



Gobierno
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA EL
ANÁLISIS DE SALARES Y CUENCAS COSTERAS Y
SU APLICACIÓN PARA EL DESARROLLO DEL PLAN
ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA
CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA**

**INFORME FINAL PEGH SALAR DE ATACAMA
MEJORAS AL MODELO WEAP**

REALIZADO POR:

**CENTRO DE CAMBIO GLOBAL UC, PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CHILE**

S.I.T. N° 484

Santiago, diciembre 2021

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Mauricio Lorca Miranda

Inspector Fiscal
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

Inspector Fiscal Subrogante
Ingeniera Civil Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal Subrogante
Ingeniero Agrónomo Franco Calderón Maturana

CENTRO DE CAMBIO GLOBAL UC, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Con el Apoyo de
STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SYDNEY
TECO GROUP

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Sebastián Vicuña D.

Profesionales

Ingeniero Civil David Purkey
Ingeniero Informático Jack Sieber
Ingeniero Civil Juan Carlos Castilla R
Ingeniero Agrónomo Francisco Meza
Ingeniero Agrónomo Oscar Melo
Biólogo Pablo Marquet
Ingeniero Forestal Juan Pablo Cerda
Ingeniero Agrónomo David Morales

Equipo Complementario

Ingeniero Agrónomo Eduardo Bustos S.

Ingeniero Civil Andrés Pica T.

Ingeniero Civil Sebastián Aedo Q.

Bióloga Natalia Villavicencio

Ingeniera Ambiental Constanza Pardo

Ingeniera Agrónoma Katherine Duarte

Licenciado en Ciencias de la Ingeniería Marcos Canales

Ingeniero Civil Juan Pablo Herane

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	5
1.1 INTRODUCCIÓN	5
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	6
CAPÍTULO 2 CAPACIDADES ORIGINALES DE WEAP.....	7
2.1 CAPACIDADES ORIGINALES DE WEAP, MODFLOW, VÍNCULO WEAP-MODFLOW Y CONEXIÓN DE WEAP CON MODELOS EXTERNOS	7
2.2 MEJORAS QUE SE INCORPORAN AL MODELO WEAP	15
CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS A APLICACIONES DEL MODELO WEAP PARA REPRESENTAR PROCESOS FÍSICOS RELEVANTES EN CUENCAS COSTERAS Y ENDORREICAS CON SALAR Y PERMITIR LA REPRESENTACIÓN EXPLÍCITA DE DECISIONES DE ACTORES EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA	17
3.1 CASO 1 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE EVT EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO AL TUTORIAL DESARROLLADO POR EL SEI	18
3.2 CASO 2 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE ETS EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO A LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA	23
3.3 CASO 3 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE SWI2 EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO A LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA	31
3.4 CASO 4 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE SWI2 EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO A LA CUENCA DEL RÍO QUILIMARÍ	40
3.5 CASO 5 DE APLICACIÓN: ACOUPLE DE UN MODELO DE AGENTES DE INSTITUCIONALIDAD AMBIENTAL EN CUENCA ENDORREICA (SALAR DE ATACAMA)	47
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES.....	54
CAPÍTULO 5 REFERENCIAS.....	55

TABLAS

Tabla 2-1: Paquetes de MODFLOW soportados y utilizados por WEAP, previo a este estudio.	8
Tabla 2-2 Paquetes de MODFLOW soportados, pero no utilizados por WEAP, previo a este estudio. WEAP permite que MODFLOW lea los archivos originales de estos módulos al momento de ejecutarse.....	8
Tabla 2-3: Paquetes de MODFLOW no permitidos por WEAP, previo a este estudio.....	9
Tabla 3-1: Estaciones de monitoreo PAT y umbrales asociados.....	52

FIGURAS

Figura 2-1 Esquema conceptual del funcionamiento del paquete de evapotranspiración, EVT, en MODFLOW.	10
Figura 2-2 Esquema conceptual de la relación lineal por tramos entre la tasa de evapotranspiración en función de la carga hidráulica.	11
Figura 2-3: Distribución vertical de la densidad del fluido en un acuífero con zonas de distinta densidad. La figura superior muestra una distribución discontinua de densidades estratificadas, mientras que la figura inferior presenta una distribución lineal.	12
Figura 3-1: Vista esquemática del modelo WEAP para el caso de aplicación del paquete EVT.	18
Figura 3-2: Captura de pantalla del paquete EVT para el caso de aplicación del paquete EVT.	19
Figura 3-3: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete EVT.	19
Figura 3-4: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete EVT.	20
Figura 3-5: Entradas y salidas mensuales al nodo <i>Groundwater</i> del modelo WEAP del caso de aplicación para el paquete EVT. Se destaca en morado la componente de evapotranspiración calculada por MODFLOW.	21
Figura 3-6: Visualización en WEAP de la distribución espacial de la evapotranspiración en enero del año 2000 y evolución temporal de la evapotranspiración en la celda ubicada en la fila 15, columna 8 de la grilla del modelo MODFLOW para el caso de aplicación del paquete EVT.	22
Figura 3-7: Vista esquemática del modelo WEAP del PEGH-Salar de Atacama para el caso de aplicación del paquete ETS. a) Distribución de las celdas del modelo numérico, b) nodo WEAP que representa el sistema subterráneo y las celdas activas (rojo) sobre las cuales se espacializa este nodo, c) distribución de las celdas enlazadas a los distintos <i>Catchments</i> y d) distribución de los <i>Demand Sites</i> para representar las extracciones desde el sistema subterráneo.	24
Figura 3-8: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete ETS.	25
Figura 3-9: Curvas de evaporación desde la napa y distribución espacial de estas en el modelo MODFLOW para el caso de aplicación del paquete ETS.	26
Figura 3-10: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete ETS.	27
Figura 3-11: Entradas y salidas mensuales al nodo <i>Groundwater</i> del modelo WEAP del caso de aplicación para el paquete ETS. Se destaca en morado la componente de evapotranspiración calculada por MODFLOW.	28
Figura 3-12: Visualización en WEAP de la evolución temporal de la evapotranspiración en la celda ubicada en la fila 193, columna 85 de la grilla del modelo MODFLOW.	29
Figura 3-13: Comparación de los flujos de evapotranspiración con el paquete ETS calculados a partir del modelo MODFLOW-USG, desarrollado por CORFO-AMPHOS21 (2021), y calculados a partir del modelo WEAP-MODFLOW, desarrollado por CORFO-PUC (2021)..	30

Figura 3-14: Vista esquemática del modelo WEAP del PEGH-Salar de Atacama para el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuenca endorreica. a) Distribución de las celdas del modelo numérico, b) nodo WEAP que representa el sistema subterráneo y las celdas activas (rojo) sobre las cuales se espacializa este nodo, c) distribución de las celdas enlazadas a los distintos <i>Catchments</i> y d) distribución de <i>Demand Sites</i> para representar las extracciones desde el sistema subterráneo.	32
Figura 3-15: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca endorreica.	34
Figura 3-16: Distribución de la altura sobre el nivel del mar de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS cm ⁻¹	35
Figura 3-17: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca costera.	36
Figura 3-18: Distribución espacial de la superficie ZETA resultante para el comienzo de la simulación en el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca endorreica.	37
Figura 3-19: Corte transversal para visualizar la elevación de la superficie ZETA a lo largo de la fila 200 de la grilla del modelo MODFLOW.	38
Figura 3-20: Visualización en WEAP de la evolución temporal de la elevación de la superficie ZETA de la celda ubicada en la fila 202, columna 111 de la grilla del modelo MODFLOW.	39
Figura 3-21: a) Vista esquemática del modelo WEAP del PEGH-río Quilimarí para el caso de aplicación del paquete SWI en cuencas costeras y b) celdas activas (rojo) e inactivas (azul) del modelo MODFLOW.	41
Figura 3-22: Vista superior del modelo MODFLOW incorporado en el modelo del caso de aplicación del paquete SWI2 en cuencas costeras y corte transversal para visualizar la condición inicial de nivel y superficie ZETA.	42
Figura 3-23: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca costera.	43
Figura 3-24: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuenca costera.	44
Figura 3-25: Distribución espacial de la superficie ZETA resultante para el año 1990 y 2020 en el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuencas costeras.	45
Figura 3-26: Visualización en WEAP de la evolución temporal de la elevación de la superficie ZETA de la celda ubicada en la fila 70, columna 5 de la grilla del modelo MODFLOW para el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuenca costera.	46
Figura 3-27: Ejemplo de definición del estado de operación de una Unidad Fiscalizable (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2), en base a la información registrada en 2 Estaciones de Monitoreo y sus diferencias a sus umbrales establecidos.	49
Figura 3-28: Conceptualización del acople de un modelo WEAP-MODFLOW a un modelo externo (ABM).	50
Figura 3-29: Nivel piezométrico resultante de la simulación para el catastro L1-4 perteneciente al Operador 1.	52
Figura 3-30: Nivel piezométrico resultante de la simulación para el catastro BA-16 perteneciente al Operador 2.	53

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la Dirección General de Aguas (DGA) se encuentra desarrollando la iniciativa del Plan Nacional de Recursos Hídricos, cuyo objetivo es elaborar e implementar un instrumento estratégico de planificación de carácter indicativo que oriente y coordine las políticas nacionales, planes y programas relacionados directa o indirectamente con el agua en una visión conjunta de los recursos hídricos en el corto, mediano y largo plazo. De manera complementaria a esta iniciativa, la DGA está desarrollando el Plan Estratégico de Gestión Hídrica en todas las cuencas endorreicas e hidrográficas de Chile.

Los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica que la DGA ha desarrollado en el país contemplan, dentro de otras aristas, la implementación de modelos de simulación hidrológica integrados a escala de cuenca, los cuales permitan conocer la oferta y demanda actual de agua y establecer el balance hídrico de la cuenca y sus proyecciones futuras. De esta forma, estos modelos asistirán a la toma de decisiones en cuanto a acciones que aseguren el abastecimiento de agua tanto en cantidad como calidad.

En el marco del estudio *Desarrollo De Herramienta Para El Análisis De Gestión En El Marco Del Plan Nacional De Recursos Hídricos* (DGA, 2019), el DICTUC desarrolló un modelo operacional en la plataforma WEAP integrado a los modelos subterráneos MODFLOW en cinco cuencas nacionales piloto: Copiapó, Limarí, Choapa, Petorca y Ligua. Si bien los modelos integrados WEAP-MODFLOW fueron acoplados en el estudio realizado por el DICTUC (DGA, 2019), este trabajo fue realizado con las limitaciones del modelo hidrológico WEAP existentes al año 2019, las cuales no permiten vincularlo a las capacidades de MODFLOW que representan procesos físicos tales como la evapotranspiración desde las aguas subterráneas y procesos hidrodinámicos de flujo con densidad variable. Otra limitante existente al año 2021 fue la capacidad de acoplar modelos hidro-sociales que representen las decisiones de los agentes de una cuenca a nivel cognitivo. Es por ello por lo que surgió la necesidad de integrar estos módulos de MODFLOW al acople con WEAP. La implementación de estas mejoras en el código WEAP fue abordada en el presente trabajo, tanto en lo que respecta a la representación de aguas superficiales como subterráneas.

Una vez validadas estas mejoras en el enlace WEAP-MODFLOW, se realizaron los siguientes casos de aplicación, presentados en el capítulo 3 de este informe:

- Implementación de los paquetes para representar la evaporación desde la napa:
 - Caso 1: Tutorial WEAP
 - Caso 2: Cuenca del Salar de Atacama en contexto de cuenca endorreica
- Implementación del paquete para representar el proceso de densidad variable en zonas costeras:
 - Caso 3: Cuenca del Salar de Atacama en contexto de cuenca endorreica (interfaz salmuera-agua dulce)
 - Caso 4: Cuenca del río Quilimarí en contexto de cuenca costera (intrusión salina).

- Implementación de un acople a modelo externo
 - Caso 5: Acople WEAP-MODFLOW a modelo en Base a Agentes representativo, de forma simplificada, de la Institucionalidad Ambiental en cuenca endorreica (Salar de Atacama)

Junto con el desarrollo de estas mejoras al modelo, se realizó una capacitación de transferencia de estas capacidades a profesionales de la DGA el día 6 de diciembre de 2021. La grabación y presentación de esta capacitación se adjuntan en el Apéndice I de este informe.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos de este estudio son los siguientes:

- **Objetivo 1:** Desarrollar las mejoras al modelo de simulación WEAP para permitir la representación de interfaz agua dulce y salada presente en cuencas costeras y endorreicas con salar.
- **Objetivo 2:** Desarrollar las mejoras al modelo de simulación WEAP para permitir la representación explícita de decisiones de actores en la gestión de recursos hídricos en una cuenca.

CAPÍTULO 2 CAPACIDADES ORIGINALES DE WEAP

2.1 CAPACIDADES ORIGINALES DE WEAP, MODFLOW, VÍNCULO WEAP-MODFLOW Y CONEXIÓN DE WEAP CON MODELOS EXTERNOS

En esta sección se presentan las capacidades de WEAP, del vínculo WEAP-MODFLOW, hasta el año 2021, en cuanto a la compatibilidad con los paquetes de MODFLOW que permiten representar distintos procesos físicos asociados al flujo subterráneo. Adicionalmente, se describen los paquetes disponibles de MODFLOW para representar los procesos evapotranspirativos y de flujo subterráneo con densidad variable, los cuales serán incorporados a las capacidades del vínculo WEAP-MODFLOW producto de este estudio. Se presentan también las capacidades de WEAP para conectar con modelos externos, como lo puede ser un Modelo en Base a Agentes para la representación explícita de la toma de decisiones.

El vínculo WEAP-MODFLOW se basa en la lectura de los archivos nativos y archivos de salida del modelo MODFLOW. Previo a la simulación, WEAP lee los archivos nativos de los paquetes de MODFLOW y genera una nueva versión de estos. Durante cada paso temporal, WEAP escribe un nuevo conjunto de archivos nativos de MODFLOW, asociados al paso temporal, ejecuta MODFLOW para simular el flujo subterráneo en ese paso temporal y luego, en caso de que el modelo WEAP requiera de información de MODFLOW, lee los resultados de los archivos de salida de MODFLOW. Más información al acople WEAP-MODFLOW se puede encontrar en los detalles técnicos del enlace¹. Los paquetes implementados en el vínculo WEAP-MODFLOW previo a este trabajo se presentan en la Tabla 2-1 y la Tabla 2-2. La Tabla 2-1 contiene los paquetes de MODFLOW cuya información es leída por WEAP y son reescritos. Los paquetes cuyas variables WEAP permite que varíen en el tiempo son reescritos para cada paso de tiempo y los que no, son escritos una única vez, quedando como información constante a lo largo de toda la simulación, como, por ejemplo, el paquete Basic (BAS6). La Tabla 2-2 presenta los paquetes de MODFLOW que WEAP admite que el modelo MODFLOW utilice, pero que no son leídos ni reescritos por WEAP directamente, manteniendo los archivos originales de estos paquetes, como, por ejemplo, los solucionadores de MODFLOW (DE4, PCG, SIP y NWT). Los paquetes no soportados por WEAP se muestran en la Tabla 2-3. Es importante considerar que las versiones del código MODFLOW que pueden ser vinculadas a WEAP corresponden a MODFLOW-2000, MODFLOW-2005 y MODFLOW-NWT.

¹ Detalles técnicos del enlace de WEAP con MODFLOW:
https://www.weap21.org/WebHelp/Linking_to_MODFLOW_Details.htm

Tabla 2-1: Paquetes de MODFLOW soportados y utilizados por WEAP, previo a este estudio.

Nombre	Descripción
BAS6	Basic
BCF6	Block-Centered Flow
CHD	Time-Variant Specified-Head Package
DIS	Discretization
DRN	Drain
GHB	Ground-Water Flow Process General-Head Boundary
HUF2	Hydrogeologic Unit Flow
LPF	Layer Property Flow
NAM	Name
OC	Output Control
RCH	Recharge
RIV	River
UPW	Upstream Weighting
WEL	Well

Fuente: Elaborado a partir de WEAP21 (2020)

Tabla 2-2 Paquetes de MODFLOW soportados, pero no utilizados por WEAP, previo a este estudio. WEAP permite que MODFLOW lea los archivos originales de estos módulos al momento de ejecutarse.

Nombre	Descripción
ADV2	Advective-Transport Observation
DE4	Direct Solution
GAGE	Stream Gaging, Station File
HFB6	Ground-Water Flow Process Horizontal Flow Barrier
HYD	HYDMOD
IBS	Interbed-Storage
KDEP	Hydraulic-Conductivity Depth-Dependence Capability of the HUF2
LMG	Link-AMG
LVDA	Model-Layer Variable-Direction Horizontal Anisotropy capability of the HUF2
MULT	Multiplier
NWT	Netwon Solver
PCG	Preconditioned Conjugate-Gradient
SIP	Strongly Implicit Procedure
SOR	Slice-Successive Over-Relaxation
SUB	Subsidence and Aquifer-System Compaction
ZONE	Zone package

Fuente: Elaborado a partir de WEAP21 (2020)

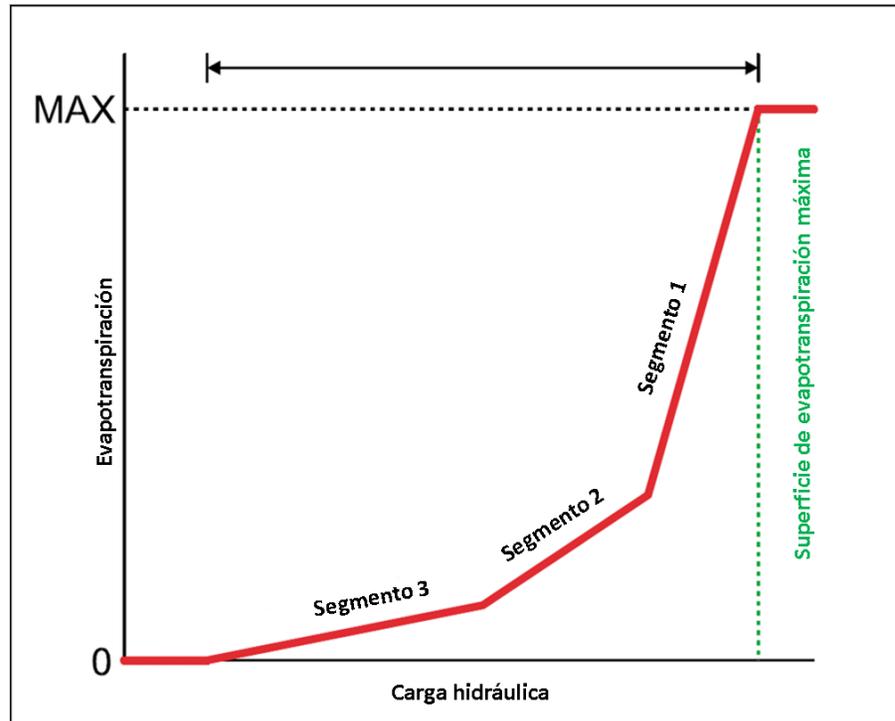
Tabla 2-3: Paquetes de MODFLOW no permitidos por WEAP, previo a este estudio.

Nombre	Descripción
ASP	Advanced Spatial Parameterization
DAF	DAFLOW surface-water
DAFG	DAFLOW ground-water
DRT	Drain Return
ETS	Evapotranspiration Segments
EVT	Evapotranspiration
FHB	Flow and Head Boundary
LAK	Lake
MNW1	Multi-Node, Drawdown-Limited Well
MNW2	Multi-Node Well
PES	Parameter Estimation
PVAL	Parameter Value
RES	Reservoir
SEN	Sensitivity Process
SFR	Streamflow-Routing
STR	Streamflow-Routing
SWI2	Seawater Intrusion
SWR	Surface-Water Routing
UZF	Unsaturated Zone Flow

Fuente: Elaborado a partir de WEAP21 (2020)

Respecto a la necesidad de representar tanto procesos evapotranspirativos como procesos hidrodinámicos de intrusión salina en cuencas costeras mediante la representación de flujo subterráneo de densidad variable, MODFLOW es capaz de resolver estos dos fenómenos de manera independiente a través de los paquetes EVT (Harbaugh et al., 2000) y ETS (Banta, 2000) para el proceso de evapotranspiración y el paquete SWI2 (Bakker et al., 2013) para el proceso de flujo con densidad variable para la intrusión salina.

El paquete EVT (Evapotranspiration Package) está disponible para las versiones de MODFLOW-2000, MODFLOW-2005 y MODFLOW-NWT, entre otras, por lo que su implementación es factible dentro del vínculo WEAP-MODFLOW en todas sus versiones. Este paquete permite simular las salidas de agua subterránea producto del efecto de la transpiración de las plantas y de la evaporación directa desde el suelo. Esta evapotranspiración queda determinada para cada período de stress al especificar una elevación de evapotranspiración máxima, la profundidad de extinción y la tasa máxima potencial de evapotranspiración, como se muestra en la Figura 2-1. Estos valores deben ser ingresados para cada celda de la grilla del modelo MODFLOW, representando el proceso evapotranspirativo de manera discreta y permitiendo representar la heterogeneidad espacial que este proceso pueda tener.



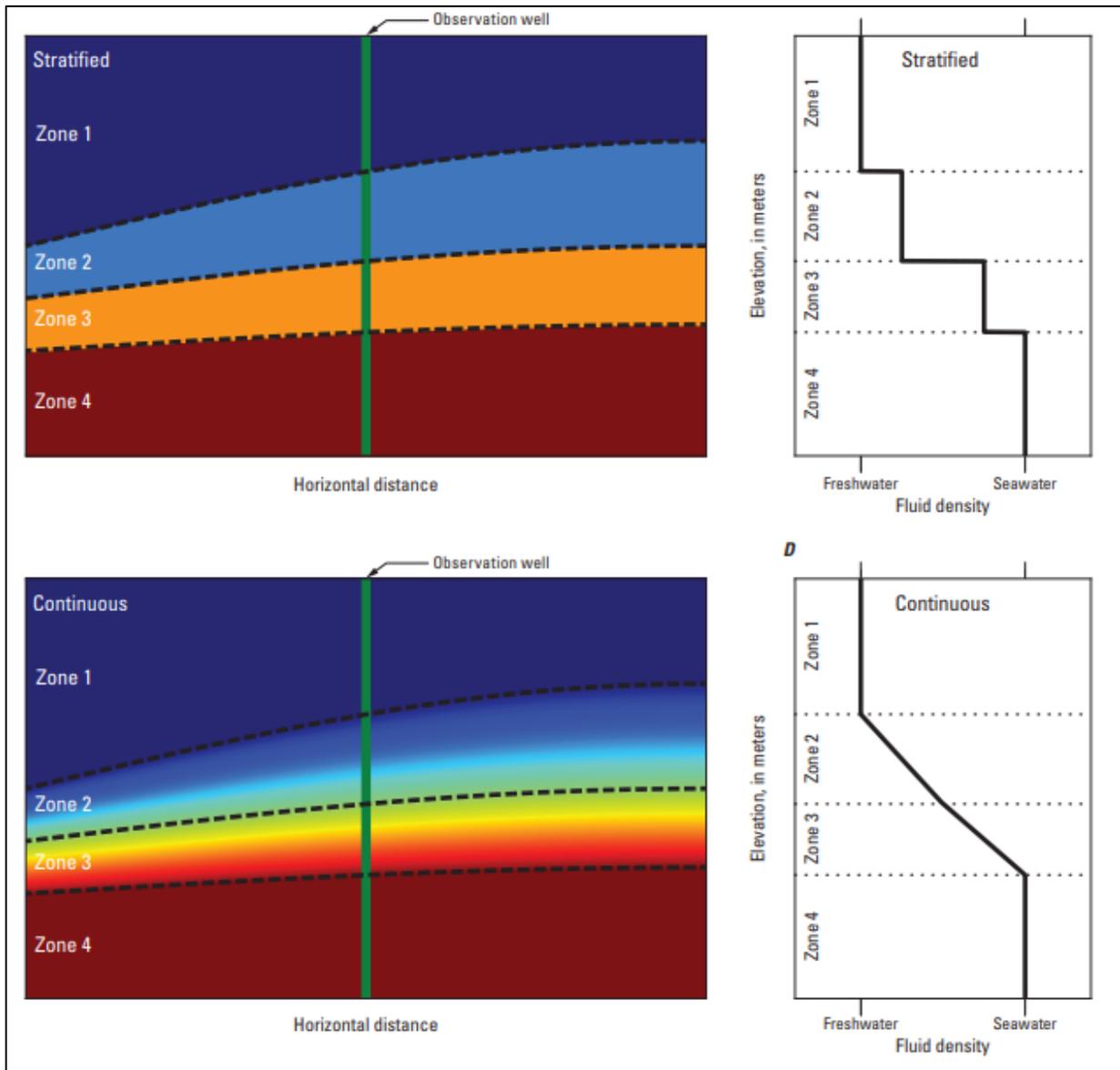
Fuente: Elaboración propia

Figura 2-2 Esquema conceptual de la relación lineal por tramos entre la tasa de evapotranspiración en función de la carga hidráulica.

De esta forma, si la carga hidráulica se encuentra por sobre la elevación máxima de evapotranspiración, la evapotranspiración se produce a la tasa máxima evapotranspirativa. Por otro lado, si la carga hidráulica se ubica por debajo de la profundidad de extinción, cesa la evapotranspiración. En caso contrario, la evapotranspiración es interpolada a partir de una función lineal por tramos (Figura 2-2).

Al igual que el paquete EVT, MODFLOW implementa esta evapotranspiración en el paquete ETS como una condición de borde mixta o de tipo Cauchy. Esta condición de borde también puede especificarse tanto para la superficie de la primera capa del modelo, como para las celdas especificadas por el usuario o para las celdas saturadas de la capa superior.

El paquete SWI2 (Seawater Intrusion) está implementado en los códigos MODFLOW-2005 y MODFLOW-NWT, por lo que su implementación es compatible con dichas versiones del vínculo WEAP-MODFLOW. Este paquete permite simular el flujo de agua subterránea de densidad variable tridimensional verticalmente integrado y la intrusión de agua de mar en sistemas costeros de múltiples acuíferos. Esta representación considera la existencia de superficies que separan verticalmente zonas de distinta densidad (superficies ZETA). La cantidad de superficies ZETA a definir es ilimitada y la variación de densidad entre estas puede ser de forma discreta o continua (Figura 2-3).



Fuente: Bakker et al. (2013)

Figura 2-3: Distribución vertical de la densidad del fluido en un acuífero con zonas de distinta densidad. La figura superior muestra una distribución discontinua de densidades estratificadas, mientras que la figura inferior presenta una distribución lineal.

El algoritmo que resuelve el paquete SWI2 consiste en calcular los niveles de agua fresca en el paso de tiempo, resolviendo las ecuaciones de flujo más términos fuente que corrigen en balance hídrico por diferencia de densidad (Bakker et al., 2013). Para ello, se requiere utilizar los niveles equivalentes de agua fresca y las elevaciones de las superficies ZETA calculadas en el paso de tiempo anterior. Posteriormente, y en el mismo paso de tiempo, el código resuelve la ecuación cinemática de las superficies ZETA. Cabe mencionar que esta formulación matemática es apropiada únicamente para sistemas donde los fluidos tienen una variación de densidad del orden de 2% o con densidades entre el rango de agua fresca y agua de mar. Adicionalmente, este paquete no es adecuado para casos donde la zona de

mezcla entre agua salada y dulce, o las variaciones en viscosidad producto de cambios en la densidad sean relevantes (Bakker et al., 2013).

La elevación de las superficies ZETA son una nueva variable de estado del modelo MODFLOW, por lo que el uso de SWI2 requiere de una correcta estimación inicial de la distribución espacial de esta. Adicionalmente, SWI2 requiere valores de la porosidad efectiva de cada celda, la densidad de cada una de las zonas y definir la densidad de los flujos de salida y entrada del sistema mediante el parámetro ISOURCE como parámetro de entrada (Bakker et al., 2013).

Como se constata en la Tabla 2-3, los tres paquetes de MODFLOW descritos anteriormente que representan procesos evapotranspirativos y de flujo con densidad variable no se encuentran disponibles al año 2021 para el acople WEAP-MODFLOW.

Respecto al acople con modelos externos, WEAP es capaz de ejecutar un modelo en modo interactivo a través de su Interfaz de Programación de Aplicaciones (API por sus siglas en inglés). Esto hace posible acoplar modelos de manera secuencial a WEAP, es decir, de tal manera que los archivos de entrada de un modelo influyeran las salidas del siguiente modelo. A nivel temporal, esta capacidad nativa de WEAP permite controlar la ejecución completa de un modelo WEAP o WEAP-MODFLOW, realizando todos los cálculos asociados a un solo paso temporal, para luego ejecutar cualquier modelo o herramienta de simulación externa (e.g., Modelo en Base a Agentes), antes de calcular el siguiente paso temporal, logrando así generar un acople más extenso.

En el marco de una herramienta de gestión hídrica integrada, surge la necesidad de que un modelo hidrológico superficial y subterráneo acoplado permita representar estos procesos físicos y que puedan ser acoplados de forma interactiva con otras herramientas de simulación, como los son los ABM, que permiten incorporar aspectos clave de la gestión del recurso hídrico. Este estudio responde a estas necesidades de manera que estos procesos queden representados en un modelo WEAP-MODFLOW integrado ya existente.

De modo de poder acoplar un modelo WEAP-MODFLOW con un ABM con la suficiente flexibilidad para el traspaso de datos entre ellos, se hace uso del lenguaje de programación Python. Para poder lograr este acople dentro de este ambiente de programación, es necesario (1) activar el modo interactivo de WEAP antes mencionado, y (2) programar la ejecución secuencial de ambos modelos (ABM y WEAP-MODFLOW).

En cuanto al primer paso (la activación del modo interactivo de WEAP), primero es necesario instalar la librería de código abierto Pywin32², la cual provee acceso a un amplio repositorio de interfaces de programación de aplicaciones desde Python, entre las cuales se encuentra la API de WEAP. Una vez instalada dicha librería, se debe crear un script de Python e incluir en él las siguientes líneas de código, las cuales en su conjunto preparan el modelo para ser utilizado a través de la API.

² Las instrucciones de instalación con el gestor estándar de paquetes de Python "pip" se encuentra en la página web oficial de esta librería: <https://pypi.org/project/pywin32/>

```
# Importar librería:  
import win32com.client as win32  
  
# Ejecutar API:  
WEAP = win32.Dispatch("WEAP.WEAPApplication")  
  
# Definir área activa:  
WEAP.ActiveArea = WEAP.Areas("Nombre_Modelo")  
  
# Definir escenario activo:  
WEAP.ActiveScenario = WEAP.Scenario("Nombre_Escenario")  
  
# Activar modo interactivo para la API:  
WEAP.InitializeInteractiveCalculations()  
  
# Activar modo interactivo para el escenario:  
WEAP.Scenario("Nombre_Escenario").InitializeInteractiveCalculations()
```

2.2 MEJORAS QUE SE INCORPORAN AL MODELO WEAP

En esta sección se reportan las mejoras y consideraciones asociadas al vínculo WEAP-MODFLOW que permiten representar los procesos evapotranspirativos y de flujo con densidad variable, descritos en los acápite anteriores. La implementación de las mejoras se realizó con la asesoría del Stockholm Environment Institute (SEI), quienes modificaron el modelo WEAP para que sea compatible con los paquetes EVT (Evapotranspiration) y ETS (Evapotranspiration Segments), para representar los procesos evapotranspirativos, y el paquete SWI2 (Seawater intrusion), para representar el proceso de flujo subterráneo con densidad variable, procesos que son relevantes tanto en la cuenca del Salar de Atacama como en otras cuencas costeras o salares del país. Las pruebas piloto fueron realizadas en la versión 2019.2129 (Beta) de WEAP, cuyo ejecutable se encuentra disponible en el Apéndice II de este informe, y se encuentran actualmente habilitadas para su uso a partir de la versión 2021.0 de WEAP. Las modificaciones son:

1. Mejoras en la representación de los procesos de evaporación directa desde el acuífero.

Para incorporar los paquetes EVT o ETS al vínculo WEAP-MODFLOW se requiere únicamente de generar el archivo asociado al paquete y explicitarlo en el archivo *Name* del modelo MODFLOW. Al incorporar uno de estos paquetes, WEAP genera una copia considerando los parámetros del primer período de estrés del archivo original para la totalidad de la simulación, omitiendo así la variación temporal que pudieran tener los parámetros del paquete. Para cada paso de tiempo, WEAP genera los archivos nativos de MODFLOW, sin embargo, en el archivo *Name* se llama siempre a la copia del paquete EVT o ETS ya mencionada. Adicionalmente, para cada paso de tiempo WEAP lee los flujos de evapotranspiración desde el archivo de balance celda a celda (cell-by-cell). A partir de estos flujos WEAP modifica el balance de agua de los nodos de agua subterránea vinculados a MODFLOW incorporándolos en los resultados de entrada (inflows) y salidas (outflows) de los nodos respectivos. Adicionalmente, ahora WEAP incluye dos nuevas salidas de MODFLOW en la vista de resultados: 1) el volumen de evapotranspiración de MODFLOW y la 2) profundidad de evapotranspiración de MODFLOW, resultados que se presentan para cada celda de la grilla del modelo MODFLOW.

2. Mejoras en cuanto a la representación de procesos hidrodinámicos de intrusión salina y flujos de densidad variable en sistemas multiacuíferos.

Para incorporar el paquete SWI2 al vínculo WEAP-MODFLOW se requiere únicamente de generar el archivo asociado al paquete y explicitarlo en el archivo *Name* del modelo MODFLOW. Al incorporar este paquete, WEAP genera una copia para cada paso de tiempo. Adicionalmente, para cada paso de tiempo, WEAP genera los archivos nativos de MODFLOW y corre el modelo MODFLOW para ese paso de tiempo. Posterior a cada simulación con MODFLOW, WEAP escribe la elevación de las superficies ZETA en archivos binarios separados para luego ser llamados por el paquete SWI2 en el siguiente paso de tiempo como condición inicial. En los resultados, WEAP ajusta los flujos en el archivo cell-by-cell mediante los términos SWIADDTOFLF, SWIADDTOFRF y SWIADDTOFFF que son calculados por el paquete SWI2 (Bakker et al., 2013), para la cara inferior (LF), la cara

derecha (RF) y la cara frontal (FF), respectivamente. En el balance volumétrico del modelo, WEAP agrega el término SWIADDOCH al término CONSTANT HEAD, para obtener el valor correcto asociado a la condición de nivel prescrito. Adicionalmente, las elevaciones de las superficies ZETA resultantes están disponibles en la vista de resultados como gráficos de superficie en 3-D.

3. Mejoras en la capacidad del modelo de representar decisiones de usuarios finales del modelo, es decir, actores del territorio, sean endógenas en los modelos, basadas en la observación del estado de las variables ambientales representadas en WEAP. Lo anterior se ejecutó mediante la realización de talleres de modelación participativa en el marco del proyecto CORFO-PUC (2021). Dichos talleres permitieron la elaboración de mapas cognitivos que fueron codificados en un modelo conceptual y luego un ABM acoplado con el modelo físico integrado de la cuenca del Salar de Atacama. Cabe destacar que WEAP ya cuenta con las capacidades para ser controlado vía API a través de lenguajes de programación (e.g., Python), lo que permitió su posterior acople con el ABM.

CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS A APLICACIONES DEL MODELO WEAP PARA REPRESENTAR PROCESOS FÍSICOS RELEVANTES EN CUENCAS COSTERAS Y ENDORREICAS CON SALAR Y PERMITIR LA REPRESENTACIÓN EXPLÍCITA DE DECISIONES DE ACTORES EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN UNA CUENCA

En este capítulo se presentan cuatro casos de aplicación para ejemplificar el uso de las mejoras implementadas en el software WEAP. Los casos de aplicación consideran la implementación de los paquetes EVT, ETS y SWI2 en el vínculo WEAP-MODFLOW y se presentan a continuación:

- Caso 1: Implementación del paquete EVT en el Tutorial WEAP para el enlace WEAP MODFLOW.
- Caso 2: Implementación del paquete ETS en la cuenca del Salar de Atacama, donde la evaporación desde la napa es relevante en las inmediaciones y alrededores del núcleo del salar.
- Caso 3: Implementación del paquete SWI2 en la cuenca del Salar de Atacama en contexto de cuenca endorreica, donde hay una interfaz entre fluidos de distinta densidad como lo son la salmuera y el agua fresca.
- Caso 4: Implementación del paquete SWI2 en la cuenca del río Quilimarí en contexto de cuenca costera, donde ocurre el fenómeno de intrusión salina.
- Caso 5: Acople WEAP-MODFLOW a Modelo en Base a Agentes representativo, de forma simplificada, de la Institucionalidad Ambiental en cuenca endorreica (Salar de Atacama).

La estructura de los casos de aplicación considera una breve descripción del sistema a analizar, una presentación de los parámetros utilizados en el paquete de MODFLOW, un ejemplo de los mensajes de WEAP asociados a la correcta implementación del paquete y un ejemplo de la visualización de los resultados tanto en WEAP como de forma externa. Debido a que la activación de los paquetes EVT, ETS y SWI2 no requiere de modificaciones a la estructura de WEAP o del archivo de enlace, no se detallan aspectos asociados a estos.

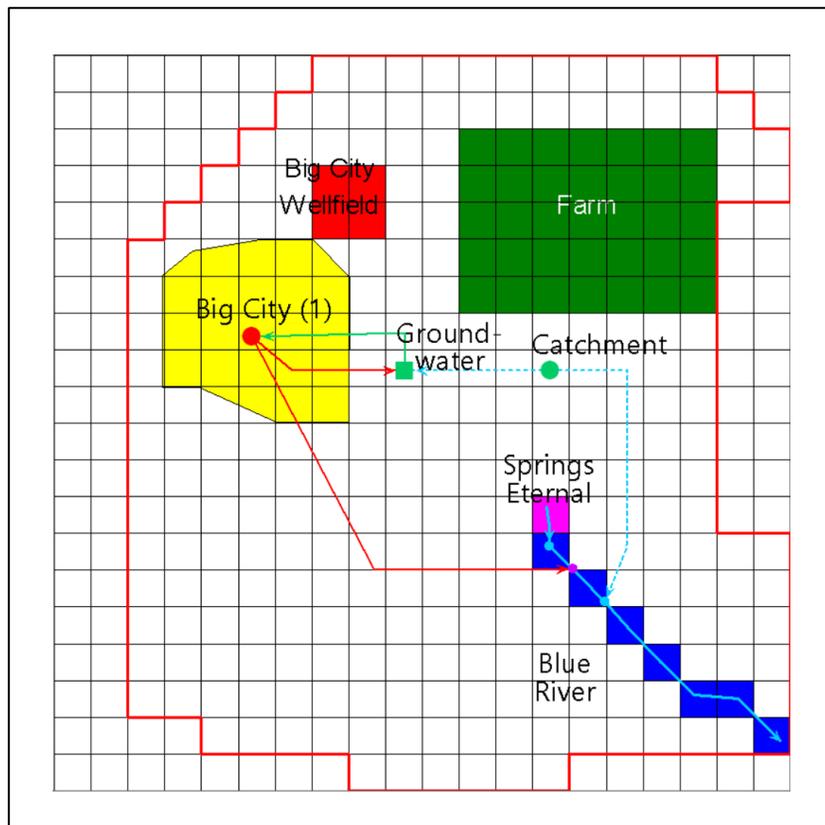
Los respaldos o *Backup* de WEAP de los casos de aplicación se encuentran disponibles en el Apéndice III de este informe.

3.1 CASO 1 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE EVT EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO AL TUTORIAL DESARROLLADO POR EL SEI

En este apartado se describe el caso de aplicación del paquete EVT para representar la evaporación desde la napa y los principales resultados asociados a la evapotranspiración que se pueden revisar en WEAP. El respaldo o *Backup* del área de WEAP se encuentra disponible como "Caso_Aplicacion_1_EVT.WEAP" en el Apéndice III.

3.1.1 Descripción del sistema

El modelo de este caso de aplicación corresponde al modelo presentado en el Tutorial WEAP-MODFLOW desarrollado por el SEI³ (Figura 3-1). El sistema consiste en un único nodo *Catchment* y un único nodo *Groundwater* para representar la hidrología superficial y subterránea de la totalidad del sistema, respectivamente. Adicionalmente, el modelo considera la existencia de un río que es alimentado por afloramientos desde el acuífero y de una ciudad abastecida desde aguas subterráneas, cuyos excesos son devueltos al río.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Vista esquemática del modelo WEAP para el caso de aplicación del paquete EVT.

³ Tutorial de WEAP, desarrollado por el SEI: http://www.weap.org/downloads/WEAP_Tutorial.pdf

El nodo *Groundwater* es representado por el modelo MODFLOW-2005. La discretización espacial del modelo considera una única capa con 20 filas de 1000 metros de ancho y 20 columnas de 1000 metros de ancho. El dominio temporal del modelo consiste en 11 años de simulación discretizados en periodos de estrés mensuales. Las unidades del modelo MODFLOW son metros para la escala de longitud y segundos para la escala temporal.

El modelo original no cuenta con la representación de la evaporación desde la napa debido a que esta se encuentra a aproximadamente 100 m de profundidad desde el nivel del terreno. Sin embargo, en este caso de aplicación se incorporará el paquete EVT como una primera aproximación básica para activar los paquetes que se incorporaron al enlace WEAP-MODFLOW a partir de este informe.

3.1.2 Parámetros utilizados en el paquete

Se activó el paquete EVT con valores constantes para todas las celdas activas. Se consideró una superficie de evapotranspiración máxima de 520 m.s.n.m, con una evapotranspiración máxima de 10^{-8} m/s y una profundidad de extinción de 1 m. En la Figura 3-2 se presenta una captura de pantalla del archivo del paquete EVT generado y en la Figura 3-3 se presenta una captura de pantalla del archivo Namefile, mostrando que el paquete EVT está incorporado en el modelo MODFLOW.

```
# EVT: Evapotranspiration package file created on 05/12/2021 by ModelMuse version 4.3.0.0.
1 9 # DataSet 2: NEVTOP IEVTCB
1 1 1 -1 # Data Set 5: INSURF INEVTR INEXDP INIEVT Stress period 1
CONSTANT 5.200000000000E+002 # Data Set 6: SURF
CONSTANT 1.000000000000E-008 # Data Set 7: EVTR
CONSTANT 1.000000000000E+000 # Data Set 9: EXDP
```

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2: Captura de pantalla del paquete EVT para el caso de aplicación del paquete EVT.

```
# Name File for MODFLOW created on 05/12/2021 by ModelMuse Version 4.3.0.0
LIST 11 tutorial_WM_EVT.lst REPLACE
DATA(BINARY) 9 tutorial_WM_EVT.cbc REPLACE
DIS 12 tutorial_WM_EVT.dis OLD
BAS6 13 tutorial_WM_EVT.bas OLD
OC 39 tutorial_WM_EVT.oc OLD
DATA 37 tutorial_WM_EVT.fhd REPLACE
DATA 38 tutorial_WM_EVT.fdn REPLACE
PCG 18 tutorial_WM_EVT.pcg OLD
BCF6 64 tutorial_WM_EVT.bcf OLD
CHD 17 tutorial_WM_EVT.chd OLD
RIV 21 tutorial_WM_EVT.riv OLD
DRN 22 tutorial_WM_EVT.drn OLD
RCH 24 tutorial_WM_EVT.rch OLD
EVT 25 tutorial_WM_EVT.evt OLD
```

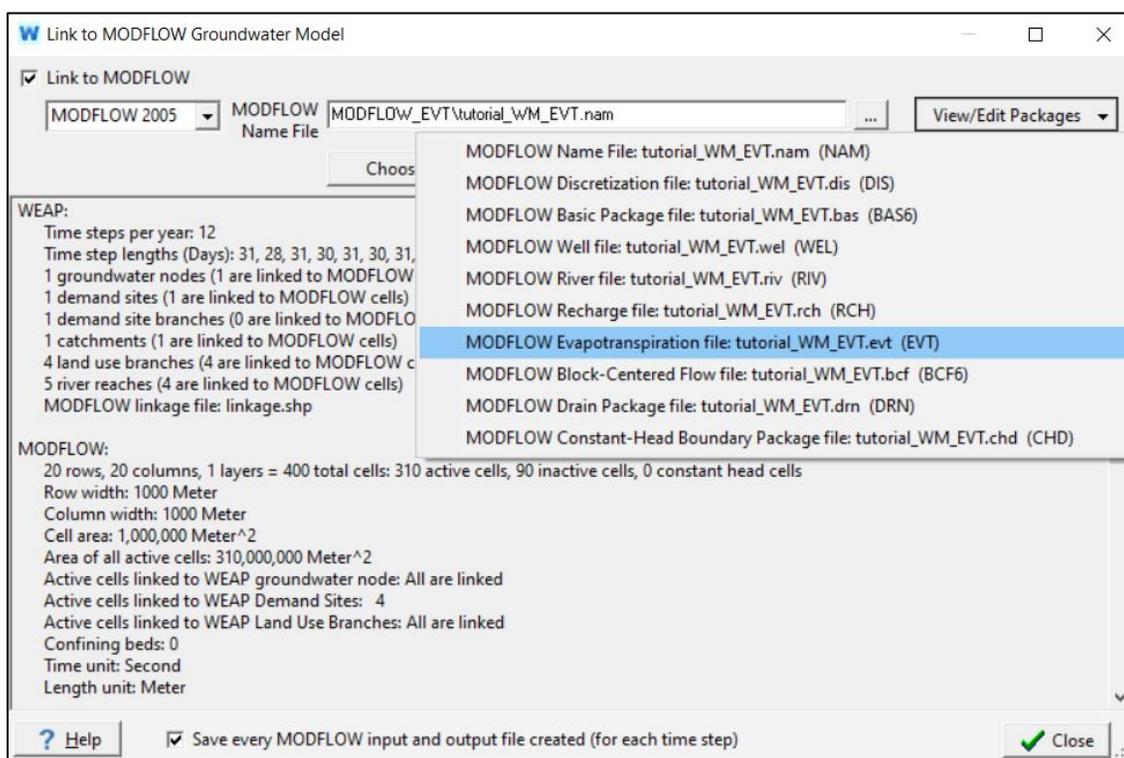
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-3: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete EVT.

Los archivos nativos del modelo MODFLOW (archivo Namefile y archivo de los paquetes considerados en el modelo) se deben guardar en el área de WEAP para posteriormente activar el enlace WEAP-MODFLOW.

3.1.3 Mensajes de WEAP asociados a una correcta implementación del paquete

Una vez generado el enlace WEAP-MODFLOW, con el paquete EVT incorporado al modelo MODFLOW, el listado de paquetes de MODFLOW identificados por WEAP para el enlace se podrá revisar en la opción "View/Edit Packages", como se muestra en la Figura 3-4. Si el paquete EVT se encuentra en el listado y no se ha levantado ninguna ventana de advertencia o error, la activación del paquete EVT fue exitosa.

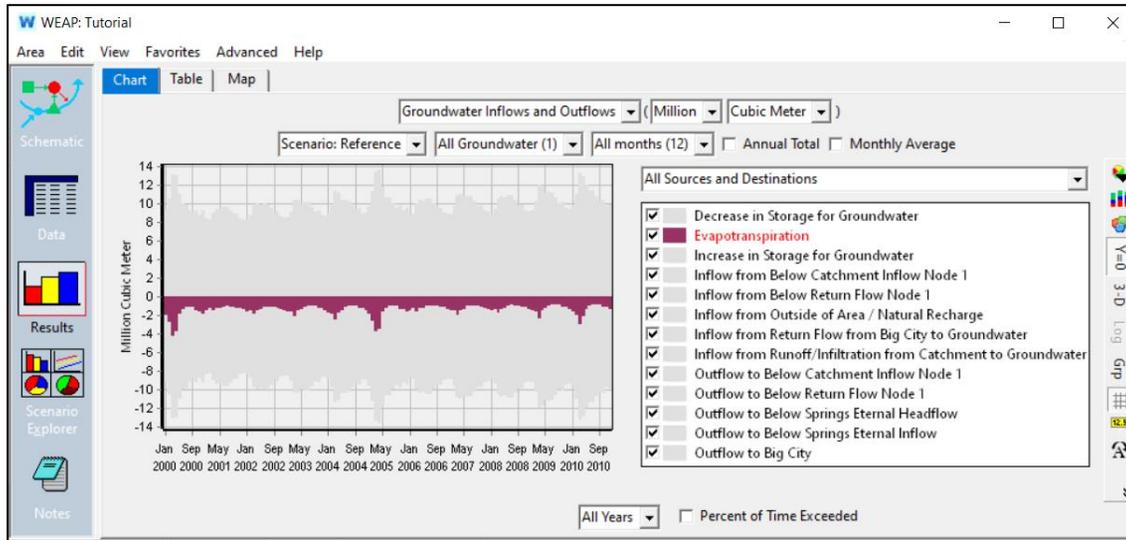


Fuente: Elaboración propia

Figura 3-4: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete EVT.

3.1.4 Resultados

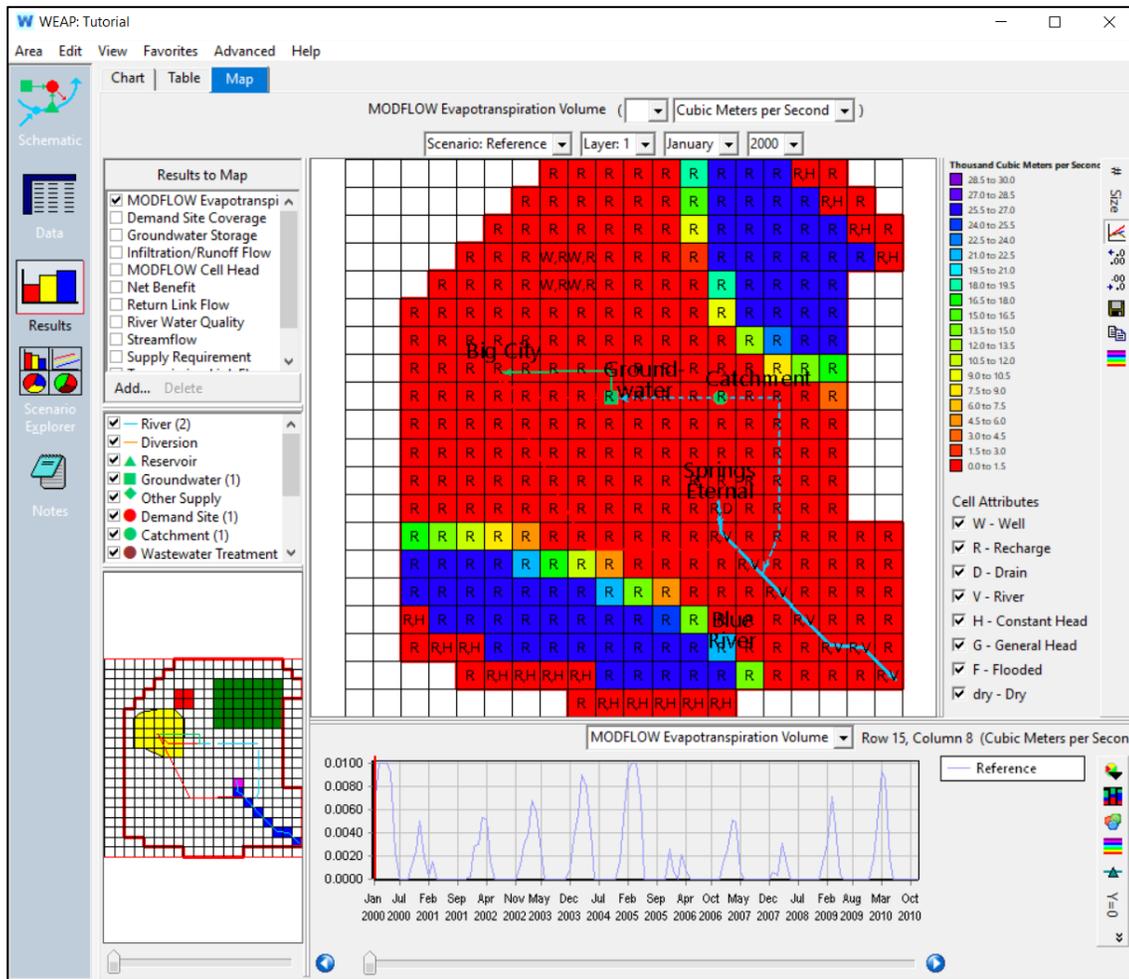
Como se presentó en la sección 3.2, WEAP lee los flujos de evapotranspiración desde el archivo de balance (cell-by-cell) resultante del modelo MODFLOW para cada paso de tiempo y los incluye en el balance de entradas y salidas de los nodos *Groundwater*. En la Figura 3-6 se muestra el balance del nodo *Groundwater* de WEAP, destacando la componente de evapotranspiración, proveniente del modelo MODFLOW.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-5: Entradas y salidas mensuales al nodo *Groundwater* del modelo WEAP del caso de aplicación para el paquete EVT. Se destaca en morado la componente de evapotranspiración calculada por MODFLOW.

WEAP permite también explorar la evolución temporal del volumen o profundidad de evapotranspiración de cada una de las celdas de la grilla del modelo MODFLOW. Esta capacidad es similar a la visualización en WEAP de la evolución de niveles, volumen de bombeos o volumen de recarga en cada una de las celdas. Un ejemplo de este resultado se presenta en la Figura 3-6.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-6: Visualización en WEAP de la distribución espacial de la evapotranspiración en enero del año 2000 y evolución temporal de la evapotranspiración en la celda ubicada en la fila 15, columna 8 de la grilla del modelo MODFLOW para el caso de aplicación del paquete EVT.

Notar que los valores de flujos evapotranspirativos registrados en el archivo de balance celda a celda (cell-by-cell) son un resultado de MODFLOW, por lo que estos pueden ser cargados en otras plataformas como ModelMuse, Python u otras interfaces y no únicamente en WEAP.

3.2 CASO 2 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE ETS EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO A LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA

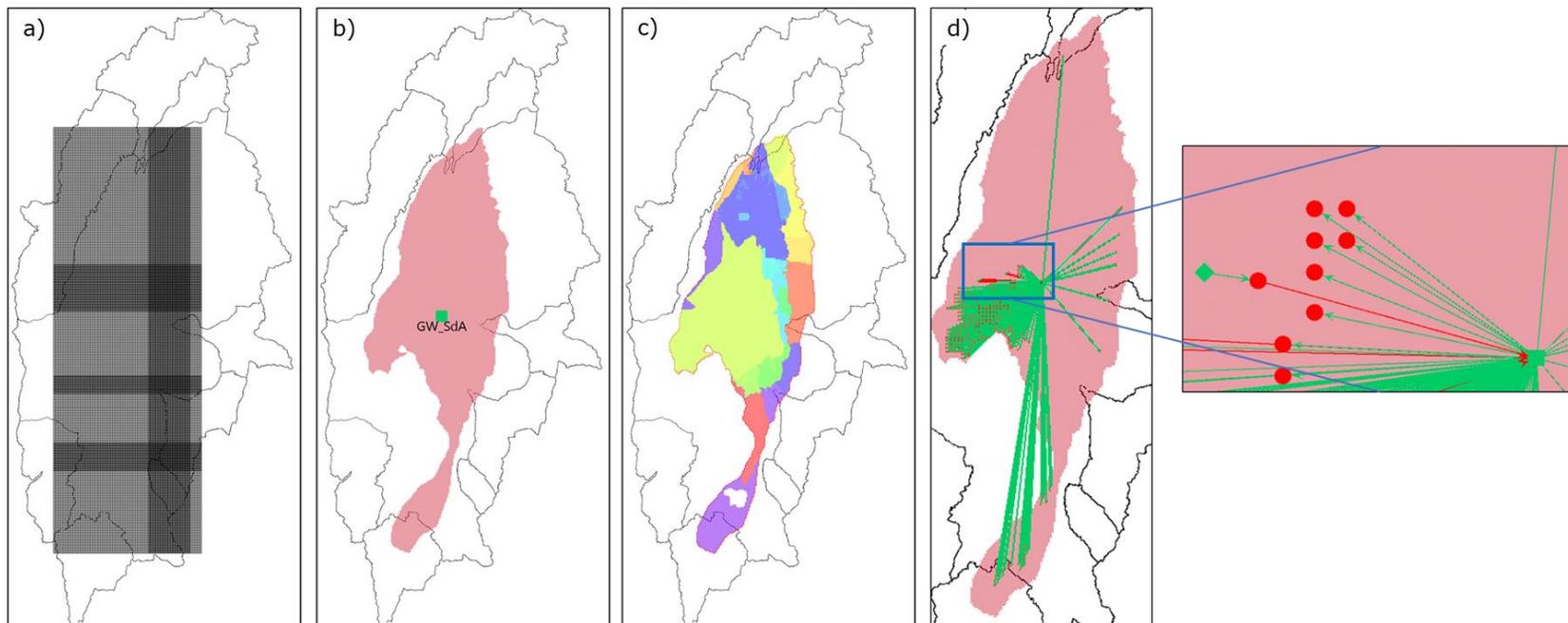
En este apartado se describe el caso de aplicación del paquete ETS para representar la evaporación desde la napa y los principales resultados asociados a la evapotranspiración que se pueden revisar en WEAP. El respaldo o *Backup* del área de WEAP se encuentra disponible como "Caso_Aplicacion_2_ETS.WEAP" en el Apéndice III.

3.2.1 Descripción del sistema

El modelo del caso de aplicación corresponde a la componente Salar-Monturaqui del modelo integrado de la cuenca del Salar de Atacama, desarrollado en el marco del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (DGA-PUC, en desarrollo) (Figura 3-7). Esta componente representa la zona del núcleo, zona marginal, zona aluvial y la zona de Monturaqui de la cuenca del Salar de Atacama. El sistema consiste en un set de nodos *Catchment* que discretizan las distintas subcuencas de la cuenca y representan la hidrología superficial, un único nodo *Groundwater* que representa la totalidad del sistema subterráneo y un set de nodos *Demand Site* que representan las extracciones para uso minero y humano.

El nodo *Groundwater* es representado por el modelo MODFLOW-NWT. El modelo considera cuatro capas, 418 filas con ancho variable entre 250 y 500 metros y 153 columnas con ancho variable entre 250 y 500 metros. El dominio temporal del modelo cubre el período 1980 – 2018, siendo el período 1980 – 1985 considerado como período de calentamiento, discretizado en periodos de estrés mensuales. Las unidades del modelo MODFLOW son metros para la escala de longitud y días para la escala temporal.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica, por lo que el agua confluye hacia la zona del núcleo, donde la única salida, además de las extracciones, es por evaporación, por lo que la evaporación desde la napa cumple un rol importante en el sistema.

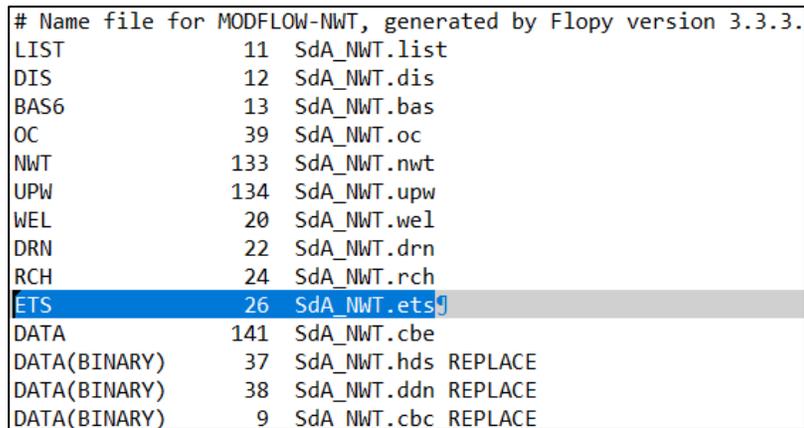


Fuente: Elaboración propia

Figura 3-7: Vista esquemática del modelo WEAP del PEGH-Salar de Atacama para el caso de aplicación del paquete ETS. a) Distribución de las celdas del modelo numérico, b) nodo WEAP que representa el sistema subterráneo y las celdas activas (rojo) sobre las cuales se espacializa este nodo, c) distribución de las celdas enlazadas a los distintos *Catchments* y d) distribución de los *Demand Sites* para representar las extracciones desde el sistema subterráneo.

3.2.2 Parámetros utilizados en el paquete

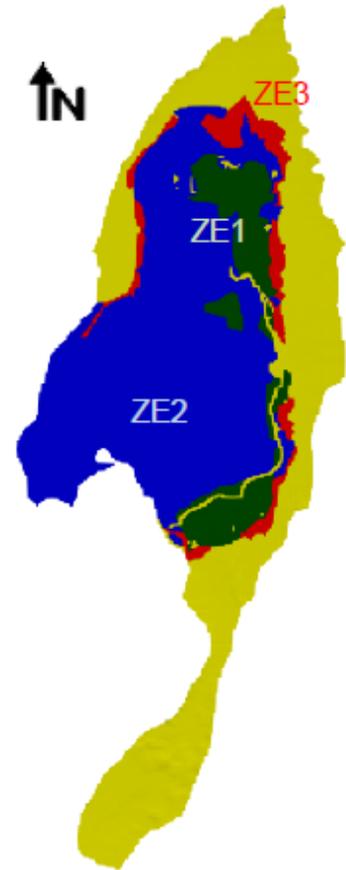
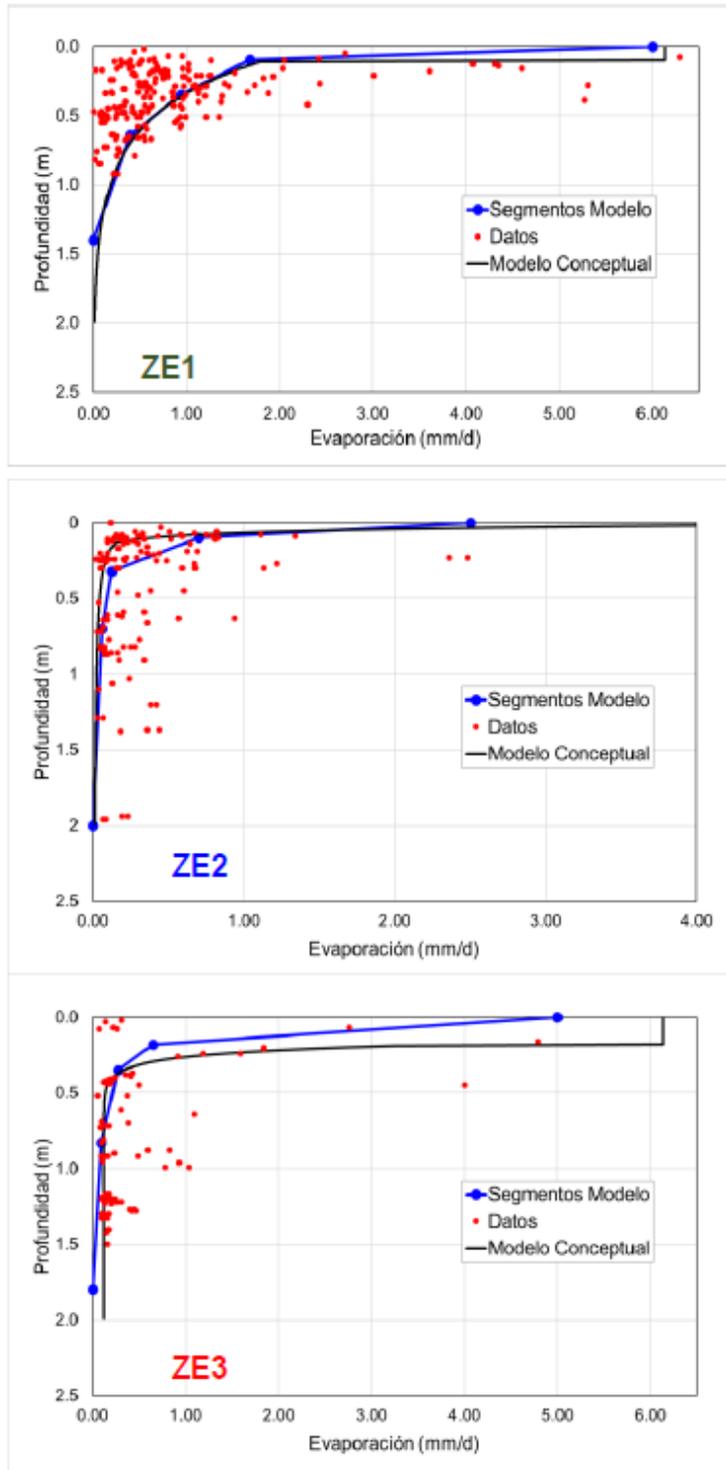
Se diferencian tres zonas con distintas curvas de evaporación, las cuales se definen en base a cuatro segmentos, el valor máximo de evaporación en superficie y la profundidad de extinción. Las zonas y sus respectivas curvas de evaporación se presentan en la Figura 3-9. En la modelo original (MODFLOW, sin acople a WEAP), el valor máximo de evaporación en superficie de cada una de estas zonas considera una variación estacional invierno-verano, asumiendo un incremento de un 10% en verano y un descenso de un 10% en invierno. Sin embargo, el acople WEAP-MODFLOW no considera estas variaciones temporales, tomando únicamente la información del primer paso de tiempo. En la Figura 3-8 se presenta una captura de pantalla del archivo Namefile, mostrando que el paquete ETS está incorporado en el modelo MODFLOW.



# Name file for MODFLOW-NWT, generated by Flopy version 3.3.3.			
LIST	11	SdA_NWT.list	
DIS	12	SdA_NWT.dis	
BAS6	13	SdA_NWT.bas	
OC	39	SdA_NWT.oc	
NWT	133	SdA_NWT.nwt	
UPW	134	SdA_NWT.upw	
WEL	20	SdA_NWT.wel	
DRN	22	SdA_NWT.drn	
RCH	24	SdA_NWT.rch	
ETS	26	SdA_NWT.ets	
DATA	141	SdA_NWT.cbe	
DATA(BINARY)	37	SdA_NWT.hds	REPLACE
DATA(BINARY)	38	SdA_NWT.ddn	REPLACE
DATA(BINARY)	9	SdA_NWT.cbc	REPLACE

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-8: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete ETS.



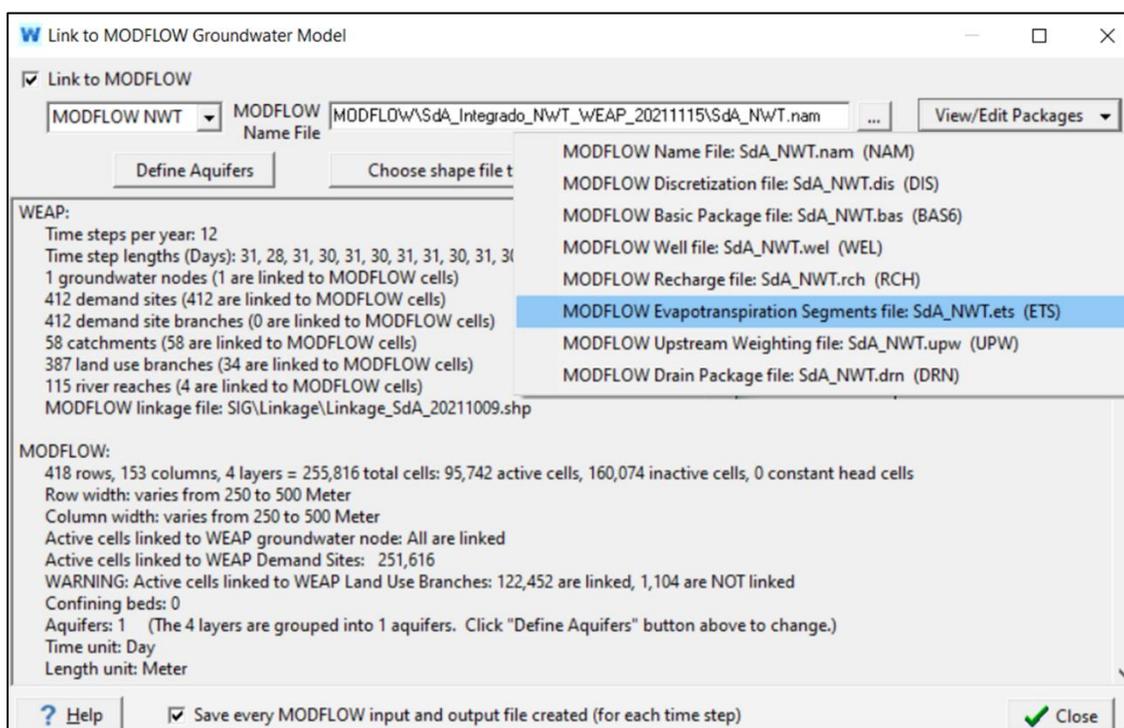
Fuente: CORFO-AMPHOS21 (2021)

Figura 3-9: Curvas de evaporación desde la napa y distribución espacial de estas en el modelo MODFLOW para el caso de aplicación del paquete ETS.

Los archivos nativos del modelo MODFLOW (archivo Namefile y archivo de los paquetes considerados en el modelo) se deben guardar en el área de WEAP para posteriormente activar el enlace WEAP-MODFLOW.

3.2.3 Mensajes de WEAP asociados a una correcta implementación del paquete

Una vez generado el enlace WEAP-MODFLOW con el paquete ETS incorporado al modelo MODFLOW, el listado de paquetes de MODFLOW identificados por WEAP para el enlace se podrá revisar en la opción "View/Edit Packages", como se muestra en la Figura 3-10. Si el paquete ETS se encuentra en el listado y no se ha levantado ninguna ventana de advertencia o error, la activación del paquete ETS fue exitosa.

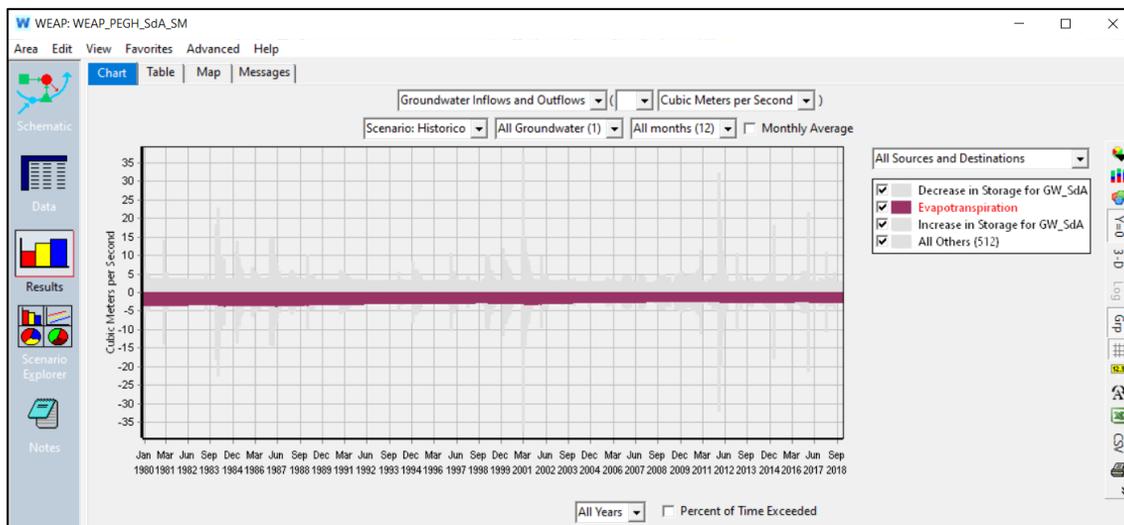


Fuente: Elaboración propia

Figura 3-10: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete ETS.

3.2.4 Resultados

Como se presentó en la sección 3.2, WEAP lee los flujos de evapotranspiración desde el archivo de balance (cell-by-cell) resultante del modelo MODFLOW para cada paso de tiempo y los incluye en el balance de entradas y salidas de los nodos *Groundwater*. En la Figura 3-11 se muestra el balance del nodo *Groundwater* de WEAP, destacando la componente de evapotranspiración, proveniente del modelo MODFLOW.



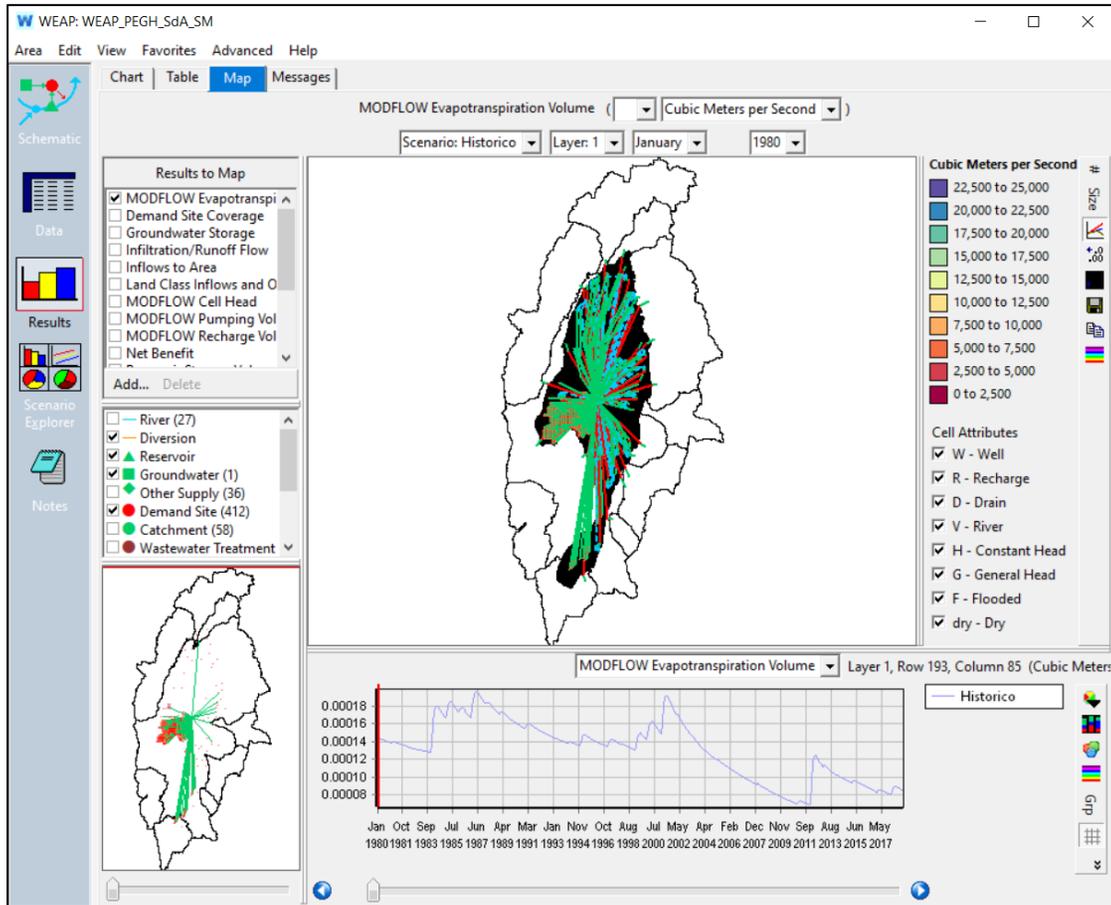
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-11: Entradas y salidas mensuales al nodo *Groundwater* del modelo WEAP del caso de aplicación para el paquete ETS. Se destaca en morado la componente de evapotranspiración calculada por MODFLOW.

WEAP permite también explorar la evolución temporal del volumen o profundidad de evapotranspiración de cada una de las celdas de la grilla del modelo MODFLOW. Esta capacidad es similar a la visualización en WEAP de la evolución de niveles, volumen de bombeos o volumen de recarga en cada una de las celdas. Un ejemplo de este resultado se presenta en la Figura 3-12.

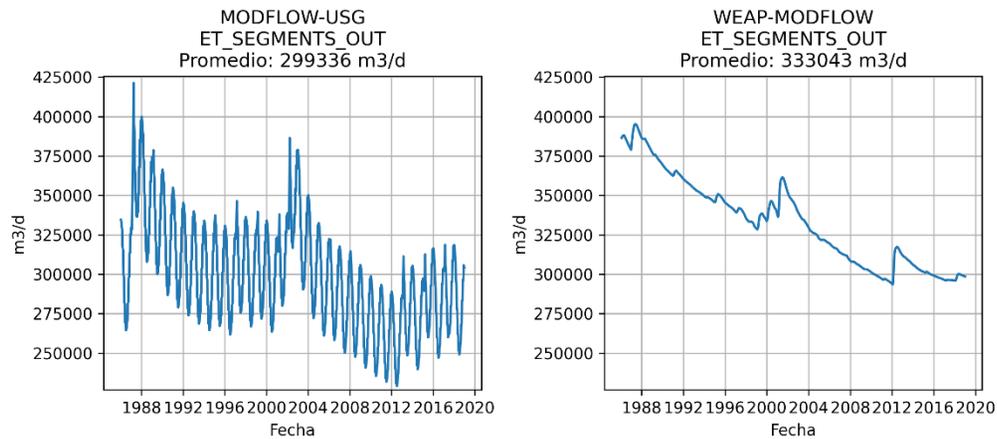
Como se comenta en la sección 2.2 de este informe, WEAP considera únicamente los valores del primer paso de tiempo, omitiendo así la variación temporal que pudieran tener los parámetros del paquete. Esto debe ser considerado al momento de definir qué valor será representativo para dicha temporalidad. A modo de ejemplo, en la Figura 3-13 se muestra la comparación realizada por CORFO-PUC (2021) entre el modelo MODFLOW, desarrollado por CORFO-AMPHOS21 (2021), que considera en la evaporación máxima una variación invierno-verano de un 10% relativa al valor medio, con el modelo desarrollado por CORFO-PUC (2021), donde se controla el modelo MODFLOW desde WEAP, sin realizar un acople integrado a la hidrología superficial. En esta figura se observa la variabilidad invierno-verano de los flujos por evapotranspiración simulados por el modelo MODFLOW, sin embargo, al incorporar el modelo a la plataforma WEAP estos ya no son representados. Esto resulta además en un cambio en el valor promedio de la evaporación desde la napa, en particular, el modelo WEAP-MODFLOW muestra un flujo 10% mayor que el modelo MODFLOW.

Notar que los valores de flujos evapotranspirativos registrados en el archivo de balance celda a celda (cell-by-cell) son un resultado de MODFLOW, por lo que estos pueden ser cargados en otras plataformas como ModelMuse, Python u otras interfaces y no únicamente en WEAP.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12: Visualización en WEAP de la evolución temporal de la evapotranspiración en la celda ubicada en la fila 193, columna 85 de la grilla del modelo MODFLOW.



Fuente: Modificado de CORFO-PUC (2021)

Figura 3-13: Comparación de los flujos de evapotranspiración con el paquete ETS calculados a partir del modelo MODFLOW-USG, desarrollado por CORFO-AMPHOS21 (2021), y calculados a partir del modelo WEAP-MODFLOW, desarrollado por CORFO-PUC (2021).

3.3 CASO 3 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE SWI2 EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO A LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA

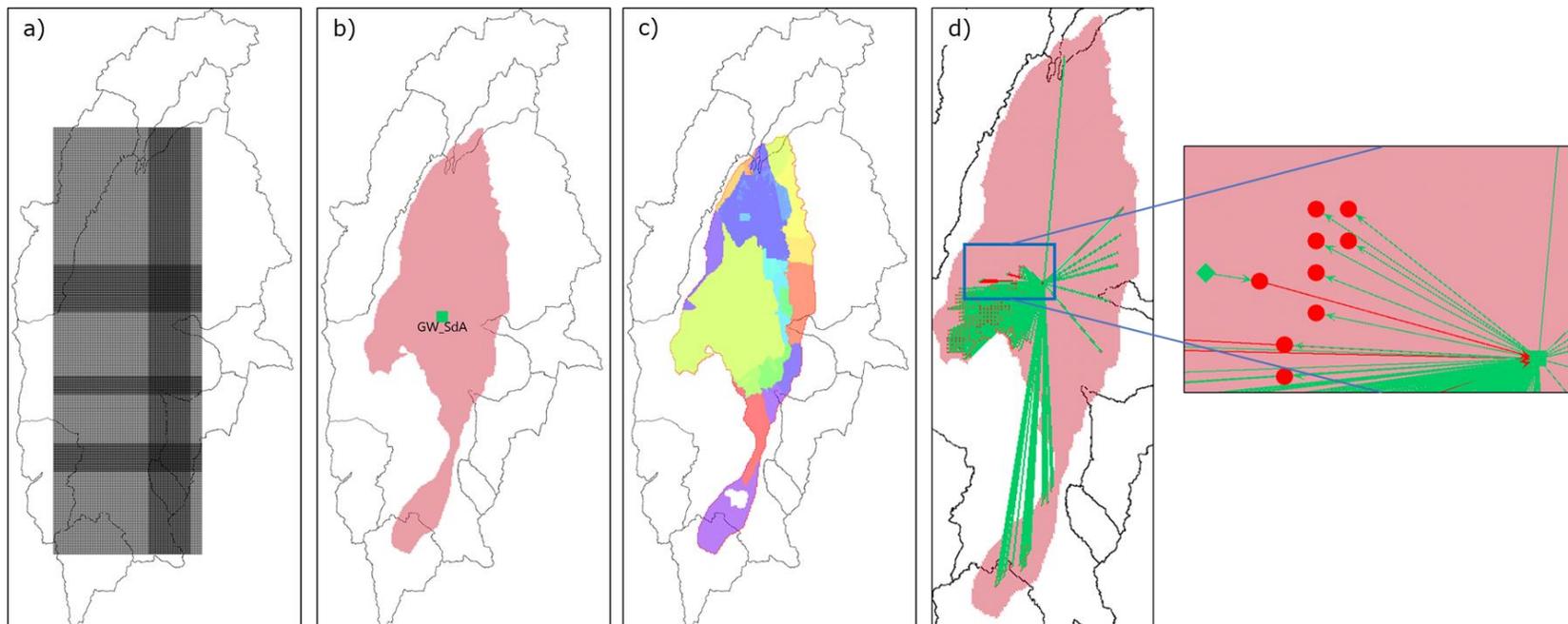
En este apartado se describe el caso de aplicación del paquete SWI2 para representar el proceso de flujo con densidad variable en cuencas endorreicas donde dos fluidos de distinta densidad coexisten mediante una interfaz que los divide y los principales resultados asociados que se pueden revisar en WEAP. El respaldo o *Backup* del área de WEAP se encuentra disponible como "Caso_Aplicacion_3_SWI2_endorreica.WEAP" en el Apéndice III.

3.3.1 Descripción del sistema

El modelo del caso de aplicación corresponde a la componente Salar-Monturaqui del modelo integrado de la cuenca del Salar de Atacama, desarrollado en el marco del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (DGA-PUC, en desarrollo) (Figura 3-14), modificado para incorporar el paquete SWI2. Esta componente representa la zona del núcleo, zona marginal, zona aluvial y la zona de Monturaqui de la cuenca del Salar de Atacama. El sistema consiste en un set de nodos *Catchment* que discretizan las distintas subcuencas de la cuenca y representan la hidrología superficial, un único nodo *Groundwater* que representa la totalidad del sistema subterráneo y un set de nodos *Demand Site* que representan las extracciones para uso minero y humano.

El nodo *Groundwater* es representado por el modelo MODFLOW-NWT. El modelo considera cuatro capas, 418 filas con ancho variable entre 250 y 500 metros y 153 columnas con ancho variable entre 250 y 500 metros. El dominio temporal del modelo cubre el período 1980 – 2018, siendo el período 1980 – 1985 considerado como período de calentamiento, discretizado en periodos de estrés mensuales. Las unidades del modelo MODFLOW son metros para la escala de longitud y días para la escala temporal.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica cuyos flujos superficiales y subterráneos confluyen al núcleo, donde el sistema subterráneo almacena salmueras (fluido de densidad $\sim 1200 \text{ kg/m}^3$). Entre la salmuera y agua fresca almacenada en el sistema subterráneo existe una zona de mezcla o transición de la densidad del fluido ubicada principalmente en la Zona Marginal de la cuenca. Esta zona de mezcla o transición es comúnmente llamada interfaz salina, a través de la cual no existen flujos, sin embargo, la posición de esta condiciona los flujos que ocurren en la zona de salmueras y en la zona de agua fresca. Es por este motivo que la representación de la interfaz es de suma importancia en estos sistemas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-14: Vista esquemática del modelo WEAP del PEGH-Salar de Atacama para el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuenca endorreica. a) Distribución de las celdas del modelo numérico, b) nodo WEAP que representa el sistema subterráneo y las celdas activas (rojo) sobre las cuales se espacializa este nodo, c) distribución de las celdas enlazadas a los distintos *Catchments* y d) distribución de *Demand Sites* para representar las extracciones desde el sistema subterráneo.

3.3.2 Parámetros utilizados en el paquete

Para la implementación del paquete SWI2 se consideraron los parámetros utilizados por CORFO-PUC (2021) para el análisis de factibilidad de la implementación del paquete SWI2 en el modelo MODFLOW de la cuenca del Salar de Atacama, desarrollado por CORFO-AMPHOS21 (2021). Adicionalmente, se utilizó la espacialización de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS/cm provistas por CORFO-AMPHOS21 (2021), las cuales aproximan los límites superior e inferior de la interfaz salina, como muestra la Figura 3-16.

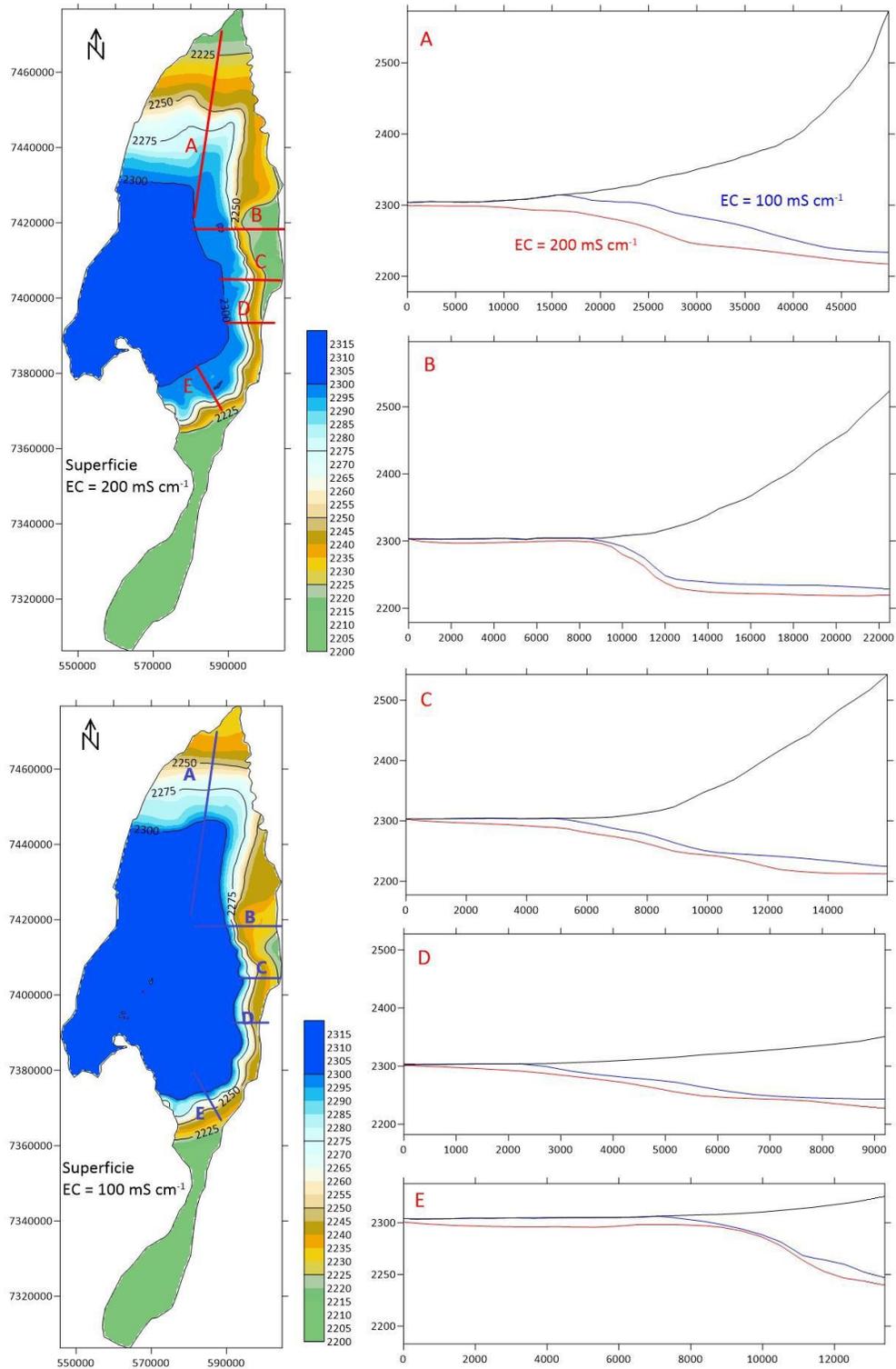
Se consideró una única superficie ZETA que separa dos fluidos de distinta densidad (agua fresca y salmuera), de esta forma se considera una interfaz abrupta sin la existencia de una zona de mezcla entre los fluidos. Para caracterizar los fluidos se consideró una densidad de $1,00 \text{ g/cm}^3$ para el agua fresca y $1,23 \text{ g/cm}^3$ para la salmuera, resultando en una densidad adimensional de 0,00 y 0,23, respectivamente. Para la porosidad efectiva se consideró un valor de 0,08 para la capa 1 y 0,03 para las demás capas del modelo. Para representar la densidad de los flujos de entrada y salida al sistema subterráneo, se consideró un valor de ISOURCE = -2 en las celdas de la capa 1 donde la elevación media de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS/cm fuera mayor a la cota del terreno y al resto se les asignó un valor 0. De esta forma, en las celdas con ISOURCE = -2, las entradas serán de la misma densidad que el fluido en la parte superior de la celda y las salidas serán igual a la densidad del fluido de la zona en el fondo de la celda. En las celdas con ISOURCE = 0, las entradas y salidas tienen densidad igual al fluido ubicado en la parte superior de la celda. Como condición inicial de la superficie ZETA, se consideró una elevación igual a la elevación media de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS/cm. En la Figura 3-15 se presenta una captura de pantalla del archivo Namefile, mostrando que el paquete SWI2 está incorporado en el modelo MODFLOW. Notar que en el archivo Namefile hay un nuevo resultado que MODFLOW exportará y que corresponde al archivo de extensión .zta, donde se almacenarán los resultados de la espacialización de las superficies ZETA

Los archivos nativos del modelo MODFLOW (archivo Namefile y archivo de los paquetes considerados en el modelo) se deben guardar en el área de WEAP para posteriormente activar el enlace WEAP-MODFLOW.

```
# Name file for MODFLOW-NWT, generated by Flopy version 3.3.3.
LIST          11  SdA_NWT.list
DIS           12  SdA_NWT.dis
BAS6          13  SdA_NWT.bas
OC            39  SdA_NWT.oc
NWT           133 SdA_NWT.nwt
UPW           134 SdA_NWT.upw
WEL           20  SdA_NWT.wel
DRN           22  SdA_NWT.drn
RCH           24  SdA_NWT.rch
ETS           26  SdA_NWT.ets
DATA          141 SdA_NWT.cbe
DATA(BINARY)  37  SdA_NWT.hds REPLACE
DATA(BINARY)  38  SdA_NWT.ddn REPLACE
DATA(BINARY)  9   SdA_NWT.cbc REPLACE
SWI2          33  SdA_NWT.swi2
DATA(BINARY)  55  SdA_NWT.zta REPLACE
```

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-15: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca endorreica.

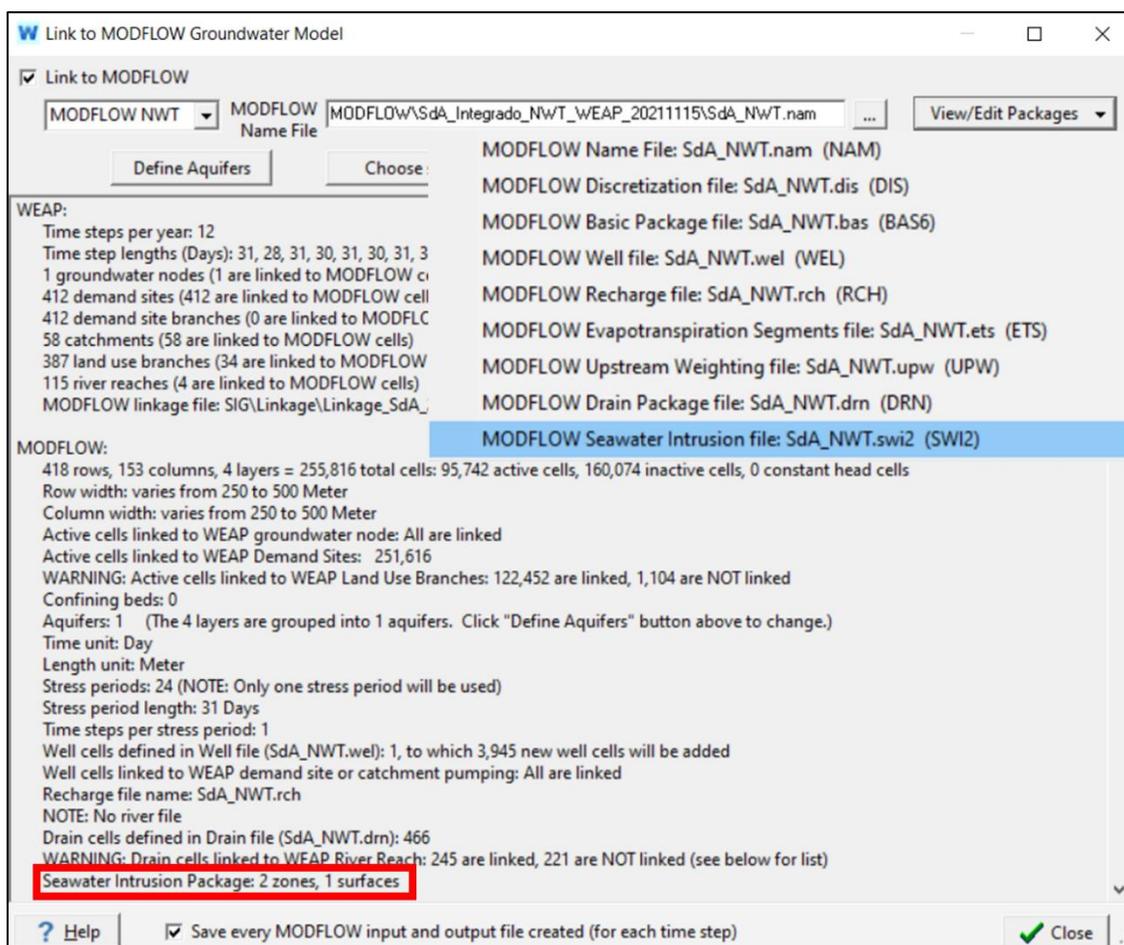


Fuente: CORFO-AMPHOS21 (2021), modificado de Marazuela et al. (2018)

Figura 3-16: Distribución de la altura sobre el nivel del mar de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS cm⁻¹.

3.3.3 Mensajes de WEAP asociados a una correcta implementación del paquete

Una vez generado el enlace WEAP-MODFLOW con el paquete SWI2 incorporado al modelo MODFLOW, el listado de paquetes de MODFLOW identificados por WEAP para el enlace se podrá revisar en la opción "View/Edit Packages", como se muestra en la Figura 3-17. Si el paquete SWI2 se encuentra en el listado, WEAP identifica la cantidad de superficies y zonas de distinta densidad definidas en el paquete SWI2 (cuadro rojo en Figura 3-17) y no se ha levantado ninguna ventana de advertencia o error, la activación del paquete SWI2 fue exitosa.



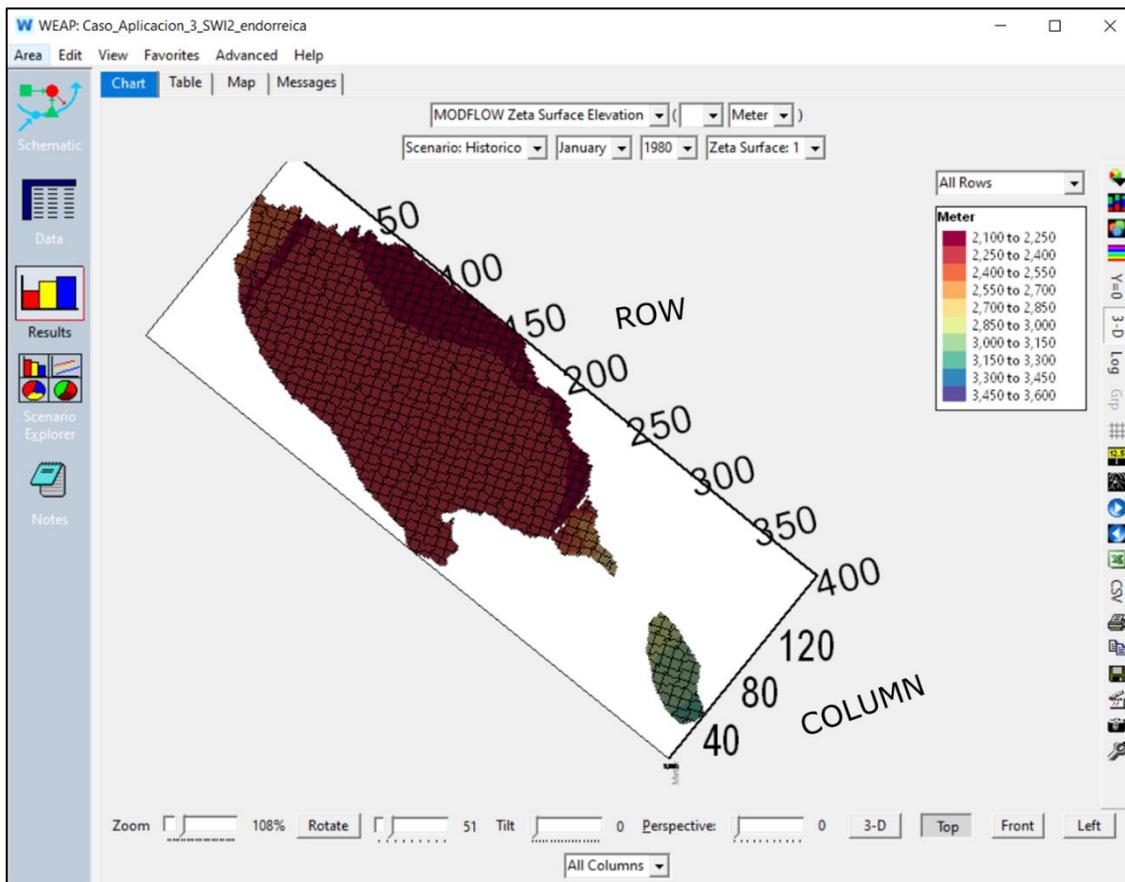
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-17: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca costera.

Nota: Se destaca en rojo el mensaje de WEAP identificando la cantidad de superficies y zonas definidas en el paquete SWI2.

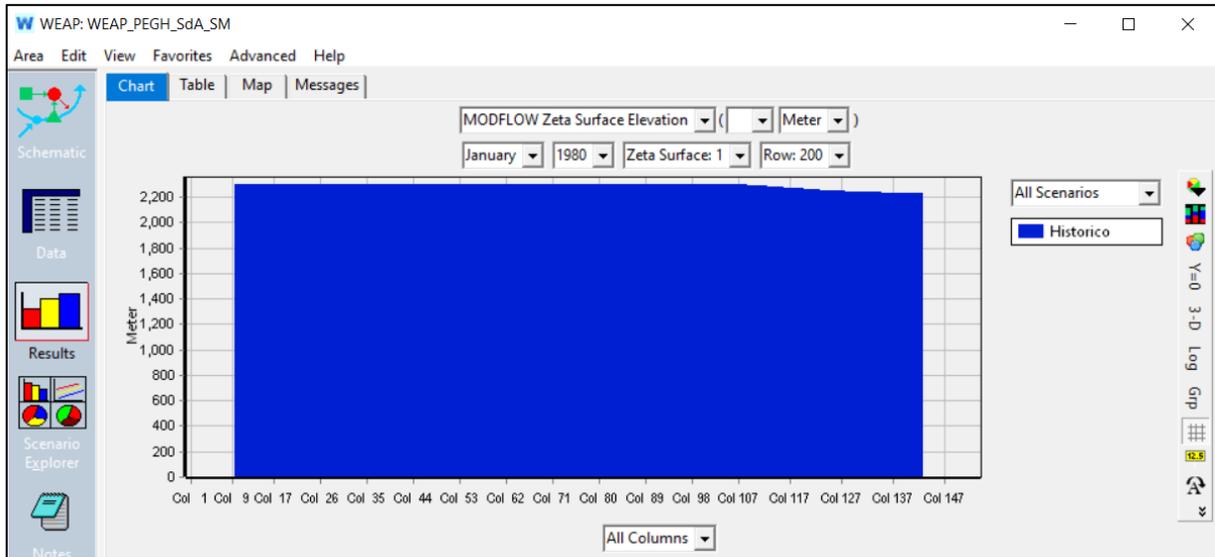
3.3.4 Resultados

Al igual que para los archivos de salida asociados a niveles simulados por MODFLOW, WEAP tiene la capacidad de leer los archivos de salida de SWI2 para visualizar la elevación de las superficies ZETA definidas. En la Figura 3-18 se muestra la espacialización de la superficie ZETA en WEAP para el comienzo de la simulación. Debido a la escala es difícil diferenciar la variación espacial, por lo que, a modo de ejemplo, en la Figura 3-19 se presenta un corte transversal en la fila 200. Esta figura está orientada en la dirección de las columnas, por lo que la columna 1 corresponde al lado izquierdo de la grilla y la columna 153 al lado derecho de la grilla. En esta figura se puede observar que antes de la columna 100 la elevación de la superficie ZETA es cercana a ~2300 m, cota topográfica del núcleo del salar, y que luego comienza a disminuir, representando la zona de transición donde el agua fresca se ubica por sobre la salmuera producto del proceso de flotación a consecuencia de la menor densidad de esta comparada a la salmuera.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-18: Distribución espacial de la superficie ZETA resultante para el comienzo de la simulación en el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca endorreica.

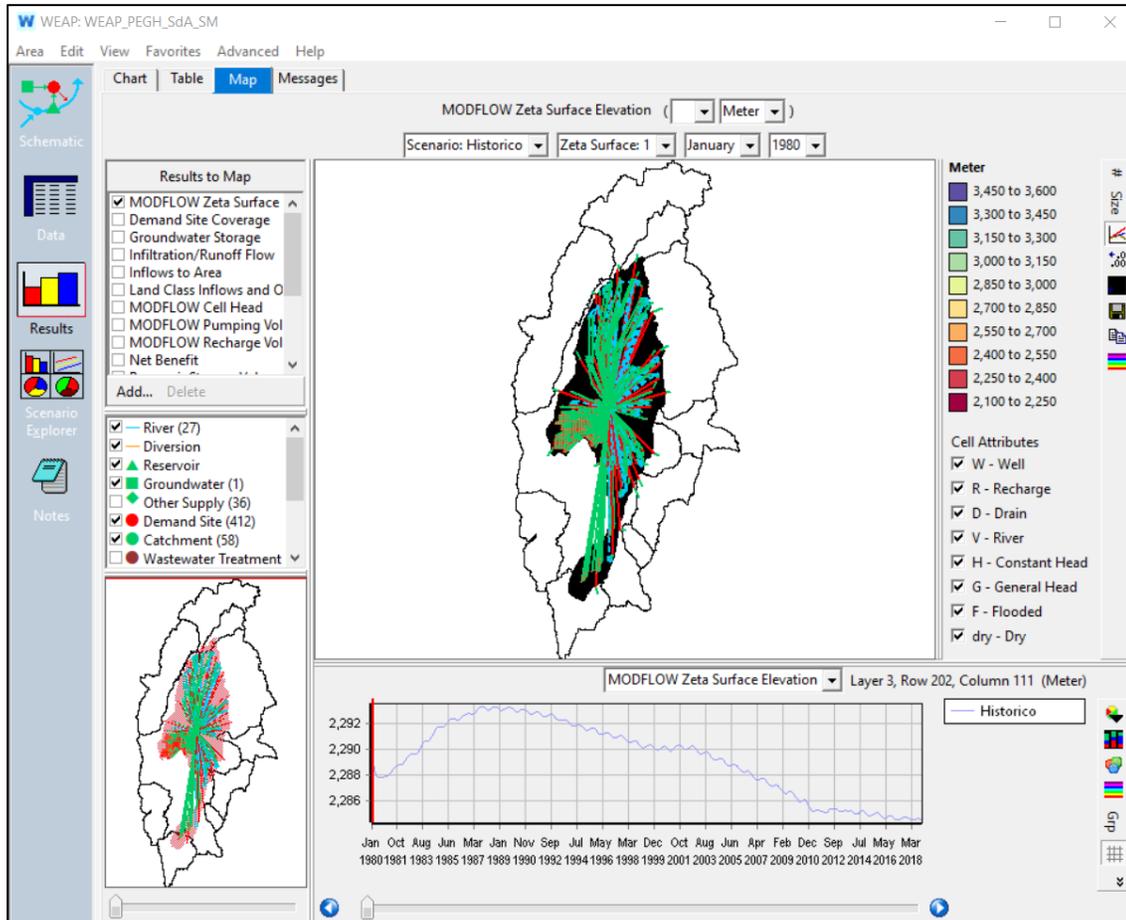


Fuente: Elaboración propia

Figura 3-19: Corte transversal para visualizar la elevación de la superficie ZETA a lo largo de la fila 200 de la grilla del modelo MODFLOW.

Nota: Esta figura está orientada en la dirección de las columnas, por lo que la columna 1 corresponde al lado izquierdo de la grilla y la columna 153 al lado derecho de la grilla.

WEAP permite también explorar la evolución temporal de la elevación de las superficies ZETA de cada una de las celdas de la grilla del modelo MODFLOW. Esta capacidad es similar a la visualización en WEAP de la evolución de niveles, volumen de bombeos o volumen de recarga en cada una de las celdas. Un ejemplo de este resultado se presenta en la Figura 3-20.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-20: Visualización en WEAP de la evolución temporal de la elevación de la superficie ZETA de la celda ubicada en la fila 202, columna 111 de la grilla del modelo MODFLOW.

Notar que los resultados del paquete SWI2 son un resultado de MODFLOW, por lo que estos pueden ser cargados en otras plataformas como ModelMuse, Python u otras interfaces y no únicamente en WEAP.

3.4 CASO 4 DE APLICACIÓN: IMPLEMENTACIÓN DEL PAQUETE SWI2 EN EL ENLACE WEAP-MODFLOW APLICADO A LA CUENCA DEL RÍO QUILIMARÍ

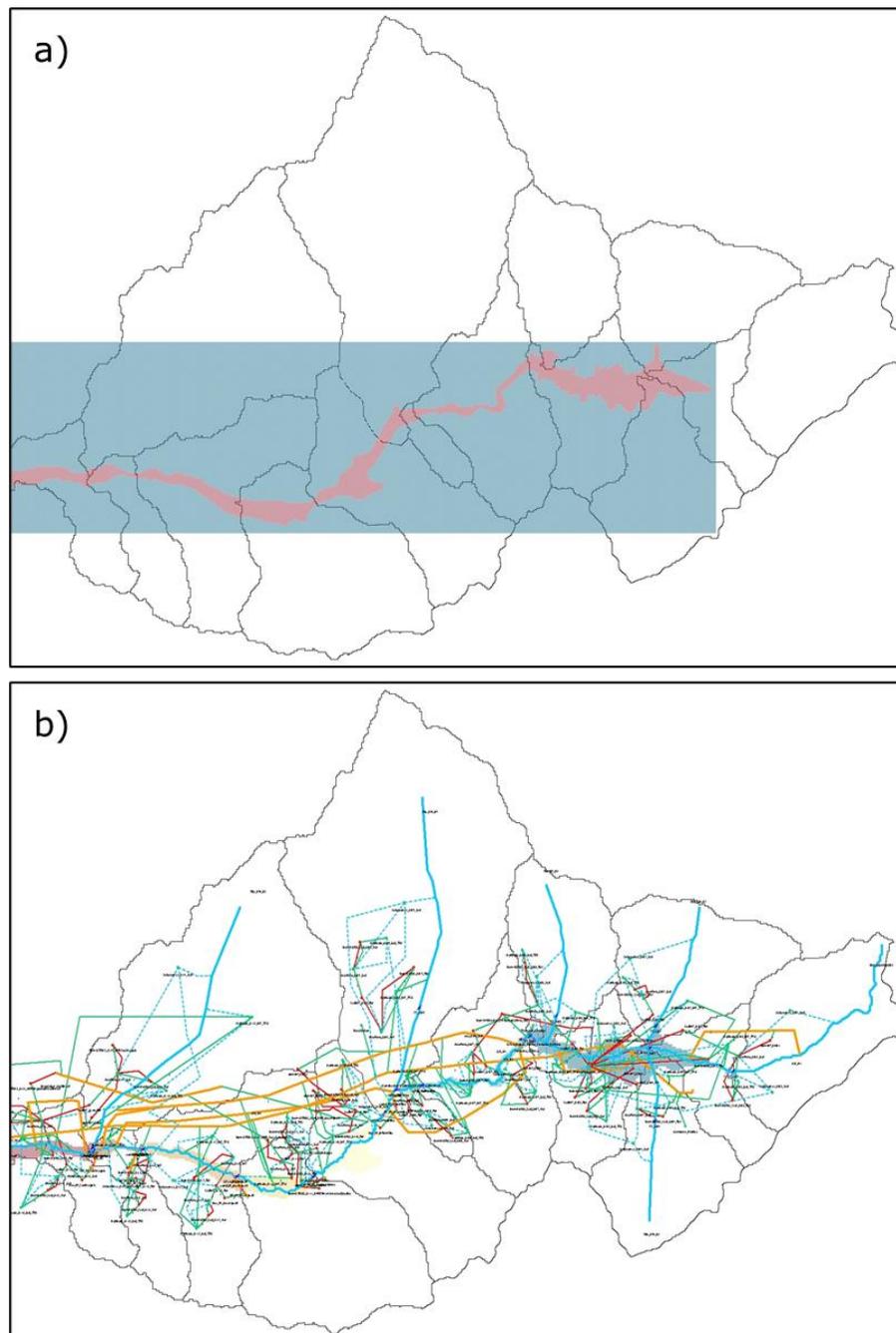
En este apartado se describe el caso de aplicación del paquete SWI2 para representar el proceso físico de flujo con densidad variable en cuencas costeras, donde la intrusión salina es un proceso relevante, y los principales resultados asociados que se pueden revisar en WEAP. El respaldo o *Backup* del área de WEAP se encuentra disponible como "Caso_Aplicacion_4_SWI2_costera.WEAP" en el Apéndice III.

3.4.1 Descripción del sistema

El modelo del caso de aplicación corresponde a una versión preliminar del modelo integrado de la cuenca del río Quilimarí, desarrollado en el marco del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (DGA-ECOHYD, en desarrollo) (Figura 3-21), modificado para incorporar el paquete SWI2. El sistema consiste en un set de nodos *Catchment* que discretizan las distintas subcuencas de la cuenca y representan la hidrología superficial, un nodo *Groundwater* para cada Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) en los cuales ha sido dividido administrativa el sistema subterráneo por la DGA, un set de nodos *Demand Site* que representan las demandas de agua y los tramos principales de la red del río Quilimarí.

Los nodos *Groundwater* son representados por el modelo MODFLOW-NWT. El modelo considera una única capa discretizada en 95 filas de 100 metros de ancho y 360 columnas de 100 metros de ancho. El dominio temporal del modelo cubre el período 1979 – 2020, discretizado en periodos de estrés semanales. Las unidades del modelo MODFLOW son metros para la escala de longitud y días para la escala temporal.

En la zona de desembocadura de cuencas costeras, como lo es la cuenca del río Quilimarí, la ubicación de la interfaz entre el agua fresca y el agua salina (o interfaz salina) puede variar tanto horizontal como verticalmente producto de cambios en el nivel del mar, en la recarga al acuífero o en las extracciones desde el acuífero. En esencia, cualquier proceso que afecte la dinámica de los flujos que ocurren en la interfaz pueden generar cambios en ella, pudiendo significar incluso un avance de la interfaz salina hacia la cuenca, lo cual puede resultar en una contaminación del recurso subterráneo y potencial contaminación de los pozos de extracción. El avance de la interfaz salina es, a gran escala, irreversible, por lo que poder entender su comportamiento y evaluarlo bajo distintos escenarios es de suma importancia.



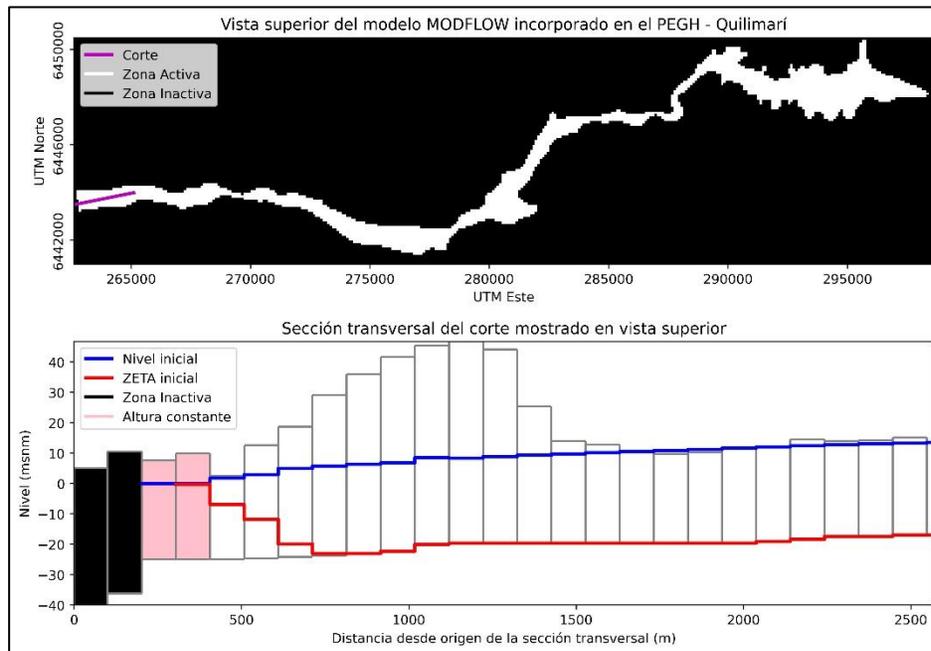
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-21: a) Vista esquemática del modelo WEAP del PEGH-río Quilimarí para el caso de aplicación del paquete SWI en cuencas costeras y b) celdas activas (rojo) e inactivas (azul) del modelo MODFLOW.

Nota: El eje horizontal y vertical están alineados con la dirección este-oeste y norte-sur, respectivamente. Al lado izquierdo (oeste) se ubica la zona de desembocadura al mar.

3.4.2 Parámetros utilizados en el paquete

Para la implementación del paquete SWI2 se consideró una única superficie ZETA que separa dos fluidos de distinta densidad (agua fresca y agua salada), de esta forma se considera una interfaz abrupta sin la existencia de una zona de mezcla entre los fluidos. Para caracterizar los fluidos se consideró una densidad de $1,00 \text{ g/cm}^3$ para el agua fresca y $1,02 \text{ g/cm}^3$ para el agua salada, resultando en una densidad adimensional de 0,00 y 0,02, respectivamente. Para la porosidad efectiva se consideró un valor constante de 0,02. Para representar la densidad de los flujos de entrada y salida al sistema subterráneo, se consideró un valor de ISOURCE = -2 en las celdas ubicadas en la desembocadura, las cuales tienen condición de carga constante y al resto de las celdas se les asignó un valor 0. De esta forma, en las celdas con ISOURCE = -2, las entradas serán de agua salada y las salidas de agua fresca, representando la dinámica que ocurre en la interacción mar-acuífero. En las celdas con ISOURCE = 0, las entradas y salidas tienen densidad igual al fluido ubicado en la parte superior de la celda. Como condición inicial de la superficie ZETA se consideró una versión modificada de la relación de Ghyben-Herzberg (Ghyben, 1888; Herzberg, 1901) aplicada a la condición inicial de niveles del modelo MODFLOW. De esta forma la superficie ZETA se encuentra inicialmente a una profundidad de 4 veces el nivel inicial⁴. Como se puede apreciar en la Figura 3-22, considerando una resolución de la grilla de 100 metros, la representación de la interfaz salina abarca una cantidad pequeña de celdas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-22: Vista superior del modelo MODFLOW incorporado en el modelo del caso de aplicación del paquete SWI2 en cuencas costeras y corte transversal para visualizar la condición inicial de nivel y superficie ZETA.

⁴ La relación de Ghyben-Herzberg indica una relación 1:40 en lugar de una 1:4, sin embargo, debido a la resolución de la grilla, la interfaz no aparece al usar una relación 1:40.

En la Figura 3-23 se presenta una captura de pantalla del archivo Namefile, mostrando que el paquete SWI2 está incorporado en el modelo MODFLOW. Notar que en el archivo Namefile hay un nuevo resultado que MODFLOW exportará y que corresponde al archivo de extensión .zta, donde se almacenarán los resultados de la espacialización de las superficies ZETA

```
# Name File for MODFLOW created on 7/1/2020 by ModelMuse Version 4.1.0.0
LIST          11 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.lst REPLACE
DATA(BINARY)  9 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.cbc REPLACE
DIS           12 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.dis OLD
BAS6          13 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.bas OLD
DATA(BINARY) 130 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT_CB.bhd OLD
OC            39 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.oc OLD
DATA          37 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.fhd REPLACE
DATA          38 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.fdn REPLACE
NWT           133 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.nwt OLD
UPW           134 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.upw OLD
CHD           17 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.chd OLD
RIV           21 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.riv OLD
DRN           22 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.drn OLD
RCH           24 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.rch OLD
SWI2          33 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.swi2 OLD
DATA(BINARY) 55 MF_Quilimari_calibracion_v01_NWT.zta REPLACE
```

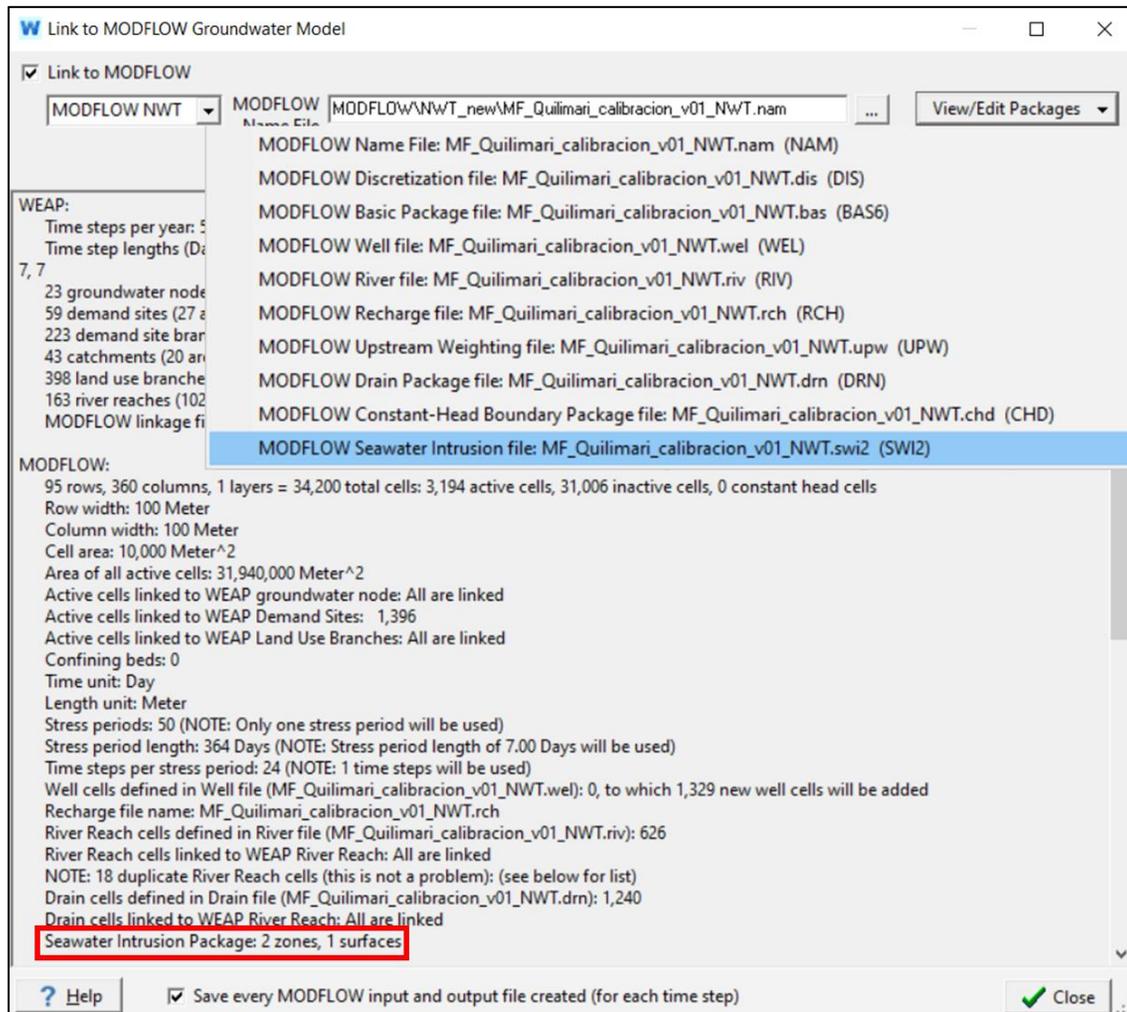
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-23: Captura de pantalla del archivo Namefile para el caso de aplicación del paquete SWI2 en una cuenca costera.

Los archivos nativos del modelo MODFLOW (archivo Namefile y archivo de los paquetes considerados en el modelo) se deben guardar en el área de WEAP para posteriormente activar el enlace WEAP-MODFLOW.

3.4.3 Mensajes de WEAP asociados a una correcta implementación del paquete

Una vez generado el enlace WEAP-MODFLOW con el paquete SWI2 incorporado al modelo MODFLOW, el listado de paquetes de MODFLOW identificados por WEAP para el enlace se podrá revisar en la opción "View/Edit Packages", como se muestra en la Figura 3-24. Si el paquete SWI2 se encuentra en el listado, WEAP identifica la cantidad de superficies y zonas de distinta densidad definidas en el paquete SWI2 (cuadro rojo en la Figura 3-24) y no se ha levantado ninguna ventana de advertencia o error, la activación del paquete SWI2 fue exitosa.



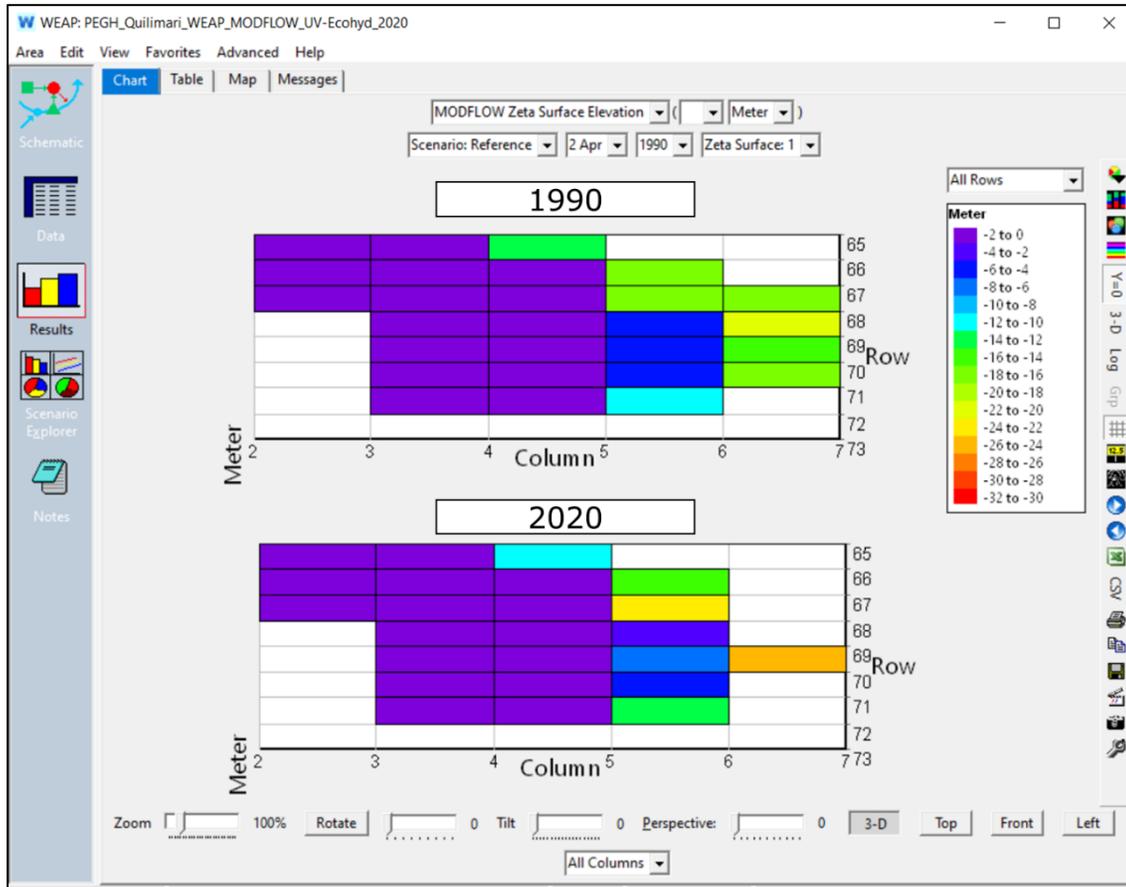
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-24: Ventana de WEAP con la descripción de los elementos enlazados entre los modelos WEAP-MODFLOW y listado de los paquetes de MODFLOW identificados para el enlace en el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuenca costera.

Nota: Se destaca en rojo el mensaje de WEAP identificando la cantidad de superficies y zonas definidas en el paquete SWI2.

3.4.4 Resultados

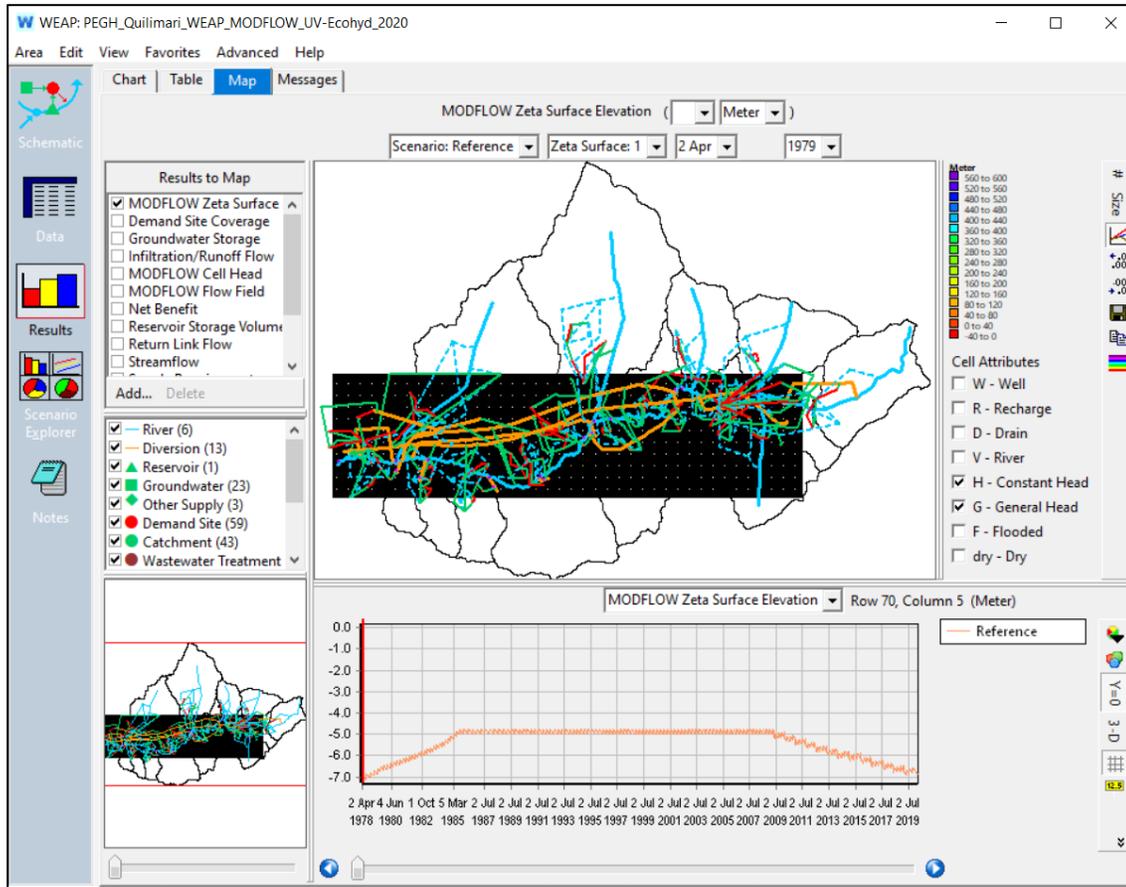
Al igual que para los archivos de salida asociados a niveles simulados por MODFLOW, WEAP tiene la capacidad de leer los archivos de salida de SWI2 para visualizar la elevación de las superficies ZETA definidas. En la Figura 3-25 se muestra la espacialización de la superficie ZETA en WEAP contrastando los resultados del año 1990 con los de 2020. Esta figura muestra un descenso de la interfaz, asociado principalmente a que la elevación inicial de las superficies ZETA se sobreestimó.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-25: Distribución espacial de la superficie ZETA resultante para el año 1990 y 2020 en el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuencas costeras.

WEAP permite también explorar la evolución temporal de la elevación de las superficies ZETA de cada una de las celdas de la grilla del modelo MODFLOW. Esta capacidad es similar a la visualización en WEAP de la evolución de niveles, volumen de bombeos o volumen de recarga en cada una de las celdas. Un ejemplo de este resultado se presenta en la Figura 3-26.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-26: Visualización en WEAP de la evolución temporal de la elevación de la superficie ZETA de la celda ubicada en la fila 70, columna 5 de la grilla del modelo MODFLOW para el caso de aplicación del paquete SWI2 en cuenca costera.

Notar que los resultados del paquete SWI2 son un resultado de MODFLOW, por lo que estos pueden ser cargados en otras plataformas como ModelMuse, Python u otras interfaces y no únicamente en WEAP.

3.5 CASO 5 DE APLICACIÓN: ACOUPLE DE UN MODELO DE AGENTES DE INSTITUCIONALIDAD AMBIENTAL EN CUENCA ENDORREICA (SALAR DE ATACAMA)

En este apartado se describe el caso de aplicación de la implementación del acople del modelo WEAP-MODFLOW a un Modelo en Base a Agentes. El respaldo de este caso de aplicación se encuentra disponible como "Caso_Aplicacion_5_ABM" en el Apéndice III.

3.5.1 Modelo integrado superficial subterráneo Salar Monturaqui

En este caso de aplicación, se utiliza como modelo el modelo integrado superficial-subterráneo desarrollado para DGA.

3.5.2 Modelo ABM Institucionalidad Ambiental

En el marco de proyecto CORFO-PUC (2021) se desarrolló un ABM que representa de manera simplificada (es decir, solo se representa algunos comportamientos e interacciones, de manera aproximada) la institucionalidad ambiental que toma lugar en la cuenca del Salar de Atacama. El modelo conceptual del sistema social de dicho ABM (i.e., los agentes y sus procesos de toma de decisión) se presenta de manera resumida a continuación⁵.

El sistema social consta de los agentes (1) Unidad Fiscalizable, (2) Estaciones de Monitoreo e (3) Institucionalidad ambiental. El primer agente corresponde a la unidad física en la que se desarrollan obras, acciones o procesos, relacionados entre sí, y que se encuentran regulados por uno o más instrumentos ambientales (en este caso, una RCA vigente). Este agente, por tanto, es el representativo de un operador minero, el cual mantiene uno o más pozos de extracción que se representan por el segundo tipo de agente (estaciones de monitoreo). En cuanto al tercer tipo de agente, este busca representar un regulador, o institución pública reguladora, en la cuenca. En base a estos agentes, sus procesos de toma de decisiones e interacciones entre sí y con el recurso hídrico, se busca por tanto reflejar la operación extractiva de recursos hídricos y salmuera que toma lugar bajo una normativa ambiental (i.e., monitoreo y fiscalización) y sus instrumentos de gestión asociados (CORFO-PUC, 2021).

En particular, el accionar de la Institucionalidad Ambiental se fundamenta en el proceso de fiscalización ambiental asociado a los Planes de Alerta Temprana (PAT). Cabe notar que, aunque cada agente Unidad Fiscalizable cuenta con su propio PAT, el funcionamiento general de cada uno es similar, pudiendo variar en la implementación final los valores de los indicadores de estado (e.g., niveles de los umbrales) y/o el número de estaciones asociadas, por lo que se explica a continuación la conceptualización general del PAT de una Unidad Fiscalizable en el ABM.

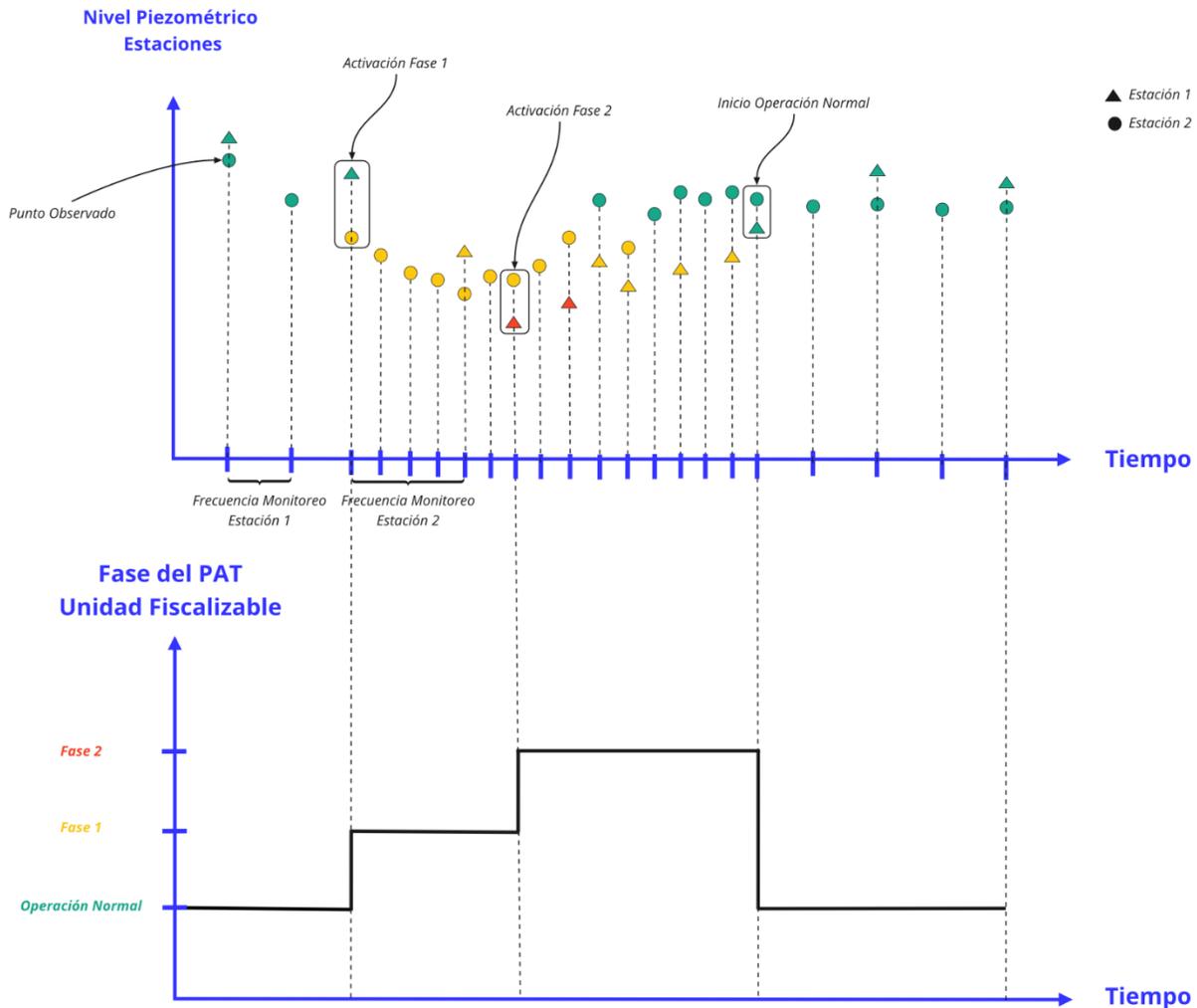
Cada Estación de Monitoreo cuenta con dos umbrales de activación (hfase 1 y hfase 2) medidos a partir del nivel piezométrico. Así, de acuerdo con el nivel piezométrico registrado por la estación, esta puede encontrarse en solo uno de tres posibles estados: (1) Operación Normal, (2) Fase 1, y (3) Fase 2. La información de monitoreo generada por cada Estación

⁵ Para una explicación detallada refiérase a CORFO-PUC (2021).

es obtenida por el Operador dueño de la Unidad Fiscalizable en la frecuencia de monitoreo establecida en cada estación en particular. Cada Operador, por tanto, recibe dicha información de múltiples Estaciones de Monitoreo, y decide si activar o no la fase asociada al PAT sobre sus operaciones (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2) de acuerdo a esta información. Esta decisión se basa en una regla de activación/desactivación pre-establecida en el PAT (CORFO-PUC, 2021).

De activarse la Fase 1 de cualquier PAT, las medidas a ser implementadas incluyen el: (1) incremento en la frecuencia de monitoreo en aquellas estaciones en que el umbral asociado fue sobrepasado, y (2) dar aviso a la autoridad ambiental de la activación de la Fase del PAT. De activarse la Fase 2 de cualquier PAT, las medidas son idénticas a las de la Fase 1, pero además incluyen (3) una reducción del caudal de explotación de salmuera, y (4) una duración fija pre-establecida (e.g., 6 meses).

La Figura 3-27 ejemplifica como varía el estado de operación de una Unidad Fiscalizable a partir de la información recabada de dos estaciones de monitoreo. Como se observa, tanto la Fase 1 como la Fase 2 se activan si cualquiera de las Estaciones de la Unidad Fiscalizable pasa a estar en dicho estado. Así mismo, la Fase se desactiva una vez el nivel en todas las estaciones supera el umbral de cada fase, y se han cumplido las medidas específicas asociadas. Cabe destacar que en este ejemplo ilustrativo el operador vuelve al estado Operación Normal, pero podría darse el caso de volver a Fase 1 o Fase 2 si se dieran las condiciones específicas para que ello ocurriera.



Fuente: CORFO-PUC (2021)

Figura 3-27: Ejemplo de definición del estado de operación de una Unidad Fiscalizable (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2), en base a la información registrada en 2 Estaciones de Monitoreo y sus diferencias a sus umbrales establecidos.

De modo de poder acoplar este ABM con el modelo WEAP-MODFLOW integrado, es necesario migrar la capa social generada en NetLogo⁶ a Python. Para ello, se hace uso de la librería de código abierto para Modelación en Base a Agentes Mesa⁷, la cual se estructura siguiendo componentes modulares (i.e., programación orientada a objetos), visualizaciones basadas en navegadores web, y una multiplicidad de herramientas de análisis.

⁶ NetLogo es un entorno de modelado programable diseñado para simular fenómenos naturales y sociales. Su uso es gratis y de código abierto (ver <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>).

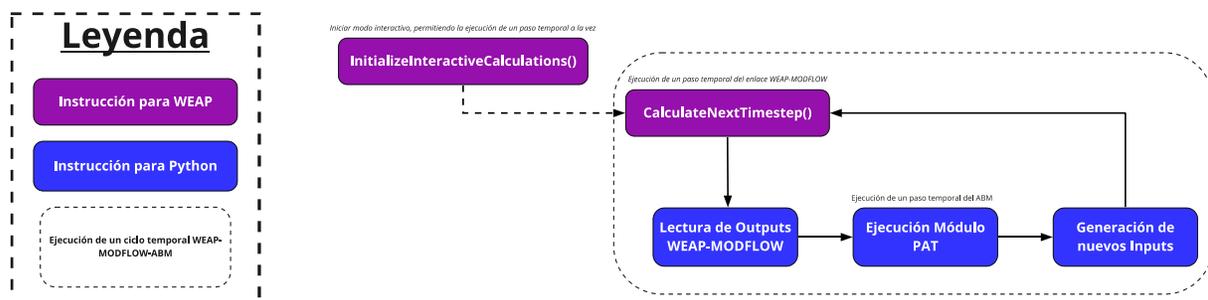
⁷ Ver sitio web oficial de la librería en <https://mesa.readthedocs.io/en/latest/>

En concreto, el ABM se escribe en distintos archivos Python (i.e., archivos con extensión .py) que en su conjunto forman una librería que puede ser ejecutada de manera externa mediante, por ejemplo, otros archivos Python, Jupyter Notebooks, Google Colab, o similar. A continuación, se describe la función de los principales archivos creados para el ABM, y que siguen el formato y esquema dispuesto por Mesa.

- *Model.py*: Este módulo contiene todo el código asociado a la creación de un objeto (denominado SimsalarModel) que contiene todo el modelo acoplado, tanto el ABM como el modelo hídrico integrado, incluyendo la discretización espacial y la ejecución de un paso temporal.
- *Agents.py*: Este módulo contiene todo el código asociado a los distintos agentes que son utilizados en el ABM.
- *Schedule.py*: En este módulo se detalla el tratamiento del tiempo para el modelo acoplado (i.e., el paso temporal de los agentes).
- *Utilities.py*: Este módulo contiene todo el código necesario para implementar un sistema de seguimiento del estado de funcionamiento y ejecución del modelo, utilizando para ello la librería nativa de Python Logging⁸.

3.5.3 Enlace entre Modelo integrado y ABM

Como se mencionaba en el acápite 2.2, la primera actividad necesaria para lograr acoplar un modelo WEAP-MODFLOW a un modelo externo corresponde a la activación del modo interactivo de WEAP, para lo cual se hace uso de la librería de Python Pywin32 (i.e., la API de WEAP). El segundo paso, consiste en programar la ejecución secuencial de ambos modelos (ABM y WEAP-MODFLOW), respetando sus escalas temporales y espaciales. A una escala macro, el código necesario para la ejecución del ciclo iterativo entre el vínculo WEAP-MODFLOW de manera secuencial con un ABM, se puede describir a partir de los siguientes pasos, los cuales se ilustran además en la Figura 3-28.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-28: Conceptualización del acople de un modelo WEAP-MODFLOW a un modelo externo (ABM).

⁸ Ver sitio web oficial de la librería en <https://docs.python.org/3/library/logging.html>

- i. **Ejecución de un paso temporal de WEAP-MODFLOW.** La siguiente línea de código solicita a WEAP avanzar un paso temporal. Dado que WEAP se encuentra nativamente acoplado a MODFLOW, esto implica ejecutar este último software por un paso temporal (i.e., realizar los cálculos de la grilla de aguas subterráneas).

```
WEAP.Scenario("Nombre_Escenario").CalculateNextTimestep()
```

- ii. **Lectura de outputs WEAP-MODFLOW, y ejecución de un paso temporal del ABM.** De manera predeterminada WEAP guarda los resultados de cada iteración en un archivo único. Por ello, es posible acceder a todo el espectro de resultados tanto del componente superficial como subterráneo de WEAP. La lectura de dichos archivos se puede realizar con cualquier librería nativa de Python (e.g., ver OS⁹ o Pathlib¹⁰).

A modo de ejemplo, una aplicación de un modelo WEAP-MODFLOW interactivo con un ABM puede consistir en la simulación de la decisión de activación de un Plan de Alerta Temprana. Los inputs para dicha decisión corresponden a los valores piezométricos medidos en cada celda del modelo (i.e., contenidos en el archivo *.hed* que se genera en cada iteración). Por tanto, basta con leer dichos archivos para permitir que el componente ABM pueda simular esta decisión.

- iii. **Guardar outputs del ABM (inputs para WEAP-MODFLOW) y término del ciclo.** Tras ejecutarse las rutinas asociadas a un ABM, pueden modificarse los archivos de entrada del modelo WEAP-MODFLOW, afectando con ello la siguiente iteración del componente físico.

Siguiendo con el ejemplo descrito previamente, el resultado de la decisión de activación de un PAT producto del ABM puede consistir en la reducción o aumento de un bombeo productivo desde una celda o un grupo de celdas del modelo WEAP-MODFLOW. Esta nueva información se añade directamente controlando los archivos nativos de MODFLOW leídos por el modelo WEAP-MODFLOW

3.5.4 Resultados

En la Tabla 3-1 se presentan las estaciones de monitoreo a utilizar para este ejemplo de aplicación, en donde dos operadores extraen recurso hídrico de una misma cuenca, y cada uno cuenta con su propio Plan de Alerta Temprana (PAT). Notar que algunas de las estaciones de monitoreo asociadas a cada PAT son compartidas (e.g., L1-5), es decir, forman parte de ambos planes.

⁹ Detalles de librería OS en <https://docs.python.org/3/library/os.html>

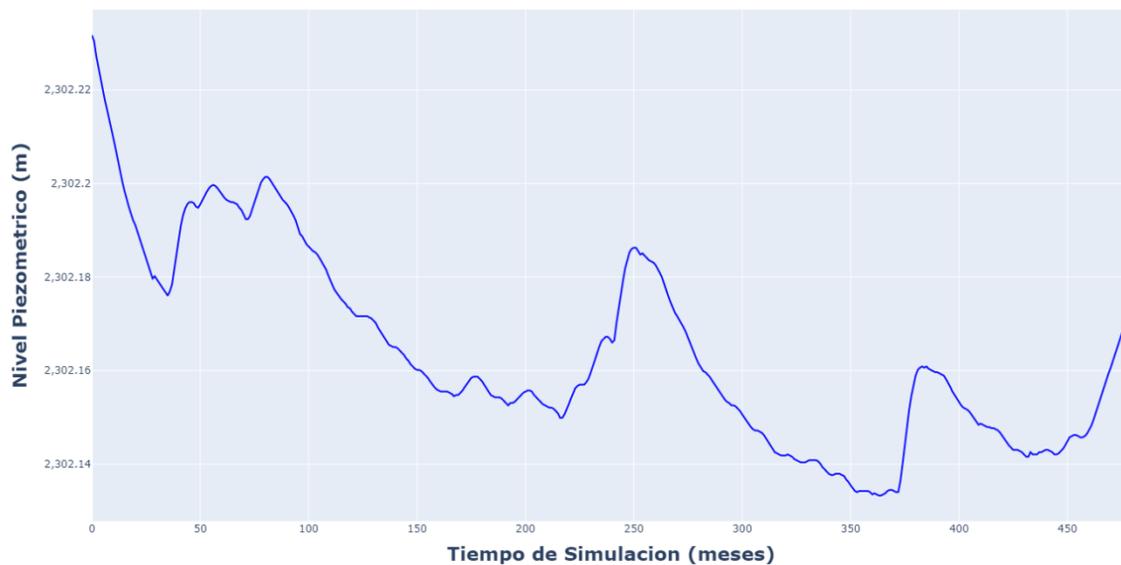
¹⁰ Detalles de librería Pathlib en <https://docs.python.org/3/library/pathlib.html>

Tabla 3-1: Estaciones de monitoreo PAT y umbrales asociados.

Nombre Catastro	Sector	Propiedad	Umbral Fase 1	Umbral Fase 2
L1-4	Zona Marginal	Operador 1	2299,69	2299,66
L1-5	Zona Marginal	Operador 1	2299,02	2298,92
L1-G4	Zona Marginal	Operador 1	2299,10	2298,95
L7-4	Zona Marginal	Operador 1	2302,46	2302,44
BA-05	Zona Marginal	Operador 2	2300,11	2300,11
BA-07	Zona Marginal	Operador 2	2299,97	2299,97
BA-16	Zona Marginal	Operador 2	2300,80	2300,80
BA-28	Zona Marginal	Operador 2	2300,59	2300,59
BA-30	Zona Marginal	Operador 2	2301,42	2301,42
L1-5	Zona Marginal	Operador 2	2299,02	2298,92
L3-9	Zona Marginal	Operador 2	2299,36	2299,36
L4-12	Zona Marginal	Operador 2	2298,72	2298,72
L5-10	Zona Marginal	Operador 2	2299,03	2299,00
L1-G4	Zona Marginal	Operador 2	2299,01	2298,95

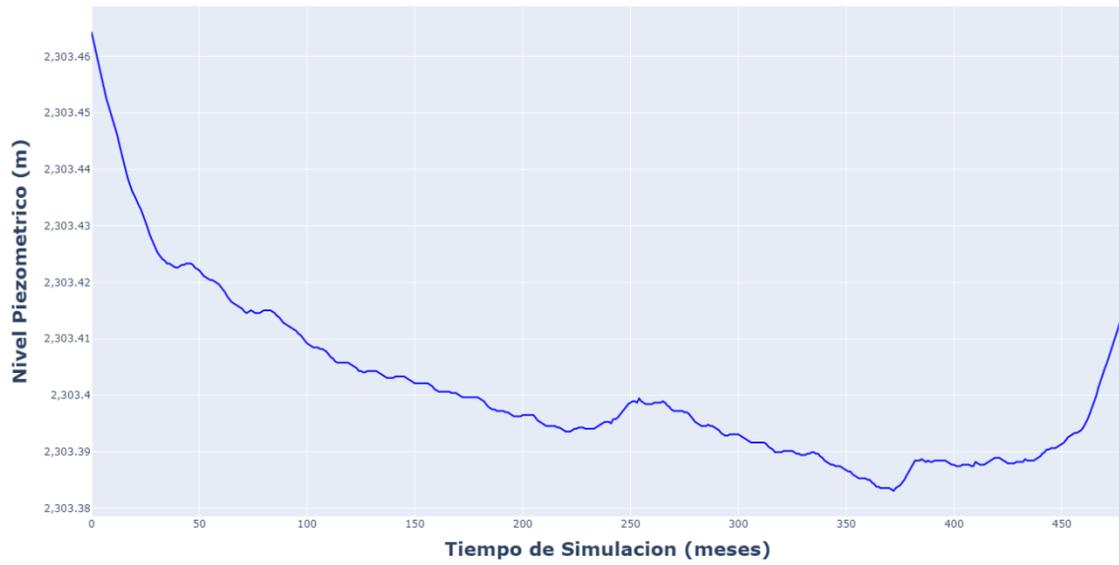
Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-29 y Figura 3-30 muestran la dinámica de dos estaciones de monitoreo seleccionadas, asociadas al Operador 1 y al Operador 2, ambas con una frecuencia de monitoreo mensual (i.e., se extraen valores piezométricos mensuales desde el modelo físico integrado). En ambos casos, y al igual que con el resto de las estaciones utilizadas, no se cruza el umbral de activación de las fases del PAT. Sin embargo, de haberse cruzado, el ABM simula un aumento en la frecuencia de monitoreo, así como una reducción en los caudales.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-29: Nivel piezométrico resultante de la simulación para el catastro L1-4 perteneciente al Operador 1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-30: Nivel piezométrico resultante de la simulación para el catastro BA-16 perteneciente al Operador 2.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

En este informe se presentaron las características de MODFLOW que se habilitaron para el acople WEAP-MODFLOW y las capacidades para acoplar modelos WEAP-MODFLOW a modelos externos, como lo puede ser un Modelo en Base a Agentes para la representación explícita de la toma de decisiones. Adicionalmente, se desarrollaron casos de ejemplo para mostrar las capacidades de esta interacción. De este modo, ahora el enlace WEAP-MODFLOW tiene la capacidad de incorporar los paquetes EVT y ETS para representar la evapotranspiración y evaporación desde la napa y el paquete SWI2 para representar la modelación de flujo con densidad variable, enfocado principalmente para el fenómeno de intrusión salina. Respecto a la capacidad de acoplar a modelos externos, se presentó un esquema para poder acoplar un modelo WEAP-MODFLOW con un ABM con la suficiente flexibilidad para el traspaso de datos entre ellos.

Como todo proceso físico o componente de un modelo, una correcta representación del sistema requiere de una correcta comprensión y caracterización de los procesos (y el tiempo correspondiente para realizar esta tarea o realizar labores de terreno). Para el caso de los paquetes EVT y ETS, se requiere de información para ajustar la evaporación máxima, profundidad de extinción y la caracterización de los segmentos o tramos. En el caso del paquete SWI, se requiere de una correcta caracterización del sistema subterráneo en términos de la porosidad efectiva, densidad adimensional y ubicación inicial de las superficies ZETA a modelar. Notar que las superficies son una nueva variable de estado para el modelo, por lo que requiere de la misma atención que los niveles modelados al momento de calibrar el modelo para obtener resultados satisfactorios y físicamente realista.

Si bien ahora es factible representar estos procesos, es de suma importancia tener claridad de las limitaciones del uso de estos paquetes en WEAP. En el caso de los paquetes de evapotranspiración, WEAP no permite definir parámetros que varíen en el tiempo (variaciones que MODFLOW sí permite), sino que toma únicamente el valor del primer paso de tiempo, por lo que la profundidad de extinción o evaporación máxima en superficie será constante en el tiempo para cada celda (cada celda puede tener sus propios parámetros). En el caso del paquete SWI2 para la modelación de la intrusión salina, este no modela de forma explícita el fenómeno de transporte, sino que es una simplificación verticalmente integrada que logra representar los procesos existentes cuando hay flujo con densidad variable donde la dispersión es poco relevante. Tal como es explicitado en la documentación de SWI2, la formulación matemática es válida únicamente para situaciones donde las densidades no son mayores a las del agua de mar. Otra limitación para el caso de SWI2 es la necesidad de información de concentración de solutos, conductividad eléctrica u otras que permitan definir una condición inicial de las superficies a modelar.

CAPÍTULO 5 REFERENCIAS

- Bakker, M., Schaars, F., Hughes, J.D., Langevin, C.D., y Dausman, A.M. (2013). USGS Techniques and Methods 6-A46: Documentation of the Seawater Intrusion (SWI2) Package for MODFLOW.
- Banta, E.R. (2000). MODFLOW-2000: The U.S. Geological Survey Modular Ground-water Model--documentation of Packages for Simulating Evapotranspiration with a Segmented Function (ETS1) and Drains with Return Flow (DRT1). U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- CORFO-AMPHOS21. (2021). Actualización Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama.
- CORFO-PUC. (2021). Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la cuenca del Salar de Atacama. Santiago. Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Desarrollo De Herramienta Para El Análisis De Gestión En El Marco Del Plan Nacional De Recursos Hídricos. Realizado por: DICTUC
- Dirección General de Aguas (DGA). (2022). Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca del Salar de Atacama. Realizado por: Centro de Cambio Global UC
- Ghyben, W. (1888). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam [Notes on the Probable Results of Well Drilling near Amsterdam]. Tijdschrift Kononklijk Inst. Ing., 9. p. 8-22.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder [The water supply of some spas on the North Sea]. J. Gasbeleuch Wasserversorg, 44, p. 815-819.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., y McDonald, M.G. (2000). Modflow-2000, the u. s. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. Open-file Report. U. S. Geological Survey 134.
- Marazuela, MA., Vasquez-Suñé, E., Custodio, E., Palma, E., García-Gil, A. y Ayora, C. (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). Journal of Hydrology. Vol. 561. p. 223-235.
- WEAP21. (2020). MODFLOW Link Technical Details [WWW Document]. URL https://www.weap21.org/WebHelp/Linking_to_MODFLOW_Details.htm (accessed 8.26.20)