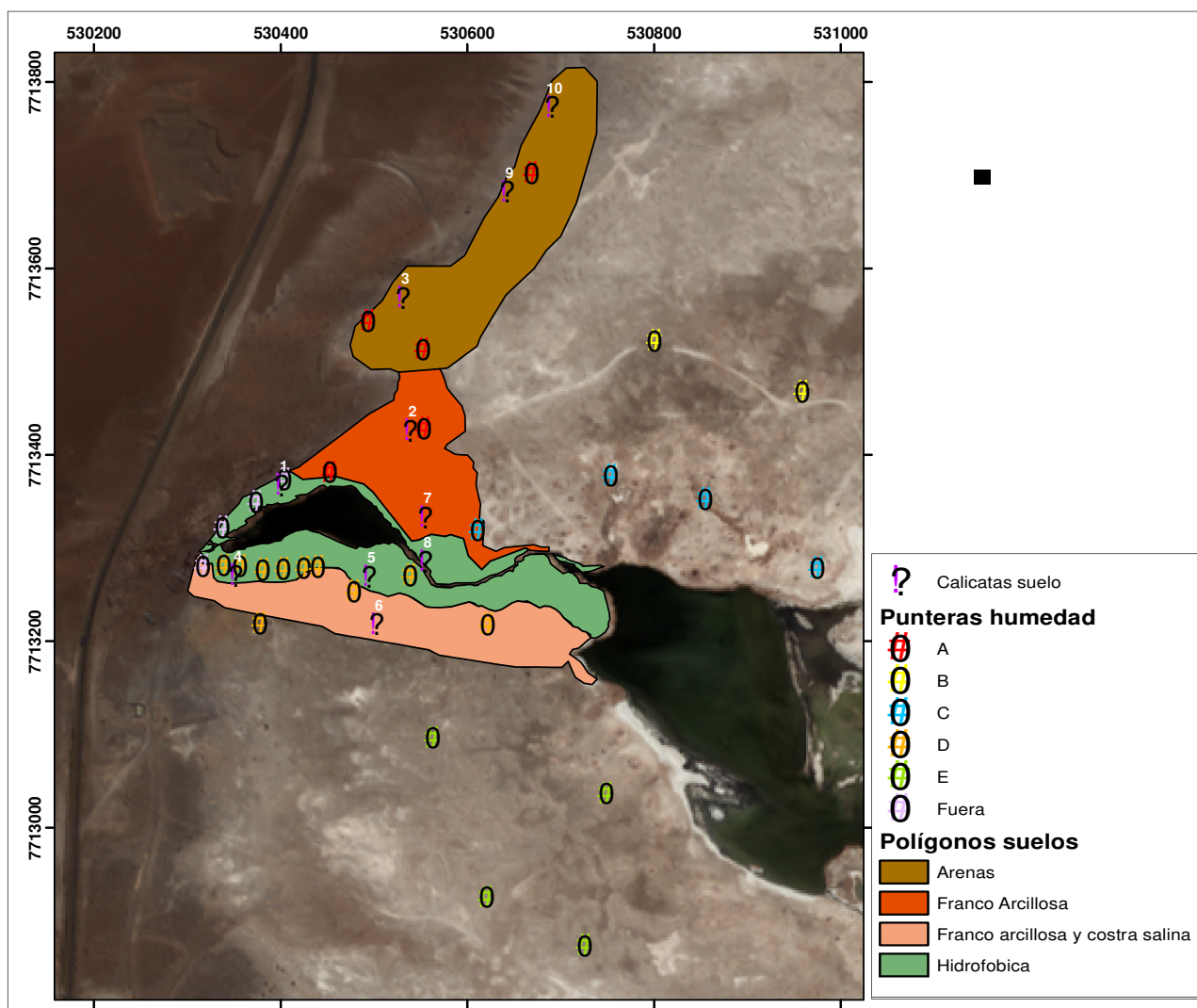


Figura 3.27 Calicatas, punteras de humedad y cartografía de suelos de Jachucoposa.
Fuente: Elaboración propia en base a Tecknoriego (2010)

En la cartografía presentada, se definieron cuatro fases de suelo, las que se agruparon según las características de los horizontes superficiales (Tecknoriego, 2010):

- Hidrofóbica: suelos con horizontes orgánicos o con abundante presencia de materiales fibricos
- Arenas: textura superficial dominante areno francosa
- Franco arcillosa : textura superficial dominante franco arcillosa
- Franco arcillosa y costra salina: textura dominante franco arcillosa con presencia de costra salina en la superficie o cerca de ella, de un espesor superior a 5 cm

Según la morfología establecida, se tomaron 19 muestras por horizontes representativos de las Calicatas 1 a 6 y 9 a 10. No se muestrearon las Calicatas 7 y 8, debido a que su morfología se consideró similar a otros sitios muestreados (Tecknoriego, 2010). Se obtuvo en laboratorio: granulometría, densidad aparente, capacidad de retención de agua a 33 y 1.500 kPa (CC y PMP), materia orgánica, pH y conductividad eléctrica, datos que se muestran en la Tabla 3.15 y que serán utilizados para la definición de los estratos de suelo en el modelo.

Tabla 3.15 Parámetros de suelo muestras analizadas. Fuente: Tecknoriego, 2010

Calicatas	Prof.	Espesor	Prof. media	CE	MO	Densidad aparente	Retención de agua (%bss)		Retención de agua (% vol)		Textura			
	cm	cm	cm	dS/m	%	Mg/m3	33 kPa	1500 kPa	33 kPa	1500 kPa	a %	A %	L %	(USDA)
C1	0 - 12	12	6	74.0	2.13	1.30	31.6	14.3	41.1	18.6	64.6	9.8	25.6	Fa
	12 - 20	8	16	25.0	2.55	1.11	35.9	18.4	39.8	20.4	59.9	17.3	22.8	Fa
	20 - 33	13	27	23.0	5.02	0.82	71.2	30.2	58.4	24.8	38.5	25.0	36.5	Fa
	33 - 61	28	48	8.2	1.51	0.95	40.0	16.4	38.0	15.6	64.9	13.8	21.3	Fa
C2	0 - 12	12	6	62.0	1.23	1.38	39.7	21.1	54.8	29.1	42.6	7.6	49.8	FL - Fa
	12 - 30	18	21	6.6	1.57	1.01	45.7	21.4	46.2	21.6	51.1	24.7	24.2	FAa
	30 - 60	30	45	1652.0	1.02	1.25	38.8	16.4	48.5	20.5	55.7	22.4	21.9	FAa
C3	0 - 20	20	10	12.0	0.02		31.1	14.6			72.3	5.0	22.7	Fa
	20 - 110	90	45	6.6	0.03	1.30	30.9	11.1	40.2	14.4	65.2	7.3	27.4	Fa
C4	0 - 8	8	4	6.0	24.00		59.7	43.4			49.2	20.1	30.7	F
	8 - 22	14	15	18.0	13.20	0.68	64.8	39.9	44.1	27.1	44.6	14.9	40.5	F
	22 - 100	78	61	6.7	13.20	0.52	104.0	45.1	54.1	23.5	36.5	21.9	41.5	F
C5	0 - 18	18	9	38.0	0.14	0.65	34.7	16.9	22.6	11.0	74.5	9.0	16.5	Fa
	18 - 32	14	25	11.0	13.40	0.37	168.6	93.7	62.4	34.7	27.0	25.5	47.6	F
	32 - 110	78	71	5.0	47.00	0.46	133.9	76.4	61.6	35.1	muestra orgánica- ND			
C6	0 - 18	18	9	66.0	2.20	1.23	41.1	21.7	50.6	26.7	41.3	9.0	49.7	FL - Fa
	18 - 50	32	34	3.8	0.74	1.20	47.1	17.6	56.5	21.1	31.4	37.8	30.8	FA
C9	0 - 20	20	10	13.0	1.06		23.9	11.7			79.4	5.7	14.9	aF
C10	0 - 30	30	15	23.0	0.91		22.4	10.6			76.0	4.4	19.6	aF - Fa

A: Arcilla, a: arena, L: limo, F: franco. ND: No determinado. Espacios rojos indican que no había terrones para determinar la densidad aparente, CC y PMP.

En general, los suelos descritos corresponden a una sucesión de estratificaciones, en algunos sectores de materiales orgánicos, y en otros de materiales minerales. Los sectores más cercanos a la laguna presentan mayor número de horizontes orgánicos y en los sectores más alejados de los cuerpos de agua se identificaron estratos de sales en el perfil de suelo, constituidas por sulfatos y cloruros (CEA, 2010). Sin embargo, los contenidos de materia orgánica indican porcentajes menores al 5% en casi todas las calicatas, exceptuando las Calicatas 4 y 5, que se encontrarían en el borde sur de las

lagunas, por lo que la mayoría de los horizontes correspondería a la definición de materiales minerales.

La conductividad eléctrica muestra condiciones salinas en todas las calicatas, con alta salinidad en superficie, entre 3,8 dS/m y 74 dS/m, con un promedio de 16 dS/m, la cual va disminuyendo en profundidad (CEA, 2010).

Los valores de densidad aparente son mayores en superficie y disminuyen en profundidad, debido a la presencia de materiales orgánicos y al origen volcánico de la fracción mineral. En superficie los valores varían entre 0,65 y 1,38 gr/cm³ en las calicatas 1, 2, 3, 5 y 6 (CEA, 2010).

Según los análisis texturales, se observa que los suelos van desde suelos franco arcillosos a arenas francas, existiendo estos últimos principalmente en el sector norte, en la zona A de vegetación. Se aprecia también un mayor contenido de finos en profundidad, aumentando hasta más de tres veces en los estratos inferiores en las Calicatas 2, 5 y 6. En el sector más arenoso según la cartografía, no se puede concluir al respecto, ya que no existen muestras en profundidad a excepción de la Calicata 3, la cual no muestra variaciones importantes.

Los puntos de CC y PMP indican, junto a los bajos valores de densidad aparente, una gran capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la que tiende a ser ligeramente mayor en profundidad que en la superficie, lo que corrobora la mayor cantidad de finos en profundidad. La excepción a esta alta retención de agua se observa en las Calicatas 9 y 10, donde las texturas de suelos son más arenosas.

CAPÍTULO 4: MODELO DE SIMULACIÓN DE LA VEGA DE JACHUCOPOSA

4.1 RESUMEN E INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN

Se presenta a continuación un resumen de las principales características de cada zona de vegetación presente en Jachucoposa, según los antecedentes revisados en el capítulo anterior. Se toma la zonificación del SAG, ya que estos polígonos son los que se han utilizado para el desarrollo del sistema de manejo ambiental del ecosistema.

- **Zona A.** Corresponde a suelos más arenosos, que según el comportamiento de los niveles pertenece a la zona de cabecera con un descenso promedio de 17 cm/año y una recuperación de 13 cm/año. La vegetación presente es monoespecífica (1 especie, presente sólo en este sector) con una cobertura promedio menor al 5% para octubre 2009 y marzo 2010. Según el modelo ecosistémico de la Jachucoposa (CEA, 2010), esta zona se ha visto fuertemente afectada por erosión eólica, la cual se explica por la menor humedad de los suelos, la que genera un menor grado de cohesión, dejando más expuestos los suelos a la acción del viento. Como medida de mitigación esta zona posee riego por aspersión con una tasa promedio de 3,2 mm/día, con un máximo de 7,2 mm/día. Sin embargo, no se han observado aumentos significativos en la cobertura o riqueza, los que se han mantenido estable del 2007 al 2010.
- **Zona B.** Zona con suelos franco arcillosos – limosos, a más de 100 m de las lagunas, que según el comportamiento de los niveles corresponde a la zona de salar norte o drenaje norte. En la zona no existen registros para determinar el descenso o recuperación, pero según las zonas aledañas, la tasa de descenso se estima cercana o mayor a 50 cm/año. La vegetación corresponde a pajonal hídrico asociado a surgencias puntuales, con cobertura promedio menor al 10% para octubre 2009 y marzo 2010, con valores entre 0% y 14%. Esta zona no está asociada a riego y se observa desde 2007 al 2010 un descenso de la cobertura vegetal.
- **Zona C.** Corresponde a la segunda zona con mayor cobertura vegetal con un promedio de 23% y 28% para octubre 2009 y marzo 2010 respectivamente, con especies asociadas a los cuerpos de agua y zonas salinas. El sustrato corresponde a suelos franco arcillosos – limosos. Según el comportamiento de los niveles el sector está en las zonas de salar norte o drenaje norte. Con respecto al descenso, existe solo un pozo con registro que indica un descenso de 40 cm/año y recuperación nula. Esta zona posee un 18% de su área con riego por aspersión, con una tasa promedio de 2,2 mm/día y un máximo de 4,7 mm/día. En las zonas con riego, desde el 2007 al 2010 se ha observado un aumento de la cobertura, mientras que en las zonas sin riego se ha mantenido constante (2 transectos) o ha disminuido la cobertura (1 transecto).
- **Zona D.** Zona de mayor cobertura vegetal sobre un 45% con hasta 4 taxas para octubre 2009 y marzo 2010, con especies asociadas a cuerpos de agua o afloramientos. Según el comportamiento de los niveles, la zona D corresponde a

la zona de influencia de las lagunas y salar sur, con un descenso promedio de 17 cm/año y 14 cm/año respectivamente, y una recuperación de 13 cm/año y 10 cm/año. Los suelos corresponden a suelos franco - franco arcillosos. Como medida de mitigación, el 90% del área es regada por aspersión y el 10% restante por surco, con tasas promedio de 4,5 mm/día y 1,3 mm/día respectivamente. Desde el 2007 al 2010 se observa un leve aumento de las coberturas en esta zona.

- **Zona E.** Corresponde a la zona con mayor área de vegetación correspondiente a vega salina, con una cobertura promedio de 4% y 9% para octubre 2009 y marzo 2010 respectivamente. Según el comportamiento de los niveles, la zona se encuentra en los sectores de salar sur o drenaje sur, con un descenso de hasta 60 cm/año y una recuperación promedio de 38 cm/año. Los suelos corresponden a franco areno arcillosos. Esta zona no está sometida a riego, y desde el 2007 al 2010, se ha observado un fuerte descenso de la cobertura (desde 16% a 3%) en algunos sectores, mientras que en otros, se ha visto un aumento de la cobertura pero con un cambio en la composición de especies y del tipo vegetacional, variando de pajonal hídrico a sistema de salar.

Considerando el tipo de suelo, se tiene como valor referencial de la humedad mínima que las plantas necesitan para aprovechar el agua del suelo, las mediciones del punto de marchitez permanente (PMP) tomadas en laboratorio para las distintas muestras de suelo (ver Tabla 3.15 en Capítulo 3.2.4.4). Se tiene que los suelos francos son los que necesitan mayor humedad entre un 24% y 35%, seguido por los suelos limosos (FL, FAL, FL-Fa) con PMP entre 25% y 30%, los más arcillosos (FAa, FA) en torno al 21% y los franco arenosos con humedades mínimas de entre 11% y 25%.

De este modo, la zona que mayor humedad necesita para que la vegetación pueda aprovechar el agua corresponde a la zona D, en especial los puntos más cercanos a las lagunas con valores entre 20% y 35%, seguida por la zona C con valores entre 20% y 30%, luego las zonas B y E con valores en torno al 20% y finalmente la zona A con valores de entre 10% y 20%, exceptuando las zonas más cercanas a las lagunas (A-10) que necesitarían hasta un 30% de humedad.

4.2 MODELO CONCEPTUAL

Para la modelación de la vega de Jachucoposa, se considera sólo el acuífero somero, ya que éste representa la principal fuente de agua para la vegetación. Según lo planteando en el marco teórico y en la revisión de antecedentes, la vegetación presente en el sistema Jachucoposa es del tipo azonal, determinada principalmente por la posición del nivel freático somero y el sustrato, los que a su vez, definen la distribución de la humedad en el suelo.

Como se menciona en el Capítulo 2.1, el sistema de Jachucoposa corresponde a un bofedal con suministro hídrico del acuífero, el que vendría dado por las surgencias y el ascenso capilar del acuífero. Dado esto, se estudia la humedad y el nivel freático en el perfil de suelo, modelando la zona no saturada, de modo de representar la distribución de la humedad en el suelo, y con ello la disponibilidad de agua para las plantas.

Según los antecedentes recopilados de la zona, se propone un modelo conceptual basado en perfiles verticales de suelo (z) en las distintas zonas de vegetación, es decir, un modelo 1D aplicado en distintos puntos del área de estudio, de modo de representar discretamente la tridimensionalidad del problema.

Se considera que un enfoque 1D es suficiente, ya que los datos de campo que se poseen, en cuanto a nivel, humedad y tipo de suelo, son discretos y con baja densidad. Además, el flujo predominante en el sistema y de interés para la vegetación, corresponde al flujo vertical en la zona no saturada, ya que se trata de una vega, donde el agua está surgiendo a la superficie.

El problema 2D es bastante más complejo de abordar, y se considera que una aproximación 1D, con una buena distribución espacial, es un buen acercamiento a la realidad. Dado esto, para representar adecuadamente la heterogeneidad del área de estudio, se modelan de dos a cinco perfiles por zona de vegetación (SAG), dependiendo de la disponibilidad de datos y de las características generales de cada zona.

Los puntos a modelar corresponden a los sitios donde se ubican las punteras de humedad, de modo de poder calibrar el modelo con las mediciones existentes. Para seleccionar los puntos, se consideró que hubiesen piezómetros y calicatas cercanas (a menos de 200 m), de modo de tener los datos de nivel y suelo necesarios para el modelo, cubriendo las distintas zonas de vegetación.

En la Tabla 4.1 y en la Figura 4.1 se observan los perfiles escogidos para modelar, con las calicatas de suelo asociadas. Cabe destacar que en los casos de las zonas A y D se posee mayor información de suelos, razón por la que se modelaron más perfiles que en las demás zonas.

Tabla 4.1 Perfiles a modelar y calicatas asociadas

Zona de vegetación	Perfil	Calicatas cercanas	Fase de suelo según cartografía
D	D-3	C4	Hidrofóbica (suelos francos con horizontes orgánicos)
	D-5	C4	
	D-7	C5 y C4	
	D-23	C5 y C6	
	D-21	C4 y C6	Franco arcillosa y costra salina
	D-24	C6	
A	A-11	C9 y C10	Arenas (suelos franco arenosos)
	A-12	C3	Franco arcillosa
	A-13	C2	
	A-10	C1 y C2	
	A-17	C7 (C2) y C8	
C	C-19	Calicatas a más de 200 m	Se infiere franco arcillosa
	C-15	Calicatas a más de 200 m	Se infiere entre franco arcillosa y franco arenosa
B	B-16	Calicatas a más de 200 m	Se infiere franco arcillosa y costra salina
	B-25	C6	
E	E-28	Calicatas a más de 200 m	Se infiere franco arcillosa y costra salina
	E-27	Calicatas a más de 200 m	

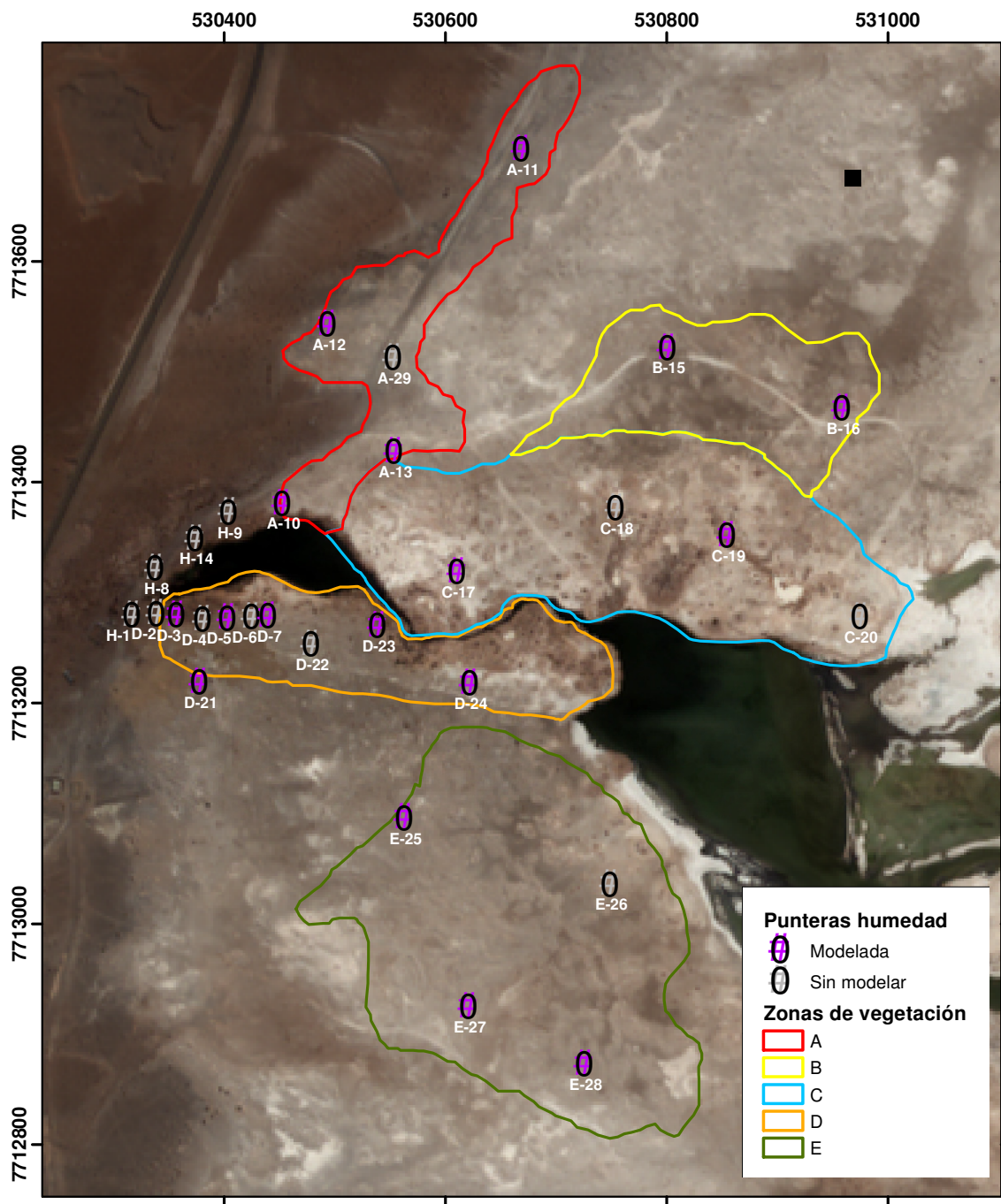


Figura 4.1. Ubicación de punteras de humedad a modelar en distintas zonas de vegetación

Se modelan perfiles de suelo de 200 cm, dada la profundidad de las mediciones de humedad. Como simplificación para caracterizar los perfiles, se utiliza de 1 a 5 estratos de suelo, homogéneos e isotrópicos, los que quedan determinados por las calicatas cercanas y por la forma de los perfiles de humedad medidos.

Cabe señalar que dentro de los primeros 90 cm de profundidad se concentra el 76,5% de la biomasa de las raíces (CEA, 2005)⁵, por lo que se espera que las plantas, obtengan el agua de una profundidad aproximada a 1 m.b.n.t. Dado esto, la zona de mayor interés del modelo a realizar, corresponde a los primeros 100 cm de suelo.

Los flujos de agua en el interior del suelo son forzados principalmente por la evapotranspiración y flujos que infiltran desde la superficie como precipitación y riego. El nivel freático corresponde a la condición de borde inferior y se considera conocido en el tiempo. El balance entre los flujos de entrada (Q_e) y salida (Q_s) determinan los flujos en el perfil de suelo y la humedad en la zona no saturada $\Theta(z)$. En el siguiente esquema se observa el perfil tipo a modelar, con las entradas y salidas del sistema (Figura 4.2).

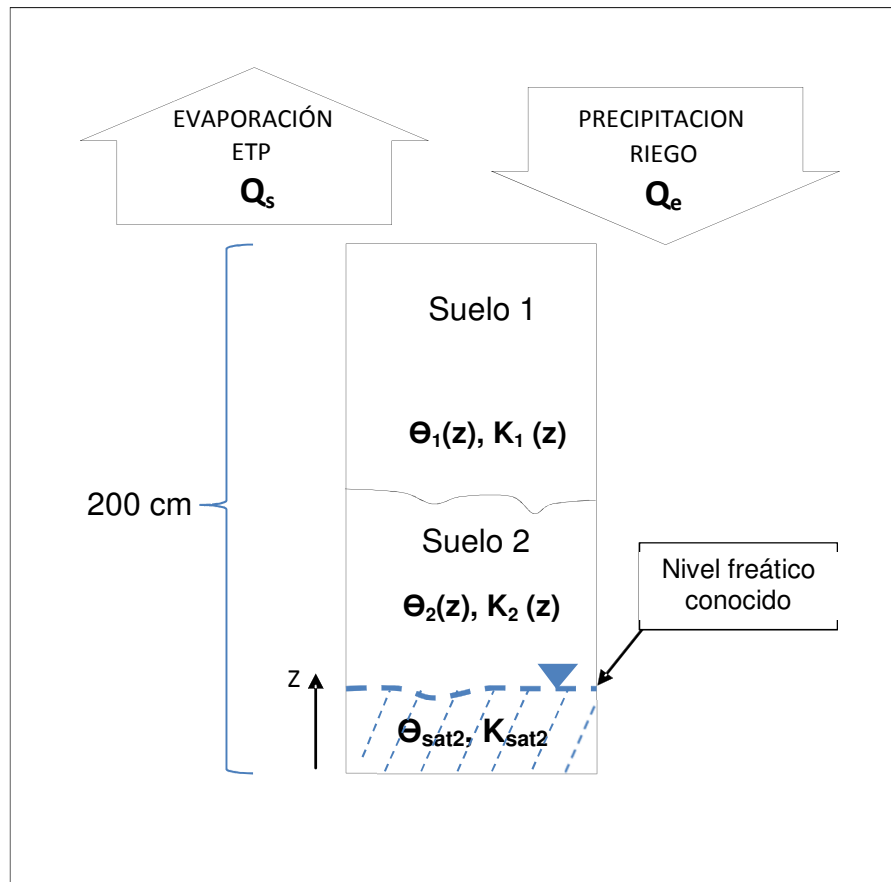


Figura 4.2 Modelo conceptual zona no saturada de la vega de Jachucoposa. Esquema corresponde al perfil tipo a desarrollarse en las cinco zonas de vegetación. Q_e : Flujos de entrada, Q_s : flujos de salida, Θ : contenido de humedad, K : conductividad hidráulica, z : profundidad. Fuente: Elaboración propia

Los tipos de suelo corresponden a los diferentes estratos que hay en la zona, los que se definen según la información de las calicatas analizadas. Según la cartografía

⁵ En CEA (2010)

desarrollada, se tienen cuatro sectores con características similares de suelo determinadas por los estratos superficiales (Capítulo 3.2.4.4):

- Arenas (suelos franco arenosos)
- Franco arcillosa
- Franco arcillosa y costra salina
- Hidrofóbica (suelos francos con horizontes orgánicos)

El comportamiento de las curvas características de humedad de los suelos queda determinado por el modelo de Van Genuchten (Capítulo 2.2, Ecuación (2.7)).

En la Figura 4.3, se aprecian en el tiempo, los hitos relevantes que afectan los flujos y niveles freáticos en el sistema Jachucoposa. Se observan los periodos con registros de nivel, humedad y precipitaciones, además de las temporadas de riego aplicado como medida de mitigación.

En base a esto, se definen diferentes casos de modelación en el Capítulo 4.4.7. Se propone modelar un caso base, que represente el comportamiento “natural” del sistema, y distintos escenarios, que muestren el comportamiento del sistema intervenido, mostrando los efectos del descenso y recuperación de los niveles freáticos y del riego aplicado.

Según lo anterior, el caso base se considera el periodo de tiempo donde no se observan variaciones inducidas relevantes en el nivel freático, correspondiente a los años 2007 y 2008, periodo en que se observa una cierta estabilidad de los niveles freáticos (ver Capítulo 3.2.4.3). Además, para dicho periodo, existen mediciones de humedad en los perfiles de suelo, las que se esperan poder reproducir con el modelo al calibrarlo.

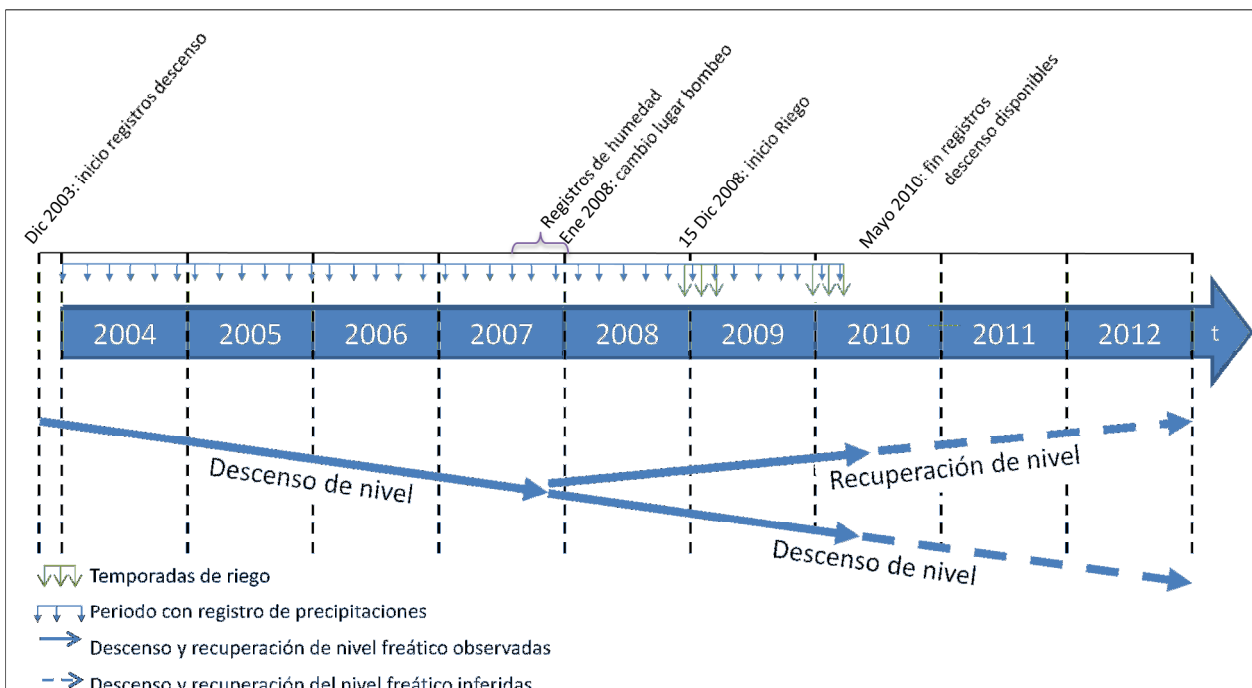


Figura 4.3 Hitos relevantes en el tiempo y periodos con registros de nivel, humedad y precipitaciones. Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Condiciones de Borde

La condición de borde superior corresponde a los flujos entrantes o salientes determinados por las condiciones atmosféricas del sistema. Para el caso base se considera sólo la evapotranspiración, ya que el riego y las precipitaciones no son flujos permanentes, por lo que se incorporan posteriormente en la definición de los escenarios.

La condición de borde inferior corresponde al nivel freático, el cual se determina mediante las curvas de isoprofundidad en cada punto, y según las condiciones de descenso y/o recuperación de los niveles freáticos, como se verá posteriormente en la etapa de construcción del modelo.

El caso base representa un año promedio, donde el nivel y la evapotranspiración varían mensualmente dada la estacionalidad del sistema. El riego y las precipitaciones se consideran en sus respectivos escenarios, como tasas diarias de entrada de agua (mm/día).

4.2.2 Condición inicial

La condición inicial se considera para el mes de enero como la distribución de la altura de presión en todo el perfil, la que queda determinada por la posición del nivel freático. En este caso, se tiene una distribución lineal cuyo valor es cero en el nivel freático y aumenta positivamente con la profundidad (presión hidrostática) y toma valores negativos por sobre la napa.

4.3 ELECCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO A UTILIZAR

La elección del modelo a utilizar es una conjugación de diversas variables, entre las cuales se tiene:

- ✓ La física que resuelve el modelo. Ésta debe ser apropiada al problema a modelar, que en este caso corresponde a un modelo de flujo que incorpore la zona no saturada. Es importante considerar, que a pesar de que en este trabajo no se aborda el problema de las sales, es un factor importante para el sistema según el modelo ecosistémico desarrollado (CEA, 2010), por lo que se requiere de un modelo que considere el problema de transporte de sales, para dejar abierta la posibilidad de ampliar el modelo a este aspecto. Por otro lado, se ha considerado que no es necesario, dado los datos que existen de la zona y el objetivo del modelo, que el modelo considere el problema de densidad variable.
- ✓ El método numérico que utilice y la posibilidad de tener mallas flexibles. Dado que el modelo a desarrollar será 1D, se considera que el método de diferencias finitas es suficiente para el modelo a desarrollar.
- ✓ La facilidad de uso y la interfaz gráfica que posea, con herramientas que faciliten el ingreso de los datos y el análisis de los resultados
- ✓ Su aplicabilidad y cantidad de problemas en que se ha probado y usado. Además del soporte técnico que se pueda tener.
- ✓ El costo del modelo, el cual debe ser adecuado según el problema a desarrollar.

Considerando estas variables, se ha llegado que el modelo numérico más apropiado, por su sencillez y por cumplir con los requerimientos necesarios, es HYDRUS 1D, por

tratarse de un modelo gratuito con una interfaz gráfica fácil de manejar. Se han descartado modelos más complejos como FEFLOW o GMS (con FEAMWATER) por ser más costosos y más complejos de utilizar. Además, Hydrus ha sido ampliamente usado en modelos de la zona no saturada en Chile y el mundo (ZNS, 2009; ZNS, 2011; Herrera, 2000; García-Huidogro, 2007), dándole confiabilidad a su código numérico.

4.4 CONSTRUCCIÓN MODELO NUMÉRICO

4.4.1 Modelo matemático

Hydrus 1D resuelve mediante diferencias finitas las Ecuaciones (2.5), (2.7) y (2.8) expuestas en el Capítulo 2.2 correspondiente a la ecuación de Richards en su forma mixta (dependiente de Θ y h), asumiendo el modelo de Van Genuchten para el comportamiento de las curvas características de suelo. Este último, relaciona la conductividad hidráulica y la humedad, con la presión de poros existente en el suelo $\Theta(h)$ y $K(h)$ (Ecuaciones 2.7 y 2.8 respectivamente).

La modelación se realiza en régimen transiente, considerando para el caso base, un año tipo que se repite a lo largo del tiempo de modelación (7 años), de modo de independizarse de la condición inicial y obtener el comportamiento en régimen permanente. Al desarrollar los escenarios se analiza el flujo y la humedad del sistema, bajo las distintas forzantes en el tiempo, como riego y precipitaciones.

4.4.2 Modelo físico

El modelo desarrollado para cada perfil posee 200 cm de profundidad, con una grilla de 201 nodos verticales. Se considera además, dado que el principal interés se encuentra en la superficie, una densidad de nodos dos veces mayor en superficie que en el fondo. Con esto se posee una distancia en superficie entre nodos de 0.66 cm y en el fondo de 1.33 cm.

El tiempo de simulación para el caso base corresponde a 7 años (2555 días, consideraros desde 01 enero 2004 a 31 diciembre 2010) con un Δt de 1 día, para modelar el periodo completo de registros de nivel freático (ver Figura 4.3).

El caso base corresponde al año 2007 que se repite en el tiempo, periodo en el cual existen mediciones de humedad, y los niveles se mantienen constantes previo a la recuperación del nivel freático por las medidas de mitigación aplicadas en enero 2008, como se observó en el Capítulo 3.2.4.3 (Figura 3.19 y Figura 3.20).

Según los antecedentes revisados en el Capítulo 3.2.4, los registros de nivel freático corresponden a datos mensuales, con variaciones inducidas por los bombeos de agua subterránea en el Salar de Coposa y las medidas de mitigación aplicadas en el sistema, y variaciones naturales generadas por las condiciones meteorológicas, que se traducen en efectos estacionales en las mediciones de nivel freático. La evaporación en tanto, posee registros horarios y diarios, que muestran ciclos diarios y estacionales. Sin embargo, los coeficientes de cultivo utilizados para la determinación de la evapotranspiración, tienen un carácter estacional. Dado esto, el nivel freático y la evapotranspiración, se consideran en el modelo a una escala mensual, con variaciones estacionales, manteniéndose constantes cada 30 días.

El tiempo inicial corresponde al primero de enero del año tipo.

Se definen 10 nodos de observación (cantidad máxima definida por Hydrus) a lo largo del perfil de suelo, para obtener la humedad en el tiempo a distintas profundidades. Estos se ubican, de modo de existir nodos en cada uno de los estratos definidos, priorizando los 100 cm de suelo más superficiales, por corresponder estos a la zona de las raíces de las plantas. De este modo, se consideran nodos cada 10 cm hasta los 70 cm y luego cada 15 cm. En algunos perfiles se consideran algunos nodos hasta los 150 cm (cada 15 cm hasta los 90 cm y luego cada 20 cm) de modo de abarcar los distintos estratos de suelo en el perfil.

4.4.3 Propiedades hidrogeológicas

Las propiedades hidrogeológicas a definir en el modelo Hydrus, corresponden a los parámetros de las curvas características de humedad según las Ecuaciones (2.7) y (2.8) - n , l , α , θ_r , θ_s y K_{sat} - para los distintos estratos de suelo definidos. El número y tipo de estratos de suelo, se determinan según las calicatas cercanas y según los cambios de humedad observados en los perfiles medidos, ya que discontinuidades en los perfiles de humedad, indican cambios en el tipo de suelo.

De los ensayos realizados en laboratorio a las muestras de suelo de las calicatas, se tienen los parámetros de suelo densidad aparente, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y textura (ver capítulo 3.2.4.4), que junto a las humedades de saturación medidas en las punteras de aluminio, se utilizan para estimar las curvas características suelo-agua.

Los parámetros θ_r y θ_s definen los “extremos” de las curvas características como se observa esquemáticamente en la Figura 2.7 (en Capítulo 2.2). Dado que no existen para las muestras de suelo pruebas de succión de humedad, se considera que una primera aproximación o estimación de los valores de θ_s y θ_r corresponden a las humedades de retención a CC y PMP respectivamente.

Se realiza entonces, una comparación espacial de las humedades de saturación (Θ_s) obtenidas de las mediciones de humedad en las punteras (Tabla 3.14 en Capítulo 3.2.4.3) – las que no están calibradas- y las retenciones de humedad a CC, obtenidas de los análisis de laboratorio de las muestras de suelo de las calicatas (Tabla 3.15 en Capítulo 3.2.4.3).

En la Figura 4.4, se observa en rangos de colores, la humedad de saturación en las punteras y la retención de humedad a CC en las calicatas. Se observa que la información de las calicatas es muy pobre en distribución con respecto a la información de las punteras, ya que solo existen 6 calicatas con dato, lo cual dificulta tener una buena correlación espacial, que sea capaz de ajustar los valores obtenidos en las punteras de humedad.

Por otro lado, se observa que los valores de retención de humedad, son en general, menores que los de humedad de saturación, hasta un 20% menos, siendo el sector D, el que presenta valores más similares. En las punteras de humedad se observa en general

valores en torno a un 60% de humedad de saturación, mientras que en las calicatas, la retención de humedad a CC varía desde 41% a 62% con un promedio de 51%.

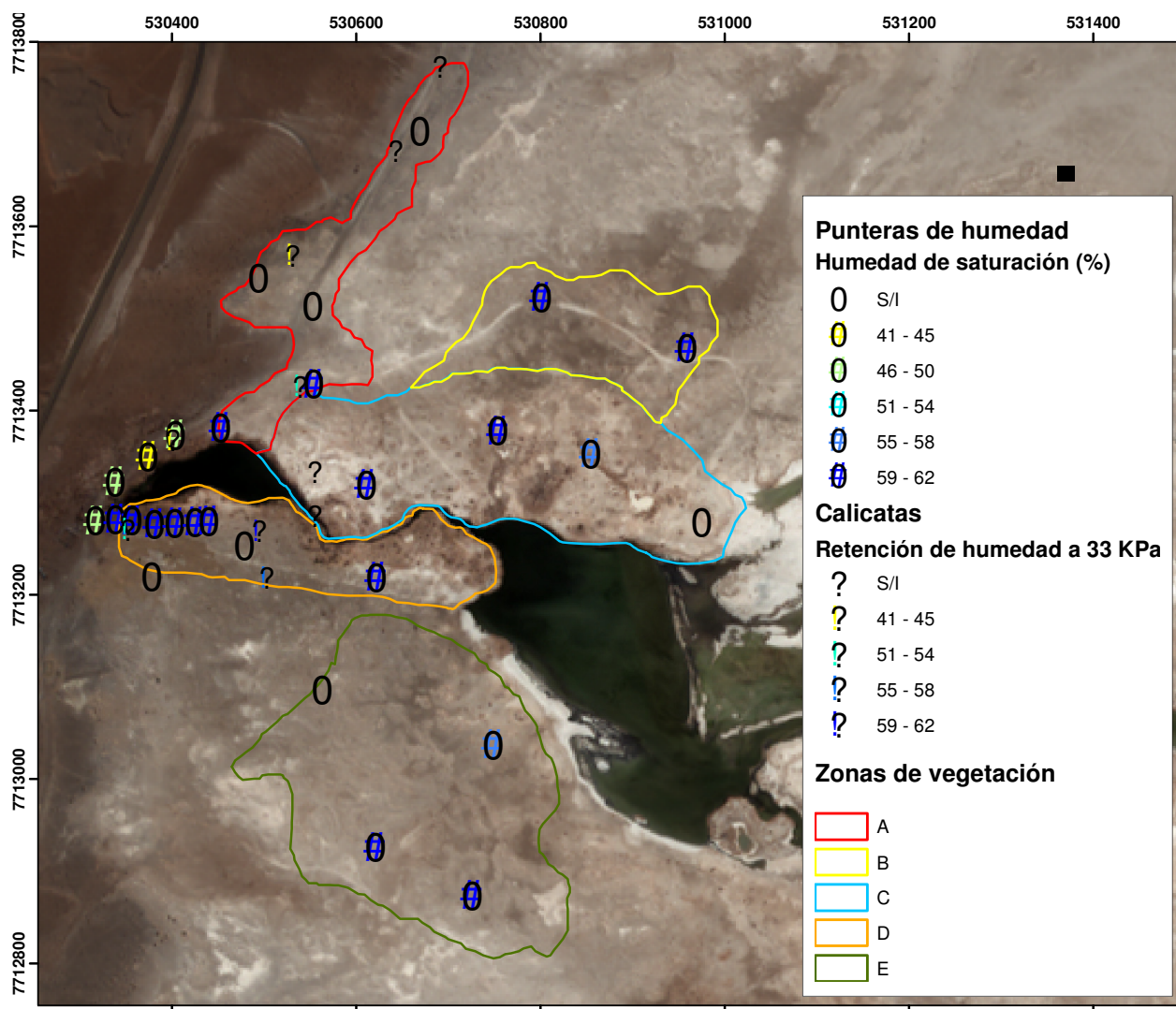


Figura 4.4 Comparación humedad de saturación en punteras de humedad y retención de humedad a 33 KPa (CC) en calicatas.

Dado lo anterior, es decir, la mala distribución de la información, las diferencias encontradas y a que no se poseen pruebas de succión, los parámetros de las curvas características se ajustan principalmente según la bibliografía, utilizando como base las curvas promedio de retención de humedad de Carsel & Parrish (1988) (Capítulo 3.2.4.3, Figura 3.12).

De este modo, según la textura descrita por las calicatas cercanas, se ajustan los parámetros θ_r , θ_s , α y n , para obtener la curva característica de humedad del estrato de suelo correspondiente, de modo que pase por los dos puntos medidos en laboratorio (presión de 33 y 1500 KPa) y que se asemeje a la curva promedio según Carsel & Parrish (1988). El ajuste de los parámetros, dado que las curvas son no lineales y se poseen sólo dos puntos, puede variar significativamente, sin embargo se intenta

mantener la forma de las curvas según la textura y estar dentro de los rangos definidos según la bibliografía (Tabla 3.8 y Tabla 3.9. en Capítulo 3.2.4.3.)

Para la conductividad hidráulica saturada, se utiliza el valor promedio de los distintos autores para la textura de suelo correspondiente (Tabla 3.10, Capítulo 3.2.4.3), ya que no hay mayor influencia del parámetro en los resultados de humedad.

Los estratos y valores impuestos de los parámetros, según lo expuesto anteriormente, se deben calibrar para que los perfiles de humedad simulados se ajusten a los medidos, de modo de representar adecuadamente con el modelo, los perfiles de humedad de terreno. Este procedimiento se detalla posteriormente en el Capítulo 4.4.6.

4.4.4 Condiciones de borde

El modelo a desarrollar considera como caso base un año tipo, en el cual se busca representar adecuadamente los perfiles de humedad promedio (en el tiempo) obtenidos para cada punto. Las condiciones de borde son variables en el tiempo, dadas por la evapotranspiración (salida, borde superior) y el nivel freático (borde inferior), los cuales cambian estacionalmente.

Para determinar la evapotranspiración de las especies vegetales existentes (ET_c), es necesario el coeficiente de cultivo (K_c). Tecknoriego para el diseño del sistema de riego en la zona, utilizó valores estacionales determinados por la DGA al estudiar varias unidades vegetacionales en los bofedales de Isluga y Chungará, los que se consideran representativos para el sistema de Jachucoposa (Tecknoriego, 2010). En la Tabla 4.2 se muestran los valores de K_c asignados.

Tabla 4.2 K_c según unidad vegetacional y temporada. Fuente: Tecknoriego, 2010

Unidad Vegetacional	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Vegetación tipo cojines	1,00	1,00	1,00	1,00
Transición 1	0,83	0,80	0,78	0,80
Vega bofedal 1	0,76	0,69	0,58	0,69
Transición 2	0,60	0,52	0,35	0,52
Vega bofedal 2	0,40	0,42	0,24	0,42
Promedio	0,72	0,69	0,59	0,69

Según estos coeficientes estacionales y la evapotranspiración potencial media mensual determinada con los registros de la estación local, se determina la evapotranspiración media mensual del sistema, mostrada en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Evapotranspiración mensual promedio sistema de Jachucoposa.
Fuente: Elaboración propia en base a Tecknoriego (2010)

Mes	ET ₀	Et _c	
	mm/día	mm/día	cm/día
Enero	4,7	3,38	0,34
Febrero	5,0	3,58	0,36
Marzo	4,8	3,29	0,33
Abril	4,0	2,74	0,27
Mayo	3,2	2,19	0,22
Junio	2,8	1,63	0,16
Julio	2,8	1,66	0,17
Agosto	3,5	2,09	0,21
Septiembre	4,3	2,98	0,30
Octubre	5,3	3,67	0,37
Noviembre	5,7	3,91	0,39
Diciembre	5,5	3,97	0,40

Dado el registro de humedad existente, entre julio 2007 y enero 2008, se considera ese periodo para estudiar las variaciones estacionales de nivel freático, de modo de poseer mediciones simultáneas en el tiempo. Además, se observa que los niveles freáticos se mantienen relativamente constantes en este periodo, no siendo afectados mayormente por el descenso o recuperación de los niveles, por lo que este periodo de tiempo representaría adecuadamente el caso base del modelo.

Según lo descrito en el Capítulo 3.2.4.3, los efectos meteorológicos en los niveles freáticos son bastante menores que los efectos generados por el bombeo, por lo que a la escala de los registros, no se aprecia claramente una tendencia estacional. Sin embargo, se aprecia que los niveles freáticos son más profundos para los meses de verano, en general con mínimos en diciembre o enero, con una diferencia de hasta 15 cm para los meses de invierno (máximos en julio o agosto) en las zonas más someras, lo que respondería a las variaciones en la evaporación.

De este modo, se propone un modelo sinusoidal para las variaciones de nivel freático, considerando un máximo y mínimo para julio y diciembre respectivamente, los que se obtienen de las curvas de isoprofundidad elaboradas para esas fechas (como las mostradas en la Figura 3.16 para septiembre 2007).

Según lo anterior, se tiene como condiciones de borde, valores mensuales de nivel freático y evapotranspiración, los que varían estacionalmente, como se observa en la Figura 4.5.

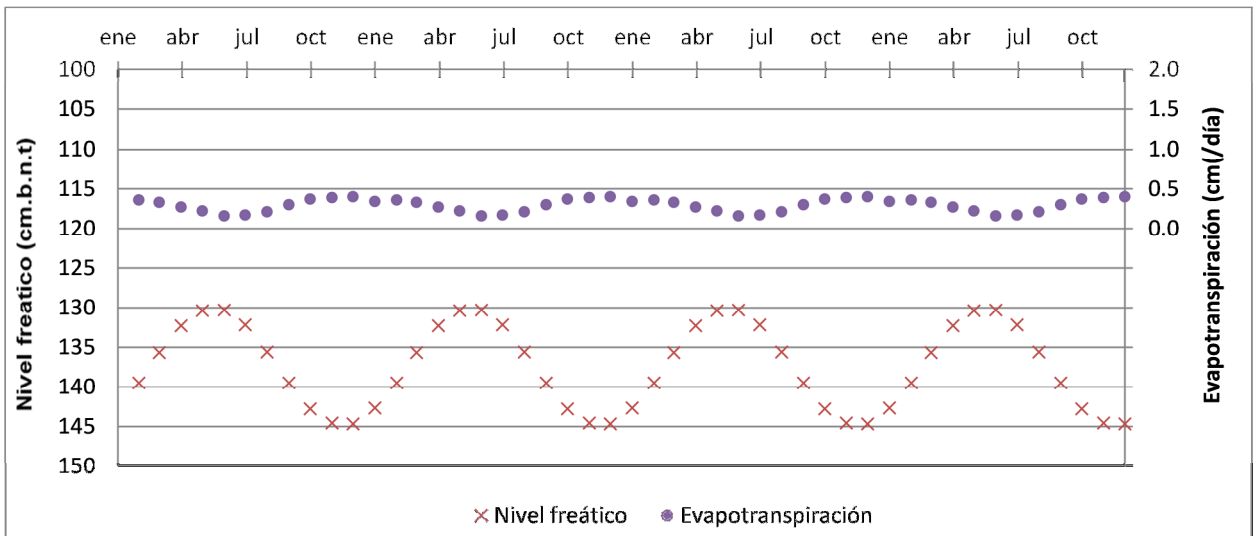


Figura 4.5 Condiciones de borde del sistema. Evapotranspiración y nivel freático variable en el tiempo para año tipo (caso base).

4.4.5 Condición inicial

Como condición inicial se tiene la distribución de la presión en profundidad determinada por el nivel freático inicial correspondiente al mes enero. Para la posición del nivel freático la presión es cero, variando linealmente en profundidad como se observa en el perfil de la Figura 4.6.

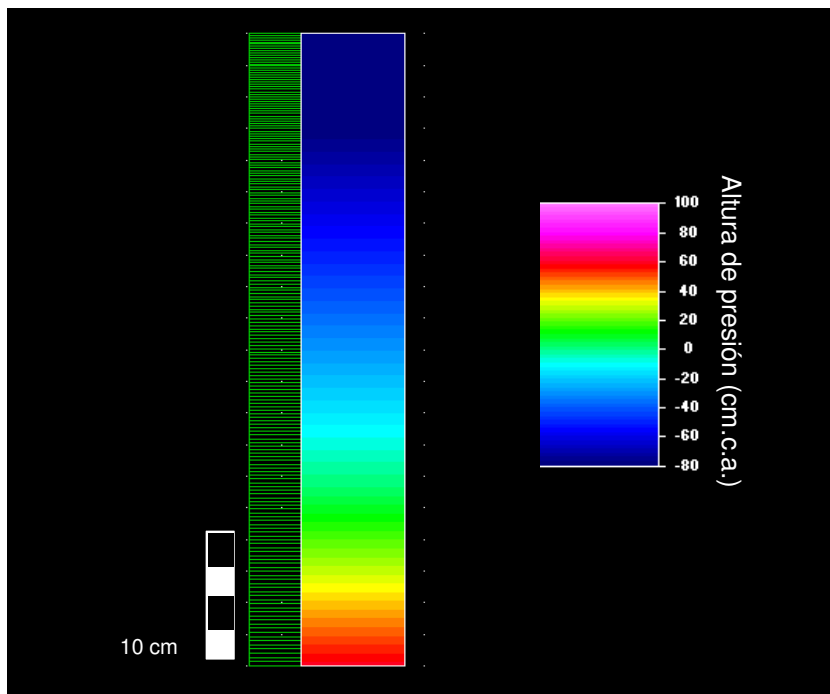


Figura 4.6 Condición inicial de presión para perfil tipo.

4.4.6 Calibración

El proceso de calibración se realiza para el año 2007, considerado el año o caso base, debido a que en este periodo, se poseen mediciones de humedad en los distintos puntos a modelar, y el nivel se mantiene relativamente estable, sin mayor descenso o recuperación. Según lo establecido en el Capítulo 3.2.4.4 las humedades medidas no muestran una tendencia estacional ni variaciones importantes en el tiempo, por lo que para calibrar, se considera para cada perfil, la humedad promedio de los registros.

En la calibración del modelo se ajustan los parámetros de las curvas características de suelo iterativamente, hasta representar adecuadamente el perfil de humedad medido. El criterio para calibrar cada uno de los perfiles fue minimizar el error cuadrático medio normalizado (NRMS), considerando una calibración aceptable de los parámetros, al obtener un NRMS menor al 10%.

Como se menciona anteriormente en el Capítulo 4.4.3, en los perfiles de humedad se observa que la humedad de saturación medida en terreno se encuentra en torno al 60%, valor que al compararlo con la capacidad de campo de las calicatas, en general es entre un 5% y un 20% mayor, siendo la zona D la que presenta menores diferencias. Por otro lado, al comparar con la bibliografía (Parsel & Carrish, 1988; Rawls *et. al.*, 1982; Anabalón, 1988), se observan diferencias en torno al 20% según las clases texturales descritas para cada perfil, ya que en general, la humedad de saturación se encuentra en torno al 40% (ver Tabla 3.8 y Tabla 3.9 en Capítulo 3.2.4.3).

Además, como se menciona en el Capítulo 3.2.4.4, la sonda de neutrones necesita ser calibrada para las condiciones locales del suelo cuando se requiere conocer la humedad absoluta, por lo que al no existir dicho análisis, las humedades se consideran relativas.

Dado esto, se considera que para calibrar los parámetros del modelo, se debe realizar un ajuste a los valores de humedad medidos, de modo que, según las texturas descritas, la humedad de saturación en los perfiles se acerque más a lo presentado por la bibliografía y la información de suelos medida en laboratorio. Dado que los datos de laboratorio son escasos y se encuentran pobremente distribuidos en la zona de estudio, siendo poco representativos de los diferentes puntos a modelar, se considera que la información bibliográfica es la que predomina. Además, la bibliografía entrega los menores valores de humedad de saturación para las texturas encontradas, y dado que el objetivo final de este estudio es analizar la disponibilidad de agua para la vegetación, se considera que este supuesto se enmarca en una alternativa conservadora de modelación, donde posiblemente se subestime el agua disponible, analizando así los escenarios más críticos para la vegetación.

Considerando lo anterior, se estima una corrección a los valores de humedad medidos de un 20%, ajuste que se hace por igual para todos los perfiles a estudiar, de modo de no generar sesgos. Para validar este valor, se comparan los datos de terreno (en zona de estudio y otras del norte de Chile) con los datos por la bibliografía, buscando la corrección que optimiza el NRMS entre los valores medidos (ajustados) y los de la literatura.

Dependiendo de los datos utilizados, el ajuste óptimo varía entre un 19 y un 20% para NRMS menores al 5%, con lo que se valida la corrección realizada a los perfiles medidos.

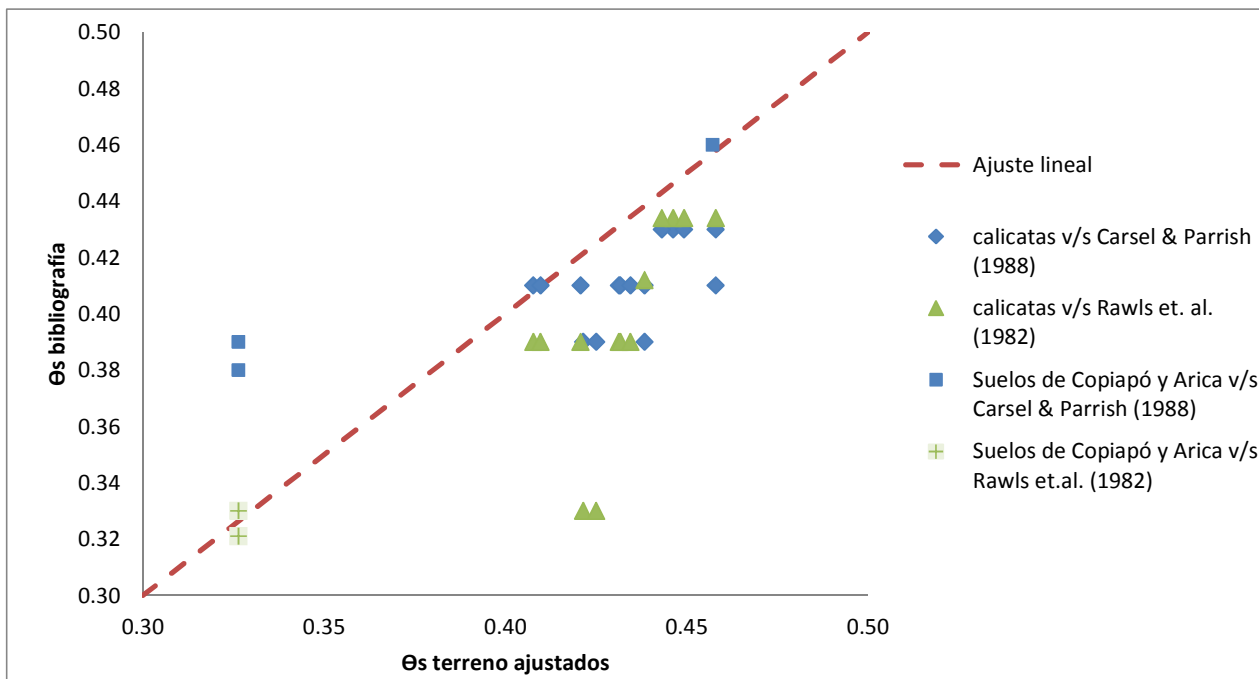


Figura 4.7 Ajuste de humedades de saturación medidas en terreno con datos bibliográficos.

Finalmente, para calibrar el modelo en Hydrus, se simula iterativamente variando los parámetros de suelo, manteniendo la forma de las curvas características según las distintas texturas, hasta obtener un perfil de humedad que al compararlo con las mediciones de humedad de terreno, menos un 20%, entregue un NRMS menor al 10%.

Inicialmente, se consideran los parámetros de suelo de modo que la curva característica pase por los puntos medidos de laboratorio. Se evalúa cuán bueno es el NRMS y la forma del perfil deseado, y dependiendo si el comportamiento simulado responde a un suelo más fino o más grueso, se cambian los parámetros o las texturas establecidas manteniendo concordancia con las curvas tipo. Se compara el perfil simulado y medido hasta obtener comportamientos similares y el NRMS requerido.

A modo de ejemplo, se presenta a continuación, el proceso y resultado final de la calibración del perfil de humedad D-5.

En primer lugar, se observan en la Figura 4.8, los datos de contenido de humedad del perfil vertical de suelo medidos en terreno, para invierno, verano y el promedio de todas las campañas, junto con los valores ajustados un 20% según la bibliografía.

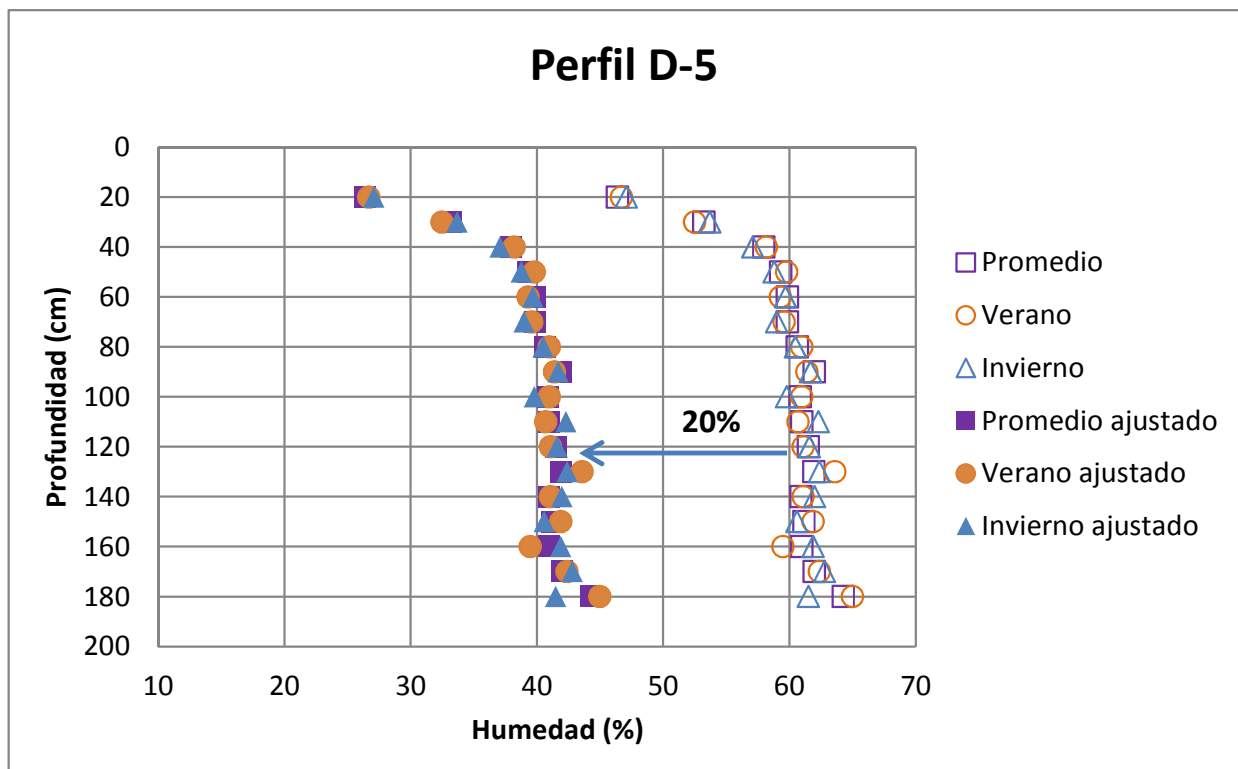


Figura 4.8 Perfil de humedad D-5 medido con sonda de neutrones para invierno (julio 2007), verano (enero 2008) y promedio. Se realiza el ajuste del 20% mencionado anteriormente. Fuente: Elaboración propia en base a registros de humedad.

En la Figura 4.9 se presentan tres resultados obtenidos para el contenido de humedad en profundidad, para distintos parámetros y tipos de suelo empleados en el proceso de calibración iterativo. Se muestra el caso inicial, el segundo caso (o intermedio) y el caso final.

Finalmente, se presenta en la Figura 4.10 el perfil de humedad final calibrado junto a los datos ajustados de terreno, indicando los distintos estratos de suelo utilizados. En la Figura 4.11 se muestra la comparación entre los valores simulados y medidos (ajustados), con los que se obtiene un NRMS de 9% y 7% para verano e invierno respectivamente.

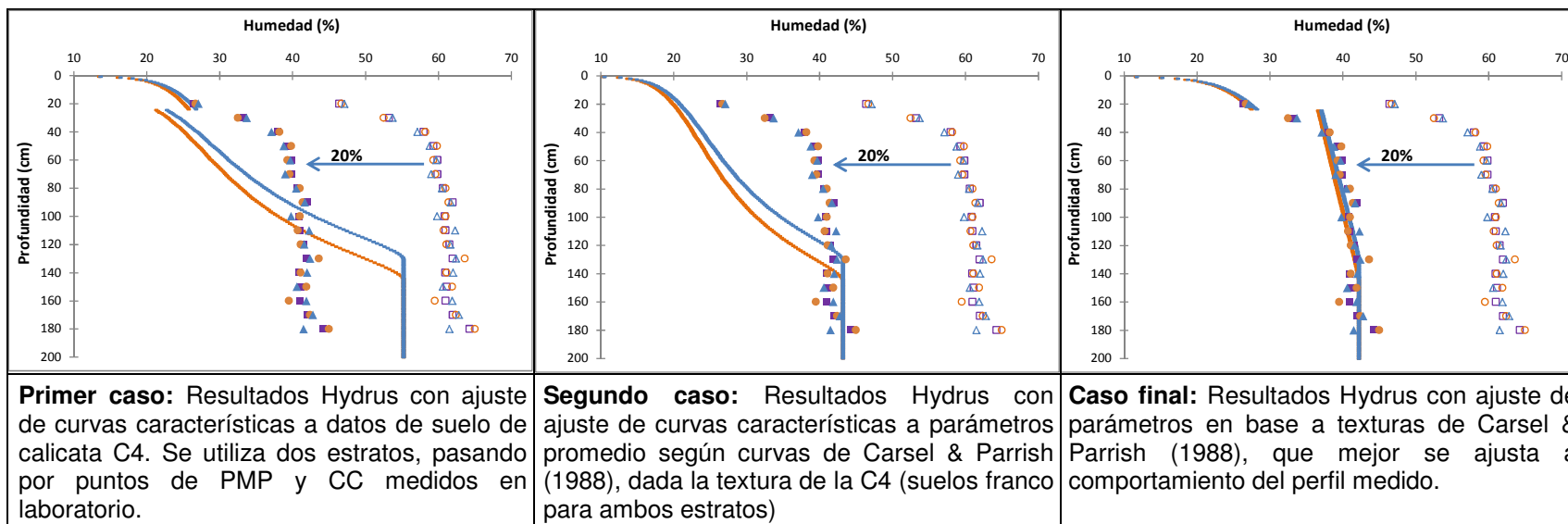


Figura 4.9 Resultados de contenido de humedad en perfil vertical de suelo en puntera D-5 simulados en Hydrus. Se muestran tres casos de ajuste de los parámetros de suelo en el proceso de calibración. El celeste resultados para invierno y en naranja resultados para verano. Se muestran los datos medidos y ajustados un 20%.

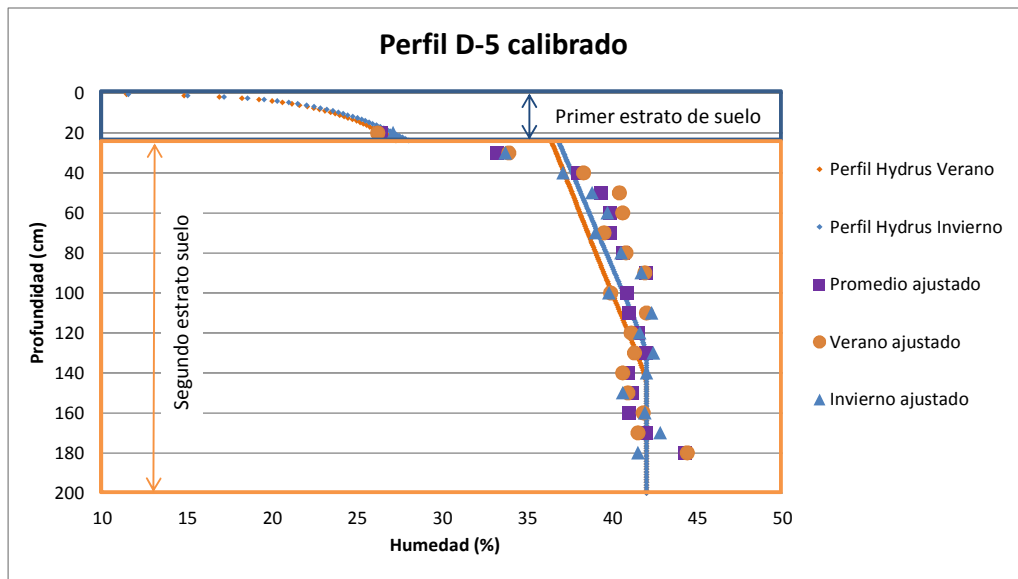


Figura 4.10 Perfil D-5 modelado y calibrado. Se presentan las curvas para invierno y verano por variaciones de nivel supuestas como condición de borde.

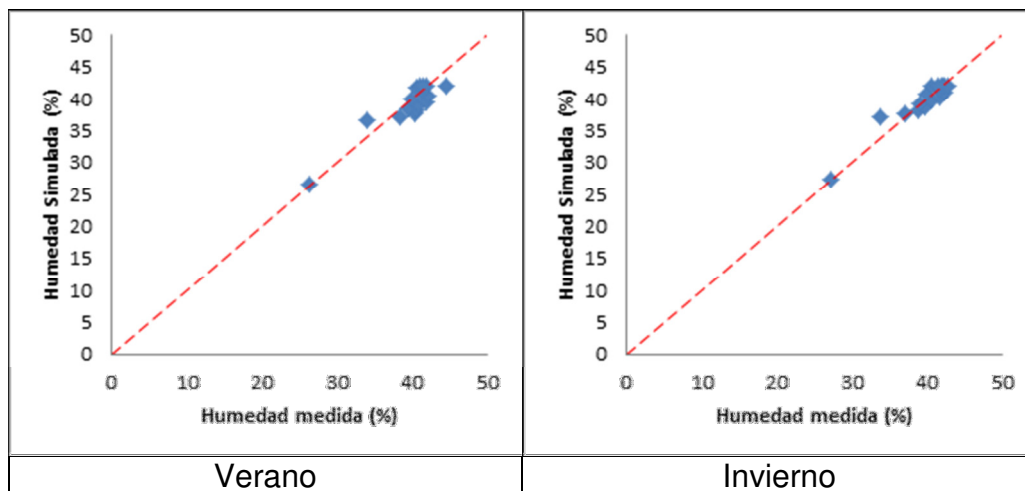


Figura 4.11 Humedad medida v/s humedad simulada para Perfil D-5 para invierno y verano.

Se presentan en la Tabla 4.4 los resultados de la calibración para todos los perfiles modelados, con los parámetros finales para cada estrato considerado y los NRMS obtenidos para invierno y verano. Se entrega además el nivel promedio utilizado para la modelación del caso base, el cual varía sinusoidalmente como se describe en las condiciones de borde.

Cabe destacar que para el perfil 23 no fue posible obtener un NRMS menor al 10%, dado el pequeño rango de humedad en el que se movían los datos, por estar casi todo el perfil de suelo saturado.

Se muestran en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 los perfiles verticales de humedad calibrados para los distintos puntos modelados en las 5 zonas de vegetación. En el Anexo D se encuentran estos mismos perfiles con mayor detalle, junto con los gráficos de humedad medida v/s modelada para invierno y verano.

Tabla 4.4 Resultados calibración para perfiles de humedad modelados. Parámetros finales de las curvas características para cada estrato y NRSM respectivos. Se observan también las texturas finales asociadas a cada estrato y el nivel promedio utilizado para el modelo.

Zona	Perfil	Prof [cm]	Textura	Nivel prom [m.b.n.t]	θ_r []	θ_s []	α [1/cm]	n []	Ks [cm/día]	NRMS [%] Invierno	NRMS [%] Verano	
D	H3	0 - 24	F	0.7	0.074	0.44	0.024	1.42	20.0	9.9%	7.6%	
		24 - 200	FAL		0.089	0.43	0.010	1.23	1.7			
	H5	0 - 24	F	1.4	0.034	0.45	0.036	1.31	6.0	8.9%	7.2%	
		24 - 200	FAL		0.089	0.42	0.010	1.23	1.7			
	H7	33 - 200	FAL	1.3	0.089	0.42	0.010	1.23	1.7	8.0%	6.5%	
		0 - 33	Aa		0.100	0.38	0.027	1.23	2.9			
	H23	0 - 18	FA	0.1	0.095	0.41	0.019	1.31	6.2	11.3%	12.5%	
		18 - 200	FAL		0.089	0.43	0.015	1.30	1.7			
	H21	0 - 37	Fa	2.0	0.065	0.41	0.075	1.89	106.1	8.5%	8.7%	
		37 - 98	F-Fa		0.072	0.42	0.056	1.73	65.0			
		98 - 158	FA		0.096	0.41	0.025	1.34	10.0			
		158 - 210	FaA		0.100	0.35	0.059	1.48	31.4			
H24	0 - 51	FaA	1.5	0.098	0.40	0.043	1.41	21.0	4.6%	5.4%		
	51 - 123	FaA-FA		0.099	0.39	0.051	1.45	26.0				
	123 - 200	FaA-FA		0.099	0.40	0.051	1.45	26.0				
A	H11	0 - 23	a	2.0	0.020	0.43	0.145	2.75	712.8	5.6%	4.6%	
		23 - 33	aF		0.057	0.43	0.124	2.20	350.2			
		33 - 46	F-Fa		0.074	0.42	0.048	1.66	49.0			
		46 - 97	F-FL		0.073	0.44	0.028	1.49	15.0			
		97 - 126	F-Fa		0.072	0.42	0.056	1.73	65.0			
		126 - 250	F		0.077	0.43	0.040	1.59	33.0			
	H12	0 - 42	a	2.1	0.010	0.43	0.145	2.68	712.8	5.6%	6.8%	
		42 - 53	aF		0.060	0.41	0.107	2.14	250.0			
		53 - 78	F		0.078	0.43	0.040	1.60	25.0			
		78 - 250	Fa		0.040	0.41	0.050	1.84	94.0			
	H13	0 - 45	Fa	1.5	0.072	0.42	0.056	1.70	65.0	7.2%	No hay mediciones de humedad en invierno	
		45 - 101	FaA		0.100	0.39	0.059	1.70	31.4			
101 - 200		Fa	0.065		0.39	0.090	2.00	106.1				
H10	0 - 42	F-Fa	0.8	0.065	0.41	0.040	1.80	106.1	6.8%	8.3%		
	42 - 118	FA- Aa		0.095	0.29	0.019	1.35	6.2				
	118 - 200	Fa		0.065	0.41	0.075	1.89	106.1				
C	H17	0 - 200	Aa	0.9	0.100	0.40	0.095	1.65	106.1	9.4%	9.3%	
		H19	0 - 65	FL	1.6	0.069	0.45	0.023	1.44	10.0	8.8%	9.5%
			65 - 107	FA		0.095	0.41	0.019	1.31	6.2		
B	H15	0 - 33	FA	1.9	0.094	0.42	0.017	1.29	5.1	8.2%	5.8%	
		33 - 52	FAL		0.089	0.43	0.010	1.23	1.7			
		52 - 94	FAL		0.091	0.43	0.012	1.25	2.8			
		94 - 152	A		0.068	0.41	0.008	1.09	4.8			
		152 - 200	Aa		0.100	0.38	0.027	1.23	2.9			
	H16	0 - 73	FA	1.8	0.092	0.42	0.015	1.27	4.0	8.2%	8.9%	
		73 - 200	A		0.068	0.39	0.008	1.09	4.8			
E	H25	0 - 57	FaA	1.9	0.100	0.39	0.059	1.44	31.4	9.0%	9.1%	
		57 - 113	FA-FaA		0.097	0.40	0.035	1.38	16.0			
		113 - 153	FA		0.095	0.41	0.019	1.31	6.2			
		153 - 200	FaA		0.100	0.37	0.059	1.48	31.4			
	H28	0 - 51	FA-FaA	1.8	0.098	0.40	0.039	1.40	18.0	7.9%	8.1%	
		51 - 123	FaA		0.100	0.39	0.059	1.48	31.4			
		123 - 200	FaA-FA		0.098	0.40	0.043	1.41	21.0			
	H27	0 - 31	F-FaA	1.9	0.075	0.43	0.046	1.64	45.0	6.6%	6.2%	
		31 - 62	FaA		0.099	0.40	0.047	1.43	23.9			
62 - 200		FaA-FA	0.098		0.41	0.038	1.38	18.8				

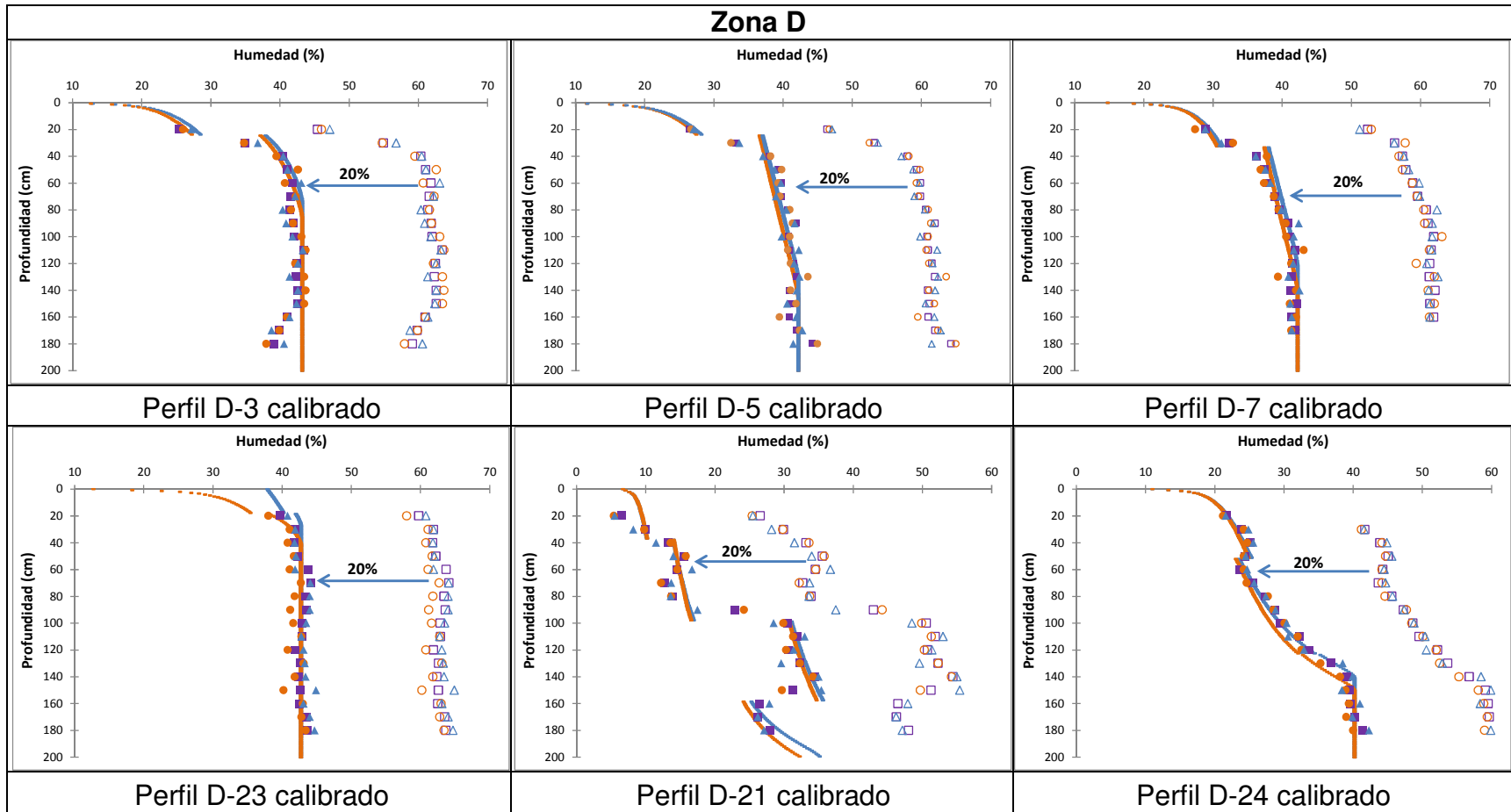


Figura 4.12 Perfiles verticales de humedad calibrados en Hydrus v/s medidos en terreno para sector de vegetación D. Se muestran datos medidos por sonda de neutrones y ajustados un 20%. En naranja resultados para verano y en celeste resultados para invierno.

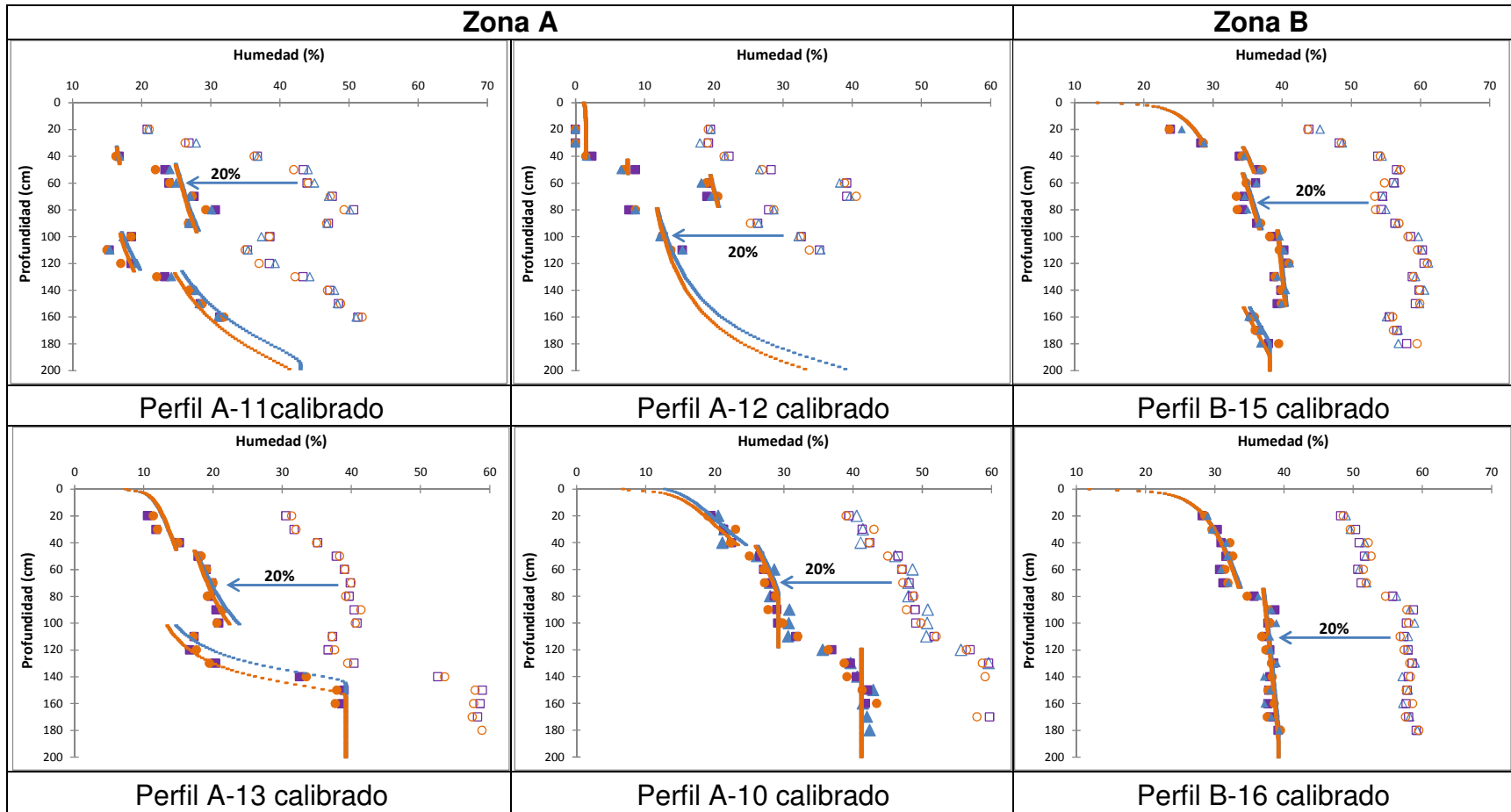


Figura 4.13 Perfiles verticales de humedad calibrados en Hydrus v/s medidos en terreno para sectores A y B de vegetación. Se muestran datos medidos por sonda de neutrones y ajustados un 20%. En naranja resultados para verano y en celeste resultados para invierno.

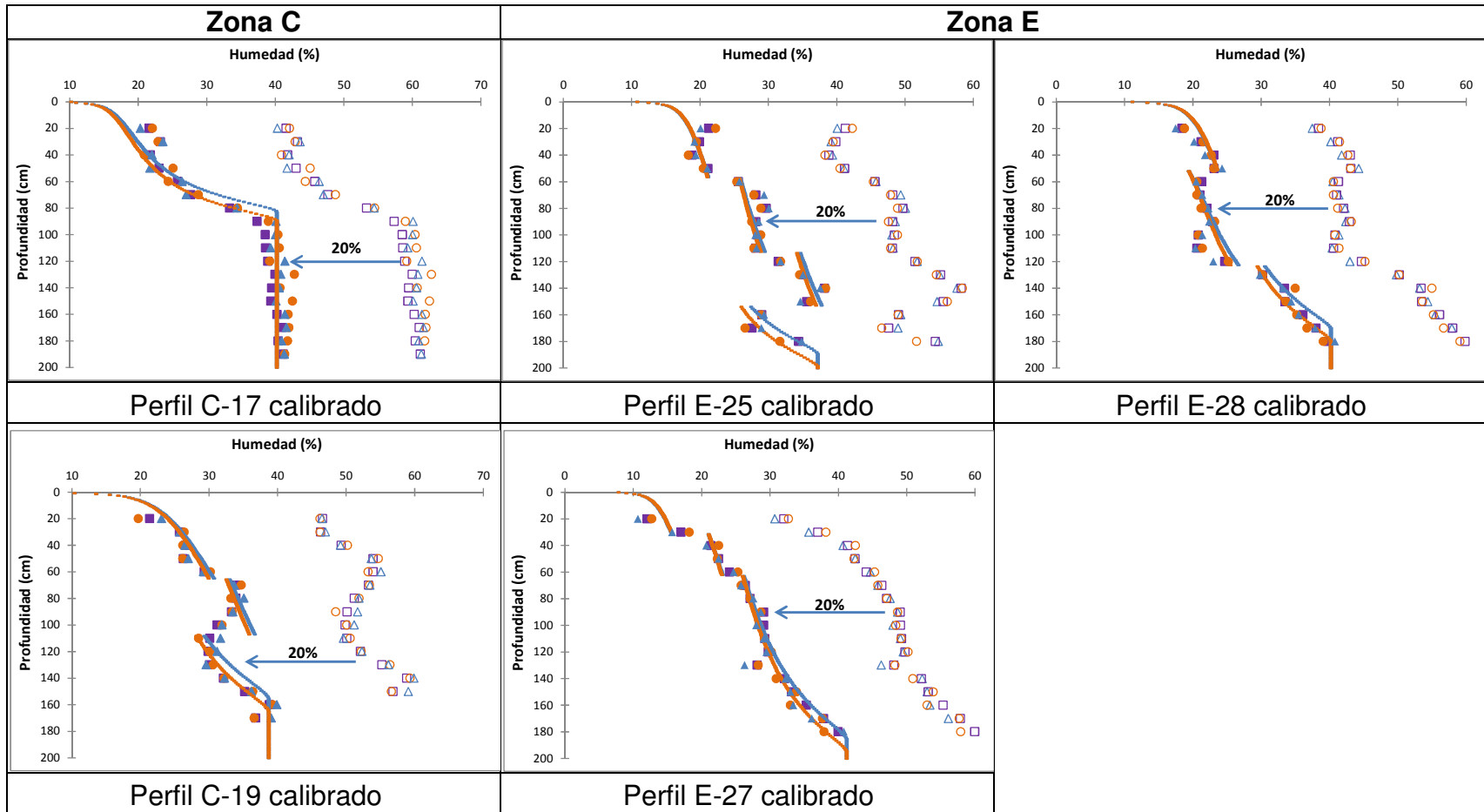


Figura 4.14 Perfiles verticales de humedad calibrados en Hydrus v/s medidos en terreno para sectores C y E de vegetación. Se muestran datos medidos por sonda de neutrones y ajustados un 20%. En naranja resultados para verano y en celeste resultados para invierno.

4.4.7 Escenarios de modelación

Los escenarios de modelación se establecen para simular las distintas situaciones a las que ha estado expuesta la vega o podría estarlo, de modo de comprender como afectan estos procesos a los niveles de humedad en las distintas zonas de vegetación.

Realizado el modelo para 17 perfiles en las distintas zonas de vegetación, se observa que por zona existen como máximo dos tipos de comportamiento del perfil de humedad, los que serían determinados por las características de suelo de la zona. De este modo, para sintetizar los resultados, se escoge uno o dos perfiles representativos para cada zona, representando en los escenarios, las variaciones que puedan existir entre ellos, las que se deben principalmente a diferencias en el nivel freático. En la Tabla 4.5 se presentan los perfiles escogidos para cada zona de vegetación.

Tabla 4.5 Perfiles representativos para cada zona de vegetación

Zona	Perfil representativo	Perfiles similares	Tipo suelo
A	A-11	A-12 y A13	Franco arenosos
	A-10	D-24	Franco arcillosos- Franco arenosos
B	B-16	B-15	Franco arcillosos-limosos
C	C-19	C-17	Franco arcillosos-limosos
D	D-5	D-3, D-7 y D-23	Francos - Francos arcillosos limosos
	D-21		Franco arenoso-Franco arcilloso
E	E-27	E25 y E28	Franco arenosos arcillosos

Los escenarios de modelación se generan en base a la dinámica temporal de las principales forzantes del sistema: evapotranspiración, niveles piezométricos y flujos superficiales aportados por precipitaciones o riego. Estas forzantes constituyen a su vez las condiciones de borde del modelo como se observa en el Capítulo 4.4.4. En la Figura 4.15 se esquematizan los distintos procesos presentes en el sistema, los que definen los escenarios de modelación. Se consideran un total de 9 años de modelación desde 2004 al 2012 (3285 días) de modo de abarcar el periodo de registro de descenso de los niveles por la explotación del acuífero y las medidas de mitigación aplicadas desde enero 2008.

Para estudiar el efecto de la precipitación se considera un escenario con todo el periodo de registro de precipitaciones, que va desde enero 2004 a marzo 2010 (2302 días), modelando las precipitaciones diarias observadas.

Según el análisis de los niveles freáticos realizado en el Capítulo 3.2.4.3, se observa un descenso de los niveles piezométricos del acuífero somero, desde el inicio de los registros en diciembre 2003 hasta el año 2007, debido a las explotaciones de agua subterránea en el Salar de Coposa. Luego, a partir de enero 2008, cuando se cambian a la zona norte parte de las explotaciones, se aprecia una recuperación de los niveles freáticos.

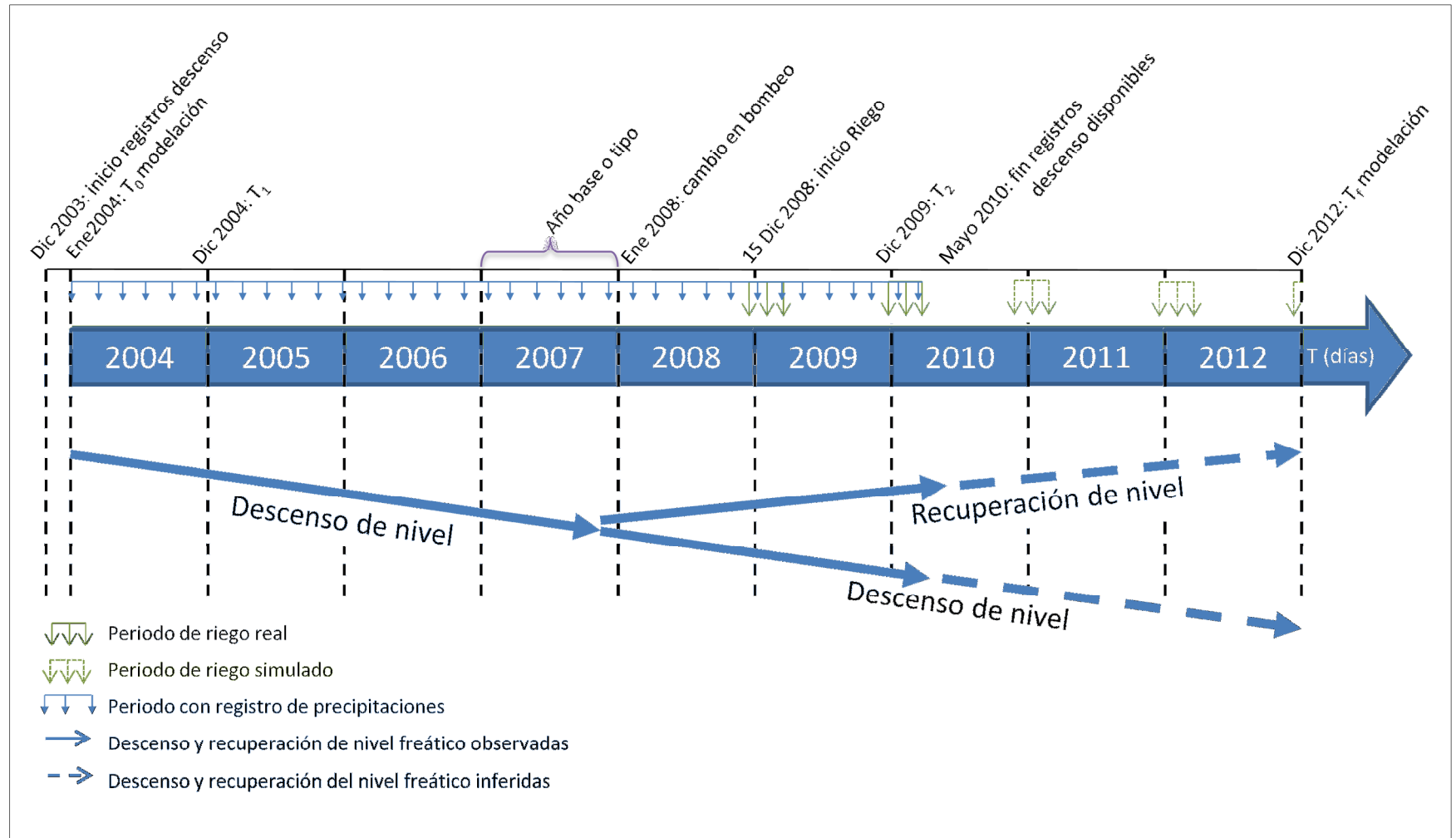


Figura 4.15 Esquema escenarios de modelación según hitos relevantes en la zona de estudio. Se consideran registros de descenso y recuperación de niveles, riego y precipitaciones.

Dado lo anterior, y para poder comparar los efectos en las distintas zonas de vegetación, se utiliza una tasa de descenso promedio de 20 cm/año para cada perfil (ver tasas de descenso por piezómetro en Capítulo 3.2.4.3). Sin embargo, para ver los efectos de un mayor o menor descenso se analizarán los perfiles para una tasa de 50 cm/año y 10 cm/año respectivamente. Para la recuperación, se observa en los registros de nivel freático que ésta ocurre a una tasa menor que el descenso, por lo que siendo conservadores, se considera que la tasa de recuperación corresponde a un 75% de la tasa de descenso.

Para estudiar el efecto del riego, se considera que éste llega al suelo en forma de precipitación, ya que en su mayor proporción es aplicado por aspersión, siendo solo áreas menores regadas por surco y con un menor caudal. Del mismo modo que el descenso, se aplica en todas las zonas la misma tasa de riego de 3 mm/día, estudiando además los casos con una tasa mayor y menor de 5 mm/día y 1 mm/día respectivamente. Las tasas simuladas se definen a partir de los registros existentes del riego en la zona, además de los requerimientos para los cuales fue diseñado el sistema (ver Capítulo 3.2.2).

Se presenta en la Tabla 4.6 una equivalencia de las tasas de riego modeladas, como volumen total de agua para el periodo (180 días aproximadamente). Se consideran las zonas que efectivamente poseen riego como medida de mitigación y aquellas no afectas a riego, para estimar la cantidad de agua necesaria para alimentar el sistema bajo este escenario.

Tabla 4.6 Volumen equivalente al final de temporada de riego según tasas de riego utilizadas

	Zona de riego	Área [ha]	Volumen equivalente [miles m ³]		
			1 mm/día	3 mm/día	5 mm/día
Zonas con riego en 2008-2009	Zona A	2.8	5.1	27.3	245.8
	Zona A1	0.4	0.6	3.5	31.5
	Zona C1	1.2	2.1	11.4	102.4
	Zona D	2.7	4.9	26.6	239.7
	Zona D1	0.4	0.6	3.5	31.5
Zonas sin riego	Zona B	3.0	5.4	29.2	262.4
	Zona C (resto)	6.2	11.1	59.8	538.0
	Zona E	8.4	15.2	81.9	737.5
TOTALES	TOTAL zonas con riego	7	13	72	650
	TOTAL zonas con riego (75% días)	5	10	54	488
	TOTAL	25	45	243	2188
	TOTAL (75% días)	19	34	182	1641

Para las temporadas de riego 2008 y 2009 se aplicaron aproximadamente 20 mil m³ y 40 mil m³ respectivamente, regando aproximadamente el 75% de los días de la temporada, y no el 100% como en el escenario modelado. Dado esto, se tendría que el riego aplicado se encontraría entre una tasa de 1 mm/día y 3 mm/día en promedio.

Según lo anterior se define 7 escenarios de modelación, agrupados en 4 grandes casos, dentro de los cuales se realiza una sensibilidad con respecto al nivel, tasa de riego, descenso o recuperación, de modo de estudiar las variaciones que pudiesen existir en las distintas zonas, con escenarios optimistas o pesimistas. En la Figura 4.16 se presentan los escenarios a modelar, con sus respectivas variantes y análisis de sensibilidad.

En el Anexo E se encuentran las series de datos de entrada para cada escenario definido en los 7 perfiles representativos de las zonas de vegetación.

Escenario			Nivel	Precipitación (Pp)	Descenso (D)	Recuperación (R)	Riego	Sensibilidad	Comparación con			
1. Base	1.1	1.1P	Base pesimista	50 cm más profundo	No	No	No	No	-			
		1.1	Base	Promedio								
		1.1O	Base optimista	50 cm menos profundo								
	1.2	1.2P	Base con Pp pesimista	50 cm más profundo	Si	No	No	No				
		1.2	Base con Pp	Promedio								
		1.2O	Base con Pp optimista	50 cm menos profundo								
2. Con riego	2	2P	Con riego pesimista	Promedio	No	No	No	Tasa de riego	Escenario 1			
		2	Con riego									
		2O	Con riego optimista									
3. Con descenso y recuperación	3.1	3.1P	Con D pesimista	Promedio	No	50 cm/año	No	No	Escenario 1			
		3.1	Con D							20 cm/año		
		3.1O	Con D optimista							10 cm/año		
	3.2	3.2P	Con D y R pesimista	Promedio	No	50 cm/año	37,5 cm/año	No		Tasa de descenso y recuperación		
		3.2	Con D y R								20 cm/año	15 cm/año
		3.2O	Con D y R optimista								10 cm/año	7,5 cm/año
4. Con riego, descenso y recuperación	4.1	4.1	Con riego y D	Promedio	No	20 cm/año	No	3 mm/día	-	Escenario 2		
	4.2	4.2	Con riego, D y R	Promedio	No	20 cm/año	15 cm/año	3 mm/día	-			

Figura 4.16 Escenarios de modelación con su respectivo análisis de sensibilidad

4.5 RESULTADOS DEL MODELO

Como se menciona en el capítulo anterior, el modelo se calibra para 17 perfiles en las distintas zonas de vegetación dependiendo de la información disponible. De estos 17 perfiles, se seleccionan 7 perfiles representativos de las zonas de vegetación, de modo de sintetizar el análisis de los resultados para los distintos escenarios (Tabla 4.5).

Para hacer comparaciones con respecto al tipo de suelo en los distintos perfiles modelados, estos se ordenan desde suelos arenosos a arcillosos, tanto en superficie como en profundidad, como se muestra en la Figura 4.17.

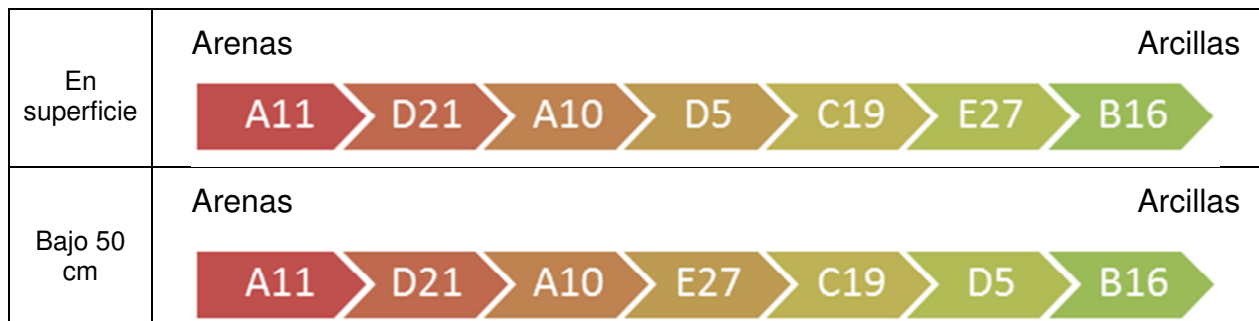


Figura 4.17 Ordenamiento de los perfiles simulados desde suelos arenosos a suelos arcillosos

Se presentan a continuación los resultados para cada escenario modelado, destacando las diferencias o similitudes en las distintas zonas de vegetación, las cuales se resumen en el Capítulo 4.1.

Los gráficos crudos para todos los perfiles seleccionados, se encuentran en los Anexos F e G. En el Anexo F se muestran los contenidos de humedad del perfil de suelo v/s tiempo para cada escenario, y el Anexo G los perfiles de humedad en profundidad para tres tiempos específicos.

4.5.1 Escenario 1: caso base

El escenario base corresponde al caso más sencillo, que incorpora evaporación y el nivel freático promedio asociado al perfil. Este se ha subdividido en dos escenarios: con y sin precipitación.

Para determinar cómo afecta la posición del nivel freático al perfil de humedad, se muestran los resultados para el nivel promedio, un nivel 50 cm más somero y 50 cm más profundo en cada caso.

4.5.1.1 Escenario 1.1

Se muestra en la Figura 4.18, a modo de ejemplo, los contenidos de humedad en el tiempo para el perfil de suelo de la puntera E27, para los tres casos de nivel (promedio, somero y profundo). Se indican el nivel freático y la evapotranspiración modeladas, de modo de visualizar como éstos determinan o afectan el perfil de humedad. Se señalan también los distintos estratos de suelo presentes en el perfil vertical.

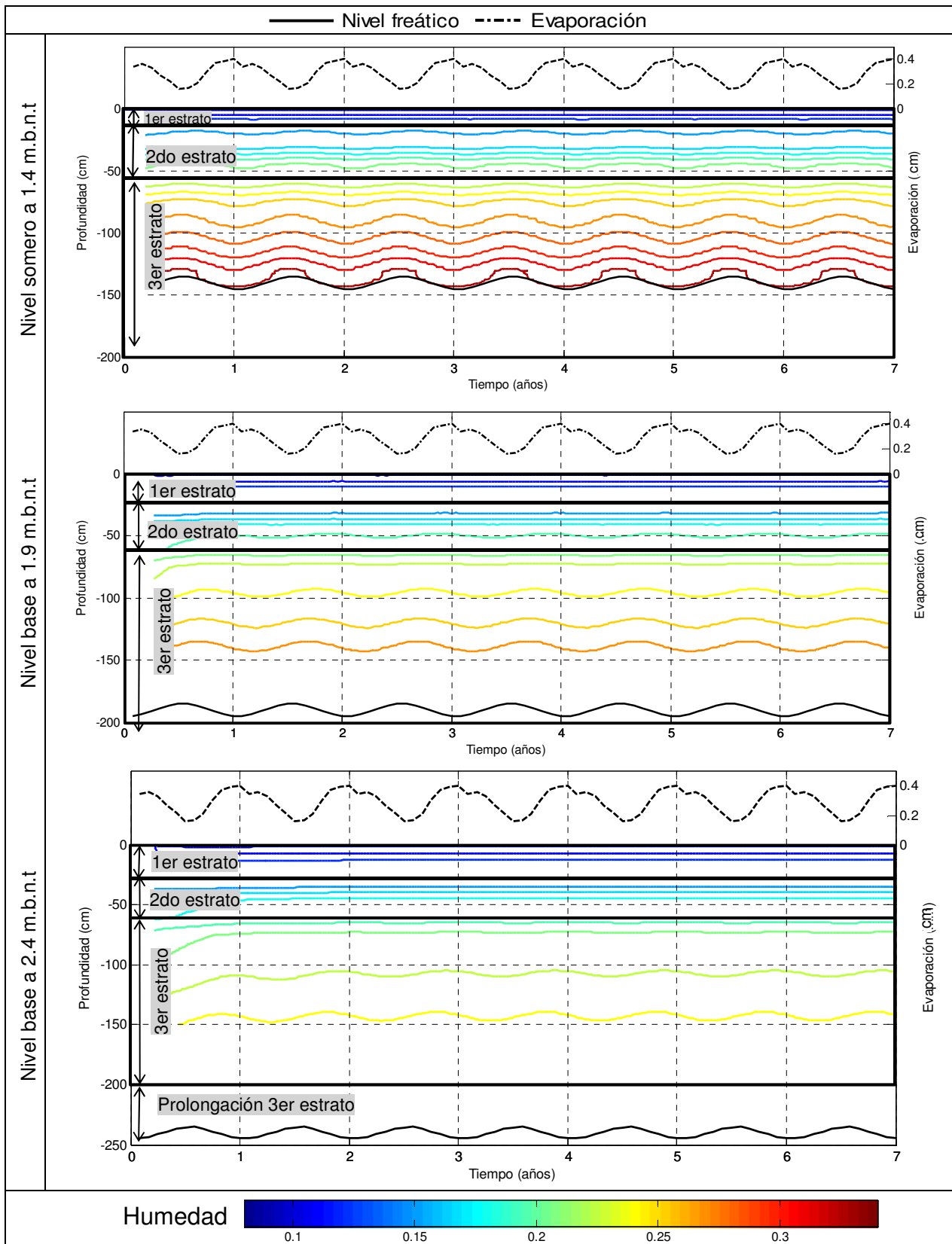


Figura 4.18 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para caso base, perfil E27. Se presenta perfil para distintas profundidades de nivel indicadas a la izquierda y visualmente en el gráfico. Ejemplo de gradiente típico de humedad, que va de mayor a menor humedad desde el nivel freático a la superficie.

Los resultados mostrados en la Figura 4.18 indican una variación cíclica del contenido de humedad, dada por los ciclos evaporativos y de nivel, la cual es menor en superficie dado los bajos niveles de humedad alcanzados, en general menores al 10% en todos los perfiles modelados. Además, se observa que para los casos donde el nivel freático está más profundo, existe un cierto desfase temporal en las variaciones de humedad con respecto al nivel, lo que indicaría que los cambios en los niveles, no afectan de forma inmediata a la humedad en todo el perfil, existiendo un pequeño tiempo de respuesta.

Por otro lado, se observa que mientras más profundo se encuentra el nivel freático, menor es el contenido de humedad en el perfil. Estas diferencias en el contenido de humedad, son notorias desde los 25 - 50 cm de profundidad, ya que superficialmente, la evaporación logra, casi independiente de la posición del nivel freático, bajar la humedad bajo un 20% en todos los perfiles modelados.

La Figura 4.18 corresponde al perfil E27, el cual posee un perfil de humedad similar a los perfiles de las zonas D y B (D5, D21 y B16), donde se observa un gradiente típico de humedad, que va de mayor a menor humedad desde el nivel freático a la superficie. Las variaciones del contenido de humedad responden principalmente a las características de los suelos y a la cercanía del nivel freático. Se tiene que para suelos más arenosos las oscilaciones debidas a la evaporación son menores y el rango de humedad del perfil es mayor.

Por otro lado, como se observa para el caso del perfil A11 en la Figura 4.19, los perfiles de las zonas A y C (A10 y C19), presentan una capa de suelo más arcillosa entre dos capas más arenosas, o bien una capa más arenosa entre dos capas francas, lo que produce una alteración en el gradiente típico de humedad, generando humedades menores entre medio del perfil.

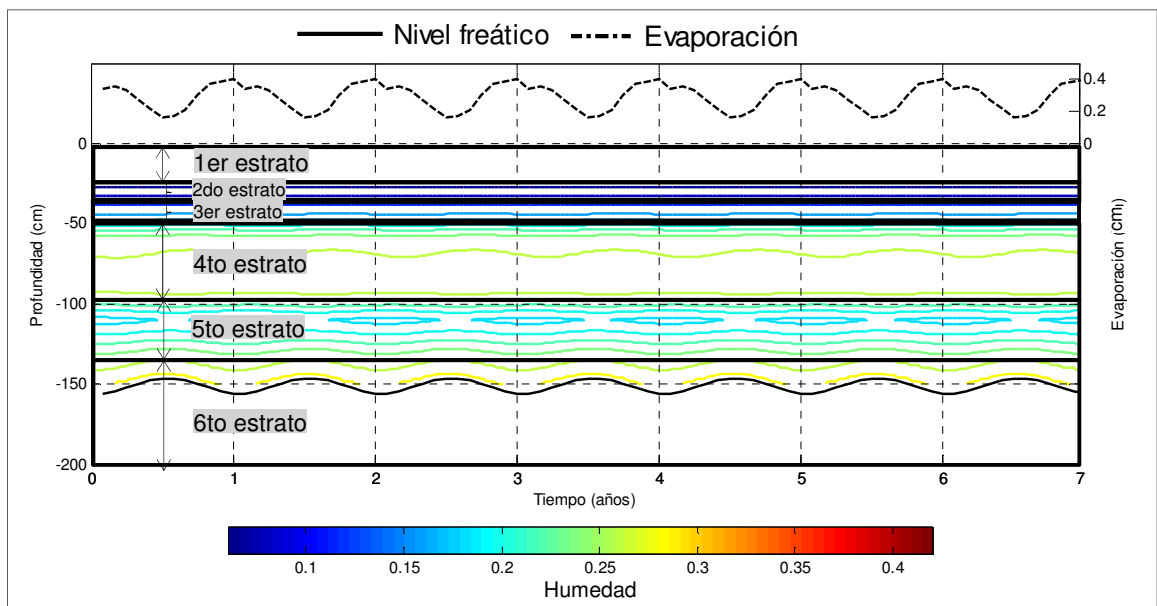


Figura 4.19 Contenido de humedad en el perfil de suelo A11, resultado caso base con nivel promedio. Caso representativo de alteraciones al gradiente típico de humedad. Con humedades menores al medio del perfil.

En el Anexo F se encuentran los gráficos en el tiempo para los demás perfiles de humedad seleccionados en las distintas zonas de vegetación.

En la Figura 4.20, se presentan los perfiles de humedad resultantes para el mes de diciembre en los distintos perfiles de suelo, para los tres casos de nivel freático modelados (promedio, somero y profundo). Se indican los estratos de suelo ocupados en cada perfil con sus respectivas texturas, de modo de explicar las discontinuidades observadas, las que se originan por las distintas curvas características suelo-agua que posee cada estrato, las que indican diferencias en cómo se comporta el flujo en cada tipo de suelo.

Se observa en los perfiles anteriores, que el contenido de humedad queda mayormente determinado por el tipo de suelo que existe en las cercanías del nivel freático.

Para los suelos más arenosos, representados por los perfiles A11 y D21, se observa que en superficie - primeros 40 cm de suelo- la humedad es casi constante para los distintos niveles simulados, variando menos de 5 puntos porcentuales, dado a que la evaporación dominaría el proceso de flujo, secando en cualquiera de los casos la primera capa de suelo. En profundidad en cambio, se tienen variaciones de hasta 20 puntos porcentuales del contenido de humedad para los distintos niveles simulados, debido a la baja capacidad de retención de agua y mayor conductividad hidráulica que poseen este tipo de suelos.

Para los suelos más arcillosos en profundidad (bajo los 50 cm), como se observa en los perfiles D5 y B16, el comportamiento de la humedad es más homogéneo tanto en superficie como en profundidad, observándose las mayores variaciones de humedad en la superficie para los distintos niveles simulados. Esto indicaría que el contenido de humedad queda principalmente determinado por la posición del nivel freático, excepto en la superficie, donde la evaporación predomina los flujos.

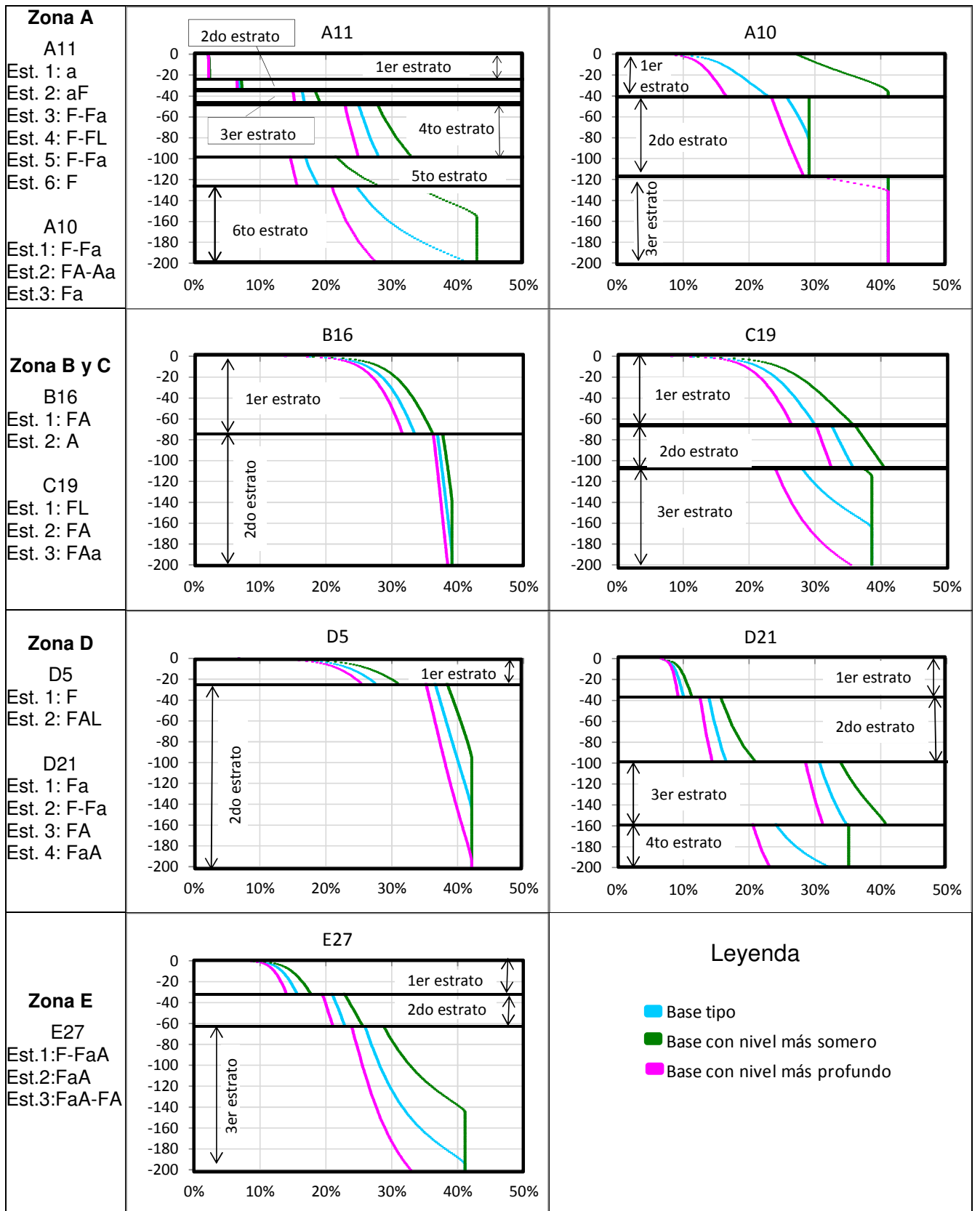


Figura 4.20 Resultados de humedad en el perfil de suelo para caso base, mes de diciembre. Se grafica el perfil de humedad para los tres niveles distintos modelados.

Con respecto al contenido de humedad entre los 80 y los 120 cm de profundidad, zona de donde las especies vegetales captarían el agua del suelo, se observa para cada zona de vegetación:

- **Zona A:** Según lo observado para diciembre en los perfiles A11 y A10, para las zonas más arenosas y alejadas de las lagunas, el contenido de humedad a dicha profundidad fluctuaría entre un 14% para un nivel de 2.55 m.b.n.t. y un 28% para un nivel de 1.55 m.b.n.t. Por ser suelos más arenosos, el PMP es de entre 10% y un 20%, por lo que para los casos de menor nivel, la vegetación podría presentar estrés hídrico. Para las zonas más cercanas a las lagunas, se tiene que la humedad varía entre un 27% y un 29%, estando en el rango necesario de humedad para las plantas según suelos un poco más arcillosos.
- **Zona B.** Según lo observado en el perfil B16 el contenido de humedad varía entre un 37% y un 39% para los distintos niveles, considerando entonces que se está por sobre la condición de PMP.
- **Zona C.** Este sector es uno de los que mayores variaciones presenta en el contenido de humedad para profundidades entre 80 y 120 cm, dependiendo de la ubicación del nivel freático. Se observa que la humedad fluctúa entre 22% para un nivel de 2.65 m.b.n.t. y 40% para niveles de 0.65 m.b.n.t., por lo que para las zonas con nivel más profundo, las plantas se encontrarían estresadas hídricamente, ya que según el suelo, el PMP está entre un 20% y un 30%.
- **Zona D.** Se observan en esta zona dos comportamientos según la cercanía a las lagunas, con humedades entre 38% y 42% para los sectores más cercanos, y entre 29% y 36% los más alejados. Según los PMP para los tipos de suelo presentes, la vegetación no debería mostrar estrés hídrico.
- **Zona E.** Para la profundidad analizada, se poseen en esta zona variaciones importantes del contenido de humedad según la posición del nivel freático, la que van desde un 25% para niveles de 2.95 m.n.b.t. a 34% para niveles de 1.95 m.b.n.t. El PMP asociado a los tipos de suelo presentes, está en torno a un 20-30%, por lo que se estaría cerca del límite de contenido de humedad que necesita la vegetación.

4.5.1.2 Escenario 1.2

Este escenario incorpora, además de las forzantes de evaporación y nivel freático promedio, los flujos entrantes por precipitación. Éstos vienen dados por los registros diarios de precipitaciones en el sistema, entre 2004 y 2010 en mm/día (Capítulo 3.2.4.1). Como se menciona en el Capítulo 4.4.7, se busca con este escenario representar el efecto de las precipitaciones en el perfil de humedad, estudiando su alcance en profundidad y el posible efecto de recarga de los niveles

En las Figuras 4.21 y 4.22 se presentan los resultados del contenido de humedad en el tiempo para los perfiles de suelo D21 y B16, los que muestran el comportamiento para suelos más arenosos y más arcillosos en superficie respectivamente.

Se observa en ambos casos que las precipitaciones generan un alza de humedad por un tiempo determinado, la cual disminuye en superficie. Para los suelos más arenosos, el aumento de humedad en superficie se observa entre 30 y 40 días, mientras que en profundidad los efectos de las precipitaciones se observan hasta 260 días después de los eventos de precipitación. Para los suelos más arcillosos, el aumento de humedad es mayor, pero con una menor duración, observándose su afecto sólo hasta 50 días después.

Además, se observa que en profundidad, las variaciones del contenido de humedad debido a las precipitaciones, llegan como máximo a los 90 cm en las zonas más arenosas con un nivel freático profundo. De este modo, se observa que las precipitaciones no alcanzarían el nivel freático para recargar el acuífero, salvo que el nivel se encuentre somero, a menos de 90 cm en suelos franco arenosos y a menos de 50 cm en suelos franco arcillosos, como en el perfil A10. En los casos correspondientes al nivel base, se tiene que la precipitación alcanza en los suelos arenosos hasta aproximadamente 50 cm de profundidad, mientras que en los suelos más arcillosos alcanzaría entre 20 cm y 30 cm de profundidad.

El efecto de las precipitaciones se percibe hasta cierto contenido de humedad en cada tipo de suelo (humedad máxima), por lo que se ve que los efectos alcanzan mayores profundidades para un mismo perfil cuando el nivel freático está más profundo.

Por otro lado, para que se aprecie el efecto de las precipitaciones en el perfil de humedad, es decir que existan variaciones del contenido de humedad de más de un 2%, éstas deben ser mayores a 40 mm en los meses de lluvia (verano), con valores diarios que varían de 0 a 10 mm/día sin importar la frecuencia de éstas, o bien, ser lluvias concentradas en días seguidos (2 días mínimo) de más de 12 mm/día, como es el caso para enero 2006. Para los años 2007, 2009 y 2010, las precipitaciones diarias son menores y son más ocasionales, por lo que no alcanzan a afectar de manera significativa el nivel de humedad al igual que las lluvias de invierno.

Con respecto a la cantidad en que aumenta o disminuye la humedad por las precipitaciones, se observa que para los suelos más arenosos en superficie, el contenido de humedad aumenta entre 3 y 6 puntos porcentuales en los primeros 20 cm, mientras que en los suelos más arcillosos, puede aumentar hasta más de 10 puntos porcentuales, aumentando en general por sobre 6 puntos.

Los resultados graficados para los demás perfiles seleccionados en cada zona de vegetación se encuentran en el Anexo F.

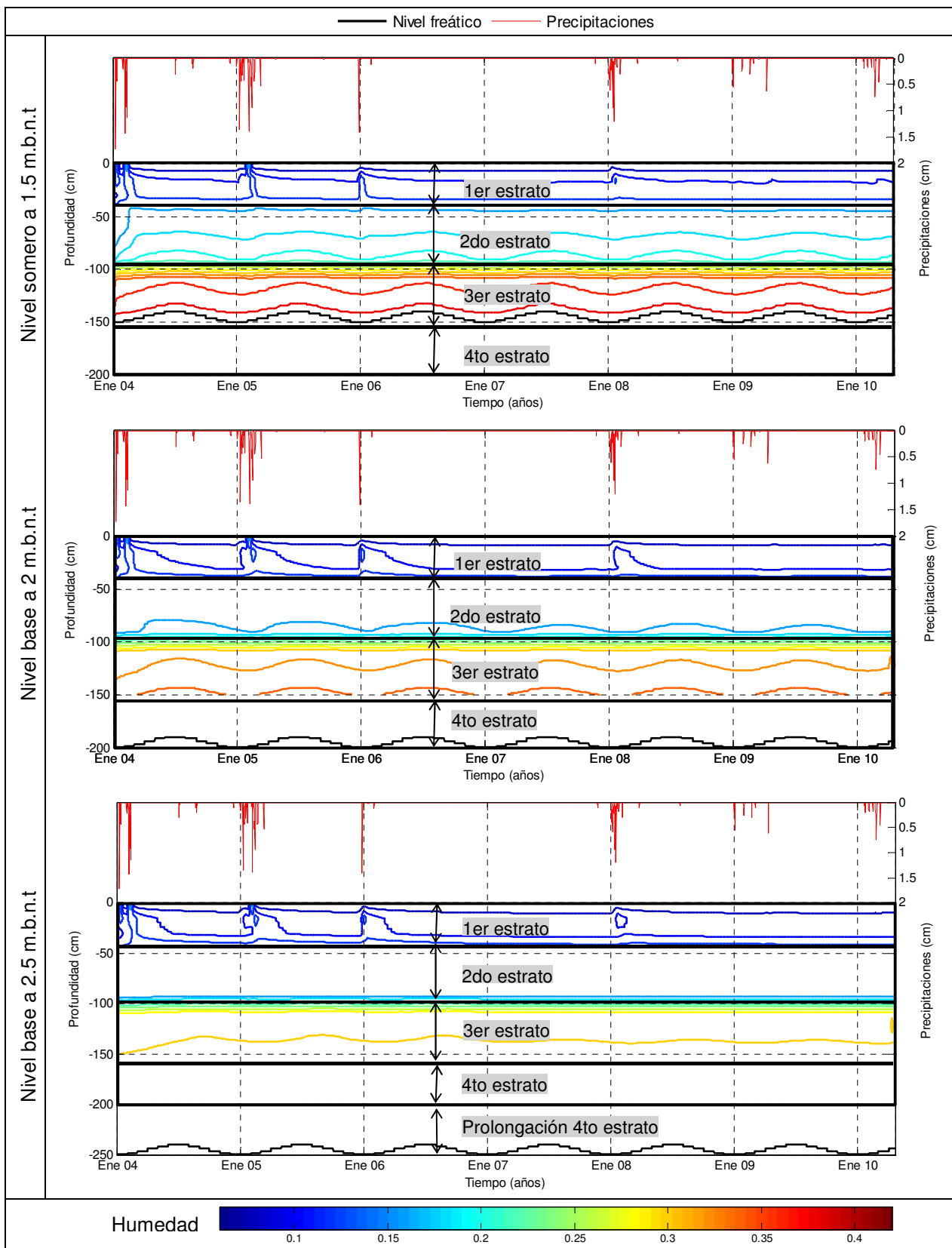


Figura 4.21 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para caso con precipitaciones perfil D21. Se presenta perfil para distintas profundidades de nivel freático indicadas a la izquierda y visualmente en el gráfico. Caso representativo de suelos arenosos en superficie.

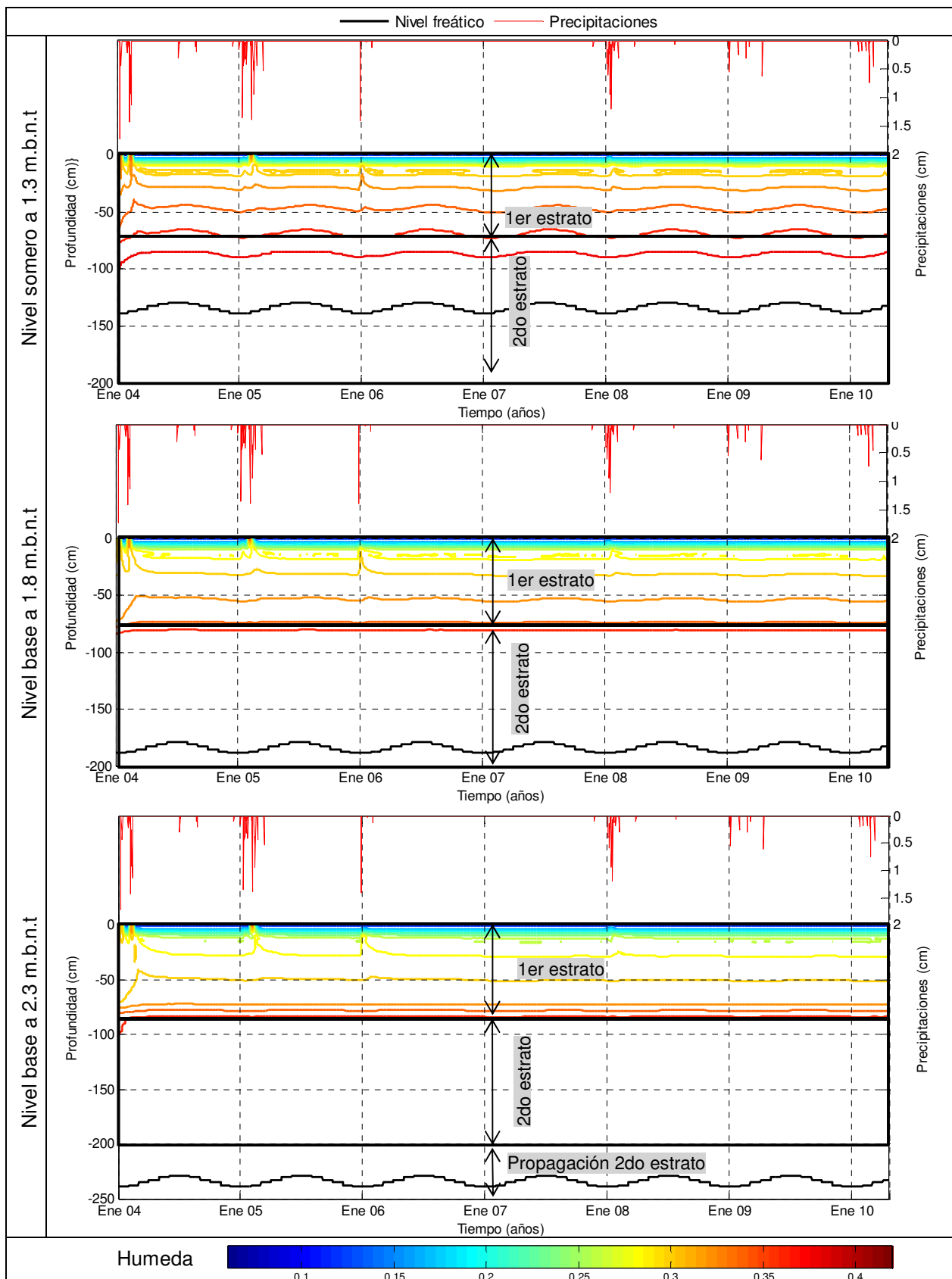


Figura 4.22 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para escenario con precipitaciones perfil B16, representativo de suelos arcillosos en superficie. Se presenta perfil de humedad para cada nivel modelado (promedio, profundo y somero).

4.5.2 Escenario 2: caso con riego

Este caso corresponde a la simulación para los distintos perfiles con un flujo de entrada por riego entre los meses de noviembre y abril, desde diciembre 2008 en adelante, además de las condiciones del caso base: evaporación y nivel promedio. Ya que las precipitaciones se producen en los meses de verano, se consideran como parte del aporte por riego, ya que los días que precipita, no se riega artificialmente.

Según las medidas de mitigación en la zona, de un área de 25 hectáreas aproximadamente de las zonas de vegetación, se riega un 30%, el cual se aplica en un 90% por aspersión y en un 10% por surco.

Como se menciona en el Capítulo 3.2.2, sólo las zonas A, D y parte de la C poseen riego como medida de mitigación. Sin embargo, se estudia el caso con riego para todas las zonas de vegetación, obteniendo resultados de todos los perfiles seleccionados, para una tasa de riego promedio de 3 mm/día, una tasa mayor de 5 mm/día y una tasa menor de 1 mm/día. Lo anterior se realiza para comprender el comportamiento de las distintas zonas ante esta medida de mitigación, para poder compararlas y analizar si ésta es efectiva en todas las zonas.

En las Figuras 4.23 y 4.24 se muestran los resultados del contenido de humedad en el perfil de suelo para los casos A11 y C19. Los gráficos para los demás perfiles se encuentran en el Anexo F.

Se observa para todos los casos, que el riego con una tasa de 1 mm/día no genera alteraciones en el perfil de humedad, lo que indica que el proceso de evaporación predominaría en este caso, no existiendo infiltración del agua aplicada, independiente del tipo de suelo en la zona.

Con respecto a la tasa de 3 mm/día, ésta logra humedecer el perfil por alrededor de 50-60 días, existiendo un tiempo de reacción de alrededor de 120 días. Sin embargo, se obtiene un aumento máximo de 3 puntos porcentuales en el contenido de humedad de los primeros 20 cm, y una profundidad de alcance del riego de entre 20 cm y 35 cm para los distintos casos, siendo así poco significativo.

De este modo, se observa que sólo el escenario con una tasa de 5 mm/día genera un cambio significativo en el contenido de humedad en los perfiles de suelo. En las zonas superficialmente más arenosas se tienen aumentos de entre 3 y 9 puntos porcentuales en el contenido de humedad del primer estrato, mientras que en las zonas más arcillosas o francas, se aumenta entre 12 y 15 puntos porcentuales. Para profundidades mayores se ve que el aumento es similar para los distintos tipos de suelos. Lo anterior se explica debido a que los suelos más gruesos, y por tanto, de mayor permeabilidad, filtran el agua más rápido, reteniendo menos humedad en los estratos superficiales.

Por otro lado, se observa que la humedad no aumenta instantáneamente, demorándose alrededor de 50 días en alcanzar la humedad máxima en el periodo de riego para los suelos arcillosos, y menos de 30 días en los suelos arenosos. Esto indica la influencia de la frecuencia de riego, mostrando que los suelos arenosos son más sensibles a los cambios en los flujos de entrada, por lo que para mantener un nivel de humedad estable en el perfil se necesitan flujos más constantes que en los suelos más finos.

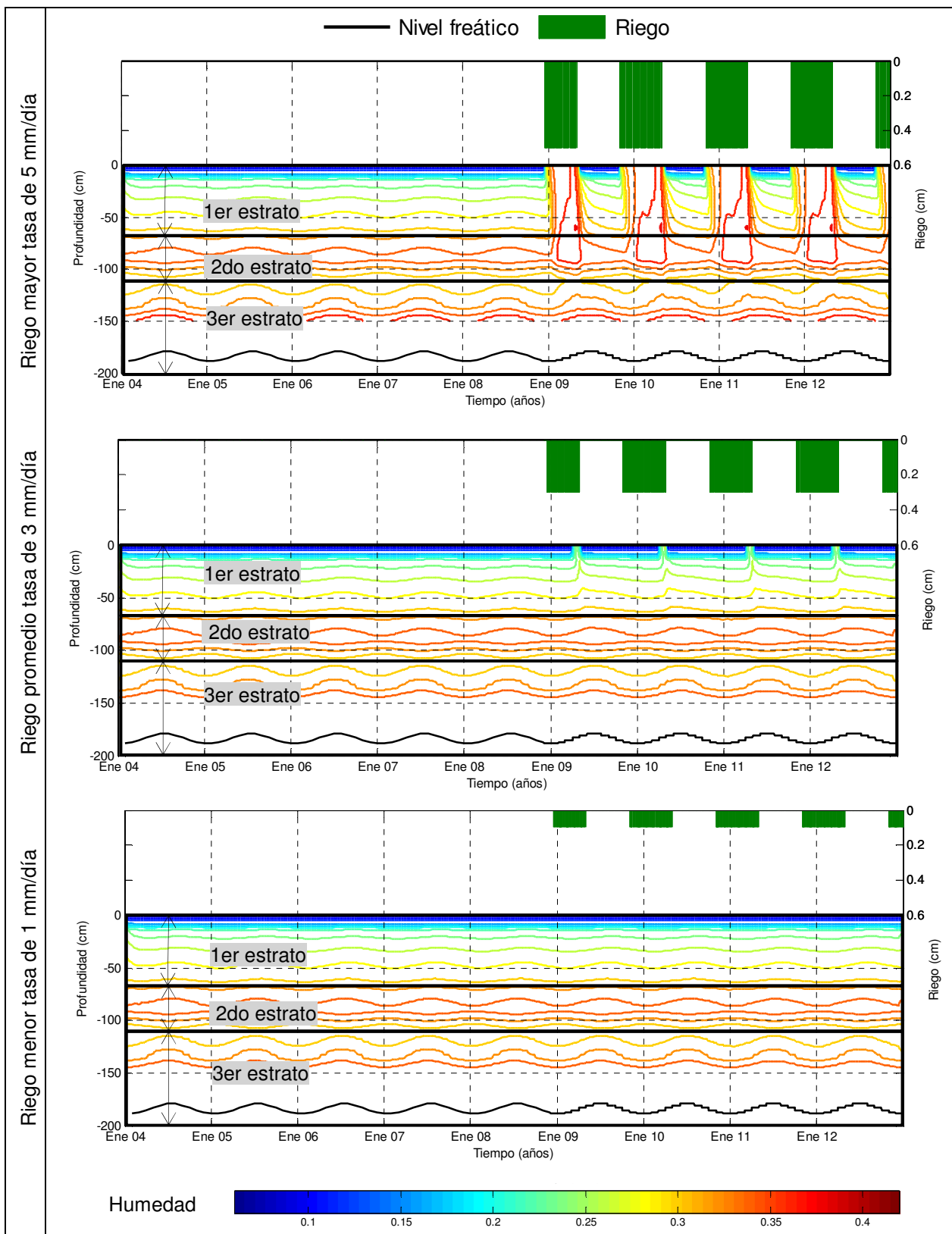


Figura 4.23 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para caso con riego perfil C19. Se presenta perfil para distintas tasas de riego aplicadas indicadas a la izquierda, considerando el nivel promedio del escenario base. Caso representativo de suelos franco arcillosos en superficie.

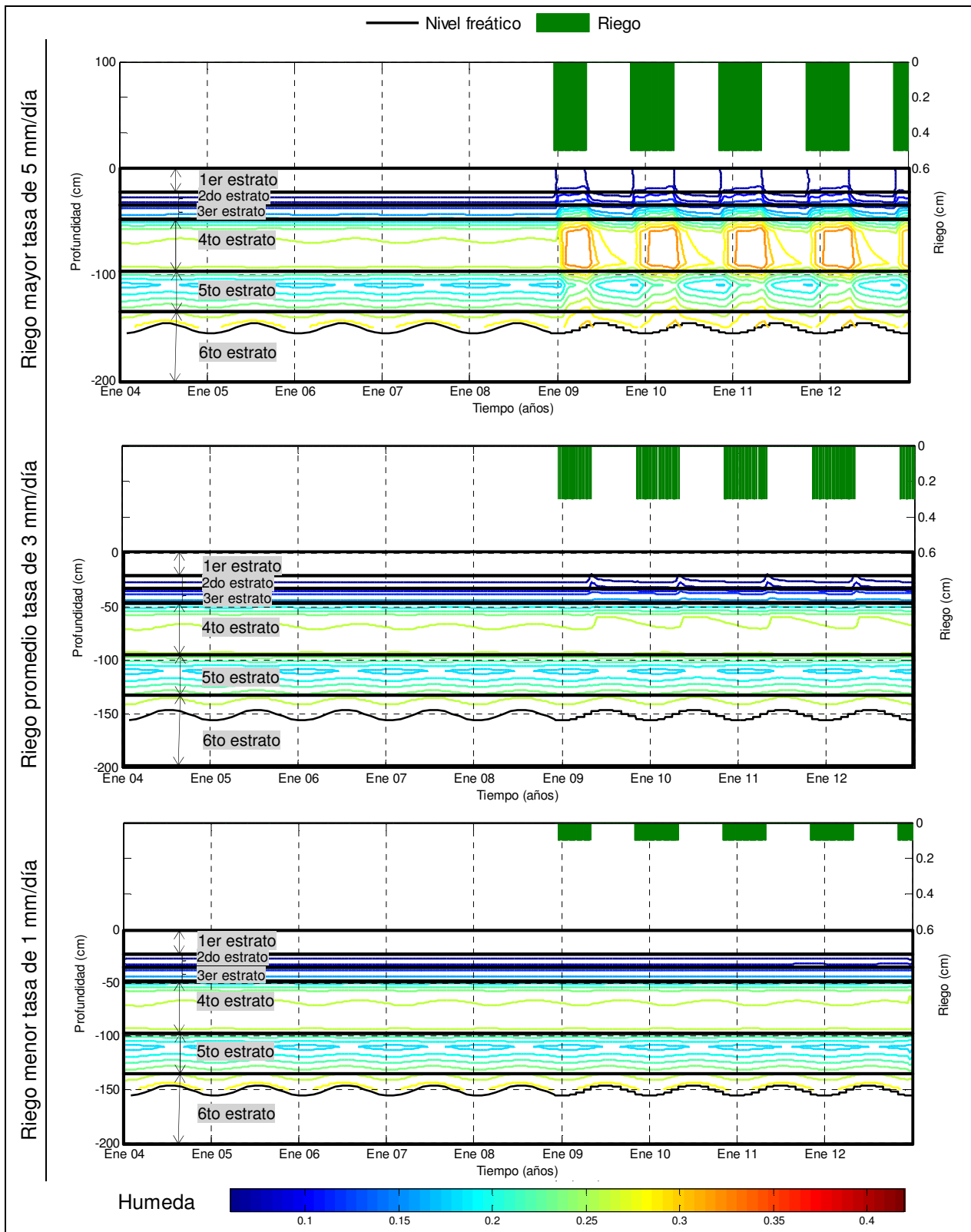


Figura 4.24 Contenido de humedad en el perfil de suelo. Resultados para caso con riego perfil A11. Se presenta perfil para distintas tasas de riego aplicadas indicadas a la izquierda, considerando el nivel promedio del escenario base. Caso representativo de suelos arenosos.

Se presenta en la Tabla 4.7 el contenido de humedad a 20 cm y 50 cm de profundidad, para cada zona de vegetación, previo y durante la temporada de riego, y se compara con el PMP asociado. Se observa que para las zonas B y D (zona cercana a laguna) el riego alcanza a saturar el suelo. Para la zona C, la humedad alcanza valores sobre el 35%, siendo los casos más críticos los de la zona A y las zonas lejanas a la laguna de la zona D (D21), ya que al ser suelos más arenosos, el agua no se retiene en el perfil de suelo, siendo el riego menos efectivo.

Tabla 4.7 Contenidos de humedad para distintas zonas de vegetación antes y durante la temporada de riego para una tasa aplicada de 5 mm/día

Zona de vegetación	Perfil	Contenido de humedad (%)				
		PMP	A 20 cm de profundidad		A 50 cm de profundidad	
			Previo al riego	En temporada de riego	Previo al riego	En temporada de riego
Zona A	A10	15% - 30%	18%	24%	26%	26%
	A11	10% - 20%	5%	8%	20%	27%
Zona B	B16	En torno a 20%	28%	40%	31%	40%
Zona C	C19	20%-30%	24%	36%	28%	38%
Zona D	D5	25% -35%	25%	40%	38%	41%
	D21	15% - 25%	9%	18%	14%	23%
Zona E	E27	En torno a 20%	14%	27%	14%	23%

En la Figura 4.25 se muestran espacialmente los resultados anteriores para una profundidad de 20 cm, de modo de visualizar mejor, los efectos del riego para las distintas zonas de vegetación. Como se menciona anteriormente, se observa aquí que la zona más crítica correspondería a la zona A.

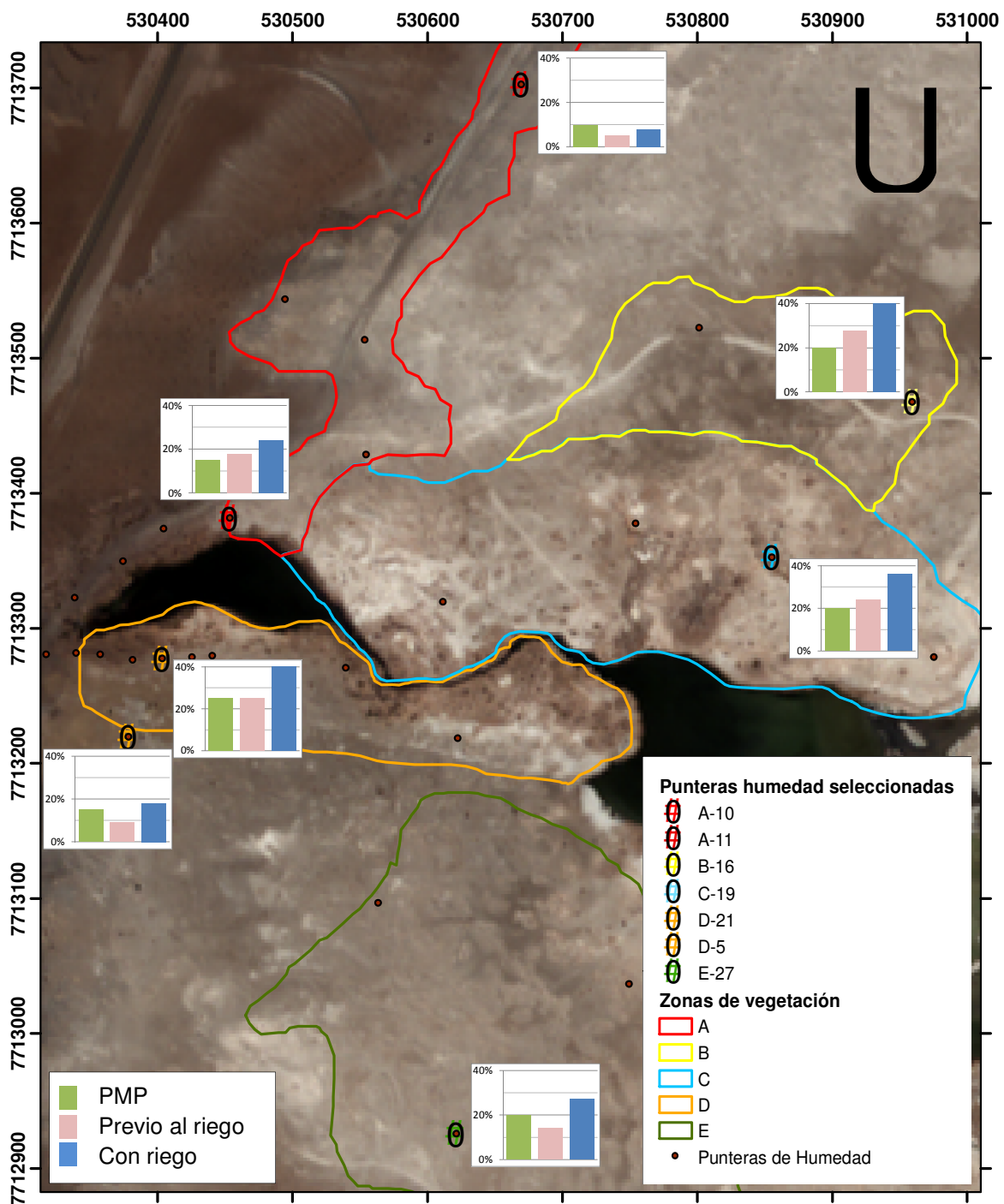


Figura 4.25 Contenidos de humedad previo al riego y en temporada de riego, a 20 cm de profundidad en distintos puntos modelados, para escenario 2 con tasa de riego de 5 mm/día. Se indica también el punto de marchitez permanente.

4.5.3 Escenario 3: caso con descenso y recuperación

Este caso de modelación se subdivide en dos escenarios, en los que se representan los efectos observados en los niveles freáticos de la vega, causados por el bombeo de aguas subterráneas en el Salar de Coposa. El primero considera sólo los efectos del

descenso, los que se prolongan hasta el año 2012. El segundo considera la situación “real”, en la que se observa primero un descenso de los niveles del acuífero y posteriormente una recuperación de estos.

4.5.3.1 Escenario 3.1

Como se menciona en el Capítulo 3.2.4.3 se poseen registros de nivel freático desde diciembre 2003 a marzo 2010, en los que se observa que para el periodo 2007-2008 el nivel se estabiliza, no existiendo descenso ni recuperación del nivel freático relevante. Dado esto, y a que para ese periodo existen mediciones de humedad, se considera el 2007 como el año representativo del caso base. Se considera entonces, para septiembre 2007, el nivel freático medido en esa fecha, estimando el nivel hasta el 2003 y el 2012, a partir de las tasas promedio de descenso.

De este modo, se busca determinar el contenido de humedad que habría existido al principio del registro, siendo ésta una estimación de la humedad existente previa a la intervención del sistema y la humedad, dado el escenario hipotético de descenso del nivel freático sostenido en el tiempo.

Como se menciona en el Capítulo 3.2.4.3, el descenso observado varía según la zona (ver Tabla 3.13), por lo que se muestran los resultados para una tasa media de 20 cm/año, una tasa menor de 10 cm/año y una tasa mayor de 50 cm/año.

A modo de ejemplo, se presentan en la Figura 4.27 y Figura 4.27, los resultados del contenido de humedad en el tiempo para los perfiles D5 y A10 respectivamente, bajo un descenso promedio de 20 cm/año. Los gráficos para los demás perfiles se encuentran en el Anexo F.

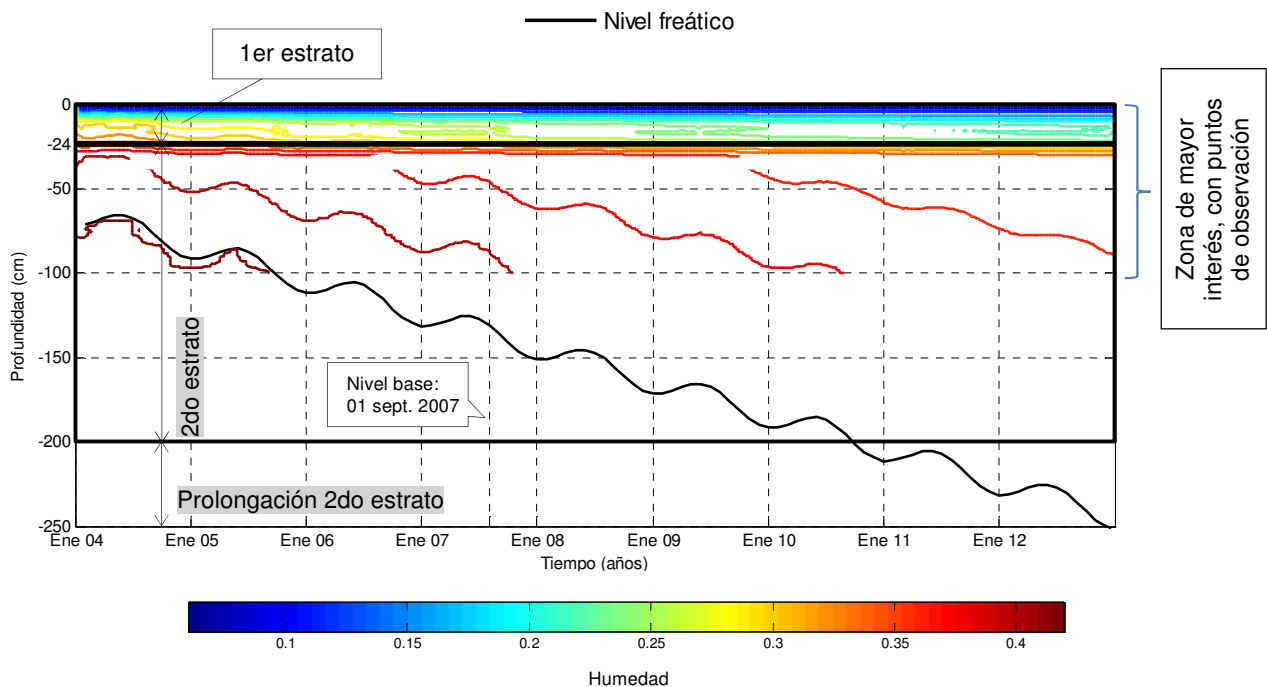


Figura 4.26 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para escenario con descenso promedio de 20 cm/año, en perfil D5. Se considera el nivel promedio del escenario base para el 1 de Septiembre 2007.

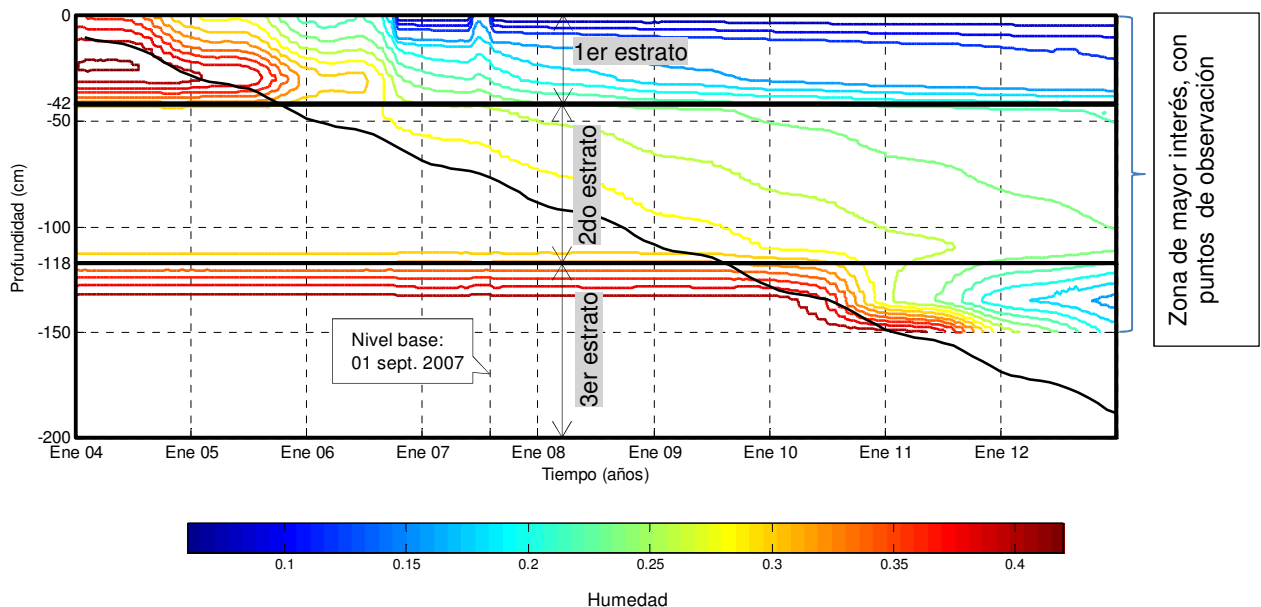


Figura 4.27 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para escenario con descenso promedio de 20 cm/año, en perfil A10. Se considera el nivel promedio del escenario base para el 1 de Septiembre 2007.

Se observa en todos los perfiles, cómo la humedad disminuye a medida que el nivel freático baja, sin embargo, la forma en que varía depende el tipo de suelo. Para suelos más arcillosos, la humedad varía proporcionalmente al nivel (saturación), como se observa a partir del segundo estrato del perfil D5 en la Figura 4.26. Esto también se aprecia en el perfil B16, y en algunos estratos de los demás perfiles. Para los suelos más arenosos, la disminución de humedad en superficie es más lenta que la variación de nivel, mientras que cerca de éste, la disminución de la humedad es más rápida.

Como se menciona en el escenario base (Capítulo 4.5.1), existen perfiles que poseen capas de suelo más arcillosas o arenosas entre dos capas de similares características, lo que genera variaciones de humedad particulares en el perfil como se muestra en el caso del perfil A10 mostrado en la Figura 4.27.

Por otro lado, se observa que alcanzada cierta humedad mínima para el estrato, aunque el nivel siga disminuyendo la humedad se mantiene, como se observa en ambos perfiles para los estratos superiores, ya que la evaporación no sería capaz de extraer más agua.

En la Figura 4.28 se presentan los perfiles de humedad simulados para tres tiempos distintos (todos en diciembre), correspondientes al año 2004, considerado como el tiempo inicial, al año 2009 como un tiempo medio entre el año base (2007) y el año final, y el año 2012 como tiempo final. Se muestran los casos asociados a los perfiles A11, C19 y B16, para representar los tres esquemas generales de suelo, el primero más arenoso, el último más arcilloso y el C19 como un suelo intermedio. Los casos para los demás perfiles se encuentran en el Anexo G.

Se observa en la Figura 4.28 las discontinuidades en el perfil de humedad, generadas por los cambios de estrato de suelo, los que poseen distintas curvas características suelo-agua, las que determinan el contenido de humedad en cada estrato según el nivel freático.

Para los suelos más arcillosos se observa que las variaciones de la humedad, debido al descenso del nivel freático, son mayores en superficie que para los suelos arenosos, y que lo contrario ocurre en profundidad, lo que indica que superficialmente, los suelos más afectados por los descenso de nivel freático corresponden a los suelos arcillosos, mientras que en profundidad, los más afectados son los suelos arenosos.

A partir de los gráficos de la Figura 4.28 (y Anexo G), se determinan los contenidos de humedad para una profundidad de 50 y 100 cm, en los distintos tiempos determinados, los que se presentan en la Tabla 4.8, junto al PMP asociado al tipo de suelo en el perfil (ver Capítulo 4.1). Se destacan los valores más críticos, es decir, los que se encuentran en el rango de PMP o bien bajo este punto.

Al comparar los contenidos de humedad de la Tabla 4.8, con los valores de PMP, los que corresponden a una primera estimación de la humedad mínima que necesita la vegetación para poder captar el agua del suelo, se observa que algunos casos estarían con estrés hídrico (valores destacados con rojo en Tabla 4.8), es decir, con contenidos de humedad menores o en el rango de humedad dado por el PMP.

Sin embargo, es importante recalcar, que no es posible afirmar con seguridad el estado de la vegetación, sólo a partir de la comparación con el PMP, ya que la respuesta de la vegetación, depende de cuán adaptada se encuentre al sistema y de otras variables como el contenido de sales y la calidad del sustrato. Además, los valores de contenido de humedad han sido estimados mediante un modelo numérico, que también entrega una estimación o aproximación de la realidad, la que se ha considerado en un marco conservador de modelación para la vegetación, debido a los ajustes realizados en el proceso de calibración, entregando los resultados más críticos para las plantas.

Teniendo lo anterior en consideración, se observa en la Tabla 4.8, que algunas zonas presentarían estrés hídrico desde el inicio de los registros de descenso, mientras otros caerían en este rango al descender los niveles en el tiempo. Cabe destacar que el bombeo en la zona partió en 1998, pero sólo se poseen registros de nivel freático desde el 2003 en el acuífero somero, por lo que no es posible determinar la condición base o natural del sistema. Sin embargo la mayor extracción de aguas subterráneas se tiene desde el 2004 en adelante, por lo que desde ese año los efectos sobre el nivel freático habrían sido mayores en el sistema, los que estarían representados en el modelo.

Dado lo anterior, las zonas más críticas corresponden a la zona A, con ambos perfiles dentro del rango de PMP, y para los escenarios con mayor descenso, los perfiles D5 y C19. Como se menciona en el Capítulo 4.1, efectivamente la zona C tiene una tasa de descenso mayor de 40 cm/año según los niveles freáticos observados, no así el perfil D5 que registra un descenso menor a 20 cm/año.

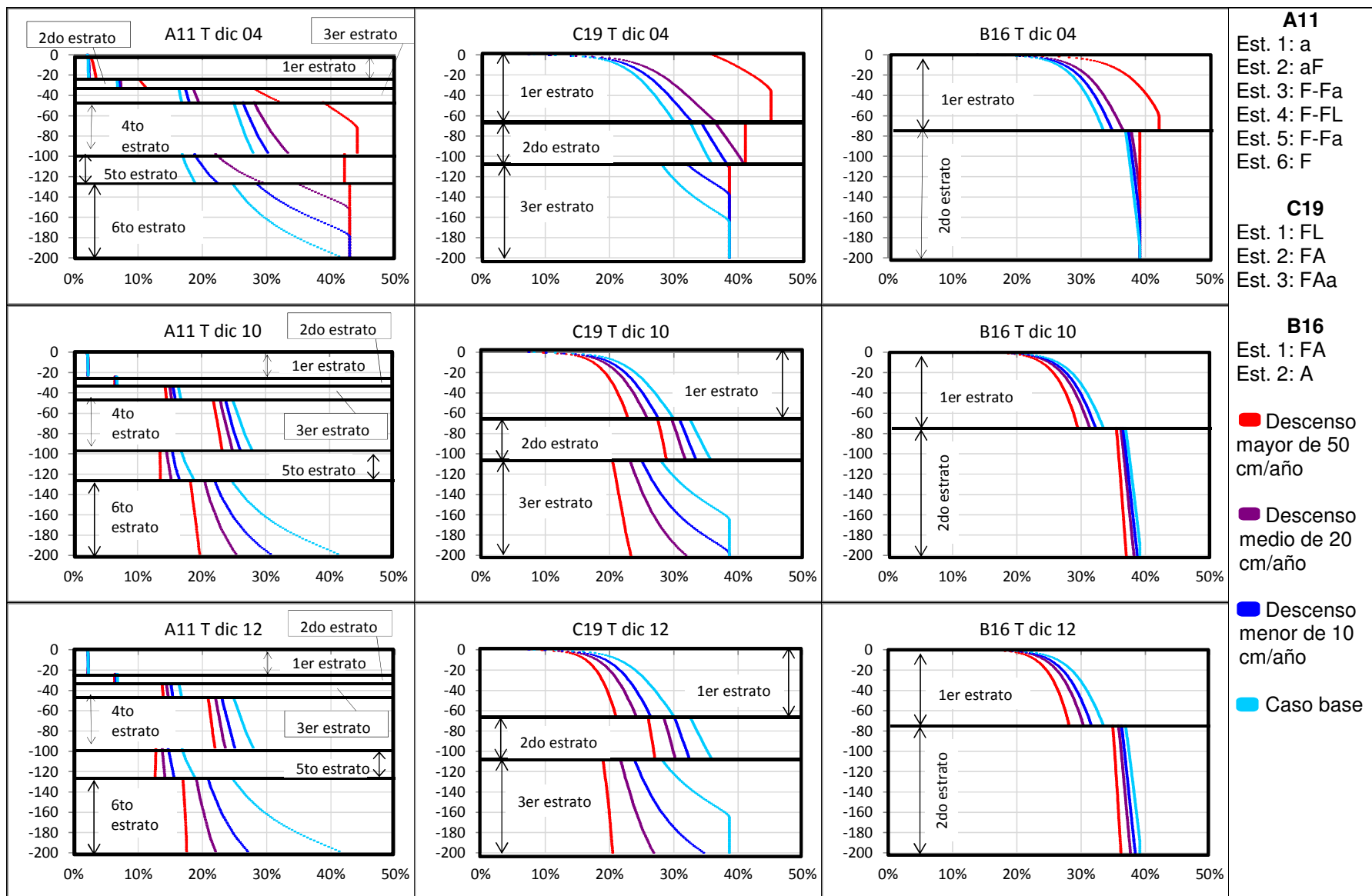


Figura 4.28 Resultados de humedad en el perfil de suelo para caso con descenso, para tiempo inicial, intermedio y final. Casos perfiles A11, correspondiente al suelo más arenoso C19 a un suelo intermedio y B16 al suelo más arcilloso.

Tabla 4.8 Contenidos de humedad observados en distintos tiempos para las diferentes zonas de vegetación a los 50 cm y 100 cm de profundidad. Se muestra el PMP asociado a los tipos de suelo de cada perfil. En naranja se destacan los valores dentro del rango dado para el PMP y en rojo los valores menores a este punto.

Tasa descenso	Zona	Perfil	Contenido de humedad (%)								
			PMP	A 50 cm de profundidad				A 100 cm de profundidad			
				2004	2007	2009	2012	2004	2007	2009	2012
Descenso menor de 10 cm/año	A	H10	15% - 30%	28%	27%	25%	24%	29%	29%	28%	27%
		H11	10% - 20%	27%	25%	24%	23%	19%	17%	16%	15%
	B	H16	En torno a 20%	33%	32%	31%	30%	38%	38%	37%	37%
	C	H19	20%-30%	30%	28%	26%	25%	37%	35%	33%	32%
	D	H5	25% - 35%	39%	38%	37%	36%	41%	40%	39%	38%
		H21	15% - 25%	16%	14%	14%	13%	32%	31%	30%	29%
E	H27	En torno a 20%	23%	22%	22%	21%	30%	28%	27%	26%	
Descenso medio de 20 cm/año	A	H10	15% - 30%	29%	27%	23%	22%	29%	29%	26%	24%
		H11	10% - 20%	28%	25%	23%	22%	22%	17%	15%	14%
	B	H16	En torno a 20%	34%	32%	30%	29%	38%	38%	36%	36%
	C	H19	20%-30%	34%	28%	24%	23%	40%	35%	32%	30%
	D	H5	25% - 35%	40%	38%	36%	35%	42%	40%	39%	38%
		H21	15% - 25%	17%	14%	13%	13%	34%	31%	29%	28%
E	H27	En torno a 20%	25%	22%	21%	20%	34%	28%	24%	24%	
Descenso mayor de 50 cm/año	A	H10	15% - 30%	29%	27%	21%	20%	29%	29%	22%	21%
		H11	10% - 20%	39%	25%	22%	21%	42%	17%	14%	13%
	B	H16	En torno a 20%	41%	32%	28%	27%	39%	38%	36%	35%
	C	H19	20%-30%	43%	28%	22%	20%	41%	35%	29%	27%
	D	H5	25% - 35%	42%	38%	34%	33%	42%	40%	35%	34%
		H21	15% - 25%	29%	14%	13%	12%	41%	31%	27%	26%
E	H27	En torno a 20%	36%	22%	20%	19%	41%	28%	24%	22%	

4.5.3.2 Escenario 3.2

Como se menciona en el Capítulo 3.3.2, desde el comienzo de los registros de nivel freático, se observa un descenso causado por la extracción de agua en el campo de pozos Coposa Tradicional, el cual sería revertido o disminuido a partir de enero 2008, al trasladarse derechos de agua al campo de pozos Coposa Norte. Este cambio en los caudales de producción, produciría una recuperación de los niveles en casi todas las zonas, exceptuando lo observado en el pozo CMA-16, donde el descenso seguiría pero a menor tasa, caso que sería representado en el escenario anterior donde el descenso continua en el tiempo (Figura 3.19 y Figura 3.20).

Dado lo anterior, se representa en este escenario el descenso de los niveles hasta fines del 2007, con su posterior recuperación, la cual ocurriría a una tasa menor, según se observa en los registros de nivel freático (ver Tabla 3.13).

Se presentan en la Figura 4.29 los resultados del contenido de humedad en el tiempo para el perfil de suelo C19, para ejemplificar el comportamiento de la humedad debido a la recuperación de los niveles. Los demás perfiles se encuentran graficados en el Anexo F.

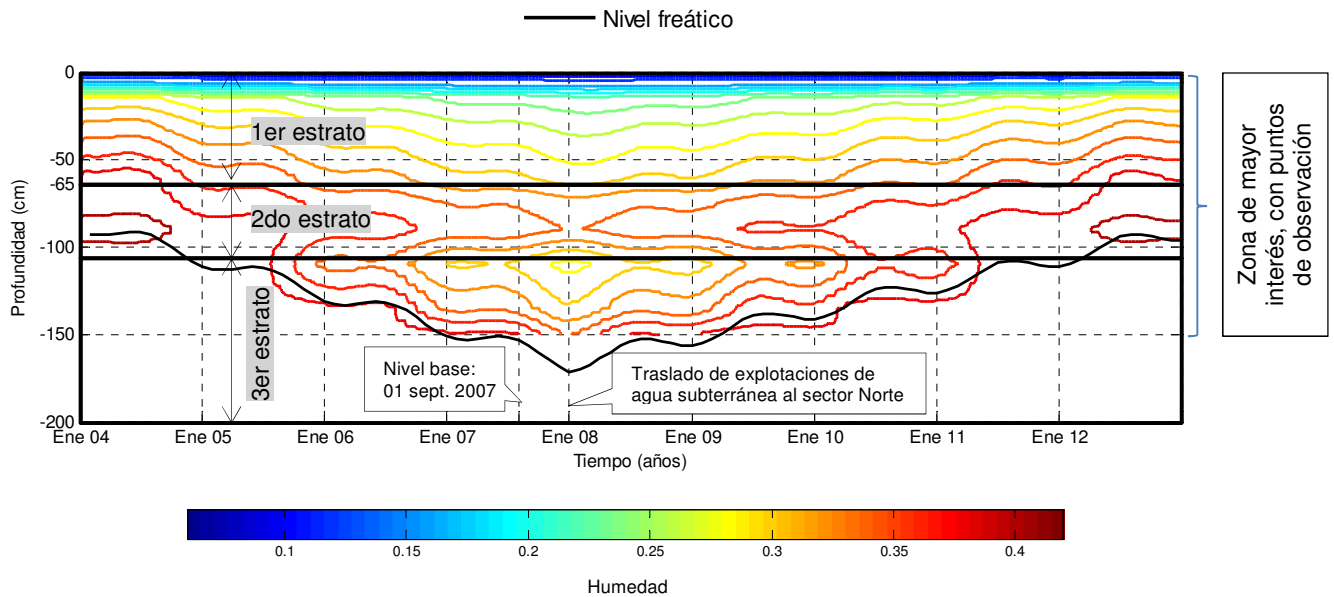


Figura 4.29 Contenido de humedad en el tiempo para perfil de suelo. Resultados para caso con descenso y recuperación promedio en perfil C19. Se considera nivel promedio del caso base para 01 septiembre 2007.

El comportamiento de la humedad es similar al caso anterior, observándose primero una disminución del contenido de humedad y luego un aumento de ésta a partir del cambio del lugar de extracción de aguas subterráneas (Enero 2008). Las variaciones, al igual que en el escenario con descenso, dependen del tipo de suelo y los estratos de cada perfil.

Además, se observa en la Figura 4.29 una cierta simetría en el tiempo, la que indica que se alcanzan a recuperar los contenidos de humedad iniciales, pero en un mayor tiempo, ya que se consideran 4 años de descenso (desde el 2004 al 2008) y 5 de recuperación (desde 2008 al 2013).

En la Figura 4.30 se presentan los perfiles de humedad simulados para diciembre 2004 (tiempo inicial), diciembre 2009 (tiempo medio) y diciembre 2012 (tiempo final), además del caso base (correspondiente a 2007), para los perfiles representativos de suelos arenosos (A11), suelos arcillosos (B16) y suelos intermedios (C19). Los demás perfiles se encuentran graficados en el Anexo G.

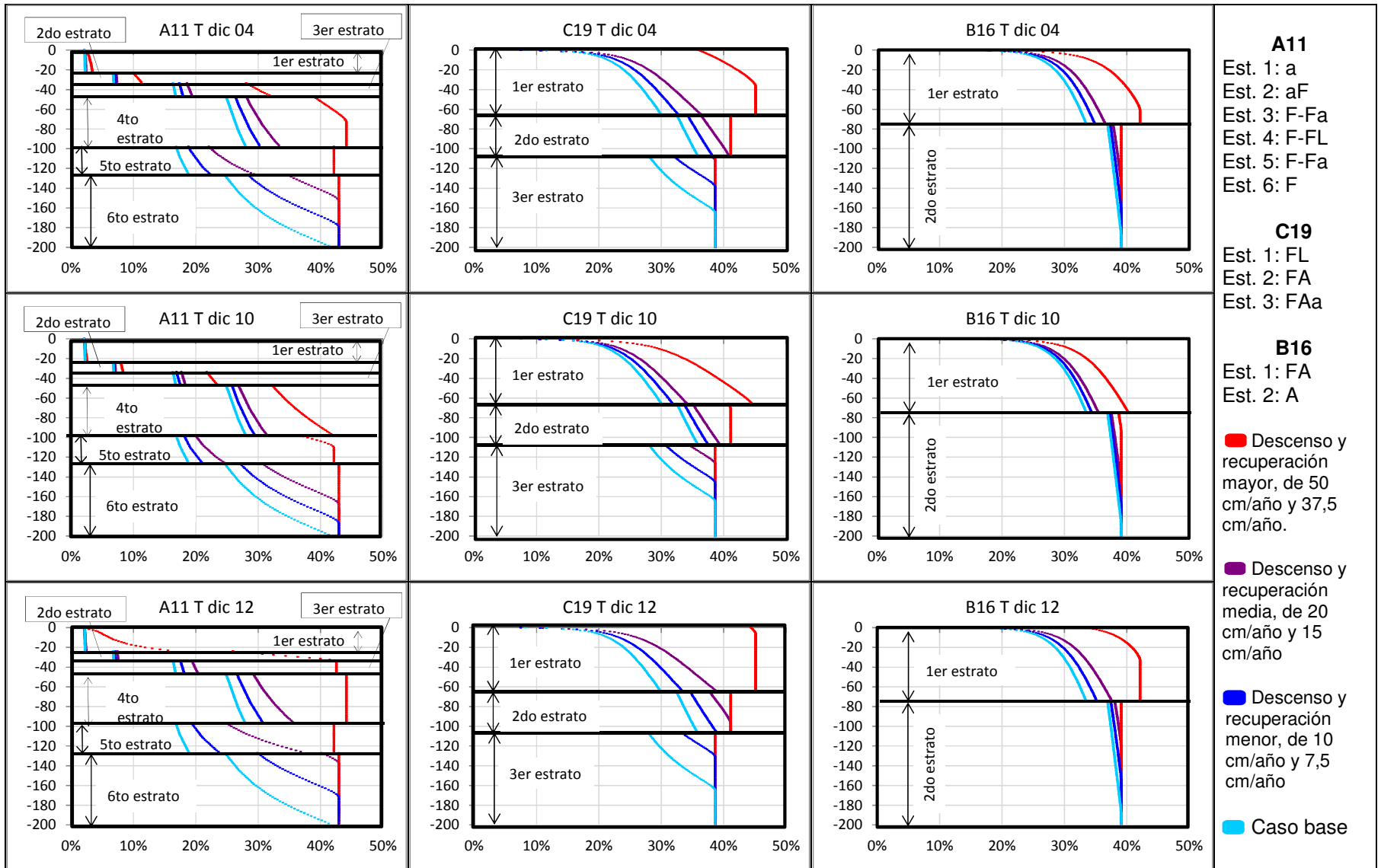


Figura 4.30 Resultados de humedad en el perfil de suelo para caso con descenso y recuperación, para tiempo inicial, intermedio y final. Casos perfiles A11, correspondiente al suelo más arenoso, C19 a un suelo intermedio y B16 al suelo más arcilloso.

A partir de los gráficos anteriores, se determinan los contenidos de humedad para los tres tiempos especificados para profundidades de 50 y 100 cm.b.n.t., los que se presentan en la Tabla 4.9. El tiempo inicial y base contienen los mismos valores que el escenario anterior, por tratarse de los periodos previos a la recuperación. Se destacan los valores críticos para los cuales las plantas no podrían aprovechar el agua, y se observa que con respecto al escenario base, se recuperan los contenidos de humedad, alcanzándose valores mayores de humedad en los perfiles para el tiempo final.

La tasa de recuperación es menor que la de descenso, sin embargo, al considerar un año más de recuperación que de descenso, se alcanzarían las mismas o mayores humedades que en el tiempo inicial, lo que indica que a la actualidad, se deberían haber recuperado los niveles freáticos y las humedades del suelo, para los sectores donde se registra recuperación de los niveles freático.

Con la recuperación analizada en este escenario, se tiene que los perfiles críticos de las zonas C y D dejan de serlo, no así los de la zona A.

Tabla 4.9 Contenidos de humedad observados en distintos tiempos para las diferentes zonas de vegetación a los 50 cm y 100 cm de profundidad. En naranja se destacan los valores dentro del rango dado para el PMP y en rojo los valores menores a este punto.

Tasa descenso	Zona	Perfil	Contenido de humedad (%)								
			PMP	A 50 cm de profundidad				A 100 cm de profundidad			
				2004	2007	2009	2012	2004	2007	2009	2012
Descenso menor de 10 cm/año	A	H10	15% - 30%	28%	26%	28%	29%	29%	29%	29%	29%
		H11	10% - 20%	27%	25%	26%	27%	19%	17%	19%	20%
	B	H16	En torno a 20%	33%	32%	33%	33%	38%	38%	38%	38%
	C	H19	20%-30%	30%	28%	30%	32%	37%	35%	37%	38%
	D	H5	25% -35%	39%	38%	38%	39%	41%	40%	41%	42%
		H21	15% - 25%	16%	14%	15%	16%	32%	31%	32%	33%
E	H27	En torno a 20%	23%	22%	23%	24%	30%	28%	30%	31%	
Descenso medio de 20 cm/año	A	H10	15% - 30%	29%	26%	29%	29%	29%	29%	29%	29%
		H11	10% - 20%	28%	25%	28%	30%	22%	17%	22%	25%
	B	H16	En torno a 20%	34%	32%	34%	35%	39%	38%	38%	38%
	C	H19	20%-30%	34%	28%	32%	36%	40%	35%	39%	41%
	D	H5	25% -35%	40%	38%	39%	41%	42%	40%	42%	42%
		H21	15% - 25%	17%	14%	16%	18%	34%	31%	33%	36%
E	H27	En torno a 20%	25%	22%	24%	26%	34%	28%	32%	36%	
Descenso mayor de 50 cm/año	A	H10	15% - 30%	29%	26%	29%	29%	29%	29%	29%	29%
		H11	10% - 20%	39%	25%	37%	42%	42%	17%	42%	42%
	B	H16	En torno a 20%	41%	32%	38%	42%	39%	38%	39%	39%
	C	H19	20%-30%	43%	28%	42%	45%	41%	35%	41%	41%
	D	H5	25% -35%	42%	38%	41%	42%	42%	40%	42%	42%
		H21	15% - 25%	29%	14%	20%	42%	41%	31%	39%	41%
E	H27	En torno a 20%	36%	22%	29%	40%	41%	28%	41%	41%	

4.5.4 Escenario 4: caso con riego, descenso y recuperación (combinación escenario 2 y 3)

Este escenario corresponde a una combinación de los escenarios 2 y 3, por lo que se subdivide también en dos casos: riego con descenso y riego con descenso y

recuperación. Se analiza aquí la efectividad de la medida de mitigación de riego, considerando las variaciones en los niveles.

4.5.4.1 Escenario 4.1

Dado que la tasa de 3 mm/día no genera aumentos significativos en el perfil de humedad según el escenario con riego, es difícil cuantificar las diferencias en este escenario, ya que el aumento de humedad es pequeño. Sin embargo, se observa que los efectos de riego y descenso se suman, sin generar alteraciones significativas en el comportamiento del perfil.

Por otro lado, se observa que la disminución de nivel freático no altera la efectividad de la medida de mitigación de riego, la cual para una tasa de 1 mm/día es prácticamente nula, para una tasa de 3 mm/día es baja y para una tasa de 5 mm/día es efectiva, como se menciona en el escenario 2 (Capítulo 4.5.2). Esto se ejemplifica con los resultados del contenido de humedad en el tiempo para el perfil D5 mostrado en la Figura 4.31.

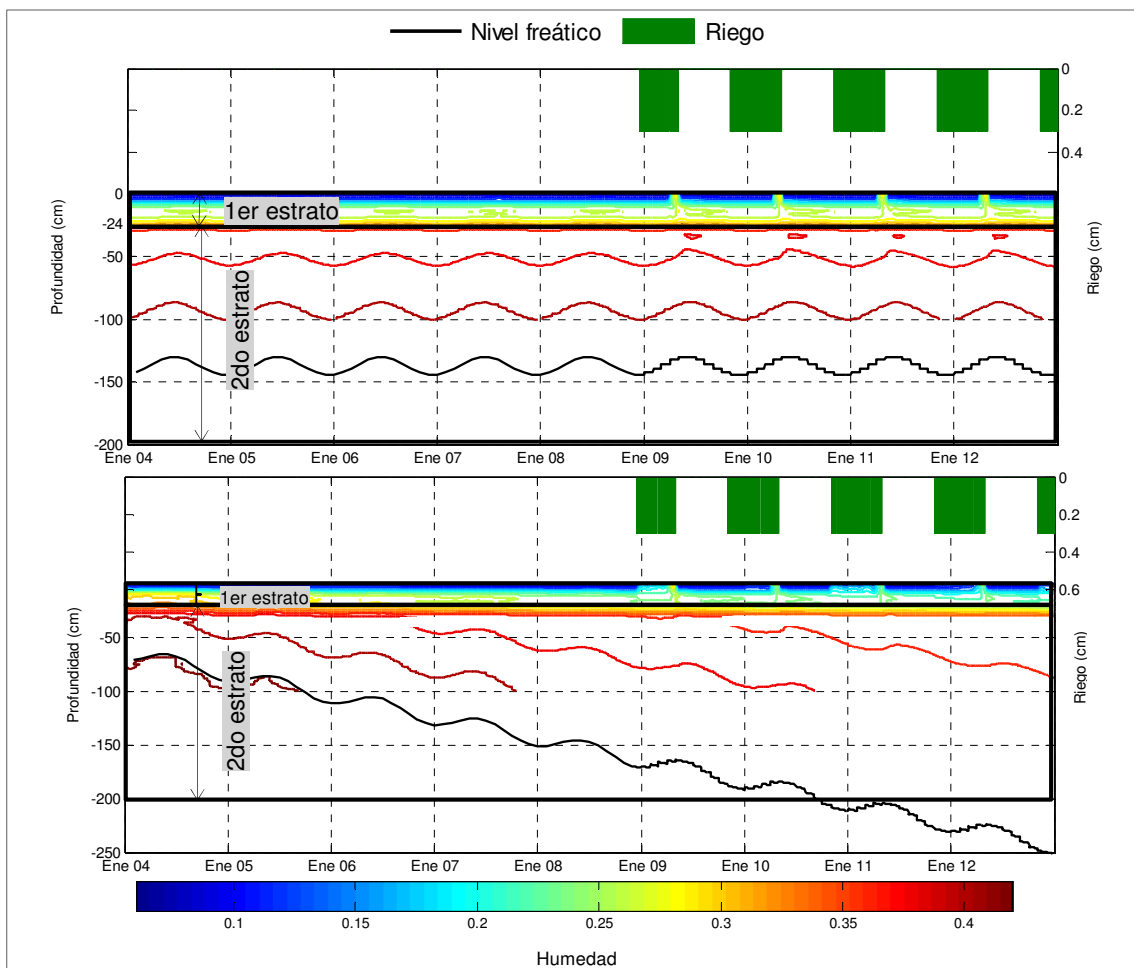


Figura 4.31 Comparación de contenidos de humedad en el perfil de suelo para el caso del perfil D5. Arriba se encuentra escenario bajo riego con nivel promedio, y abajo el escenario con riego y descensos.

Sin embargo, para el caso del perfil A10 mostrado en la Figura 4.32, se observa que el descenso de los niveles freáticos, genera que el riego no aumente los contenidos de humedad en superficie al mismo valor que en el escenario 2, disminuyendo aún más la efectividad de la medida de mitigación de riego. Sin embargo, la profundidad de alcance del aumento de humedad debido al riego sigue siendo la misma que en el escenario 2. Esto indica, que para las zonas donde el nivel freático se encuentra más somero, la efectividad del riego, si puede perjudicarse al descender los niveles freáticos.

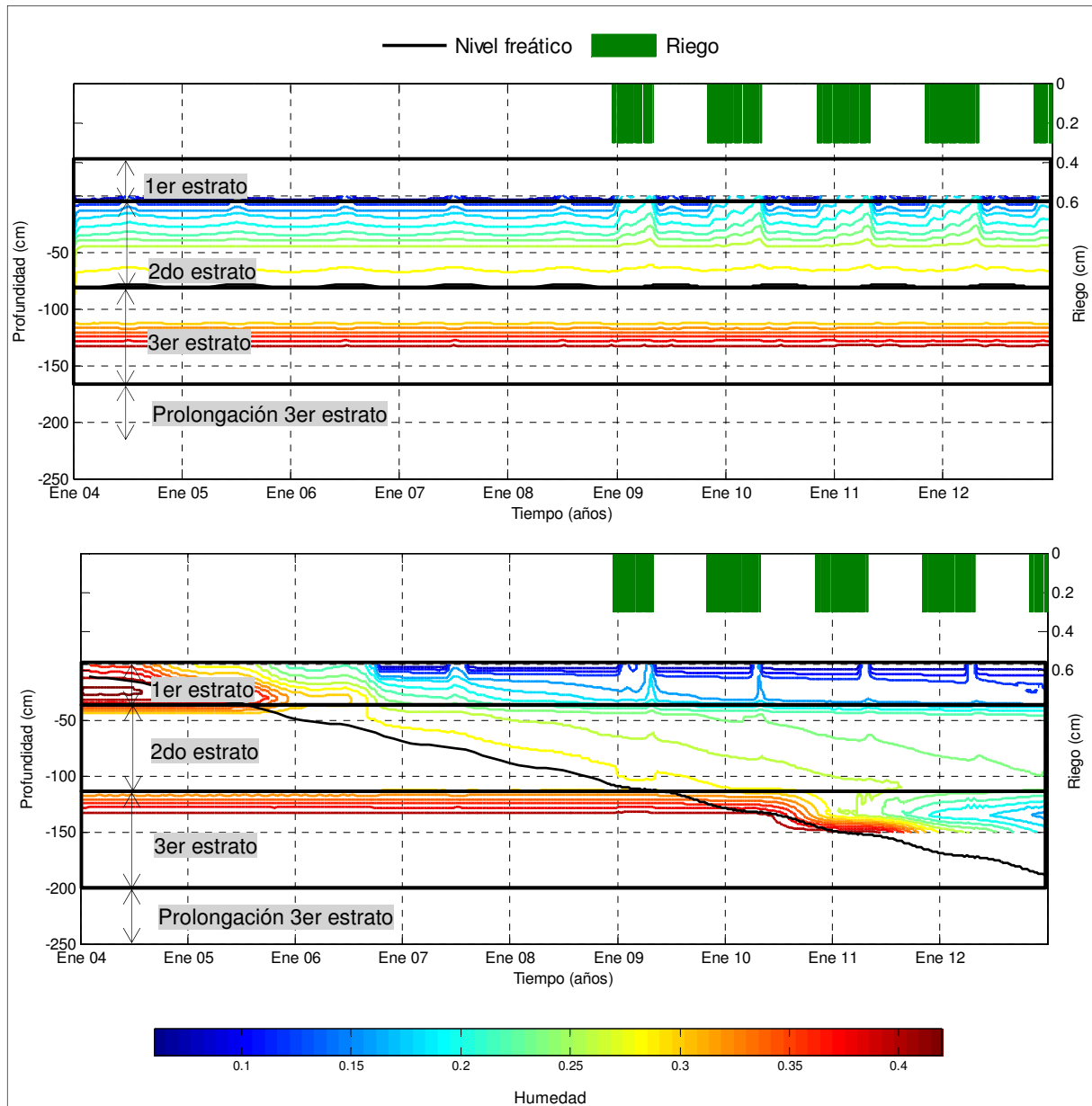


Figura 4.32 Comparación de contenidos de humedad en el perfil de suelo para el caso del perfil H10. Arriba se encuentra escenario bajo riego con nivel promedio, y abajo el escenario con riego y descensos.

Se presenta en la Tabla 4.10 el contenido de humedad a los 20 y 50 cm de profundidad, para cada zona de vegetación, previo y durante la temporada de riego, y se compara con el PMP asociado al tipo de suelo del perfil.

Se observa que para la tasa de 3 mm/día analizada, en ninguna zona se alcanza a saturar el suelo, aumentando el contenido de humedad a lo más 1 punto porcentual, lo que indica la baja efectividad de la tasa de riego aplicada. Al comparar con el PMP, se tiene que las zonas más críticas corresponden a la zona A y a la zona más alejada de las lagunas de la zona D (representada por D21), siendo el perfil B16 el único que se encuentra en condiciones óptimas, bastante sobre el PMP.

Tabla 4.10 Contenidos de humedad en escenario con riego de 3 mm/día y descenso de 20 cm/año para distintas zonas de vegetación, antes y durante el periodo de riego.

Profundidad (cm.b.n.t.)	Zona de vegetación	Perfil	Contenido de humedad (%)						
			PMP	Base (año 2007)		Medio (año 2009)		Final (año 2011)	
				Previo al riego	En temporada de riego	Previo al riego	En temporada de riego	Previo al riego	En temporada de riego
20	Zona A	H10	15% - 30%	18%	-	15%	15%	13%	14%
		H11	10% - 20%	2%	-	2%	4%	2%	4%
	Zona B	H16	En torno a 20%	29%	-	28%	27%	27%	27%
	Zona C	H19	20%-30%	24%	-	22%	22%	21%	21%
	Zona D	H5	25% -35%	27%	-	25%	25%	24%	24%
		H21	15% - 25%	9%	-	9%	10%	9%	10%
Zona E	H27	En torno a 20%	15%	-	14%	15%	13%	14%	
50	Zona A	H10	15% - 30%	26%	-	24%	24%	23%	23%
		H11	10% - 20%	25%	-	24%	24%	23%	23%
	Zona B	H16	En torno a 20%	32%	-	30%	30%	30%	29%
	Zona C	H19	20%-30%	28%	-	26%	26%	24%	23%
	Zona D	H5	25% -35%	38%	-	36%	36%	35%	35%
		H21	15% - 25%	14%	-	14%	14%	13%	13%
Zona E	H27	En torno a 20%	22%	-	21%	21%	20%	20%	

4.5.4.2 Escenario 4.2

Este escenario corresponde a la aproximación más cercana a la realidad, ya que considera los efectos de todos los factores forzantes: evaporación, descenso y recuperación de los niveles freáticos en la zona, y aplicación de la medida de mitigación de riego.

Al igual que el escenario anterior, en general se observa que los efectos se suman, no alterando la forma del perfil de humedad descrito para cada escenario, pudiendo identificarse claramente los efectos por separado de cada forzante en la humedad del suelo.

En general, los efectos del riego no son alterados por la disminución y aumento de nivel freático, variando los contenidos de humedad principalmente debido a los cambios de nivel y no al riego, ya que la tasa de aplicación de éste es pequeña. El único caso donde se observan variaciones en el riego corresponde al perfil A10, el cual sería más eficaz por la recuperación de los niveles.

Se muestra en la Figura 4.33 los resultados obtenidos para este escenario en el perfil D21, donde se observa lo antes descrito. Además se presentan en Tabla 4.11 los contenidos de humedad antes y durante el riego para los años 2007, 2009 y 2011.

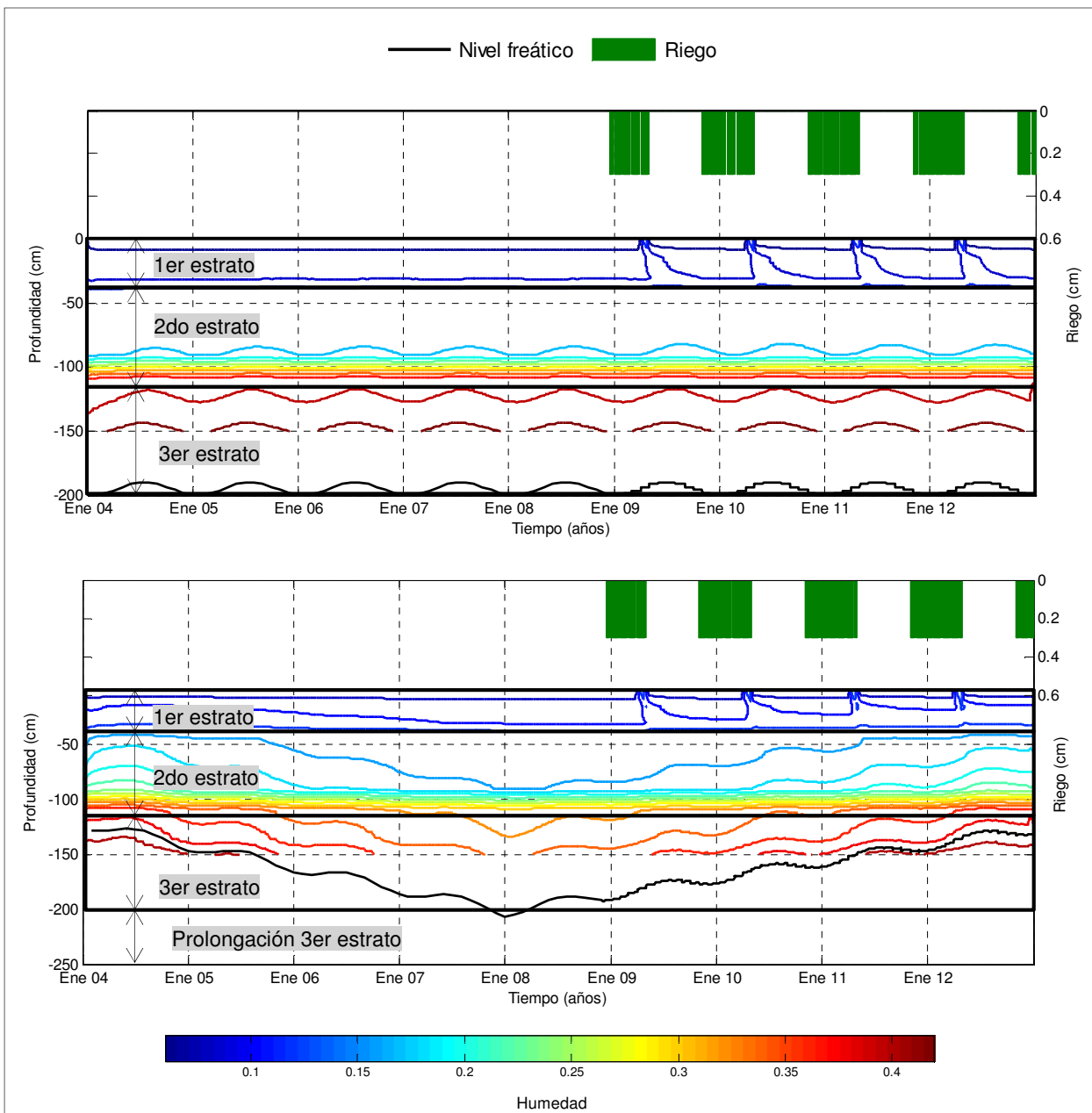


Figura 4.33 Comparación de contenidos de humedad en el perfil de suelo para el caso del perfil D21. Arriba se encuentra escenario bajo riego con nivel promedio, y abajo el escenario con riego, descenso y recuperación

Tabla 4.11 Contenidos de humedad en escenario con riego de 3 mm/día, descenso de 20 cm/año y recuperación de 15 cm/año para distintas zonas de vegetación, antes y durante el periodo de riego.

Profundidad (cm.b.n.t.)	Zona	Perfil	Contenido de humedad (%)						
			PMP	Base (año 2007)		Medio (año 2009)		Final (año 2011)	
				Previo al riego	En temporada de riego	Previo al riego	En temporada de riego	Previo al riego	En temporada de riego
20	A	H10	15% - 30%	18%	-	23%	29%	37%	41%
		H11	10% - 20%	2%	-	2%	4%	2%	4%
	B	H16	En torno a 20%	29%	-	29%	30%	31%	33%
	C	H19	20%-30%	24%	-	25%	27%	28%	33%
	D	H5	25% -35%	27%	-	28%	29%	30%	34%
		H21	15% - 25%	9%	-	9%	10%	10%	12%
E	H27	En torno a 20%	15%	-	15%	17%	16%	18%	
50	A	H10	15% - 30%	18%	-	28%	29%	29%	29%
		H11	10% - 20%	2%	-	26%	26%	28%	29%
	B	H16	En torno a 20%	29%	-	33%	33%	34%	35%
	C	H19	20%-30%	24%	-	30%	31%	34%	37%
	D	H5	25% -35%	27%	-	39%	39%	40%	41%
		H21	15% - 25%	9%	-	15%	15%	17%	17%
E	H27	En torno a 20%	15%	-	23%	23%	25%	25%	

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La vega de Jachucoposa ha sido afectada negativamente por la extracción de aguas subterráneas en los pozos de producción, afectando el caudal de la vertiente de afloramiento, el nivel de las lagunas permanentes y el nivel freático somero, y por consecuencia la vegetación de la zona (CEA, 2010).

Dado esto, CMDIC ha implementado en la zona una serie de medidas de mitigación, entre las que se encuentran el cambio de puntos de extracción de agua subterránea que inicialmente se utilizaban, el riego por aspersión y por surco aplicado a parte de la vegetación (30% del área total), y la recarga artificial de la vertiente (CEA, 2010; Tecknoriego, 2010).

Según esto, el sistema ha sido fuertemente intervenido, lo que se ha intentado representar con el modelo numérico desarrollado, a través de la modelación de las distintas zonas de vegetación bajo distintos escenarios hipotéticos.

Se presentan a continuación las principales conclusiones de este trabajo, que apuntan en primer lugar a describir funcionamiento del sistema en base a los resultados del modelo, y luego a discutir la validez y utilidad del modelo desarrollado.

5.1 Sobre los escenarios modelados y la eficacia de las medidas de mitigación

Para concluir en base a los resultados del modelo, acerca de las condiciones en que se encuentra el sistema de Jachucoposa, se comparó los contenidos de humedad simulados, con la estimación del PMP realizada para cada perfil, de modo de tener una primera aproximación de la humedad necesaria para la vegetación en cada sector.

Sin embargo, no es posible afirmar o predecir el estado de la vegetación, sólo a partir de la comparación de la humedad con el PMP, ya que la respuesta de la vegetación, depende de cuán adaptada se encuentre al sistema y de otras variables como el contenido de sales y la calidad del sustrato. Además, de estudios anteriores (CEA, 2010; Tecknoriego, 2010) es posible concluir que la vegetación posee un tiempo de recuperación bastante mayor al del nivel freático, el cual, según el escenario 3 y 4, determina de forma predominante el contenido de humedad del suelo.

Por otro lado, los contenidos de humedad han sido estimados mediante un modelo numérico, el cual entrega una aproximación de la realidad. Las estimaciones realizadas se consideran conservadoras desde el punto de vista de la vegetación, debido a los ajustes realizados en el proceso de calibración del modelo, por lo que los resultados entregados, corresponden a los más críticos para las plantas.

Según esto, se concluye que los resultados expuestos en este trabajo, representarían los casos más críticos para la vegetación de la vega, por lo que al encontrar valores de humedad menores a los de PMP según los sectores, se plantea que podría existir estrés hídrico, pero en ningún caso, se puede decir categóricamente que la vegetación estaría siendo afectada.

Teniendo en consideración esto, se concluye según el modelo de la zona no saturada desarrollado, para los distintos sectores de vegetación, lo siguiente:

Zona A. Esta correspondería a la zona más crítica del sistema dado sus suelos más arenosos, su lejanía con las lagunas y su topografía local (zona más cercana a los cerros y donde comenzaría la planicie).

Estas características, han provocado que los niveles freáticos en la zona, especialmente hacia el este (entre zona A y B), no se recuperen con el cambio de los pozos de producción, con lo que el escenario modelado más representativo correspondería al escenario 3.1, con descenso del nivel freático y riego. Sin embargo, a pesar de no apreciarse una recuperación de los niveles freáticos en los registros, si ha existido una disminución en la tasa de descenso, por lo que el escenario 3.1 correspondería a un caso más extremo que lo observado realmente. De este modo, se recomienda, para ser más precisos en los resultados obtenidos, modelar un nuevo escenario que muestre los cambios en las tasas de descenso.

Con los resultados de los escenarios modelados, se concluye que esta zona podría presentar estrés hídrico, no alcanzando a superar la humedad del punto de marchitez permanente. Para el año 2009, se tendría una humedad a los 100 cm de profundidad menor al 20% para las zonas más alejadas de las lagunas, que en el caso de continuar los descensos a la misma tasa, podrían llegar a valores en torno al 15%, con lo que se estima, que al continuar los descensos con una tasa menor, se tendrían valores en torno a un 18%, que podrían significar un estrés hídrico para la vegetación.

Por otro lado, esta zona con una tasa promedio de riego aplicado de 3,2 mm/día, con máximos de hasta 7,2 mm/día, no tendría un riego eficaz, ya que a pesar de tener un máximo de agua aplicado diario importante, la frecuencia de riego no se mantiene, y dado que se trata de suelos más arenosos, la pérdida de humedad en superficie por efecto de evaporación es más rápida. El caso más optimista de riego, con una tasa promedio de 5 mm/día, permite un aumento de alrededor de 7 puntos porcentuales del contenido de humedad a los 100 cm, el cual mantendría al límite la vegetación del PMP. Sin embargo, se tiene que el riego en la zona tendría un promedio más cercano a 3 mm/día, con lo que el aumento sería como máximo de 3%.

Como se menciona en los resultados del escenario 3.1, los efectos del descenso y del riego se suman, no existiendo una alteración en la forma de los perfiles de humedad de cada escenario, superponiéndose los efectos, por lo que en conjunto representarían lo expuesto anteriormente.

Zona B. Esta zona, a pesar de tener suelos más arcillosos, también corresponde a una zona crítica, ya que presenta una de las mayores tasas de descenso, y no se observa recuperación de los niveles. Además, esta zona no está afectada a riego, por lo que no se observarían en ella los efectos de las medidas de mitigación aplicadas en Jachucoposa, lo que ha provocado el descenso continuo de la vegetación.

Según el escenario 3.1 modelado, la humedad en la zona para los años 2007 y 2009 estarían en torno a un 30% para los 50 cm de profundidad y en torno a un 35% a los 100 cm de profundidad, lo que indicaría que se está por sobre el PMP estimado. Sin embargo, se evidencia en la zona una pérdida de la vegetación, la cual está asociada a

zonas de surgencias puntuales (CEA, 2010), por lo que se espera que para que ésta se encuentre en buenas condiciones, se debe estar en torno a la humedad de saturación cercana a un 40%.

Según los escenarios con riego (esc. 2 y 4), se observa que si se aplicara esta medida sería bastante eficaz, llegando en los estratos superficiales a la humedad de saturación, dado lo arcillosos de los suelos, los que permiten una mayor retención de la humedad. Sin embargo, se necesitan de todos modos, tasas mayores de aplicación a la promedio de 3 mm/día, que equivale a 30 mil m³, para lograr el aumento necesario en la humedad.

Zona C. En esta zona existen sectores bajo riego, correspondientes al 18% de su área. Además se observan tasas de descenso en torno al 40% con nula o baja recuperación. Según esto, se tendrían humedades de entre 30% y 35% para el año 2009 a los 100 cm de profundidad, con lo que se observa que no existiría mayor estrés hídrico en la zona, lo que se manifiesta en la mantención de la cobertura vegetal en la mayor parte del área, a pesar de los descensos. Sin embargo si los niveles siguiesen bajando podría llegarse a la humedad crítica para las plantas.

Las áreas con riego, poseen una tasa de aplicación promedio de 2,2 mm/día, con un máximo de 4,7 mm/día. Dado que se trata de suelos franco arcillosos-limosos, se tiene que la frecuencia de riego no afectaría tanto la medida como en el caso de los suelos arenosos, por lo que se espera que el riego aplicado sea efectivo, lo que queda de manifiesto en los aumentos de cobertura en las zonas regadas.

Zona D. Esta zona se encuentra cercana a lagunas superficiales, las que regulan el nivel freático y la vegetación, por lo que, al recuperar éstas su nivel y espejo de agua por las medidas de mitigación, afectarían positivamente a la recuperación del área.

Se ha observado en esta zona, una clara recuperación de los niveles freáticos de 10 cm/año, con lo que actualmente se alcanzarían los niveles freáticos inicialmente registrados. Por otro lado, esta zona se encuentra afecta a riego, con una tasa promedio de 4,5 mm/día, con lo que se alcanzaría la saturación en las zonas más cercanas a las lagunas, no presentándose estrés hídrico en la zona.

Dado lo anterior, esta zona no debiese necesitar más riego, ya que los niveles freáticos y la vegetación se habrían recuperado, presentando aumentos en su cobertura (CEA, 2010). Sin embargo, dado que la vegetación se recupera de forma más lenta que los niveles, se recomienda disminuir la tasa de riego para mantener los niveles de vegetación, pero no suspenderlo de inmediato.

Por otro lado, se tiene que las zonas más lejanas de las lagunas poseen suelos más arenosos y menor nivel, por lo que son más críticas y susceptibles a una baja en la vegetación. Sin embargo, se observa que las medidas de riego han sido eficaces en la zona según los estudios de cobertura y riqueza (CEA, 2010), lo que se condice con los resultados del escenario 2 y 4 para esta zona.

Zona E. Esta zona posee un descenso de los niveles freáticos de aproximadamente 60 cm/año, con una tasa de recuperación de 38 cm/año, con lo que los niveles freáticos estarían llegando a fines del 2012 a los niveles inicialmente registrados. Sin embargo, al

igual que en los casos anteriores, la vegetación aquí no responde instantáneamente a la recuperación de los niveles freáticos, por lo que se ha observado una disminución de la cobertura vegetal y un cambio en el tipo de vegetación (CEA, 2010).

Esta zona no está sometida a riego, pero con una tasa de aplicación de 5 mm/día se llegaría a la humedad necesaria para superar el PMP, con lo que se podría recuperar la vegetación de la zona. Sin embargo, esta zona es la de mayor área y sería bastante costoso regarla completamente, con un volumen de agua necesario por temporada de aproximadamente 550 miles de m³ para una tasa de 5 mm/día y 60 miles de m³ para una tasa de 3 mm/día.

5.2 Con respecto a la utilidad del modelo desarrollado

El modelo desarrollado para la zona no saturada, puede ser utilizado para analizar las medidas de mitigación a aplicar en Jachucoposa, estudiando por ejemplo, en el escenario con riego tasas reales aplicadas, estudiando su eficacia para mejorar el sistema. Se describe en los resultados un comportamiento promedio, pero se puede fácilmente manejar el modelo para representar otros casos representativos de la zona.

El modelo entrega la respuesta de la humedad del suelo ante los distintos escenarios, sin embargo, es importante considerar que la vegetación responde a todas las condiciones locales, como temperaturas, vientos, salinidad, entre otros factores, por lo que el modelo no predice lo que pasaría con la vegetación. Además, como se menciona anteriormente, el efecto del aumento de los niveles o de la humedad en la zona, no se vería reflejado instantáneamente en la vegetación.

Para tener una mejor representación de lo que sucedería con la vegetación, se sugiere estudiar la relación entre la profundidad de las raíces con el nivel freático (y frente de humedad), ya que el punto de marchitez permanente utilizado es sólo una medida referencial de la humedad necesaria que las plantas necesitan para aprovechar el agua en el suelo, y no se puede a través de él, concluir de forma definitiva sobre si la plantas presentarán o no estrés hídrico.

Por último, la salinidad en el sistema es importante, junto con los procesos de lavados de sales dados por el riego y las precipitaciones (CEA, 2010). Dado esto, se sugiere complementar el modelo desarrollado, simulando la concentración de sales en el sistema. Hydrus se escogió considerando este punto, ya que permite además de modelar flujo, resolver el problema de transporte de sales.

5.3 Con respecto a la validez del modelo desarrollado

El modelo desarrollado fue calibrado para las condiciones de humedad observadas en el periodo 2007- 2008. Sin embargo, es necesario validar los resultados obtenidos bajo los distintos escenarios, para nuevas mediciones de humedad.

El proceso de calibración no contó con buenos datos de entrada con respecto a los parámetros de suelo necesarios para el modelo. De hecho, las humedades medidas se debieron ajustar un 20% según lo observado en la bibliografía, al no estar calibradas por muestras de laboratorio. Dado esto, para validar los resultados, se sugiere

corroborar el ajuste realizado, midiendo en laboratorio la humedad real de muestras de suelo, en las zonas en que se mida la humedad en terreno.

Metodológicamente hablando, es necesario mejorar los estudios de suelo para obtener una calibración más representativa de la realidad, pudiendo así ajustar las curvas características de los suelo según los datos de terreno de mejor manera. Idealmente, para este tipo de estudios, es necesario realizar muestreos de suelo, que permitan hacer pruebas de succión en laboratorio, para estimar de mejor forma, las curvas características suelo-agua.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

AHUMADA, M. y FAÚNDEZ, L. 2009. Guía Descriptiva de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altiplánica (SVAHT). Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero.

ANABALÓN, DAVID. 1998. Construcción y puesta en marcha de un sistema experimental de tratamiento suelo-acuífero (SAT). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

AQUEAVEO. Water Modeling Solutions. [en línea] <http://www.aquaveo.com/> [Consulta: octubre 2012]

ARBAT, G., PUIG-BARGUÉS, J., DURAN-ROS, M., BARRAGÁN, J. y RAMÍREZ, F. 2007. Distribución del agua en el suelo en riego por superficie: Aplicación del código HYDRUS. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero.

AVES DE CHILE. 2013. [en línea] <http://www.avesdechile.cl/1region.htm> [Consulta: julio 2013]

CALVO, M. A., POZO, V., ROJAS, M. F. y LILLO, A. 2000. Protección de humedales (vegas y bofedales) en el Norte de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

CARSEL, ROBERT y PARRISH, RUDOLPH. 1988. Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. WATER RESOURCES RESEARCH, Vol. 24, N° 5, Pages 755-769, May 1988

CENTRO DE ECOLOGÍA APLICADA LTDA. 2010. Modelación Ecosistémica Vega Jachucoposa. Salar de Coposa. Estudio para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

COMSOL. COMSOL Multiphysics. Multiphysics Modeling. [en línea] <http://www.comsol.com/> [Consulta: octubre 2012]

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN, DGA. 2001. Actualización delimitación de acuíferos que alimentan Vegas y Bofedales, Región de Antofagasta. S.I.T. N°76. Santiago.

DICTUC INGENIERÍA. 2005. Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa. Estudio para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

DIVISIÓN DE RECURSOS NATURALES Y BIODIVERSIDAD (MMA), SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO y DEPARTAMENTO DE PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS (DGA). 2011. Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales andinos.

ESPINOZA, CARLOS. 2005. Tema 6: Flujos en medios porosos no saturados. Apunte curso CI51J, Hidráulica de Aguas Subterráneas y su aprovechamiento. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

FEFLOW. [en línea] <http://www.feflow.info/> [Consulta: octubre 2012]

GARCÍA-HUIDOGRO, F. 2007. Modelación numérica preliminar del acuífero costero de la quebrada Los Choros (IV región). Tesis para optar al grado de magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídricos, Universidad de Chile.

GOBERNACIÓN PROVINCIA DEL TAMARUGAL. 2012. Información de Turismo. Ministerio del Interior y Seguridad Pública.

GP CONSULTORES LTDA. 2007. Fase I: Diagnóstico de las variables hídricas relevantes del Sistema Jachucoposa. Parte 1, 2 y 3. Estudio para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

GP CONSULTORES LTDA. 2008. Fase II: Seguimiento del estado de las variables hídricas relevantes del sistema Jachucoposa. Estudio para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

HARPER, D., ZALEWSKI, M. y PACINI, N. 2008. Ecohydrology: Processes, Models and Case Studies. And approach to the sustainable management of water resources. Netherland: CAB Internacional.

HERRERA, 2000. Modelación numérica de flujo en medios porosos saturados y no saturados. Tesis para optar al grado de magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídricos, Universidad de Chile.

HONG, S.-H. 2002. Soil salinity in arid on-flooded riparian areas. New Mexico Institute of Mining and Technology, Department of Earth and Environmental Science.

KAMPF, S., y TYLER, S. 2006. Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Advances in Water Resources* 29, 336-354.

KUMAR, C. 2003. Groundwater Flow Models. Roorkee: National Institute of Hydrology.

LAJOS, BLASKÓ. 2008. Soil science. University of Debrecen, within the framework of the SROP 4.1.2 project

MAÑAS, F. M., FUSTER, P. L., y BELMONTE, A. 2005. Agua y Agronomía. Madrid, España: Mundi Prensa

PC-PROGRESS, Engineering Software Developer. 2008. Hydrus. [en línea] <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d> [Consulta: octubre 2012]

QUEVEDO, D. y FRANCÉS, F. 2008. A conceptual dynamic vegetation-soil model for arid and semiarid zones. *Hydrology and Earth System Sciences* .

RAMSAR. 2011. Convención de Ramsar sobre los humedales. Obtenido de <http://www.ramsar.org/>

RAWLS, W., BRAKENSIEK, D. y SAXTON, K. 1982. Estimation of soil water properties. TRANSACTIONS of the ASAE, Vol. 25, N°5, Pages 1316-1320 and 1328.

SECRETARÍA DE LA CONVENCION DE RAMSAR. 2010. Uso racional de los humedales: Conceptos y enfoques para el uso racional de los humedales. Gland, Suiza: Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ta edición, vol.1.

SCIENTIFIC SOFTWARE GROUP. Groundwater software [en línea]
http://www.scisoftware.com/environmental_software/index.php?cPath=21. [Consulta: octubre 2012]

ŠIMŮNEK y ŠEJNA. 2011. HYDRUS, User Manual version 2. Prague, Czech Republic: PC-Progress, 2011.

TECKNORIEGO. 2010. Sistema de regadío y recuperación bofedal de Jachucoposa, salar de Coposa. Informe final temporada 2009-2010. Estudio para Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

TINDALL, J. A. y KUNKEL, J. R. 1999. Unsaturated Zone Hydrology for Scientist and Engineers. Prentice Hall.

TORO, M. 2009. Evaluación de Filtraciones en Presas. Modelación numérica de flujo en medios porosos saturados y no saturados. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

TORRES, R. y GRAU, J. 2007. Introducción a la mecánica de Fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics. España: ADDLINK SOFTWARE CIENTIFICO.

ZNS. 2011. Estudios de la Zona no Saturada del Suelo Vol. X - ZNS'11. Martínez, José Y Sánchez, Nilda (eds.). Salamanca, España

ZNS. 2009. IX Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo. ZNS'09. Silva, Orlando Y Carrera, Jesús (eds.) Barcelona, España.

ANEXOS

Anexo A: Registro de riego aplicado en sistema de Jachucoposa

Este anexo se encuentra en digital en archivo excel. Muestra los volúmenes en m³ y tasas de riego aplicadas en los distintos sectores de riego para las temporadas 2008-2009 y 2009-2010.

Anexo B: Registros de variables meteorológicas en estaciones Salar Coposa y Coposa

Este anexo se encuentra en digital en archivo excel. Se tienen los registros medidos para la precipitación, temperaturas, vientos y evaporación.

Anexo C: Mediciones de perfiles de humedad bimensuales en sistema Jachucoposa

Este anexo se encuentra en digital en archivo Excel. Corresponden a los resultados de contenido de humedad, medidos por CCHEN en las campañas de 2007-2008, realizadas en los perfiles verticales de suelo en las 29 punteras de aluminio.

Anexo D: Perfiles de humedad calibrados

Este anexo se encuentra en digital en archivo excel. Se muestran el contenido de humedad en el perfil de suelo para cada caso y los gráficos de humedades simuladas v/s medidas para invierno y verano.

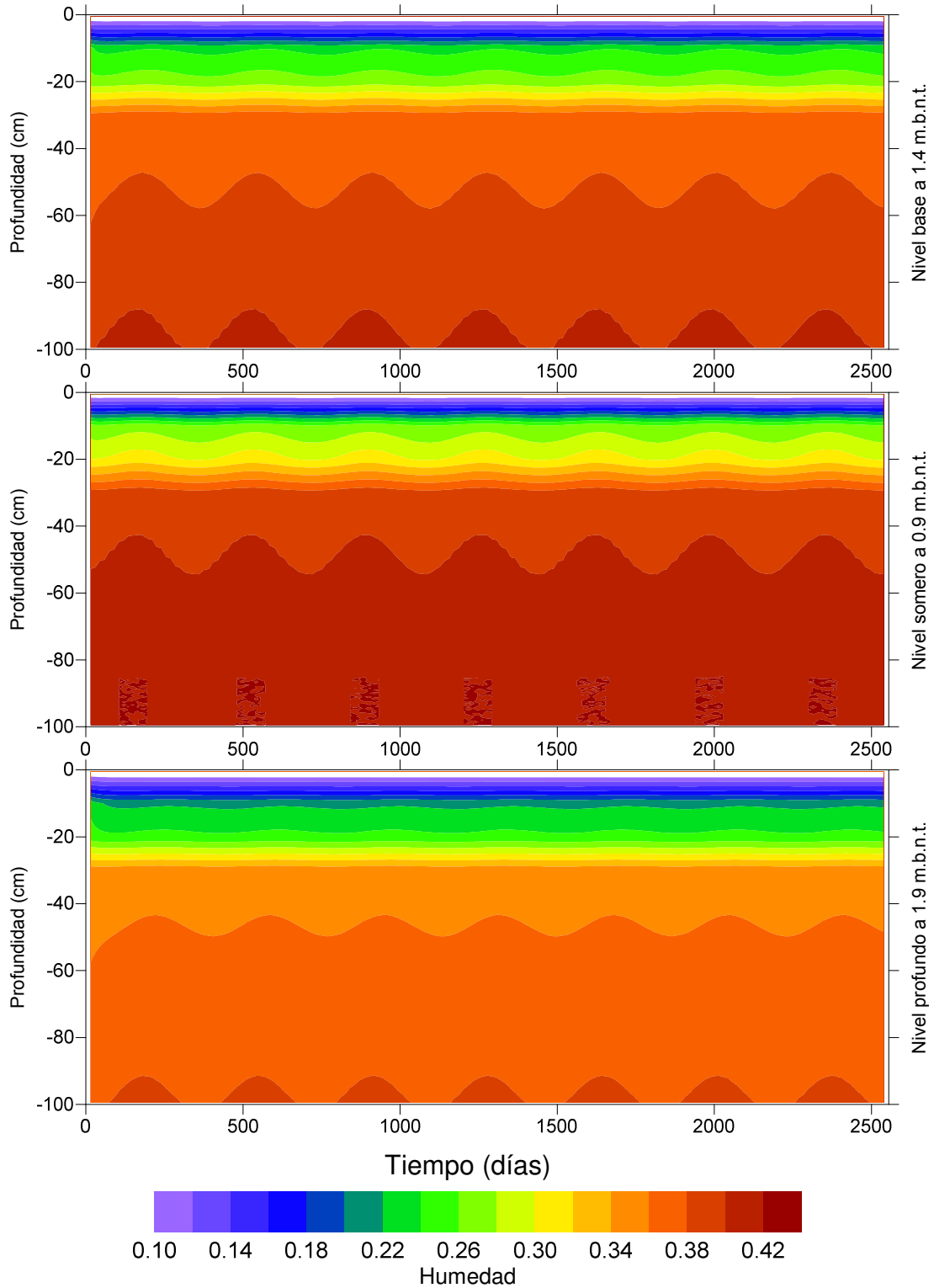
Anexo E: Series de datos de entrada para escenarios de modelación perfiles representativos

Este anexo se encuentra en digital en archivo Excel y consiste en los valores de entrada para el modelo Hydrus.

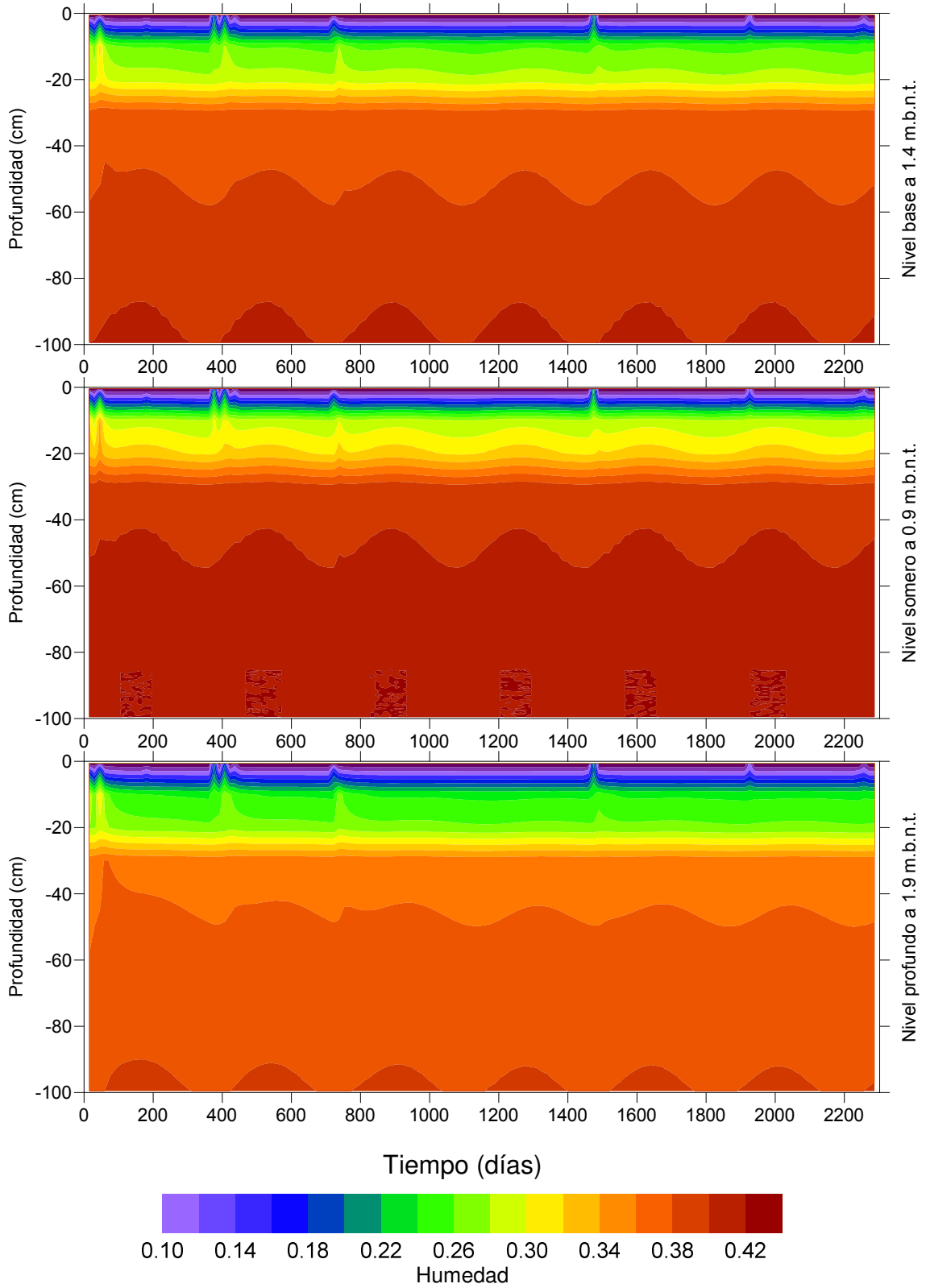
Anexo F: Contenido de humedad v/s tiempo en el perfil de suelo para escenarios de modelación

Anexo F.1 Perfil D-5

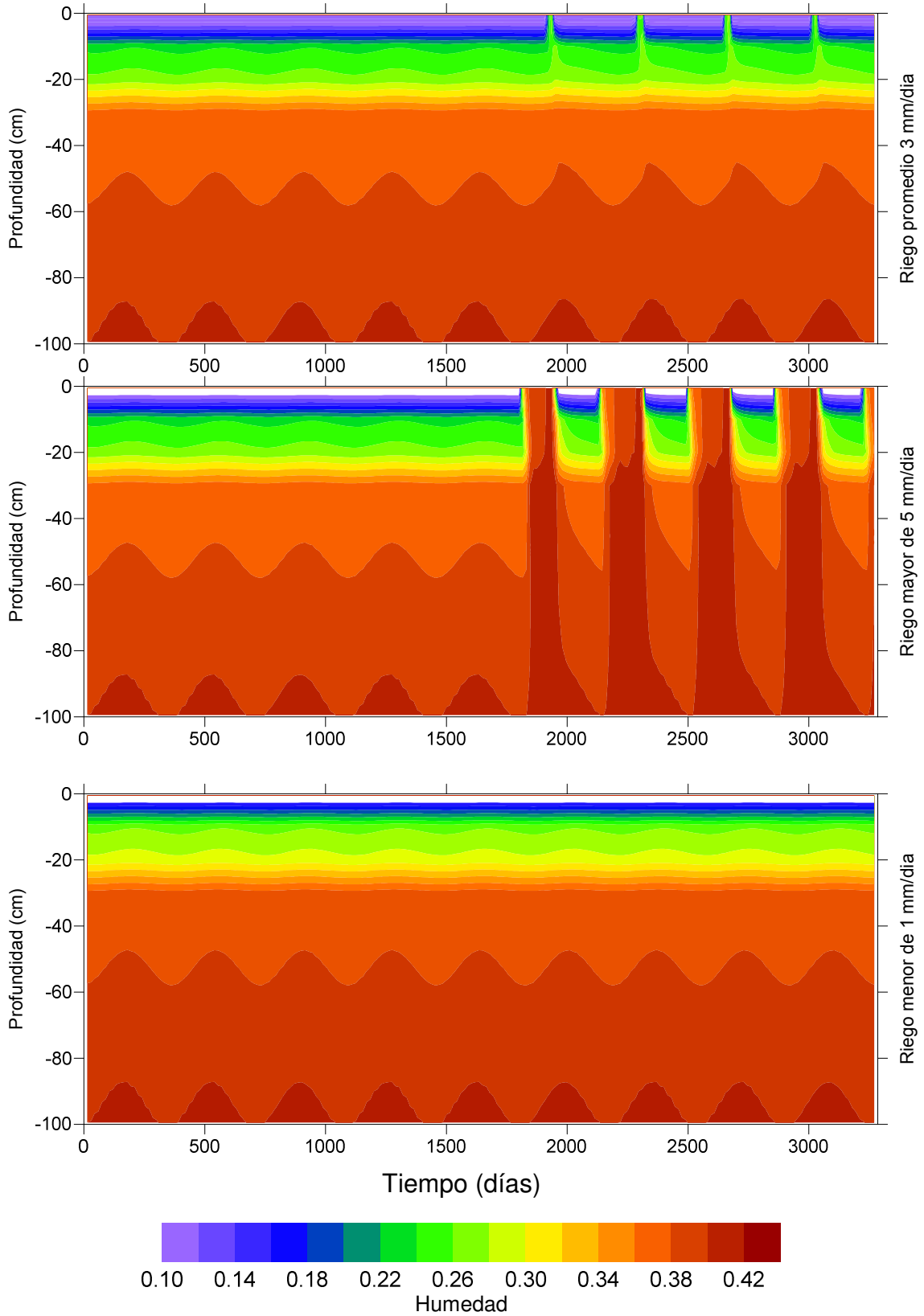
Caso Base



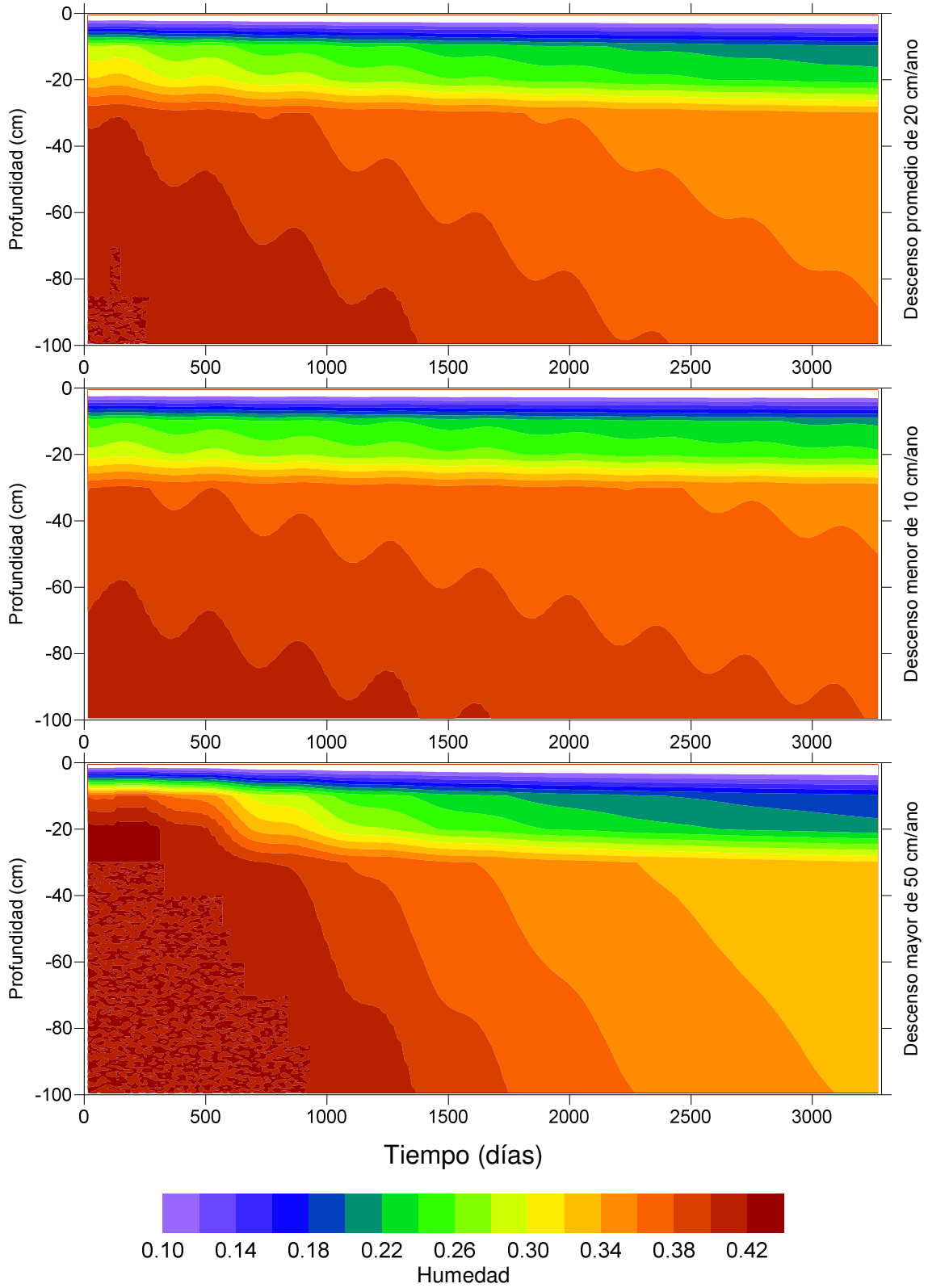
Caso con precipitaciones



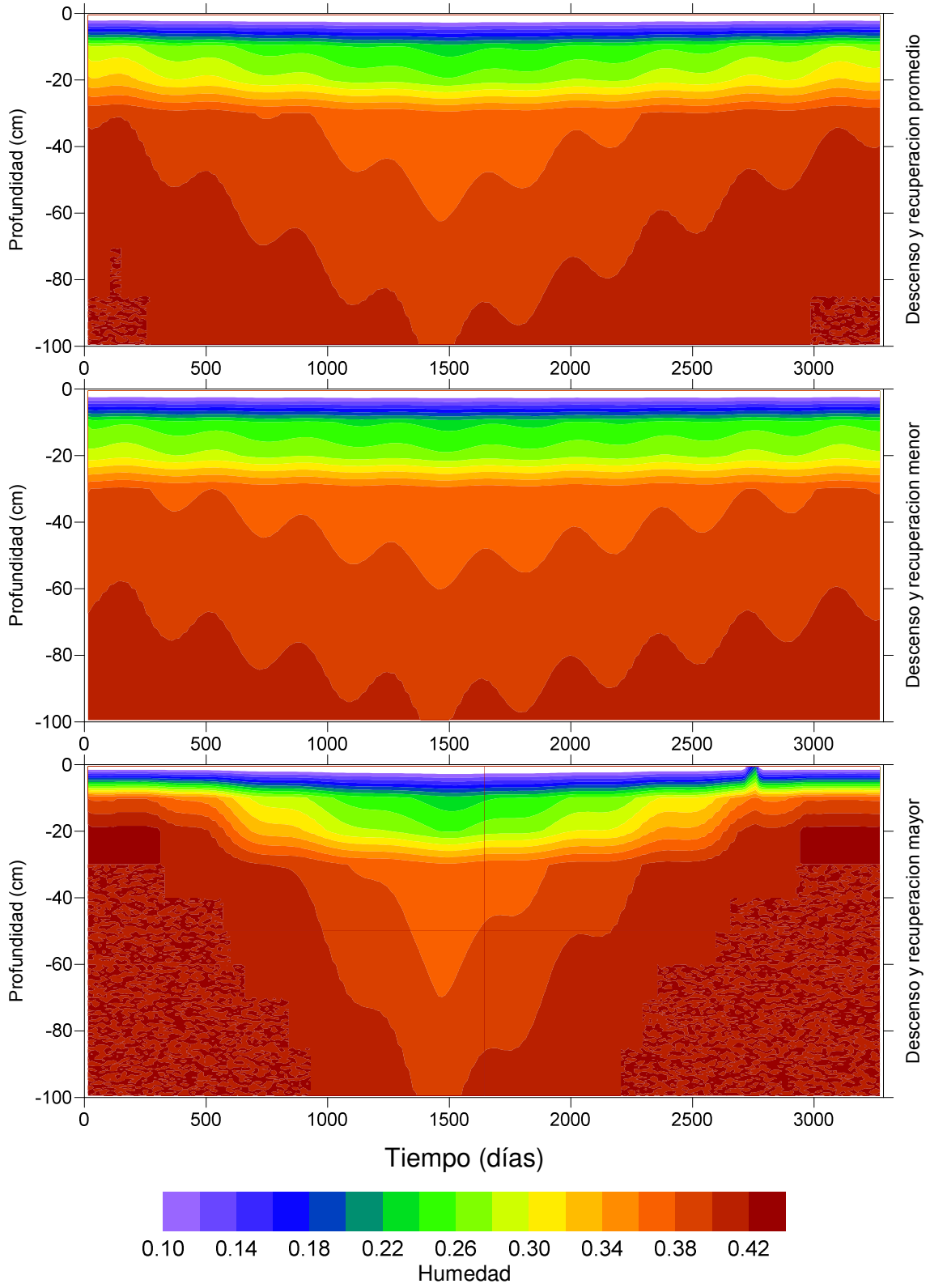
Caso con riego



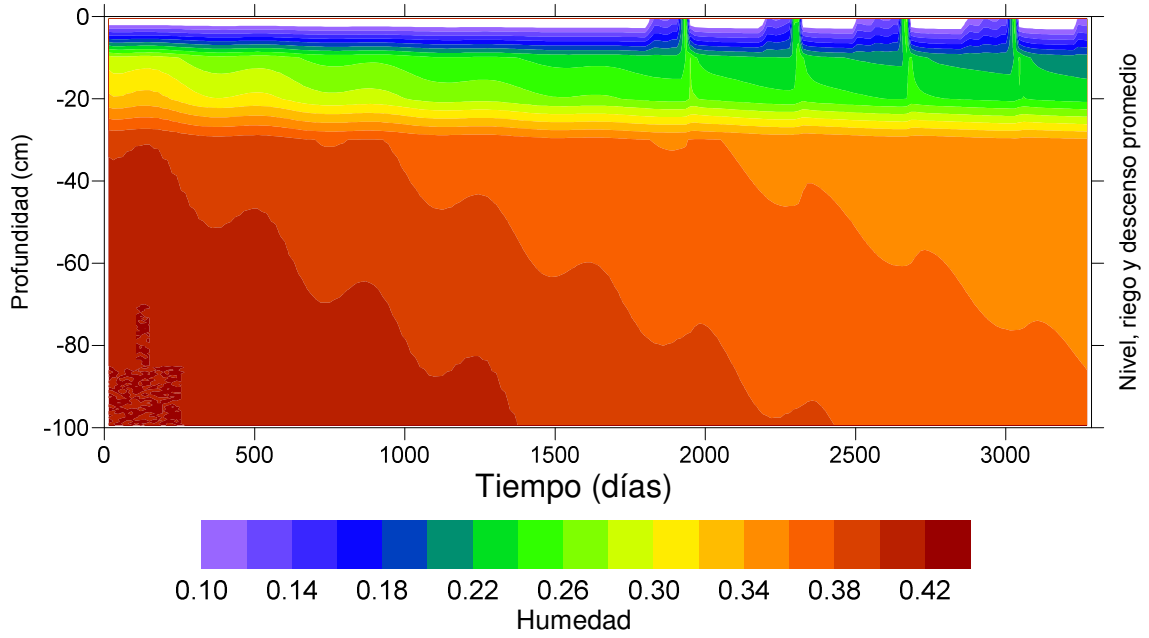
Caso con descenso



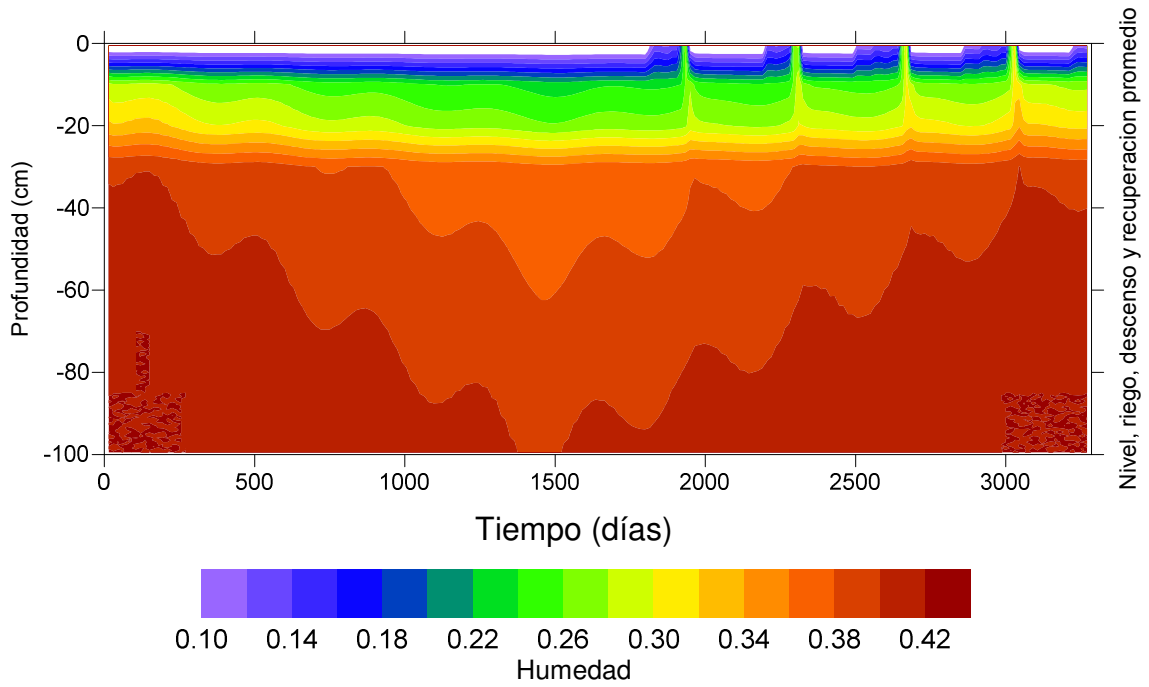
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso

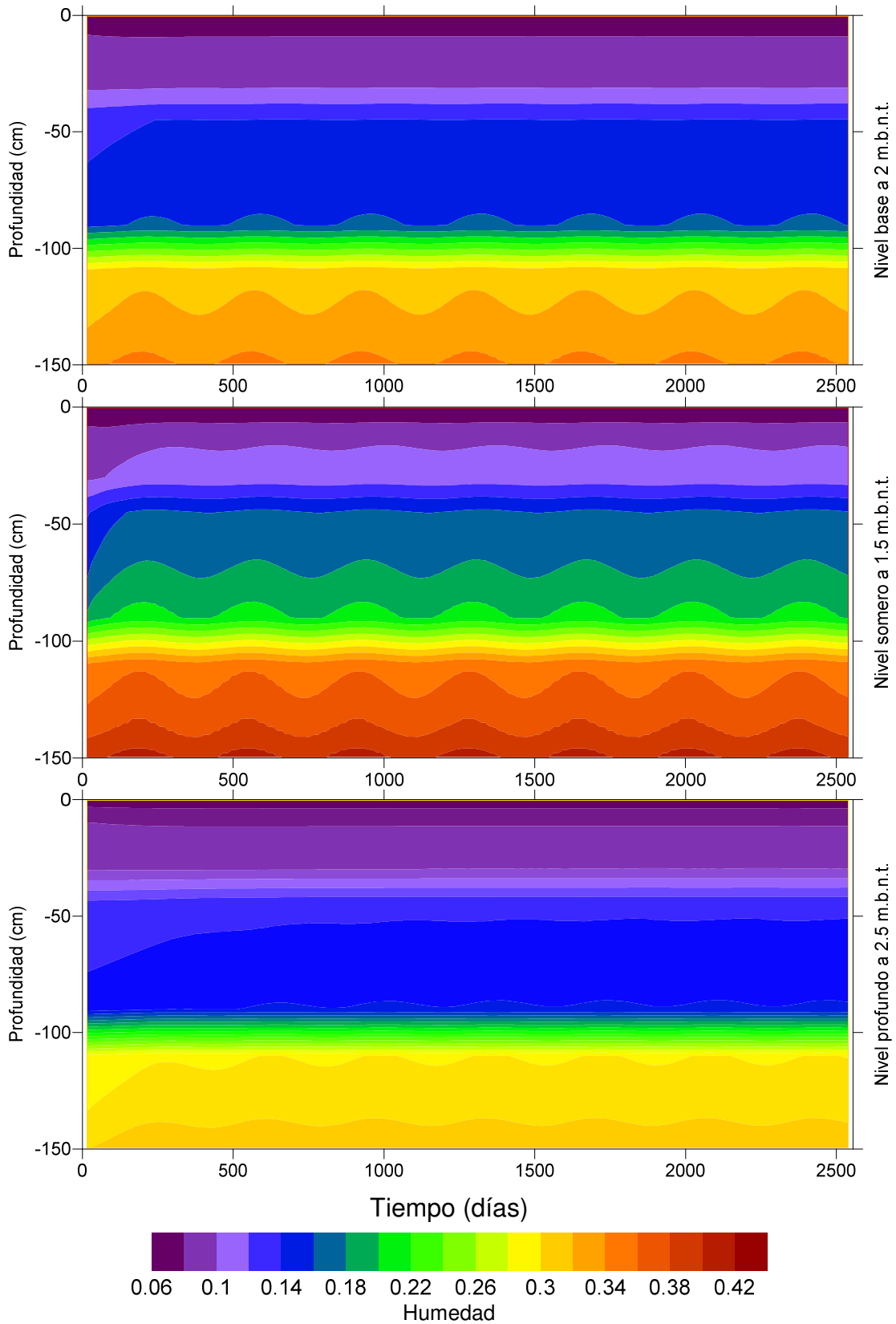


Caso con riego, descenso y recuperación

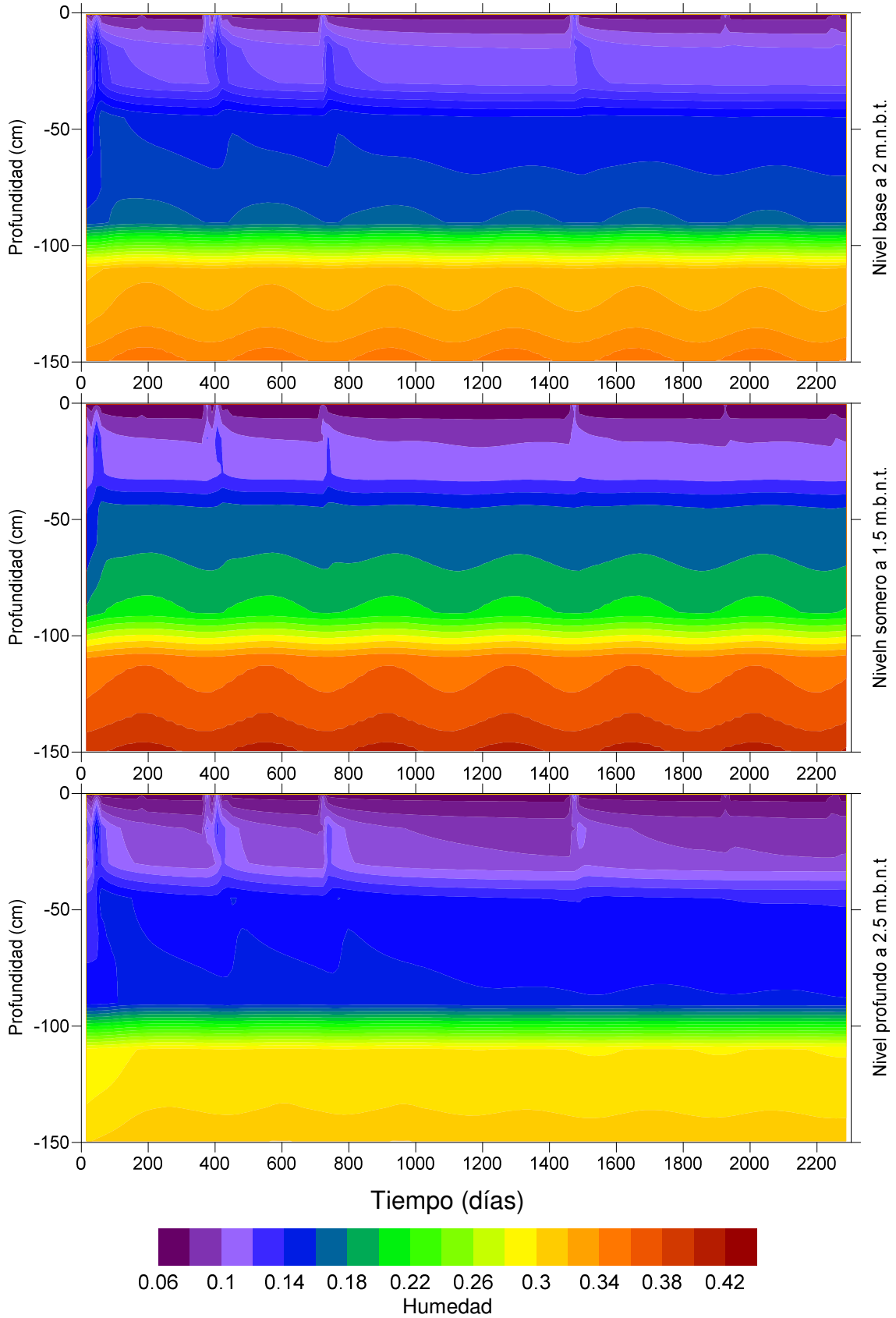


Anexo F.2 Perfil D-21

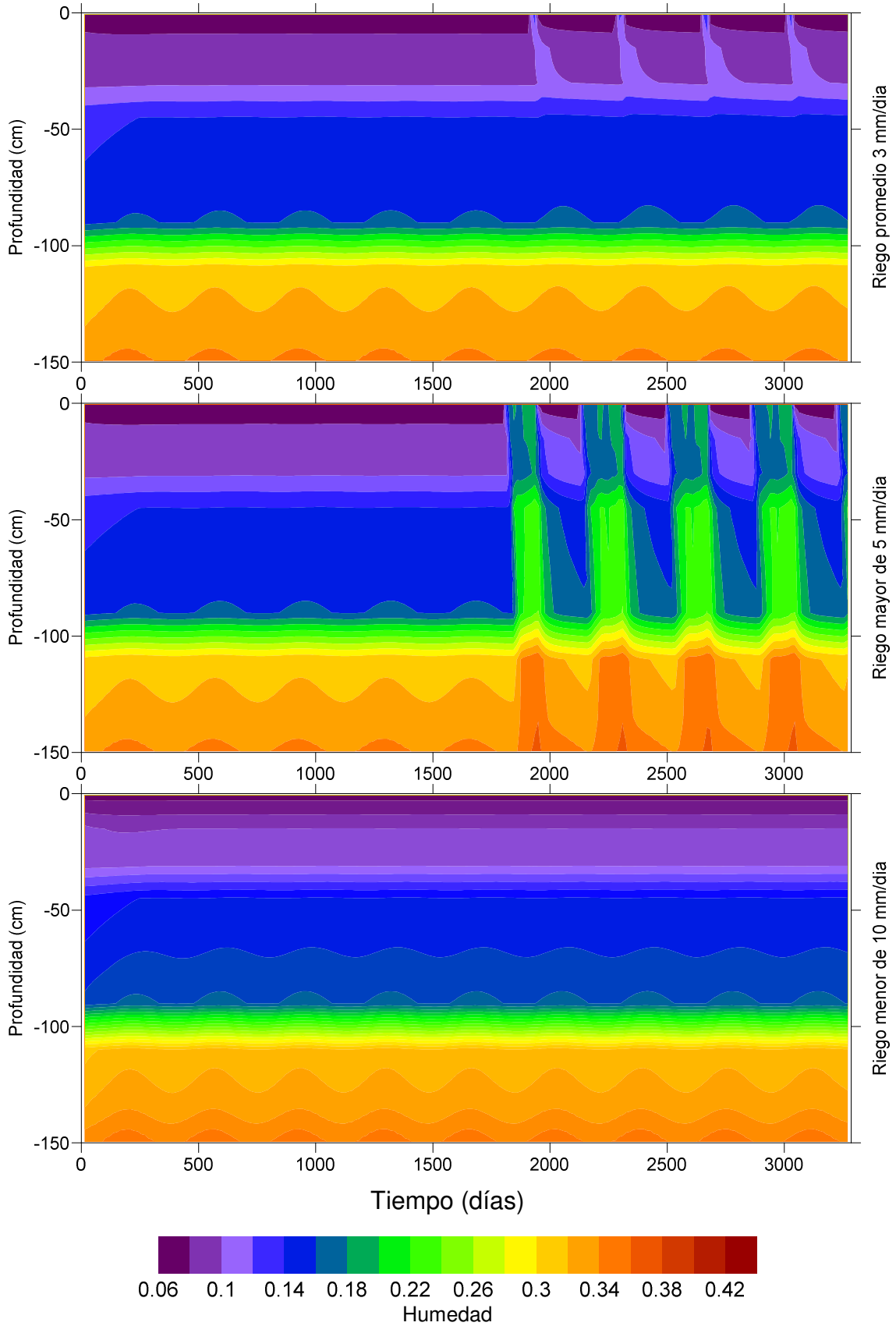
Caso Base



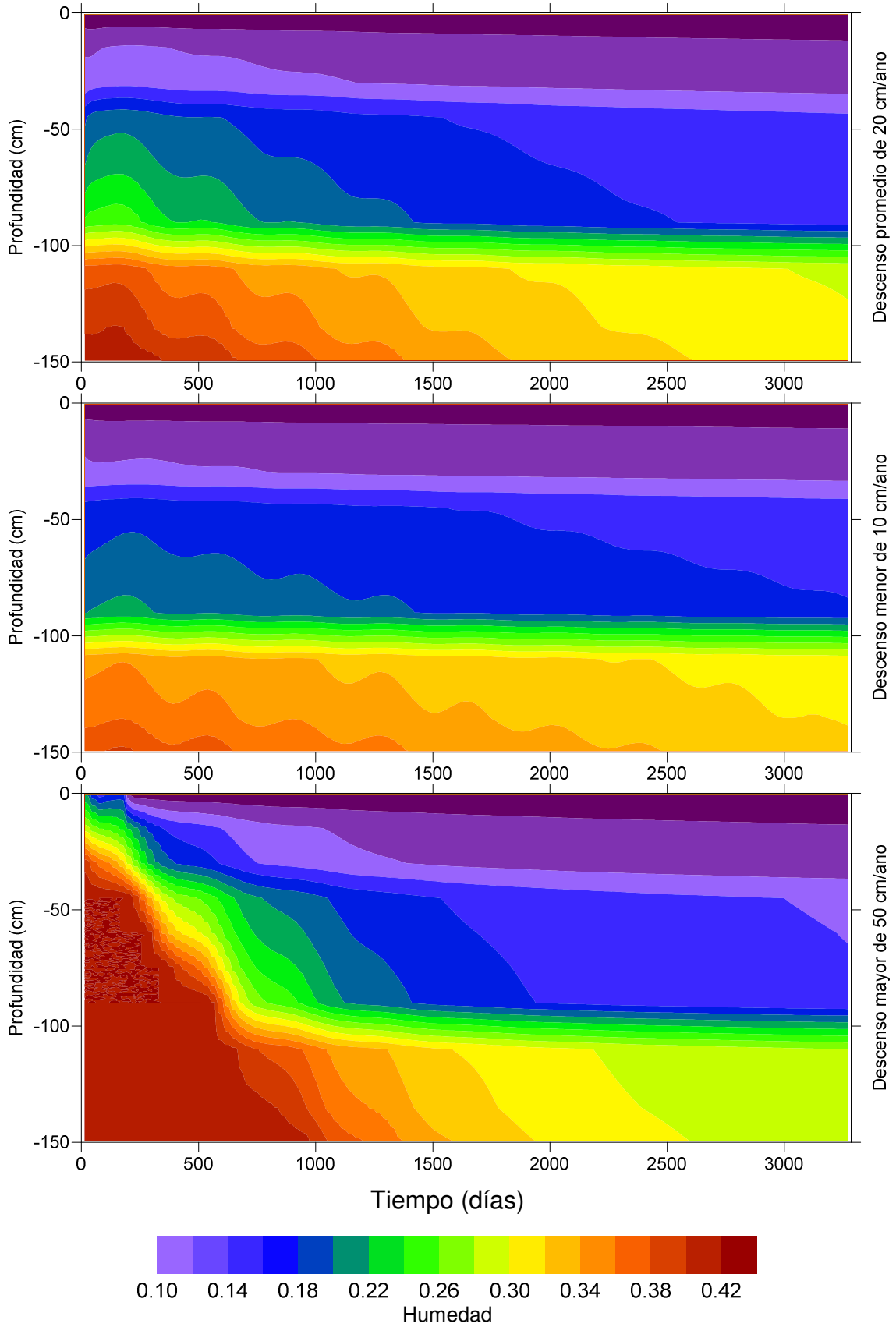
Caso con precipitaciones



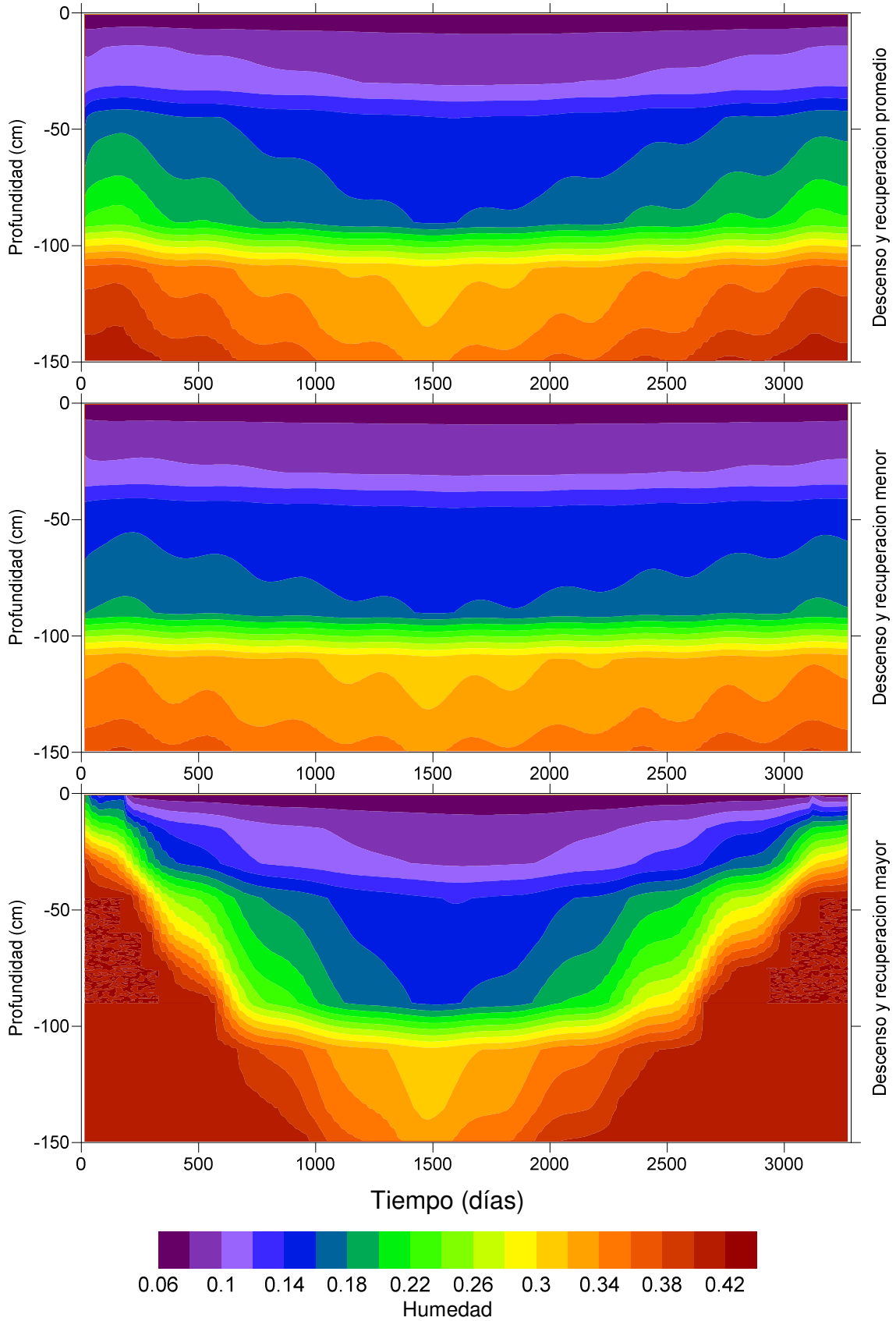
Caso con riego



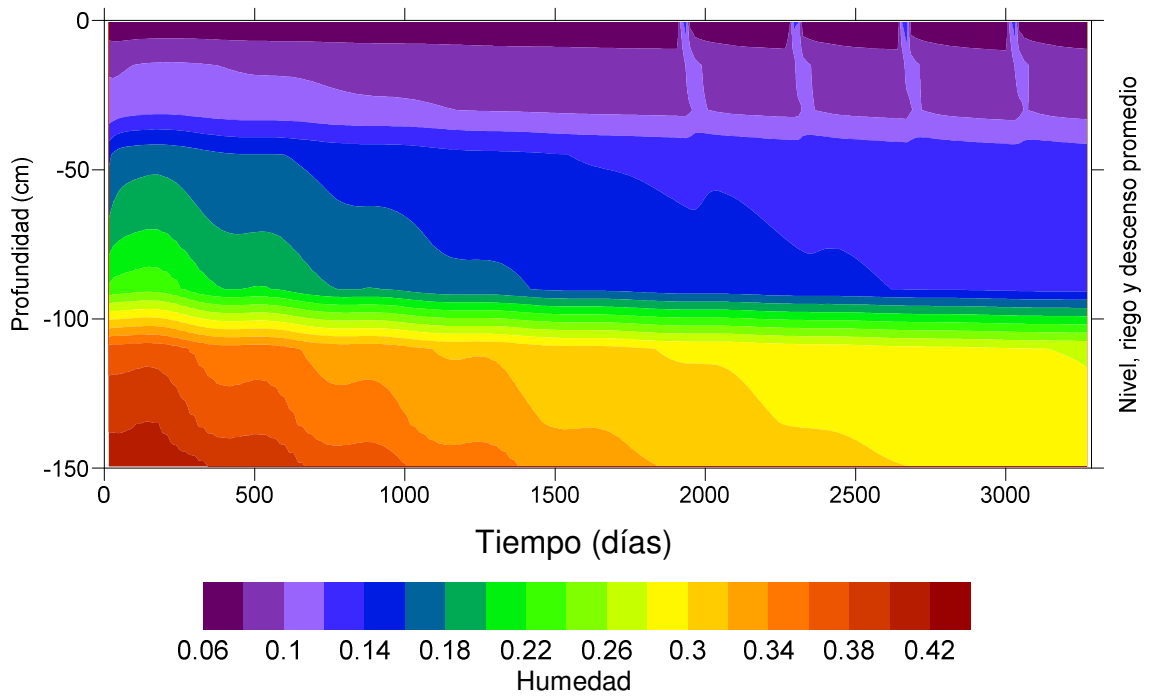
Caso con descenso



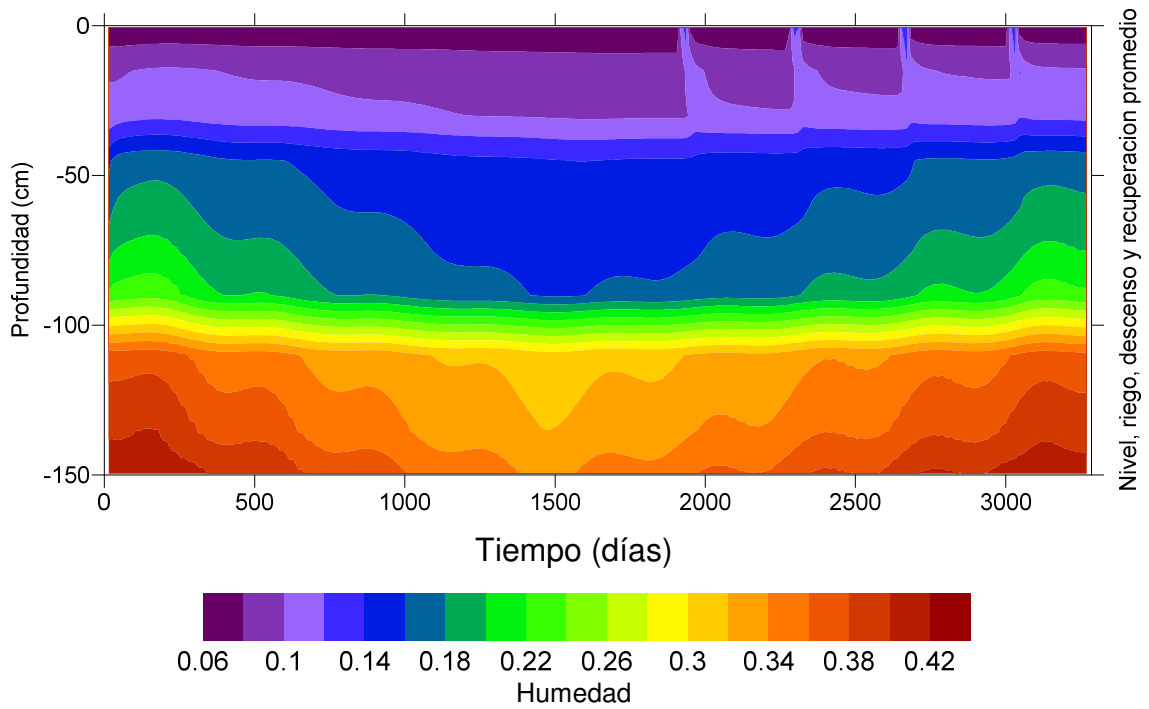
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso

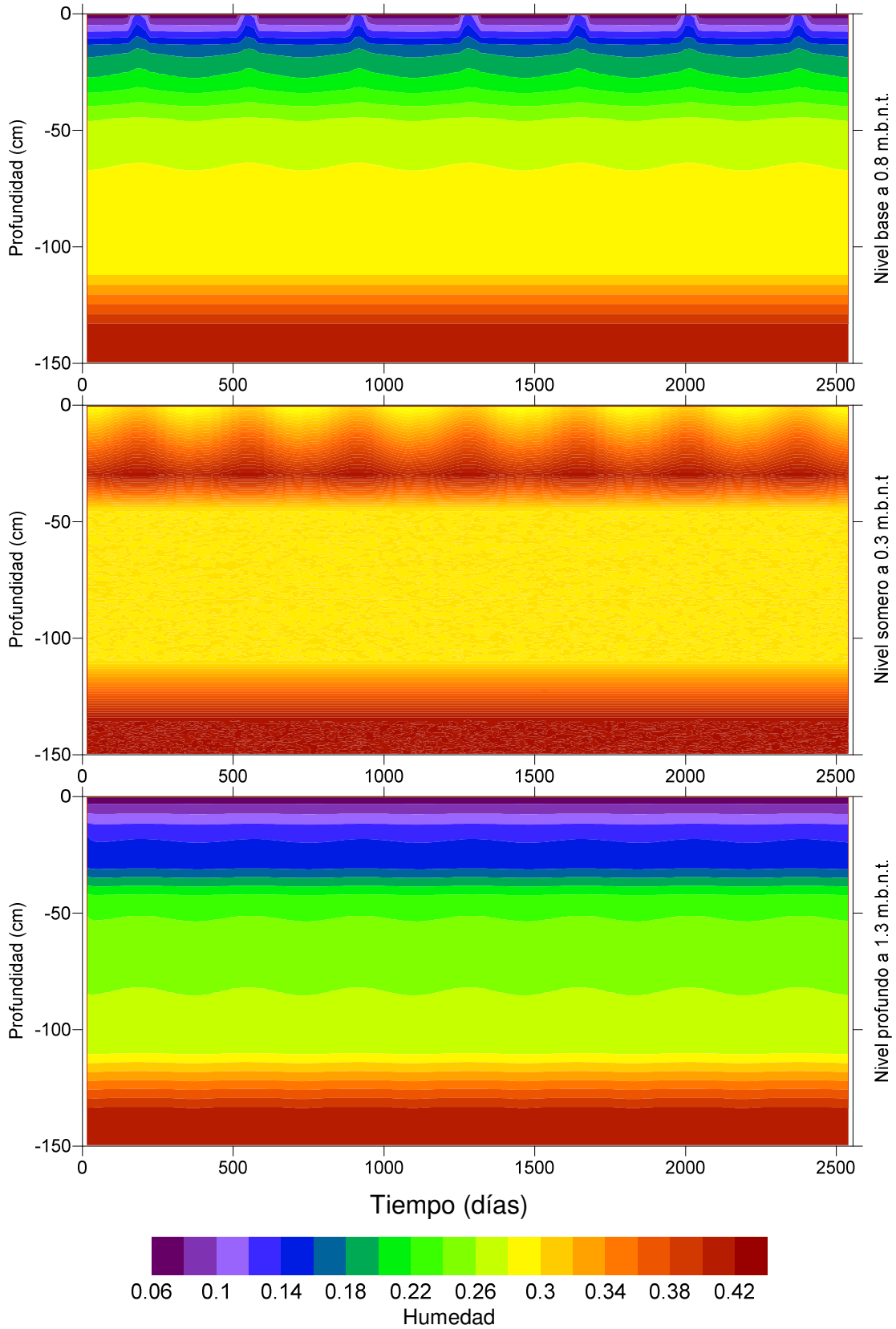


Caso con riego, descenso y recuperación

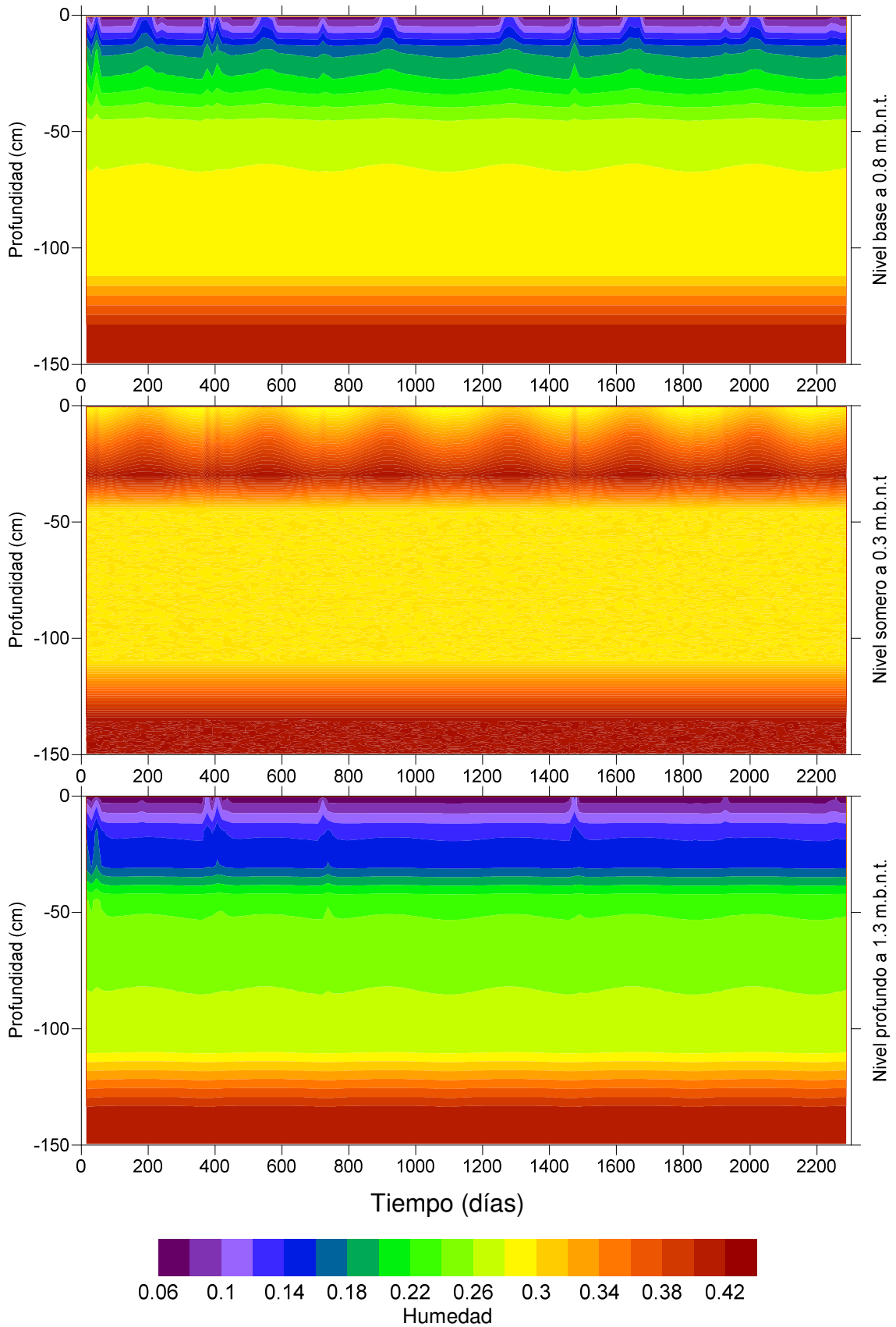


Anexo F.3 Perfil A-10

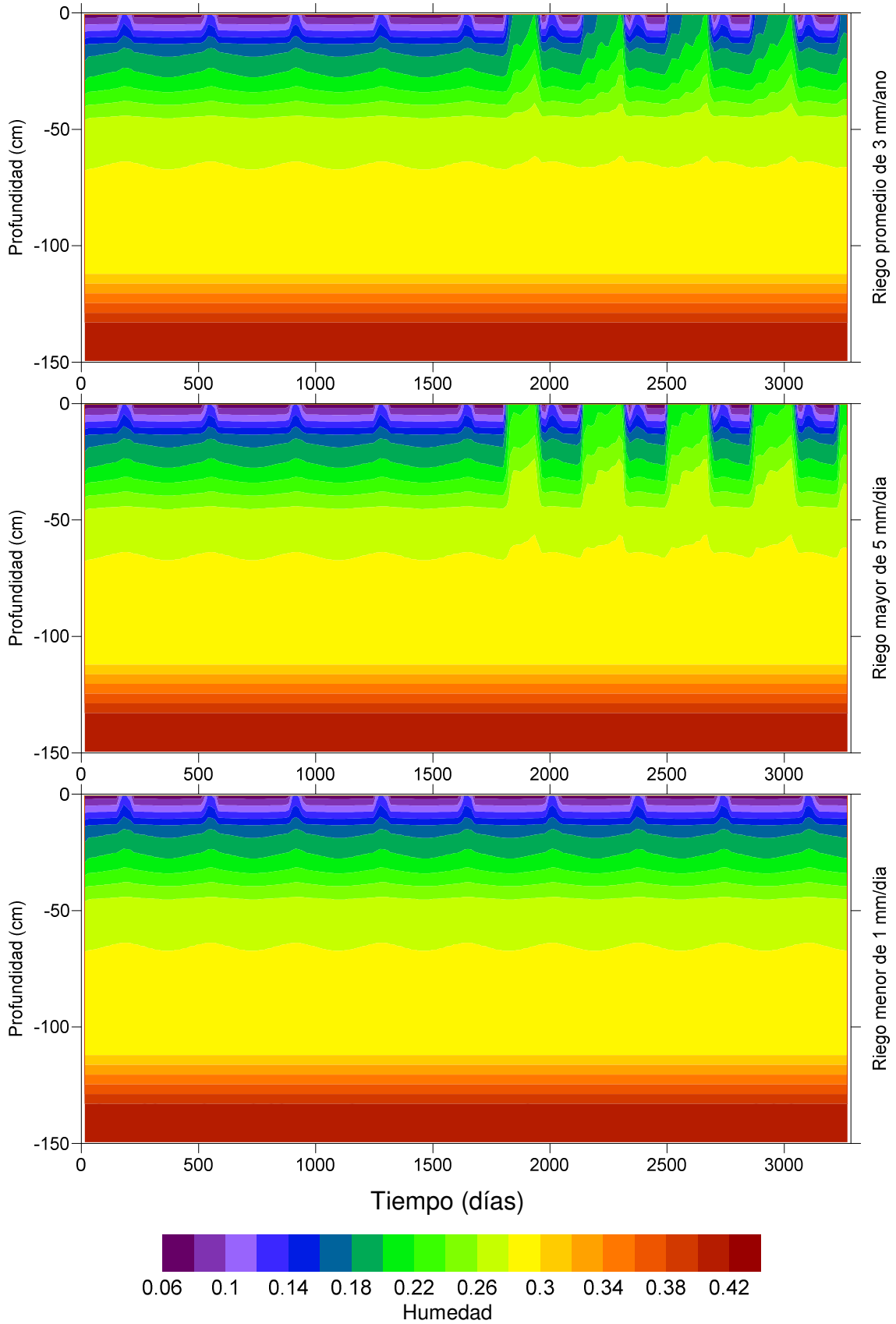
Caso Base



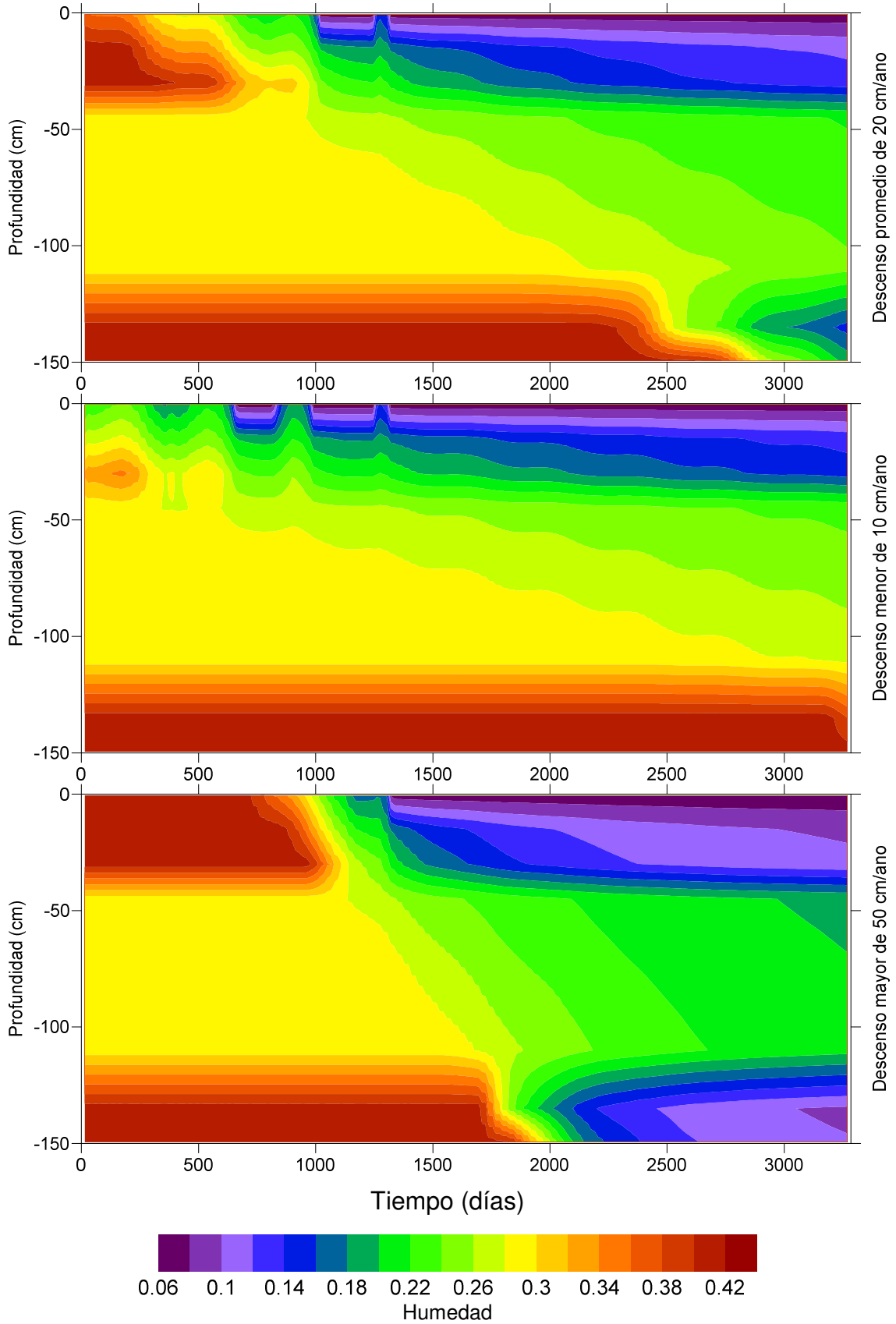
Caso con precipitaciones



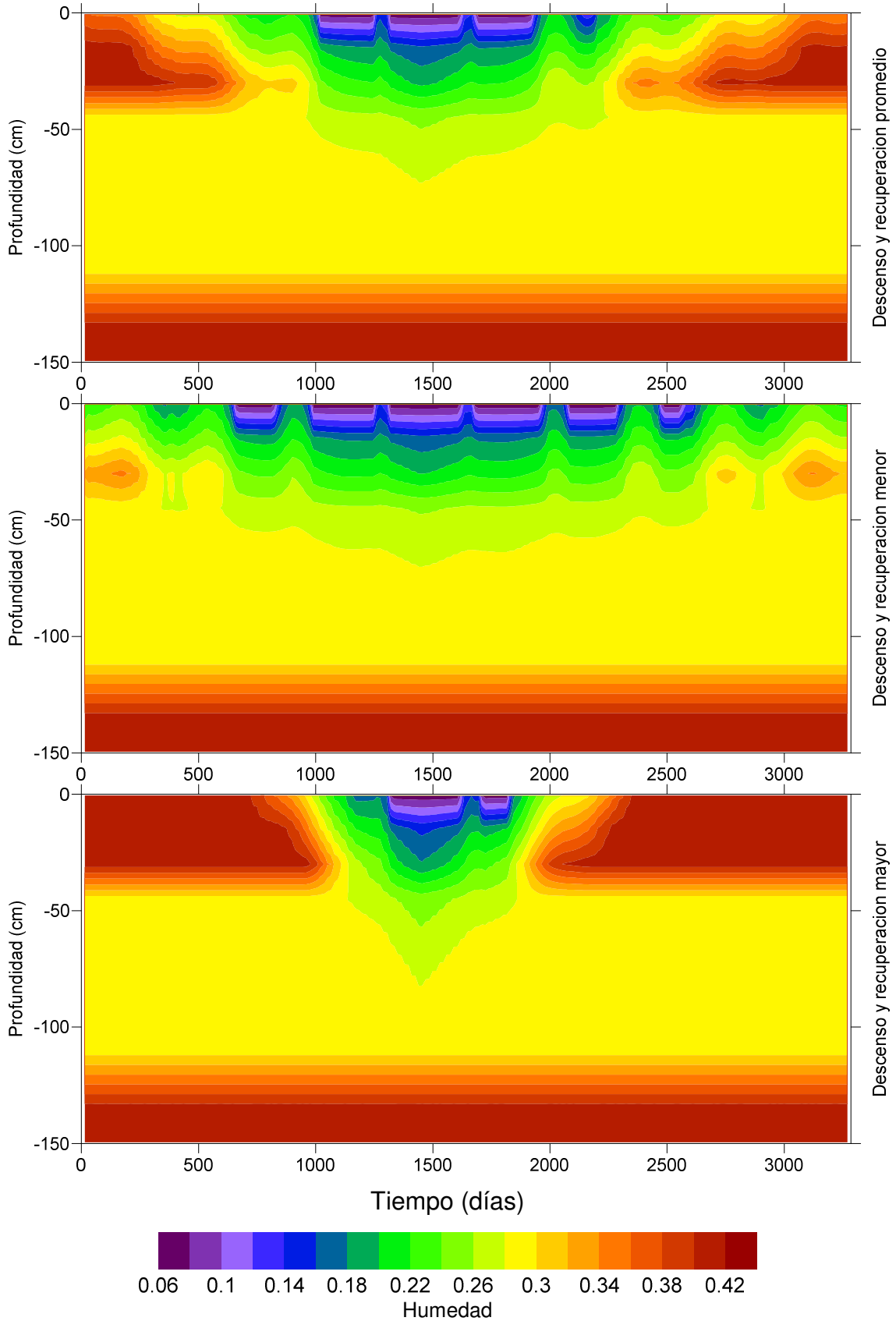
Caso con riego



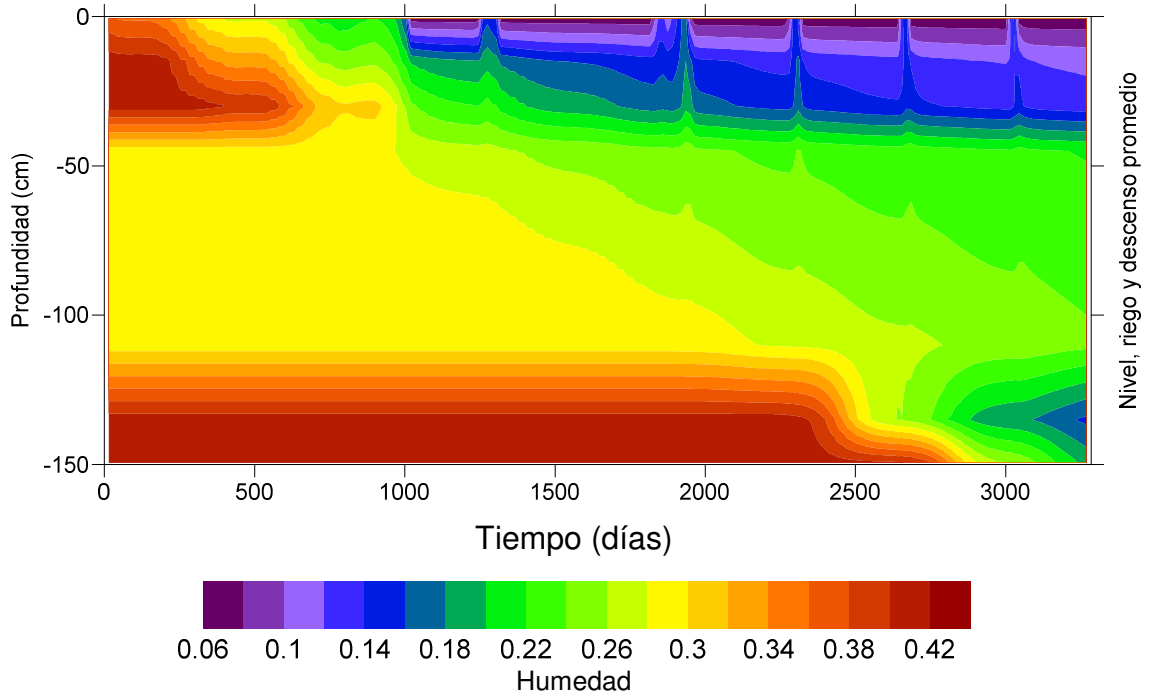
Caso con descenso



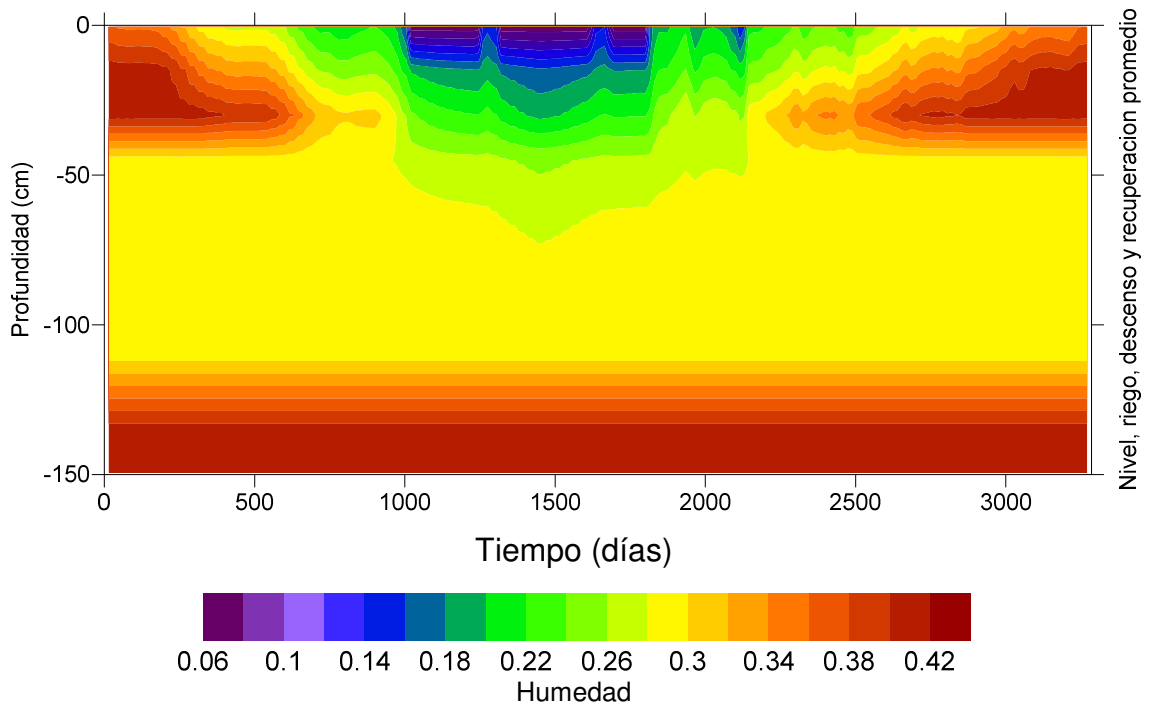
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso

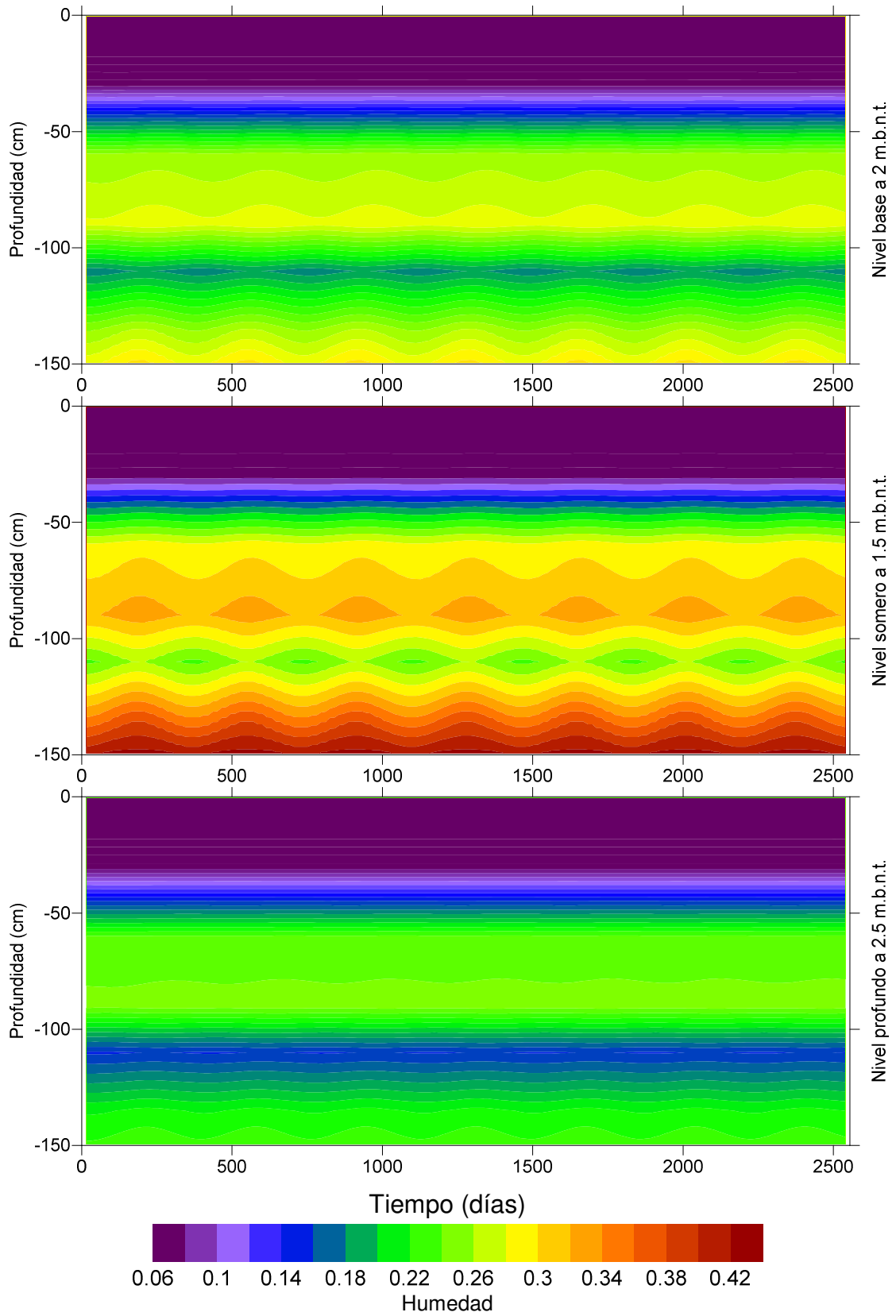


Caso con riego, descenso y recuperación

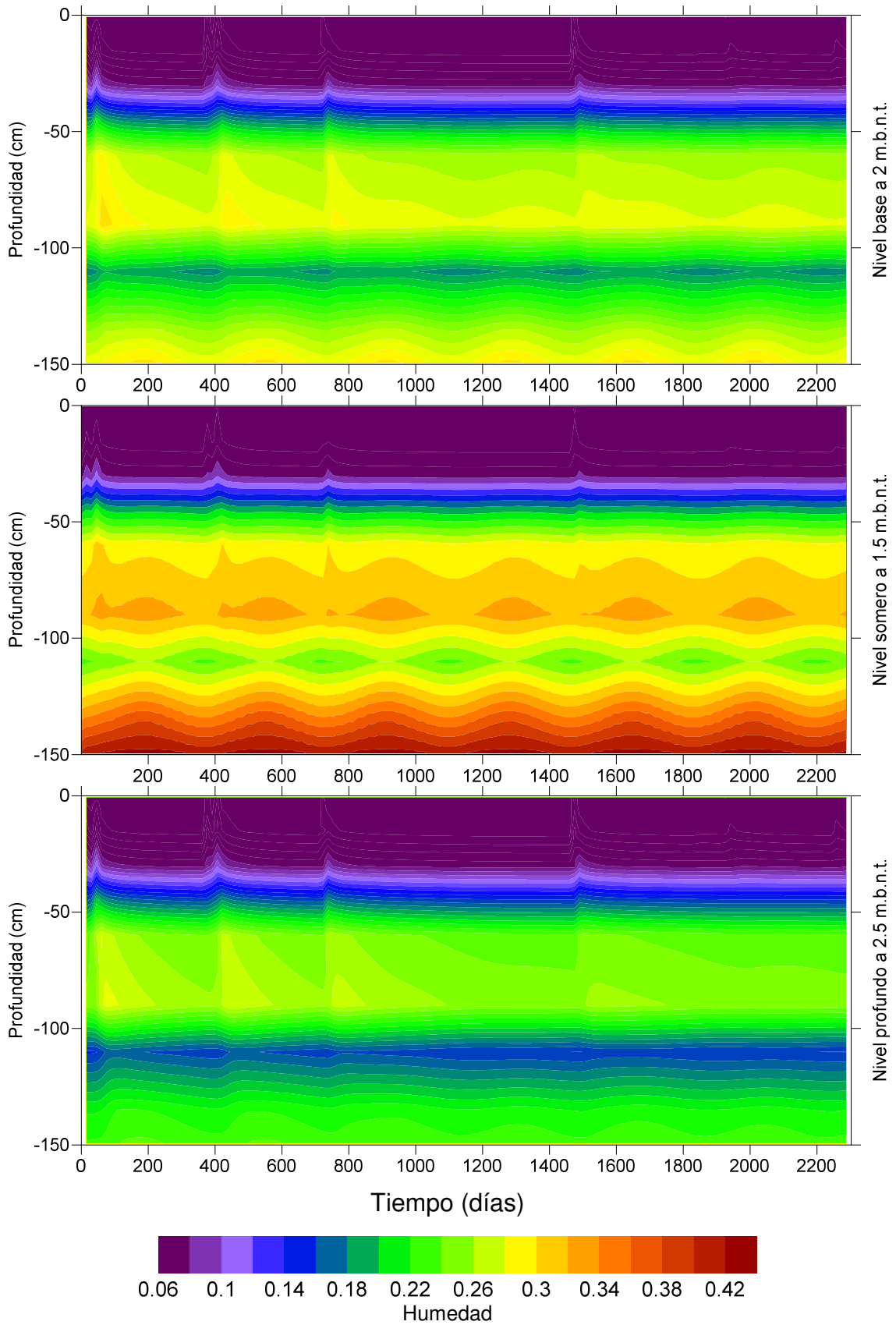


Anexo F.4 Perfil A-11

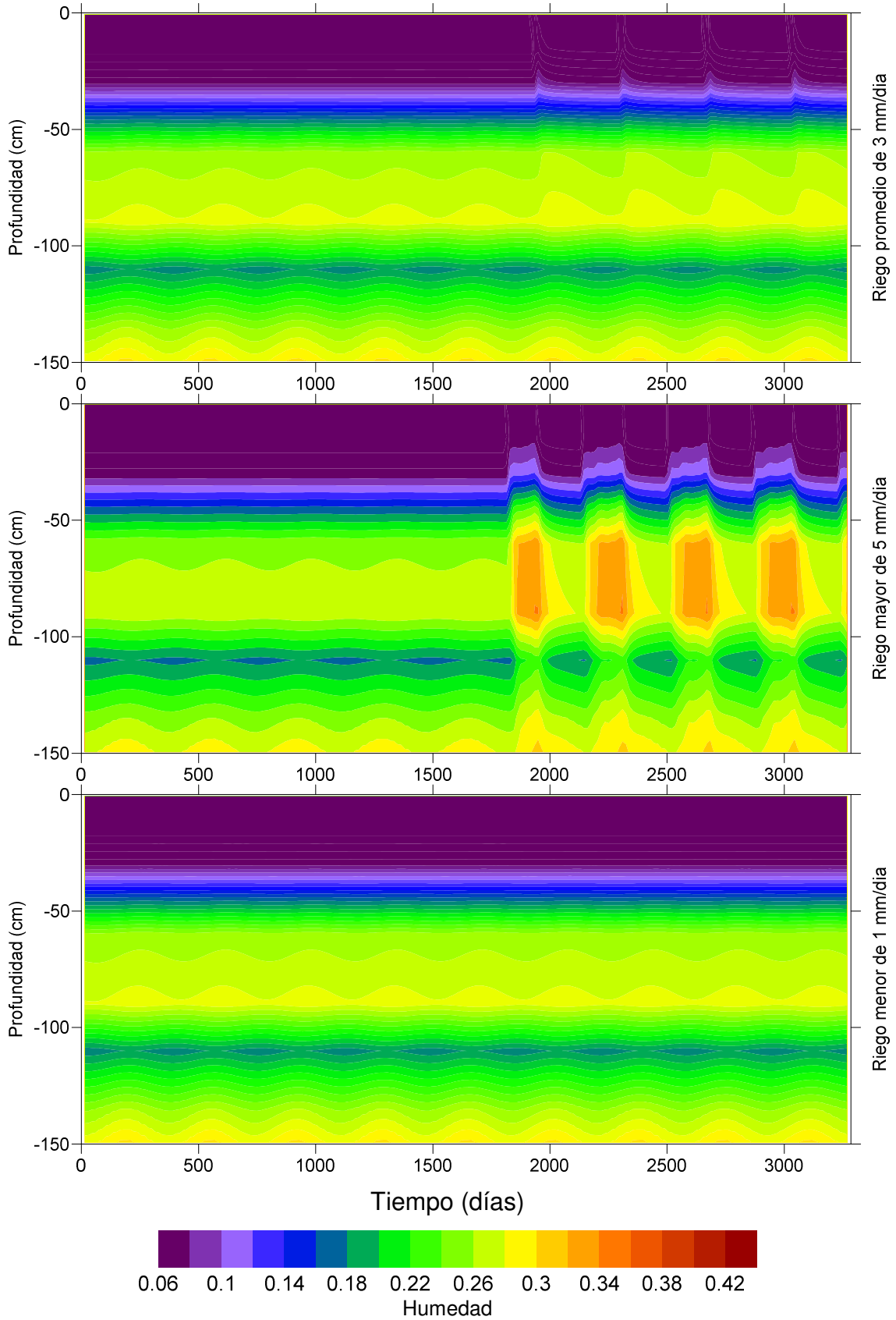
Caso Base



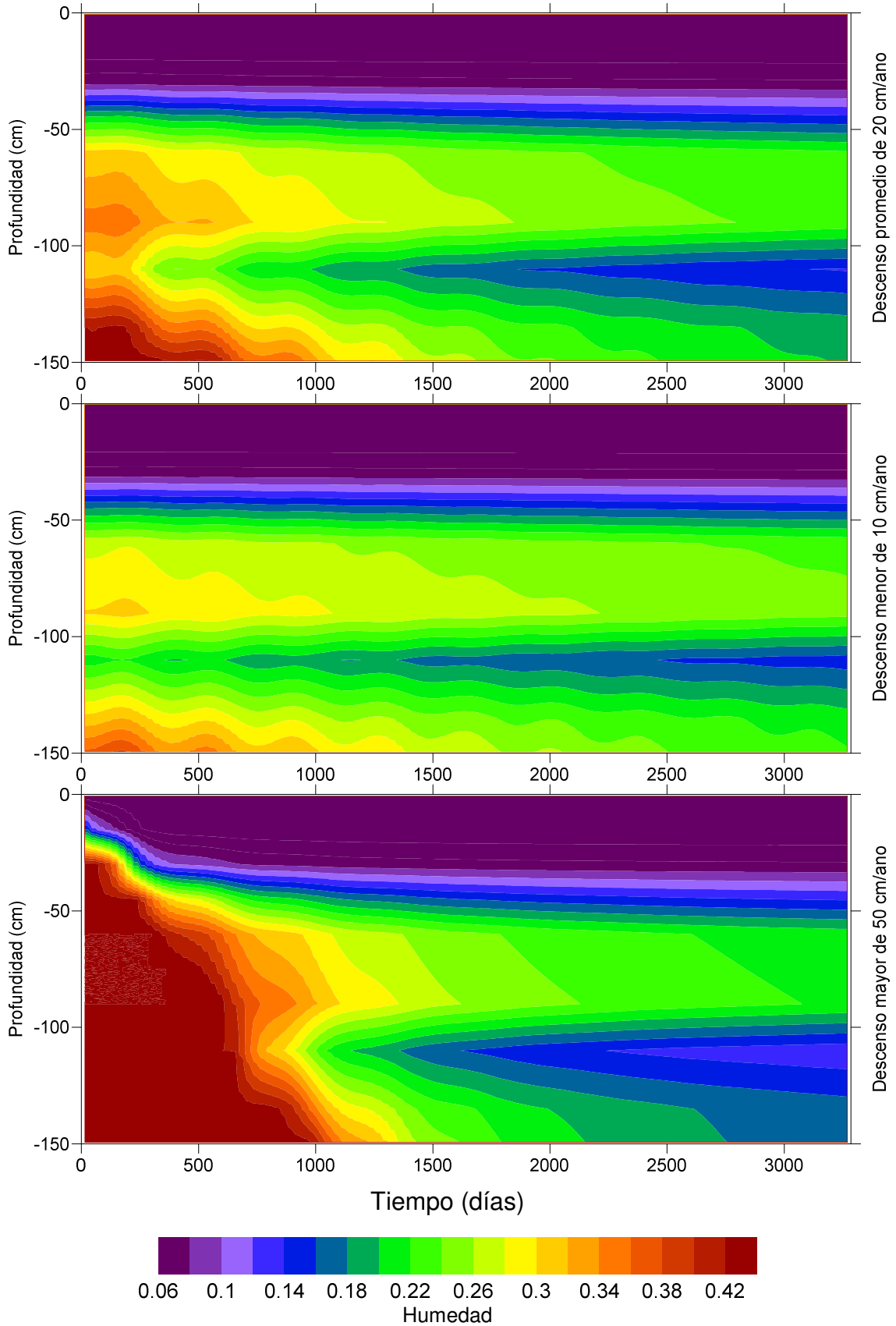
Caso con precipitaciones



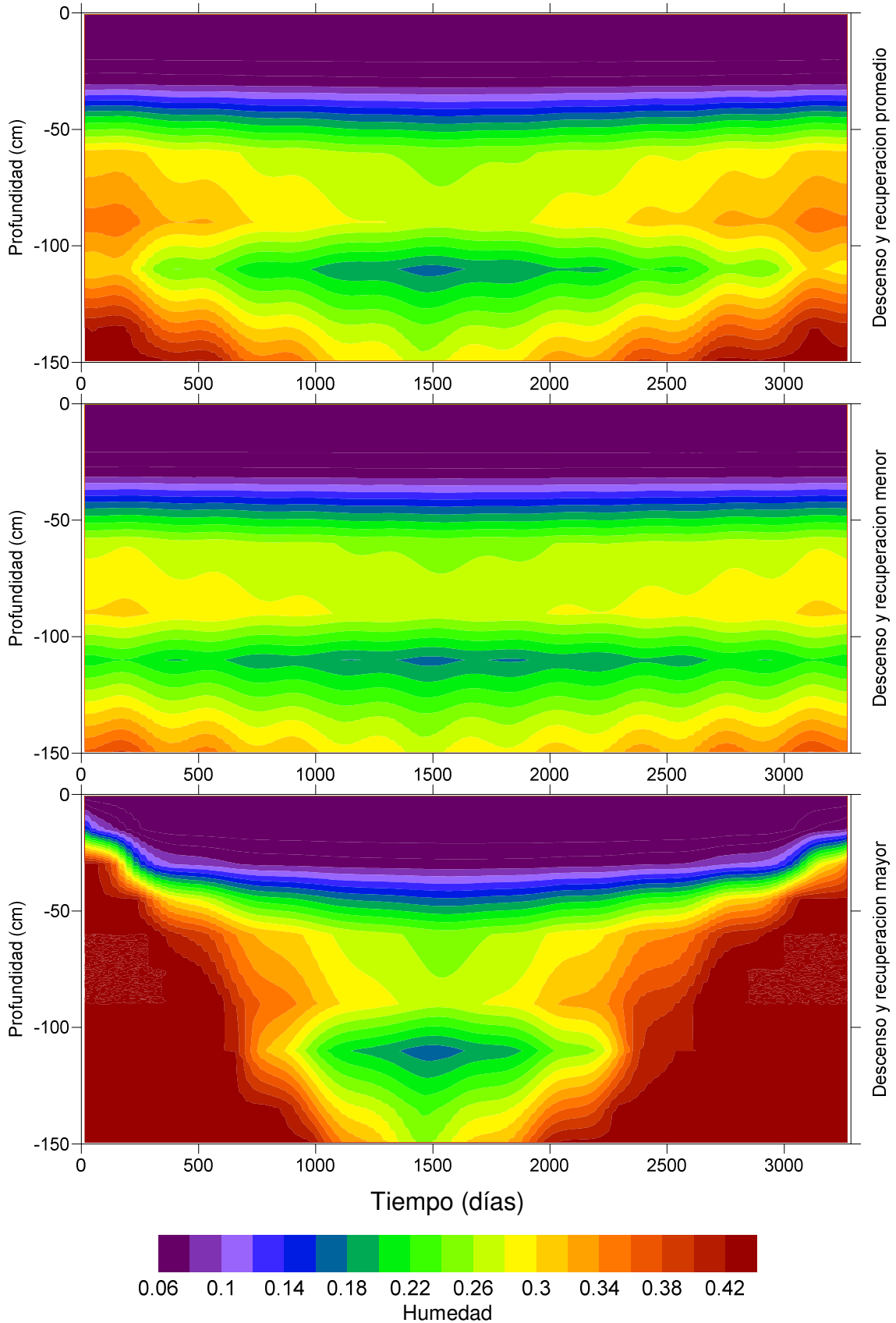
Caso con riego



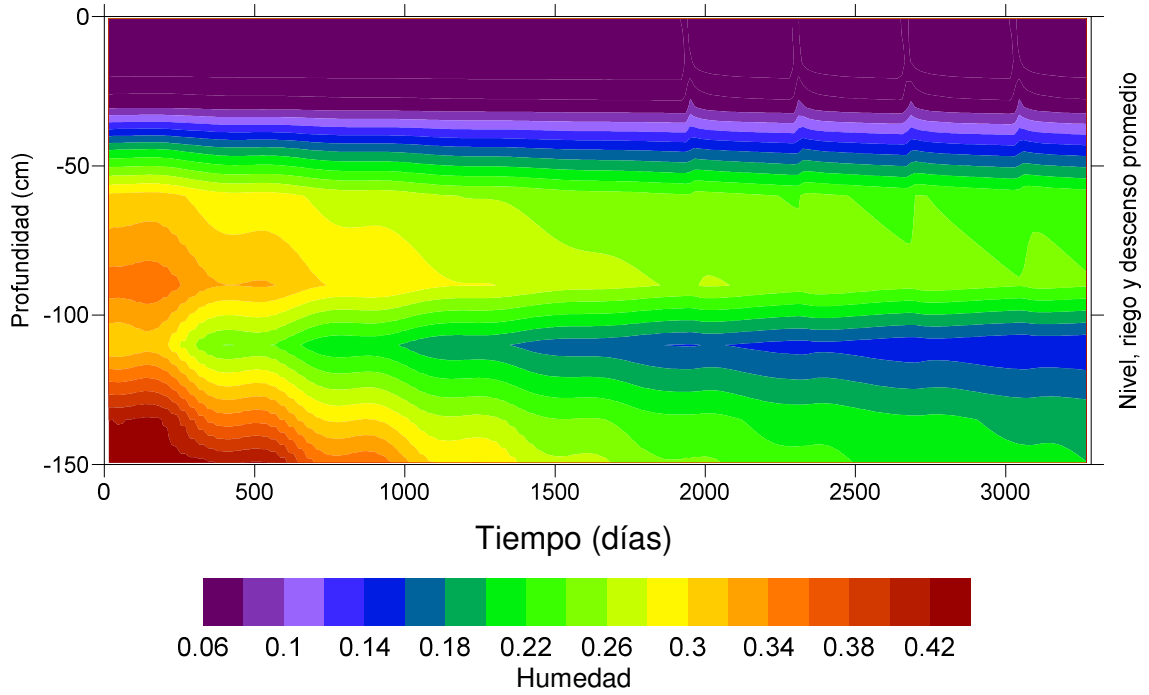
Caso con descenso



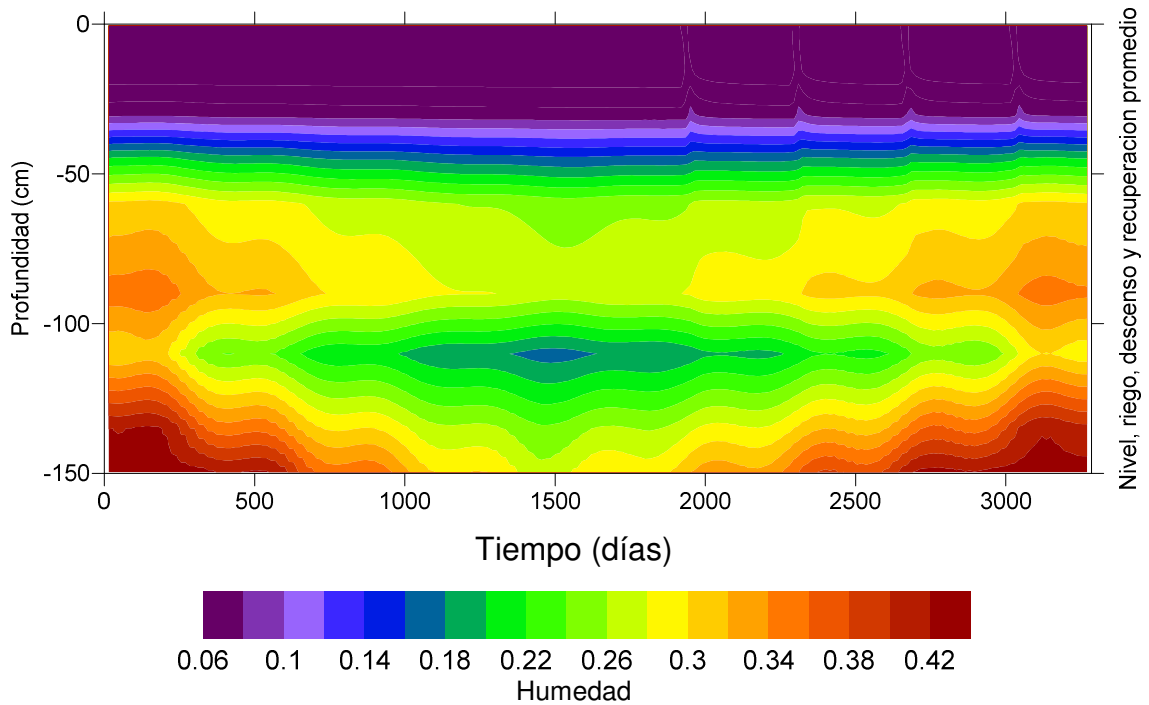
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso

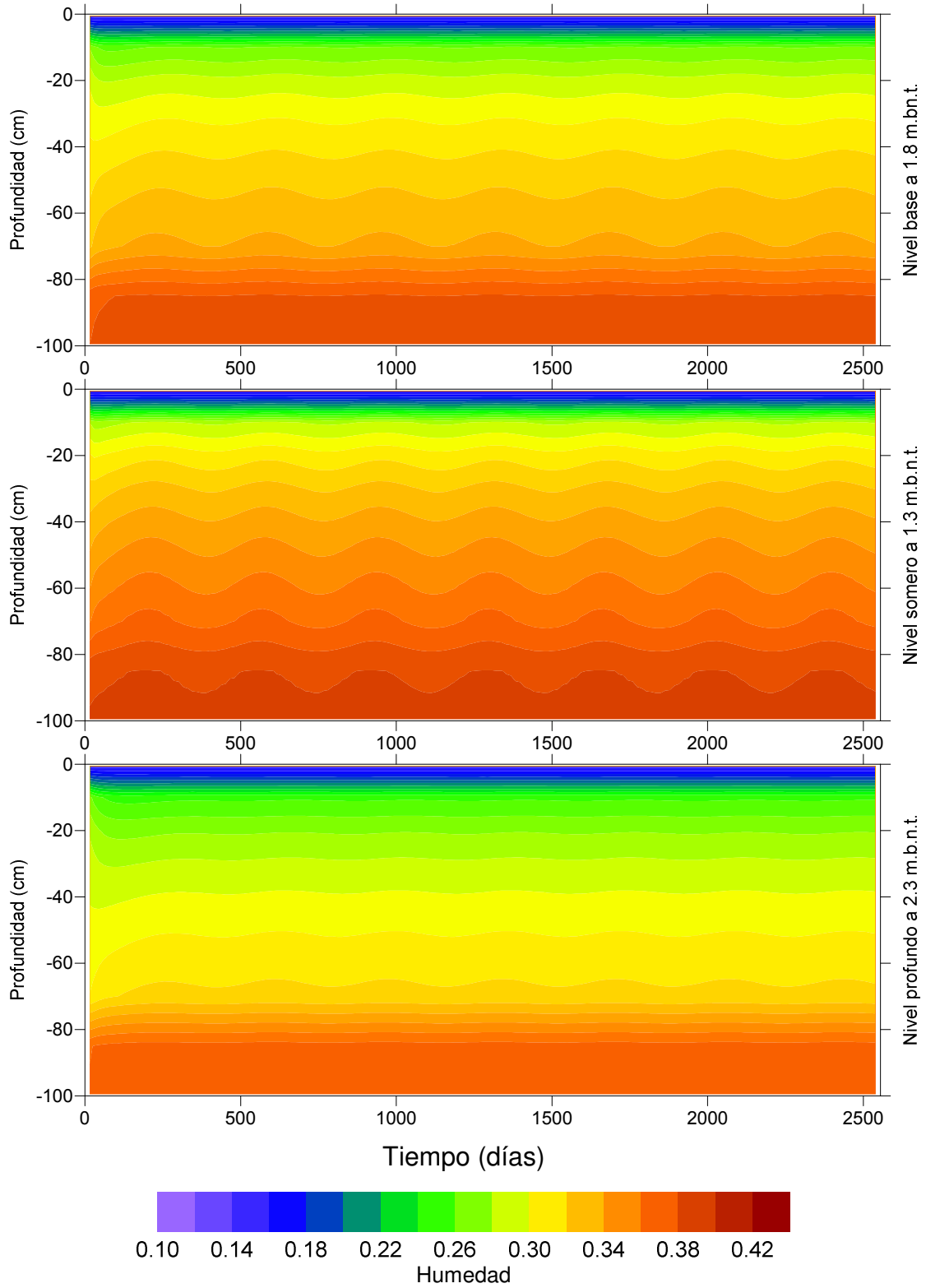


Caso con riego, descenso y recuperación

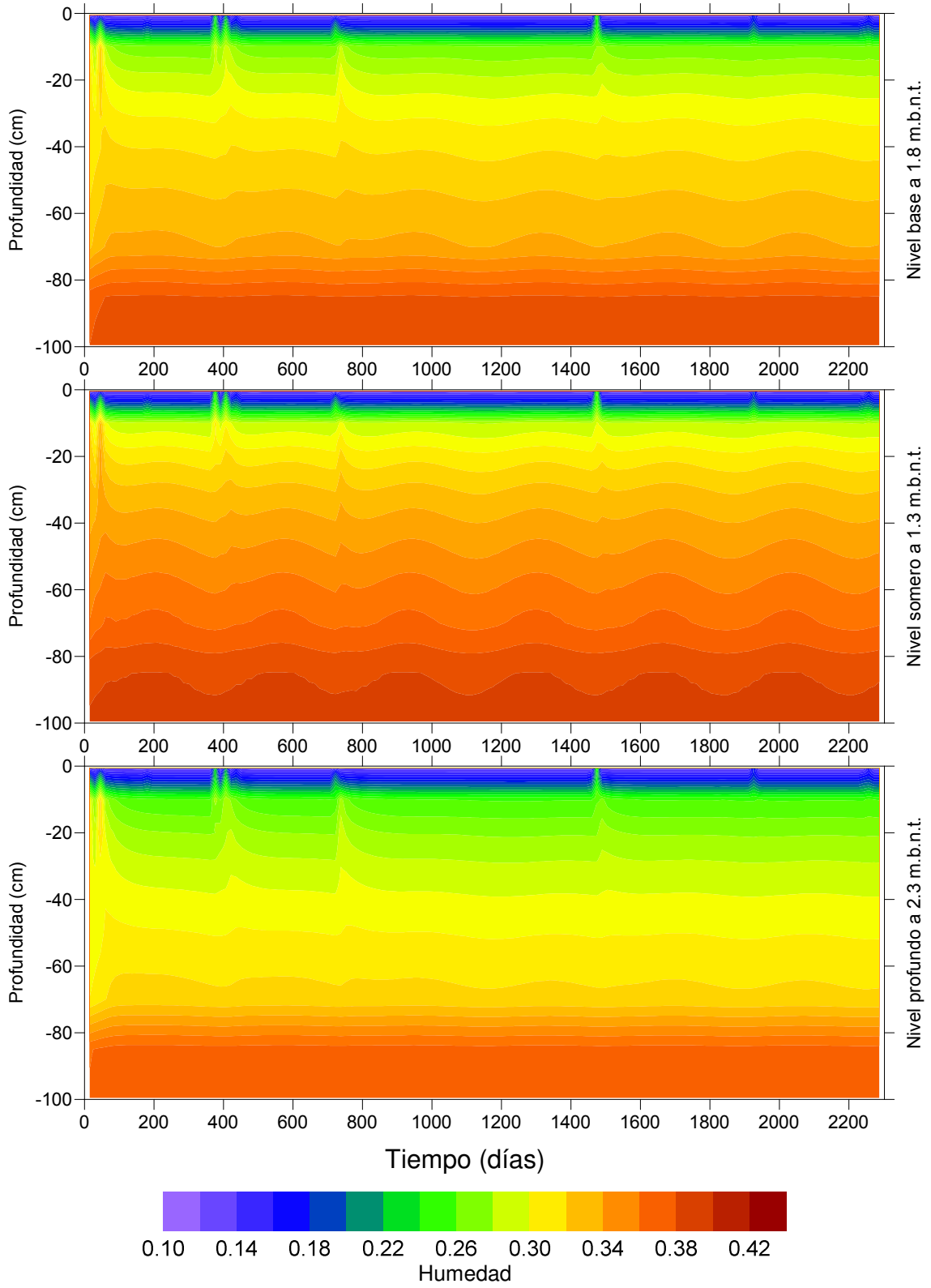


Anexo F.5 Perfil B-16

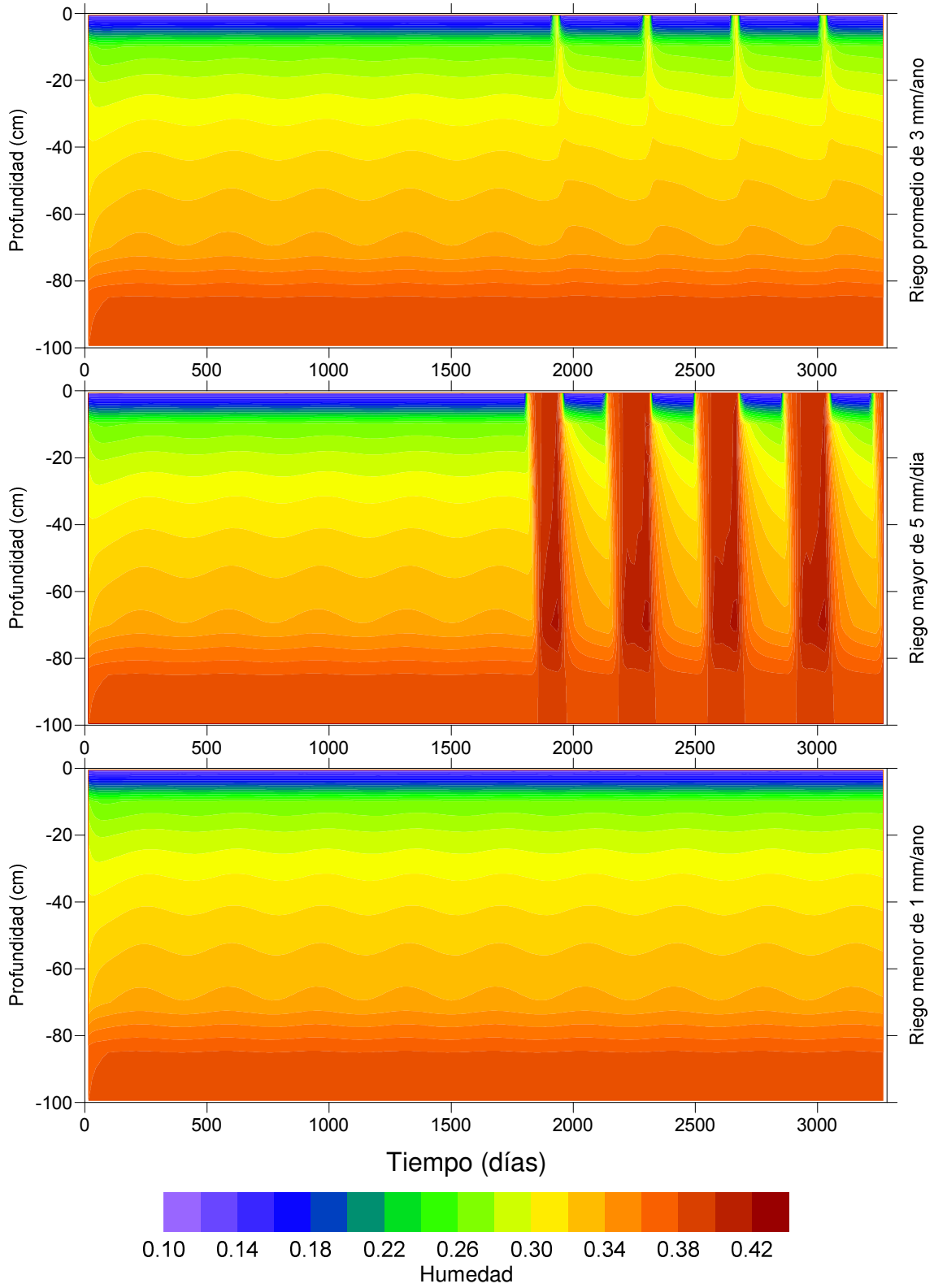
Caso Base



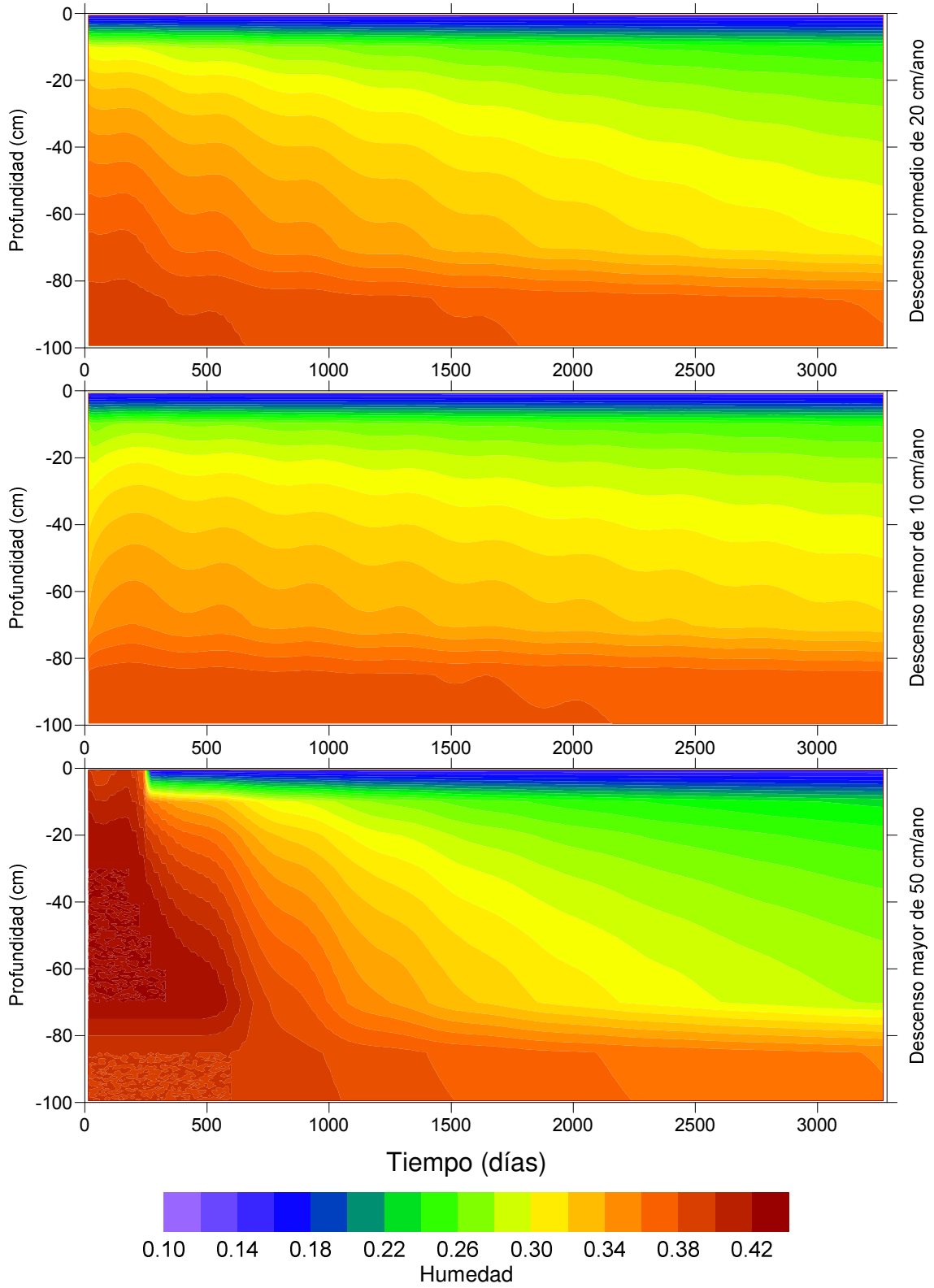
Caso con precipitaciones



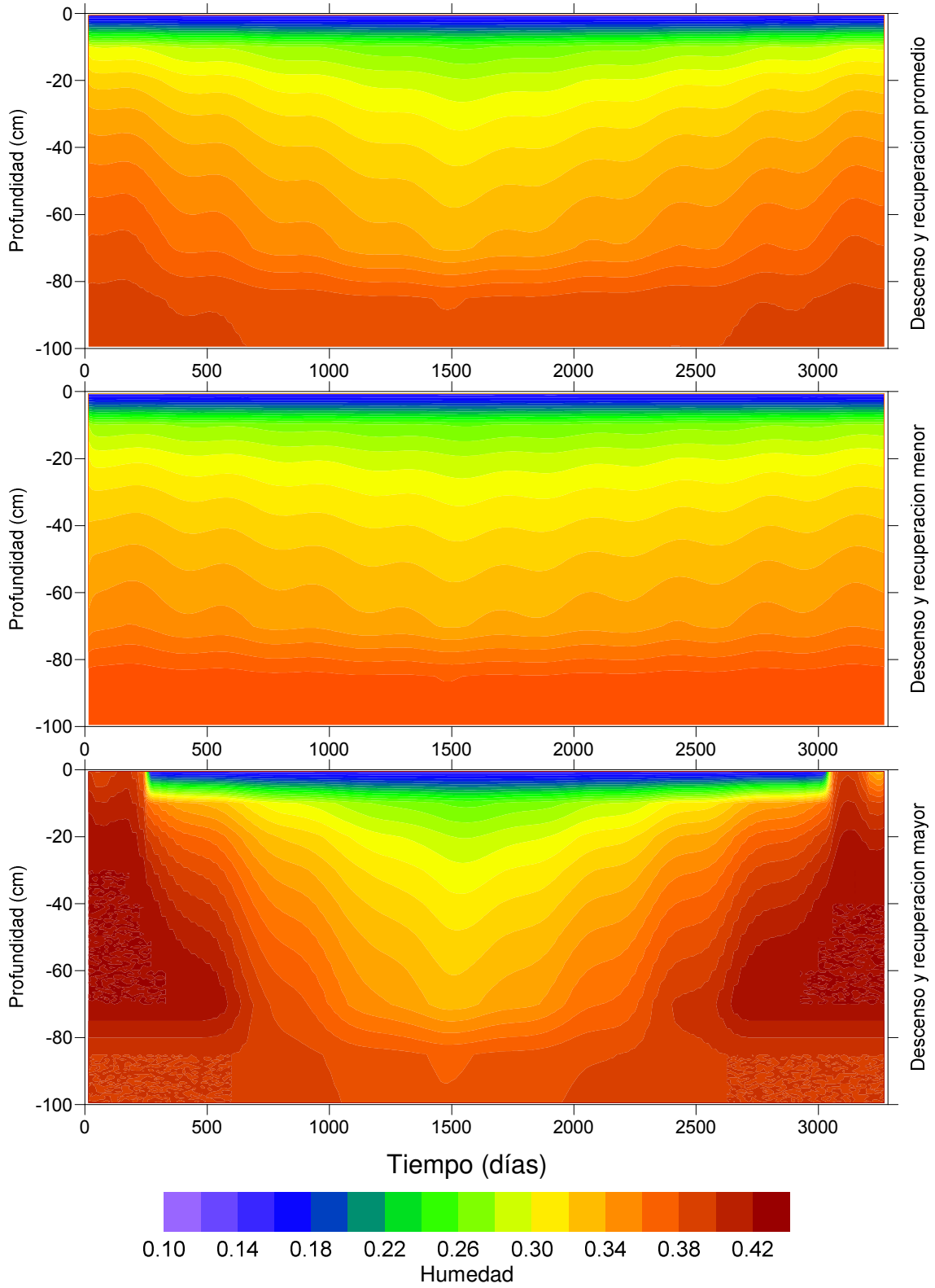
Caso con riego



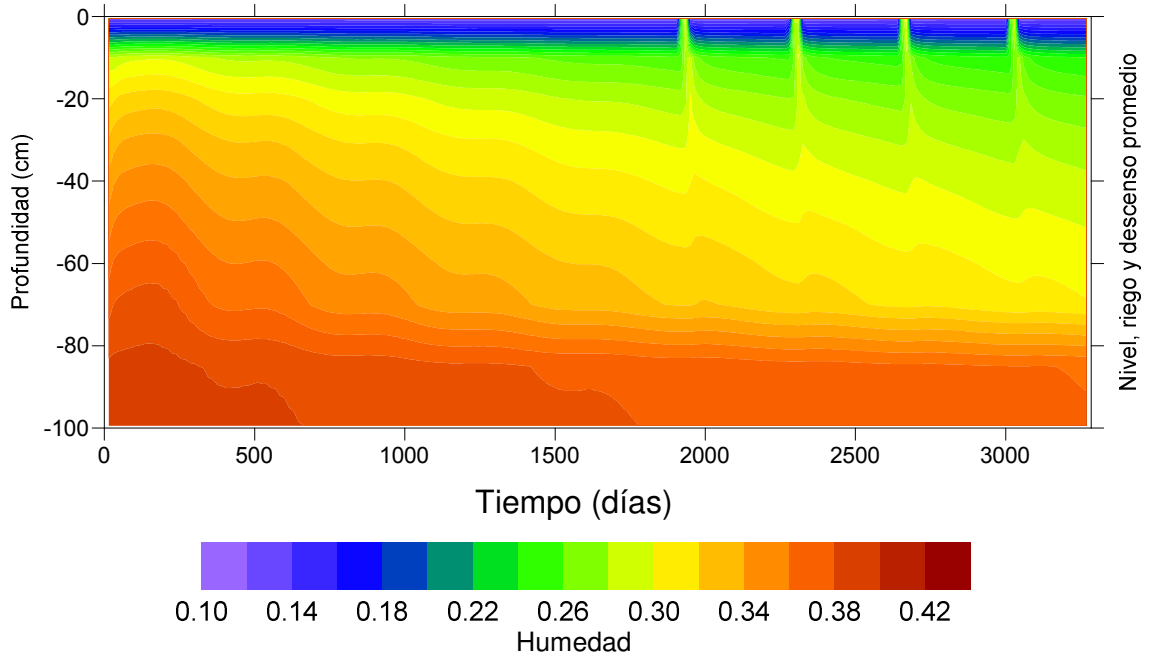
Caso con descenso



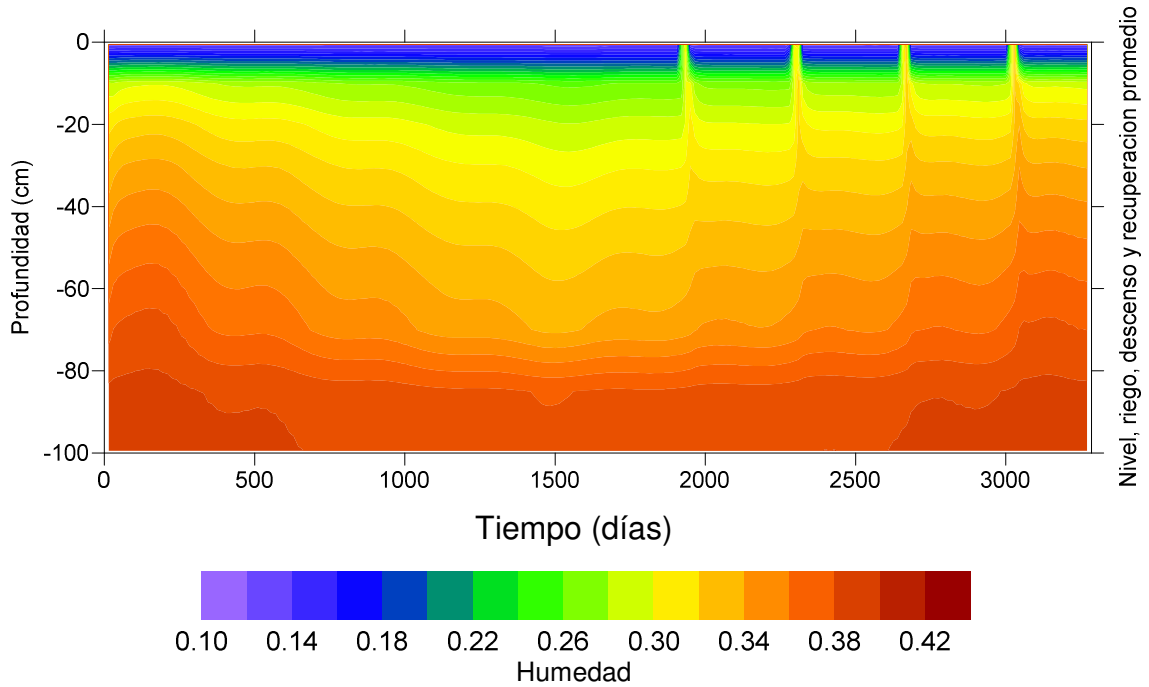
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso

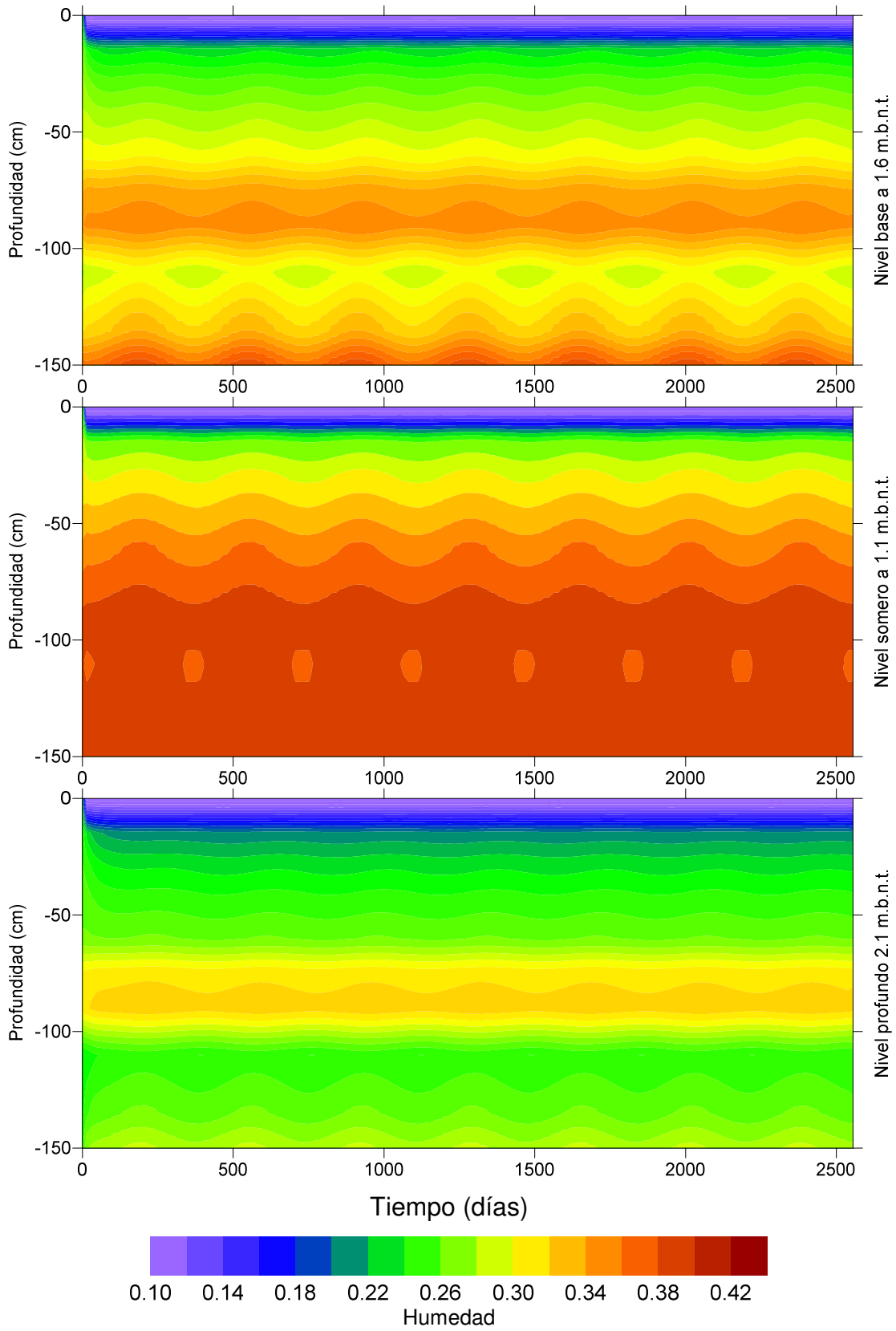


Caso con riego, descenso y recuperación

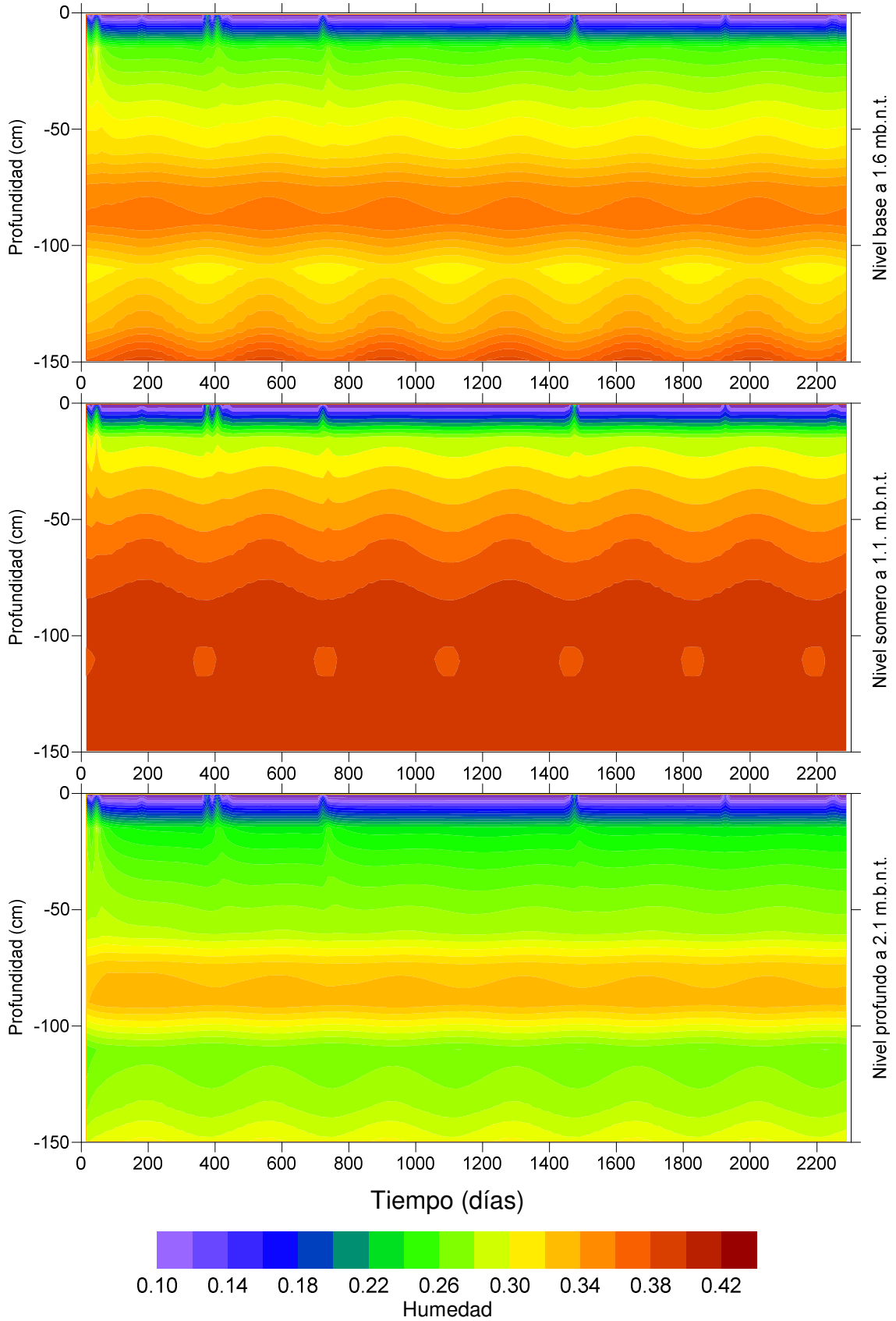


Anexo F.6 Perfil C-19

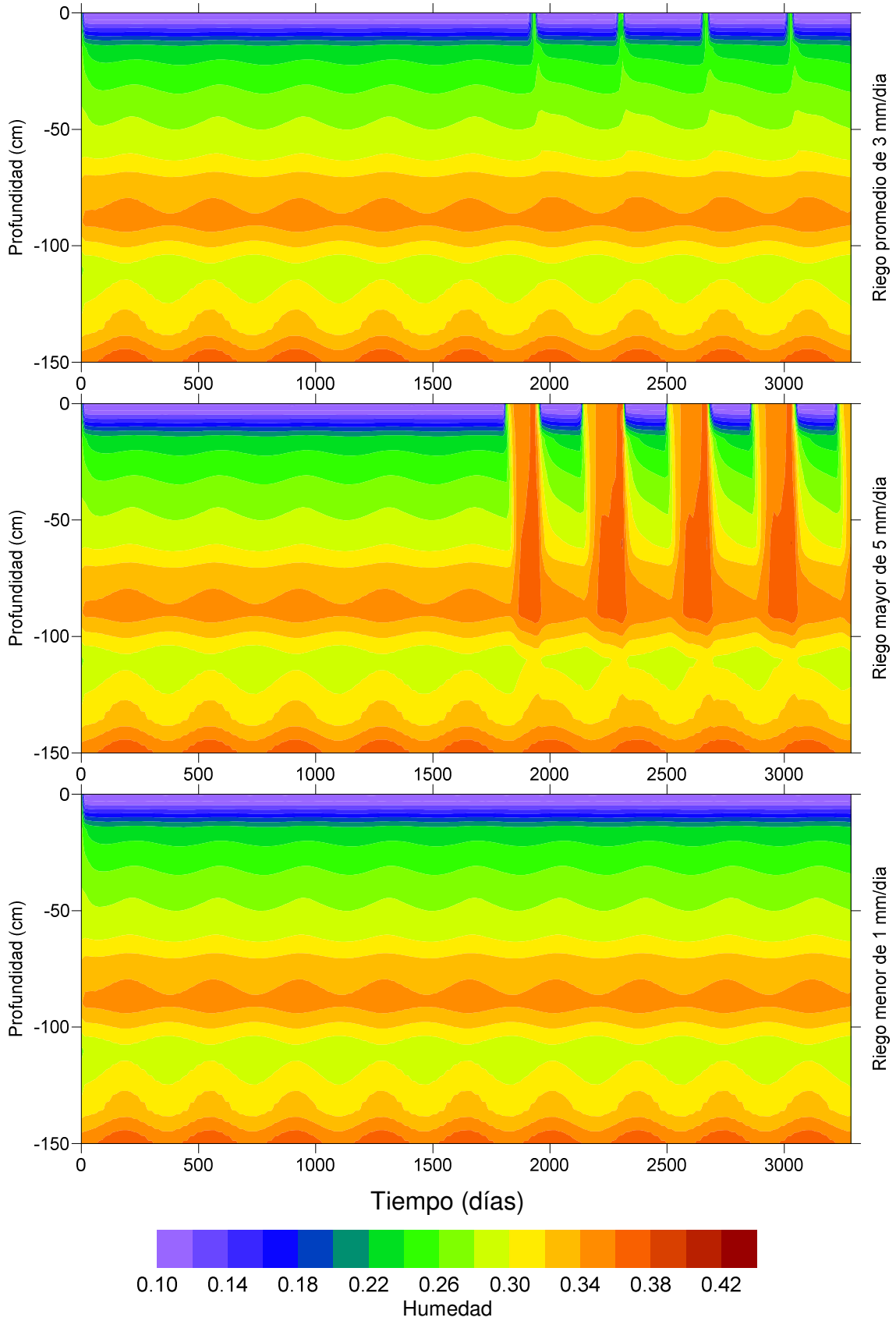
Caso Base



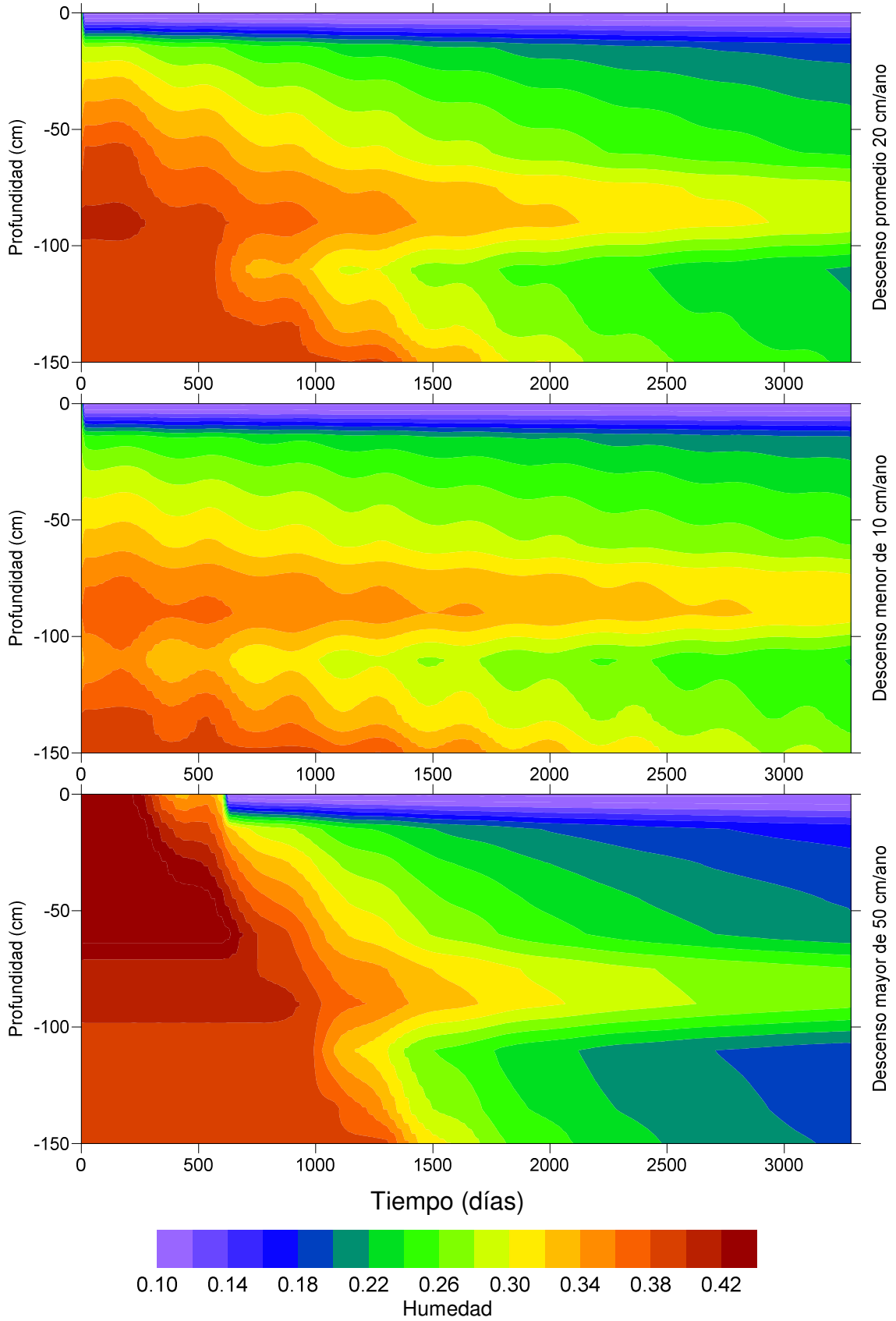
Caso con precipitaciones



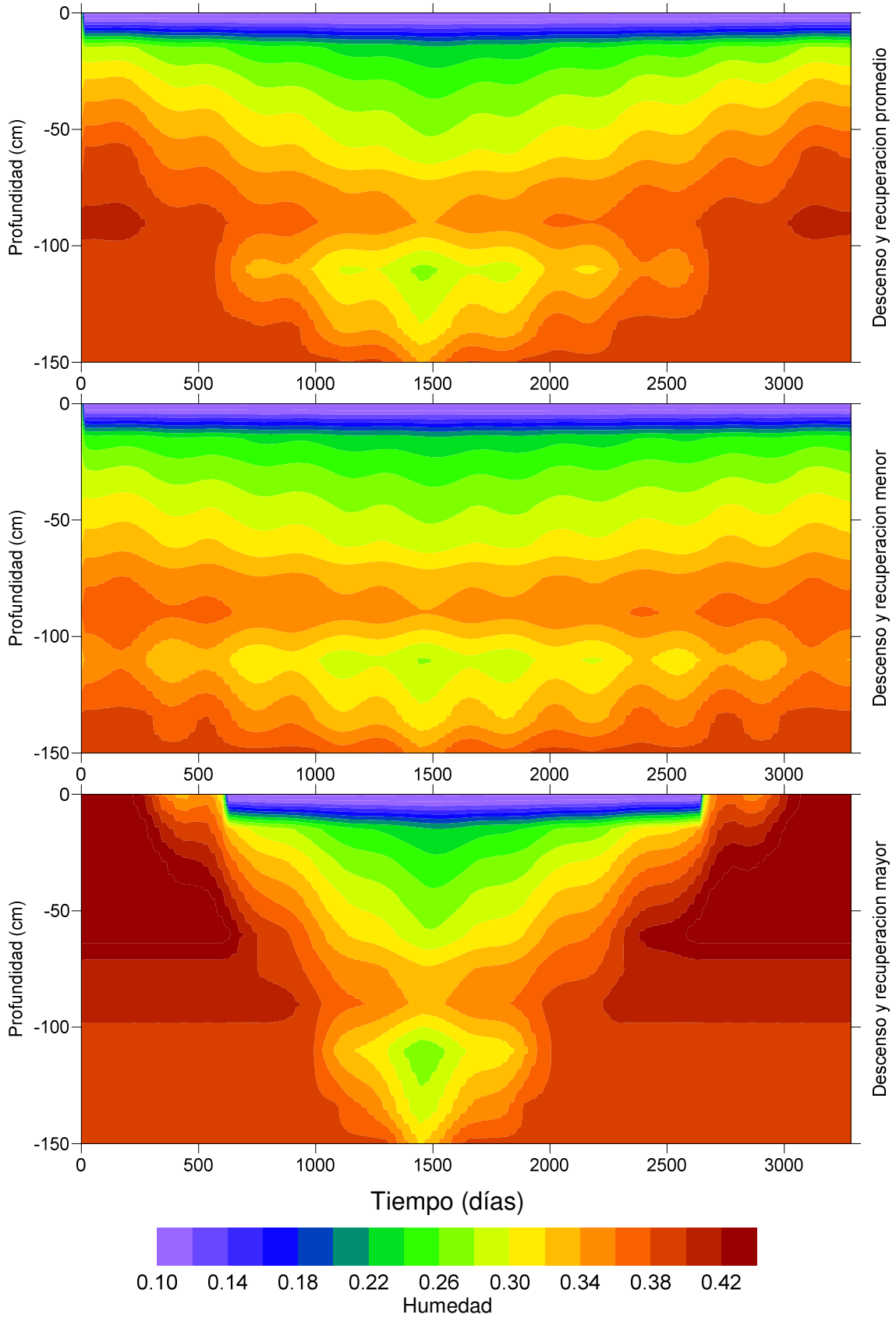
Caso con riego



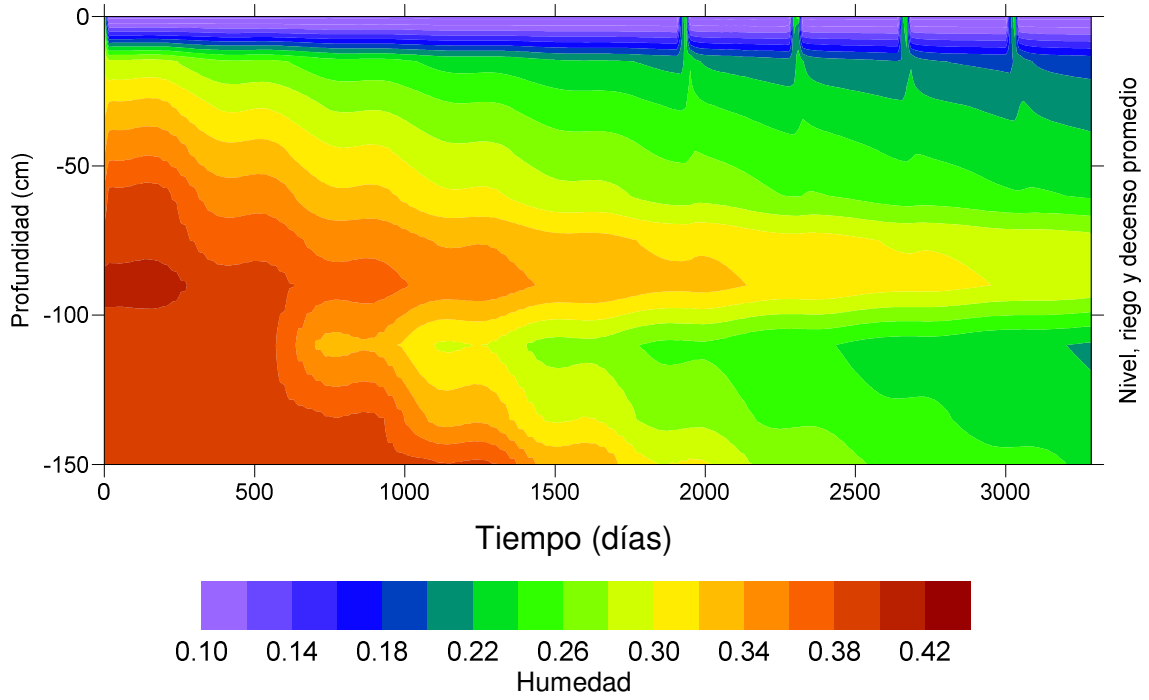
Caso con descenso



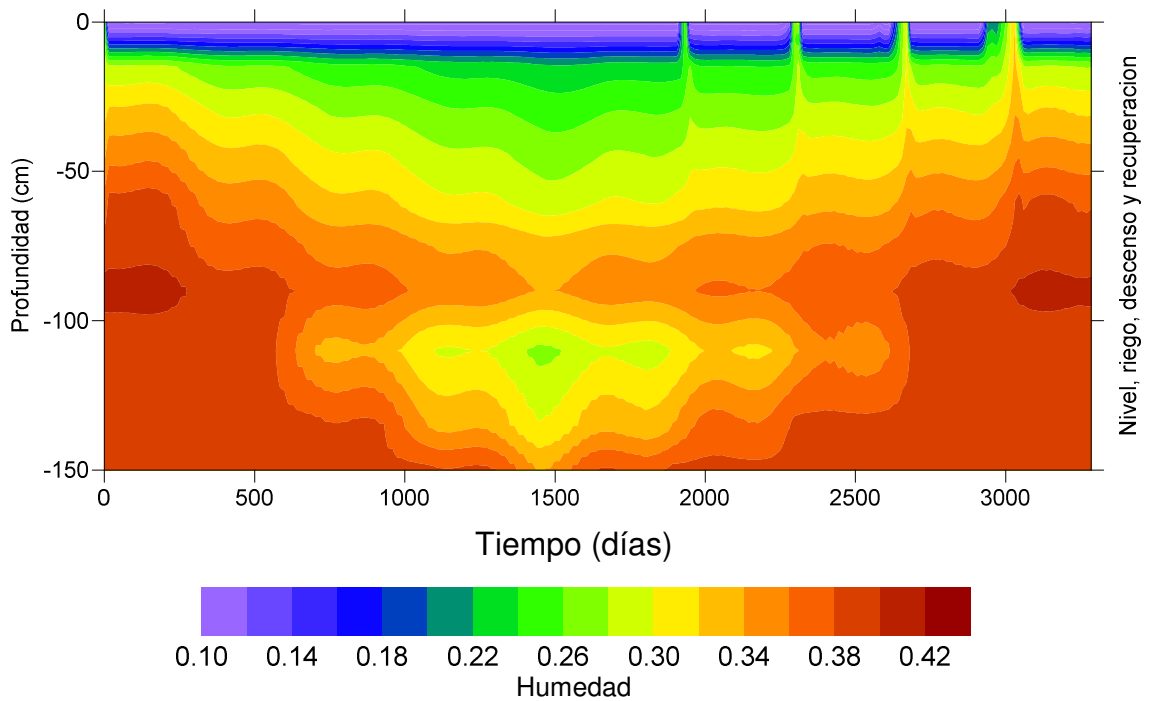
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso

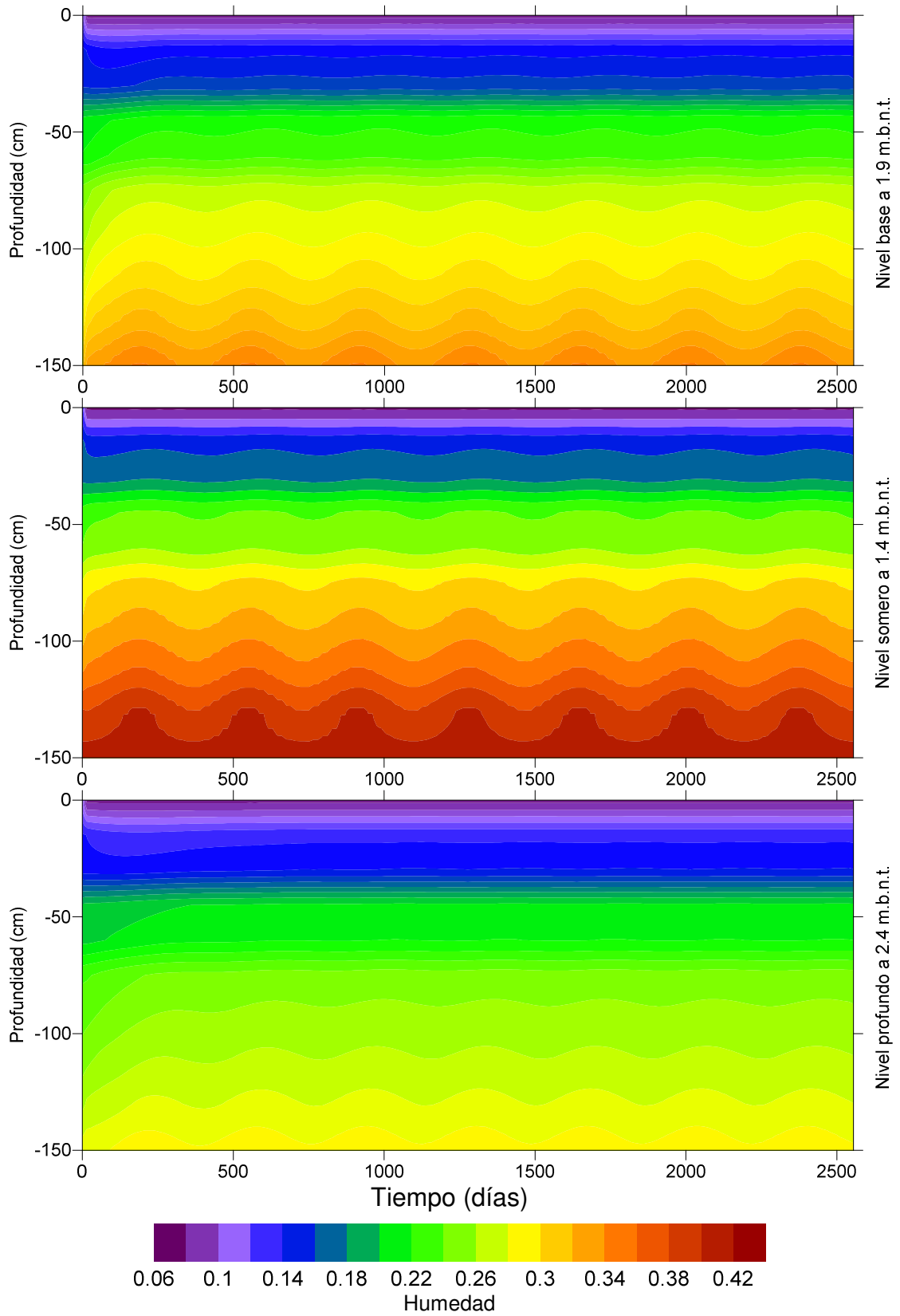


Caso con riego, descenso y recuperación

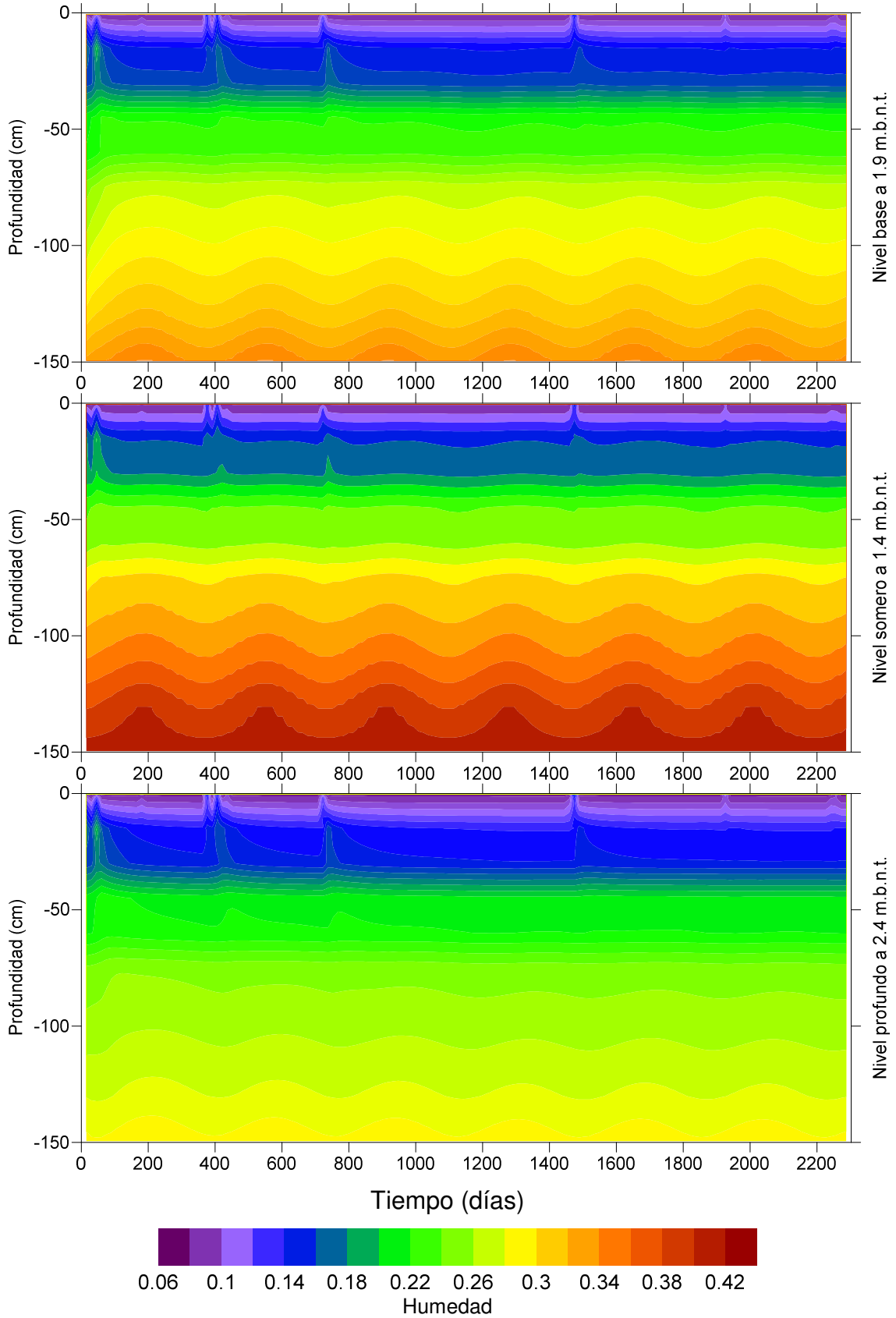


Anexo F.7 Perfil E-27

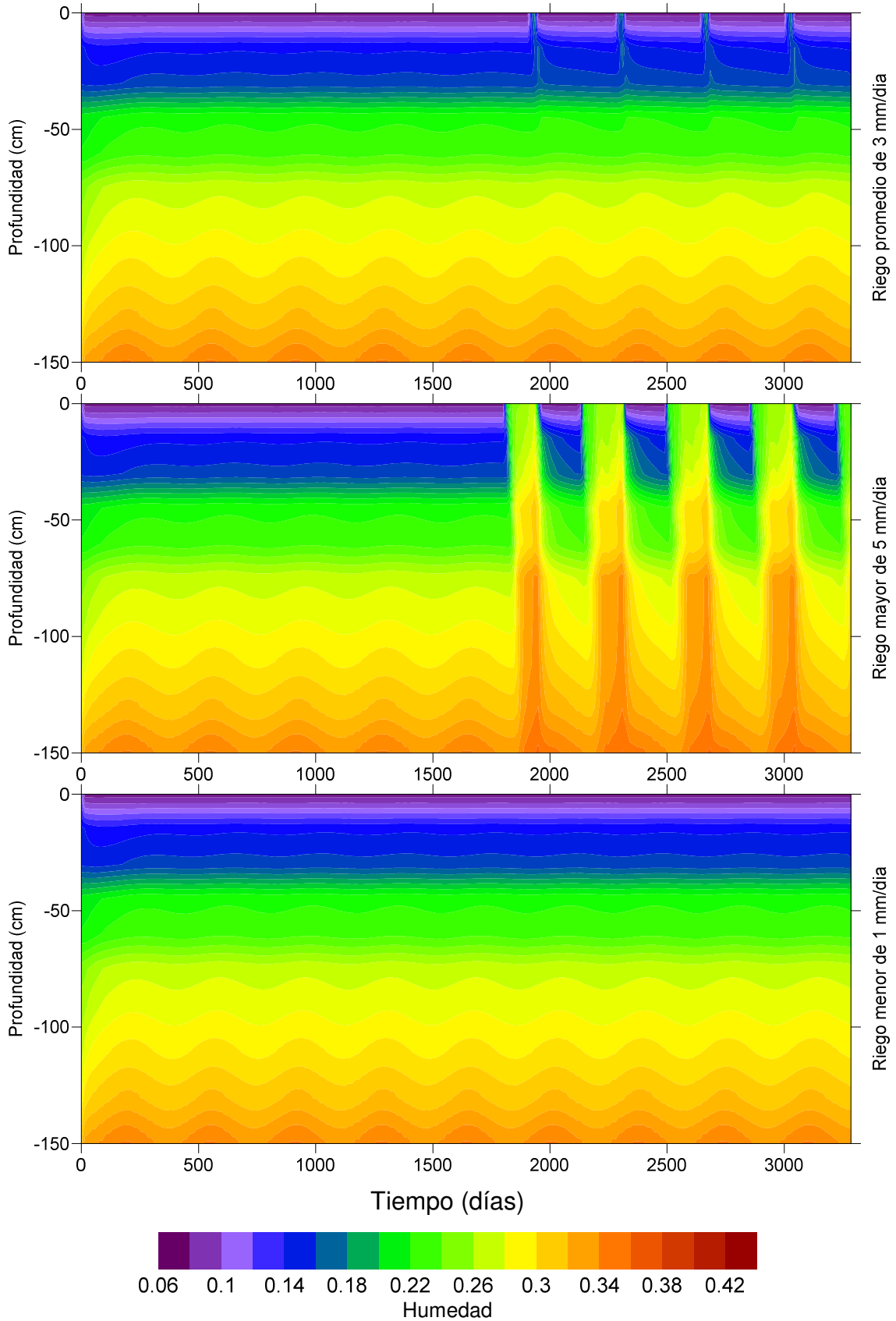
Caso Base



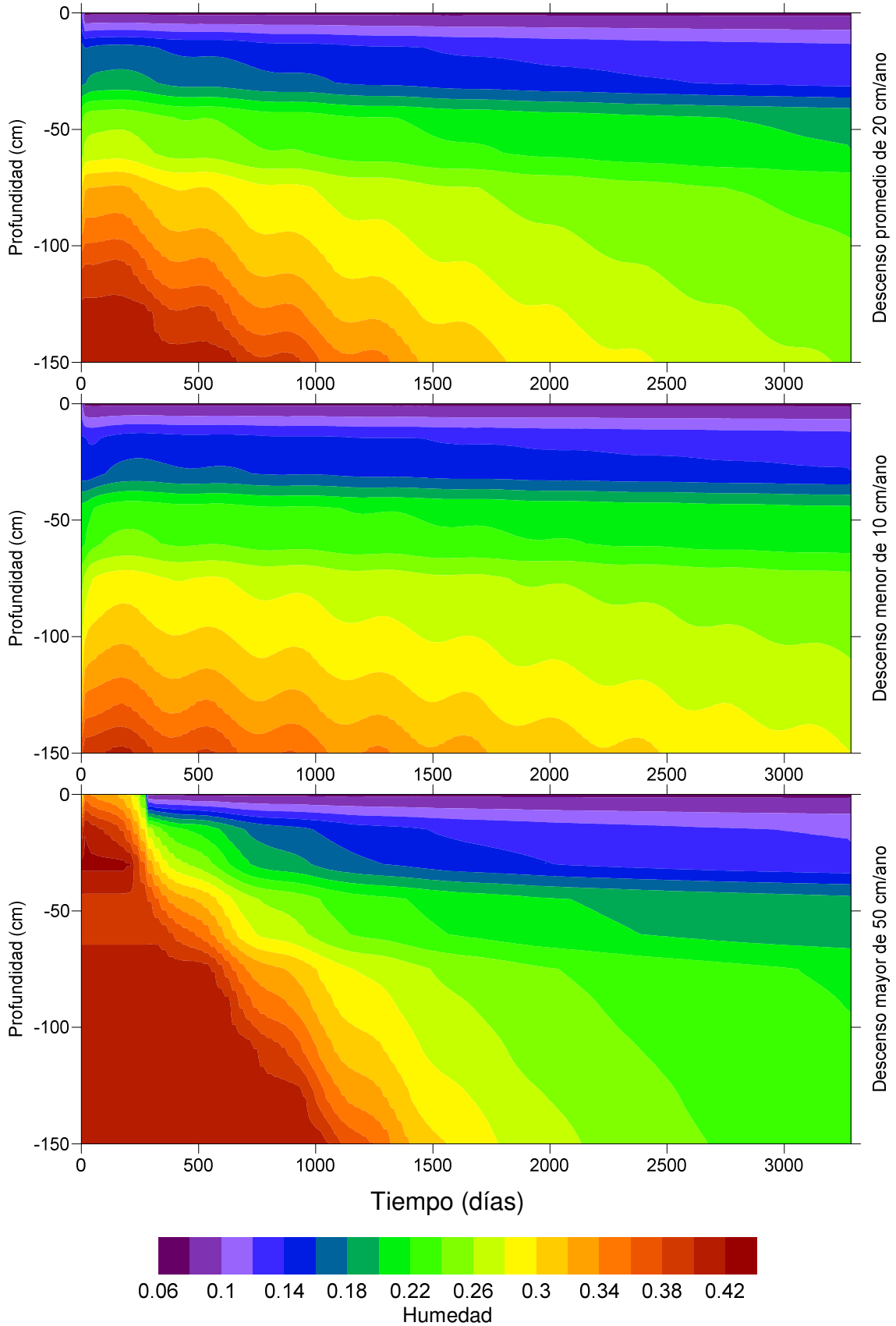
Caso con precipitaciones



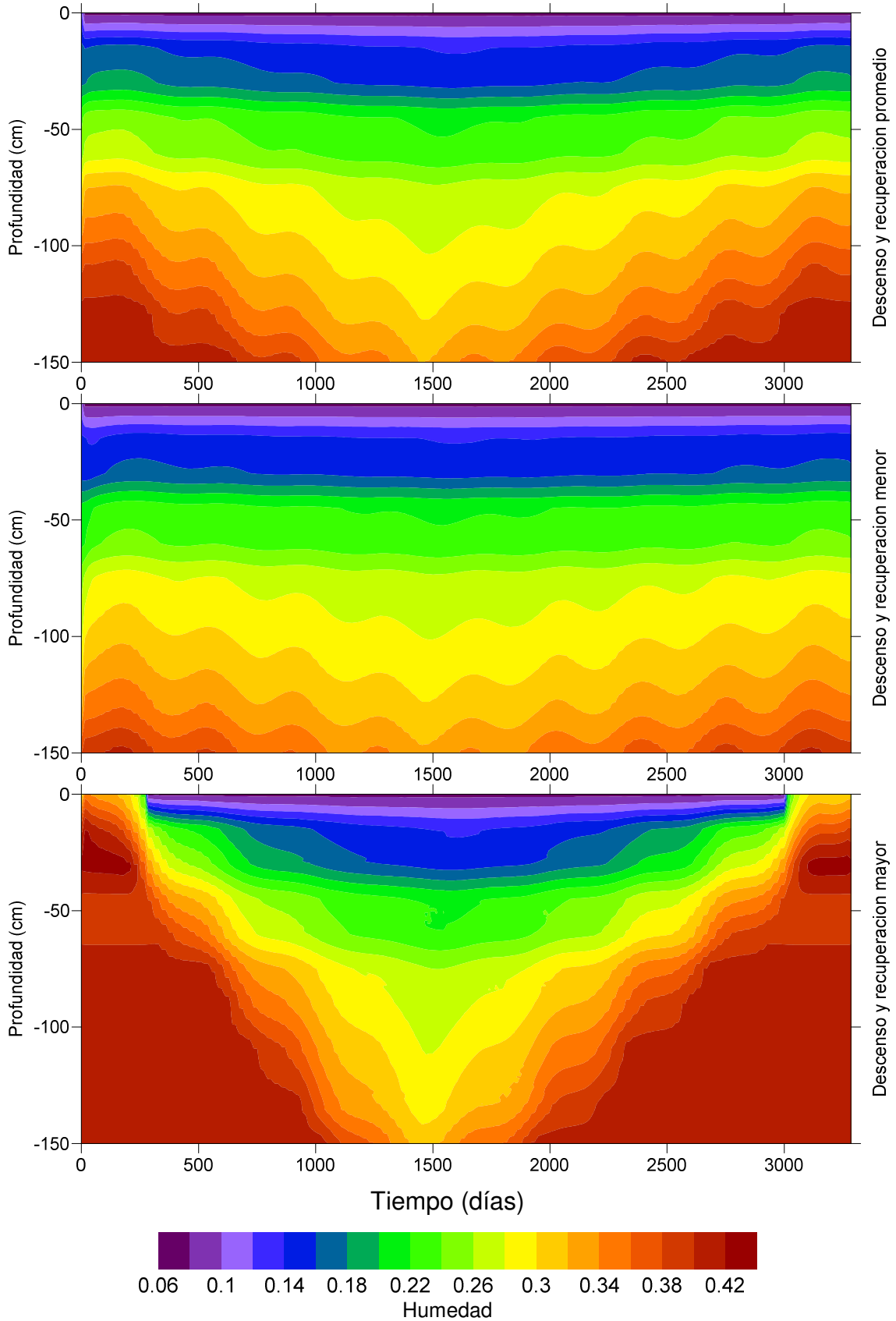
Caso con riego



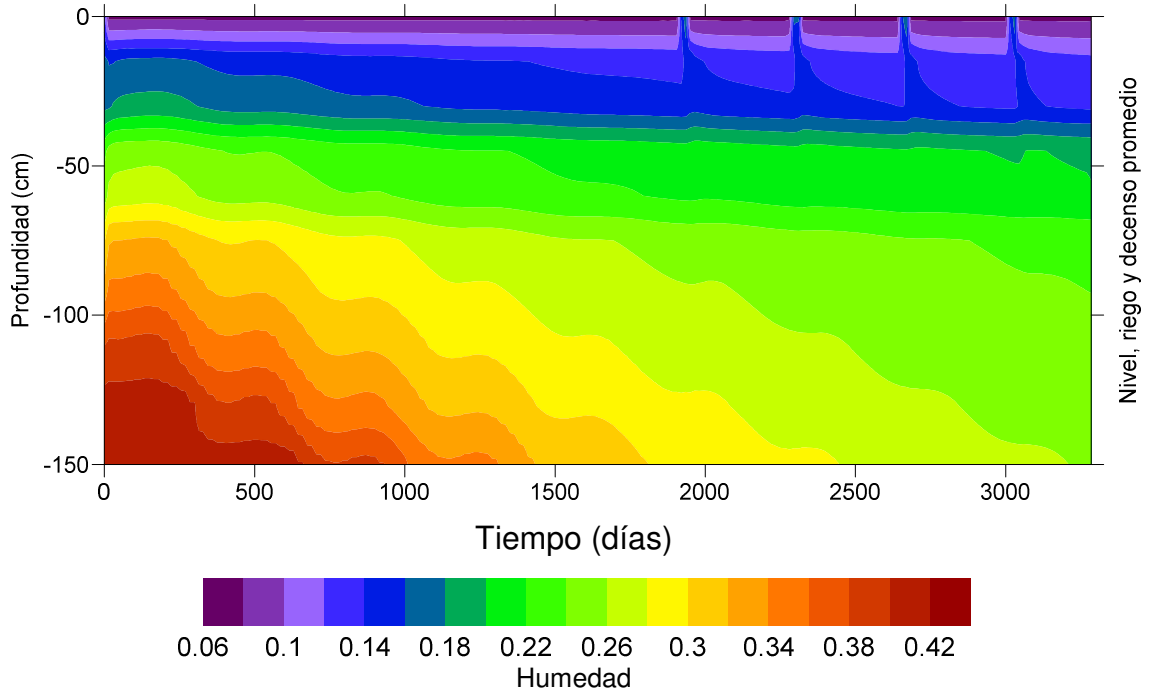
Caso con descenso



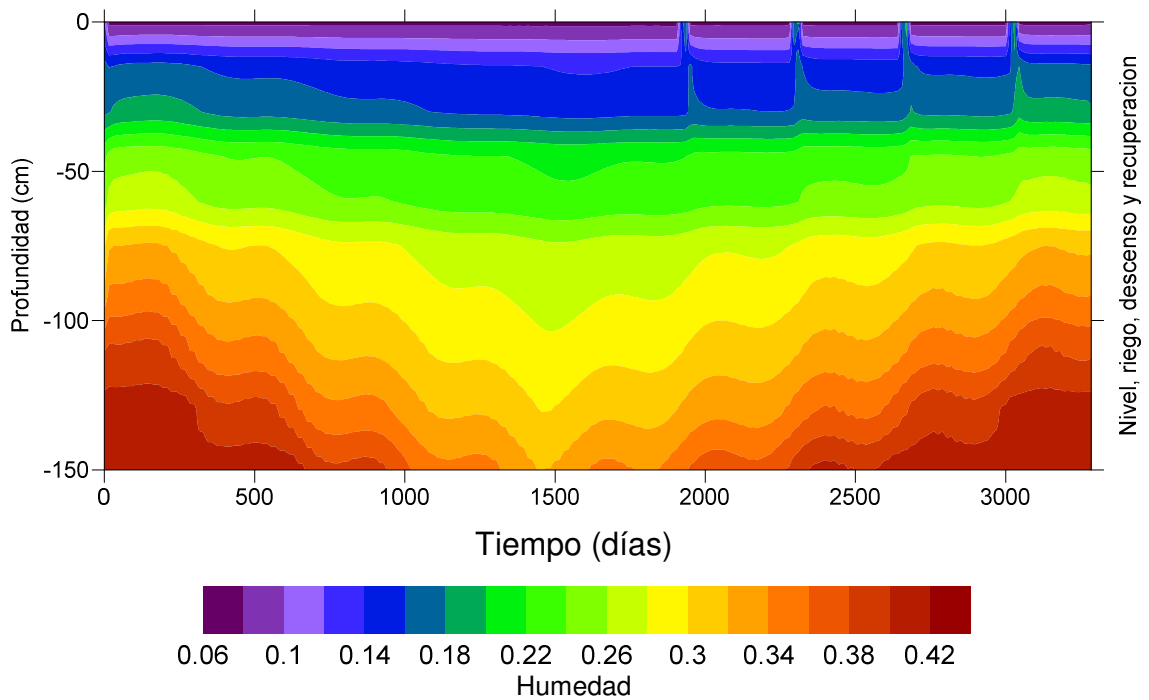
Caso con descenso y recuperación



Caso con riego y descenso



Caso con riego, descenso y recuperación



Anexo G: Perfiles de humedad representativos en los distintos escenarios para tiempos específicos.

Este anexo muestra los gráficos de profundidad v/s humedad para los siguientes tiempos: inicial, correspondiente a diciembre 2004, intermedio, correspondiente a diciembre 2009 y final, correspondiente a diciembre 2012.