



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

PROYECTO ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA INTEGRADA DEL ACONCAGUA

Resumen Ejecutivo

**REALIZADO POR:
WSP CONSULTING CHILE LTDA.**

SIT N°446

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2019

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Alfredo Moreno Charme**

**Director General de Aguas
Ingeniero Comercial PhD Sr. Oscar Cristi Marfil**

**Jefe de División Estudios y Planificación
Ingeniero Civil MSc Sra. Andrea Osses Vargas**

**Inspector Fiscal
Ingeniero Civil PhD Sr. Carlos Flores Arenas**

**WSP CONSULTING CHILE LTDA
Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Sr. Eduardo Abujatum Gidi**

**Profesionales:
Ingeniero Civil MSc Grace Palomino
Geólogo Catalina Sesmero
Ingeniero Civil Juan Pablo Riquelme
Ingeniero Civil Ignacio Farías
Ingeniero Civil Agustín Ferrer
Dibujante Técnico Johanna Rojas**

CONTENIDO GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos de la Prestación de Servicios	1
1.2	Alcances y Metodología	2
2	ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN INTEGRADA	5
2.1	Revisión de Antecedentes.....	5
2.2	Modelación hidrológica	6
2.3	Modelación hidrogeológica	10
3	ESCENARIOS PREDICTIVOS	18
3.1	Construcción de escenarios	18
3.1.1	Extracciones Subterráneas.....	18
3.1.2	Recarga Superficial	20
3.1.3	Recarga Artificial	21
3.2	Resultados Seguridad de Riego	24
3.3	Resultados Modelación Subterránea	27
4	MIGRACIÓN DE LA MODELACIÓN INTEGRADA	40
5	RESUMEN Y CONCLUSIONES	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Balance de masas promedio global de la cuenca del río Aconcagua para la calibración	15
Tabla 2-2:	Producción promedio dren Las Vegas para períodos seleccionados	16
Tabla 3-1:	Demanda comprometida a abril de 2019 y caudal considerado en cada escenario ...	19
Tabla 3-2:	Recarga superficial promedio impuesta en cada escenario.....	21
Tabla 3-3:	Caudal medio mensual disponible para recarga artificial.....	22
Tabla 3-4:	Comparación de Seguridad de riego por sección con Escenario 1 (1)	23
Tabla 3-5:	Grado de satisfacción de la demanda (%).	25
Tabla 3-6:	Diferencia de grado de satisfacción de la demanda entre Escenarios 2 y 1	26
Tabla 3-7:	Balance de masas promedio global en 50 años de la cuenca del río Aconcagua para las simulaciones	27
Tabla 3-8:	Interferencia río-acuífero para el Escenario 1 (demanda comprometida a abril de 2019)	39
Tabla 3-9:	Interferencia río-acuífero para el Escenario 2 (proyecto DOH)	39

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1-1:	Ubicación del área de estudio	3
Figura 2-1:	Comparación caudales medio mensuales N07 y estación DGA río Aconcagua en San Felipe, periodo completo.....	8
Figura 2-2:	Comparación caudales medio mensuales N22 y estación DGA río Aconcagua en Romeral, periodo completo	8
Figura 2-3:	Salidas de MOS ACN 2019 a acuíferos (todas las fuentes)	9
Figura 2-4:	Grado de satisfacción de la demanda por sección legal	10
Figura 2-5:	Ubicación condiciones de borde en el modelo, vista 2 corresponde a los sectores de río modificados.....	13
Figura 2-6:	Serie de recarga superficial considerada desde el MOS	14
Figura 2-7:	Serie de bombeo ingresada al modelo numérico	14
Figura 2-8:	Niveles observados vs calculados sobre la recta Y=X (pantalla salida Visual Modflow)	16
Figura 3-1:	Bombes impuestos en las simulaciones predictivas	20
Figura 3-2:	Recarga superficial impuesta en las simulaciones predictivas.....	21
Figura 3-3:	Discrepancia para el período de simulación a) Escenario 1, b) Escenario 2 y c) Escenario 3	28

Figura 3-4:	Recarga superficial impuesta vs computada a) Escenario 1, b) Escenario 2 y c) Escenario 3	29
Figura 3-5:	Extracciones impuesta vs computada a) Escenario 1, b) Escenario 2 y c) Escenario 3	30
Figura 3-6:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de Llay Llay.....	32
Figura 3-7:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de Putaendo	33
Figura 3-8:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe.....	34
Figura 3-9:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación).....	35
Figura 3-10:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación).....	36
Figura 3-11:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación).....	37
Figura 3-12:	Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación).....	38

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día la Dirección General de Aguas (DGA) considera prioritario el estudio del agua en la cuenca del Aconcagua, tema de particular relevancia dado el actual contexto de escasez hídrica que se registra en esta zona, situación que se ha evidenciado con mayor intensidad durante la última década y que ha sido abordada desde la administración pública mediante la implementación de instrumentos administrativos y/o de gestión como lo son: Declaraciones de zonas de escasez hídrica y de Áreas de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas, entre otras medidas.

De esta manera, surge la necesidad de realizar una actualización del modelo hidrológico integrado para la cuenca del río Aconcagua, el cual data de 2009, incorporando nuevos datos actualmente disponibles para las distintas variables a lo largo de la cuenca, como recopilación de datos climáticos e hidrometeorológicos complementarios a los obtenidos en el modelo realizado el 2009, agregándose además, realizar estimaciones del balance hídrico a nivel de cuenca en función de escenarios de proyección y modelación.

En este contexto, la DGA adjudicó el estudio "Actualización de la modelación hidrológica integrada del Aconcagua" a WSP Consulting Chile Ltda (Resolución DGA N° 264/2019), debido al conocimiento con que cuenta este consultor sobre la cuenca del río Aconcagua.

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Aconcagua, la cual se encuentra dividida en 5 secciones, (numeradas desde aguas arriba hacia aguas abajo) las que abarcan desde la cabecera del río Aconcagua hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Los principales usuarios de la cuenca corresponden a los rubros agropecuario, sanitario y doméstico.

La cuenca del río Aconcagua se encuentra ubicada en la zona central de Chile, en la región de Valparaíso, más exactamente entre los paralelos 32° 20' y 33° 07' de la latitud sur y entre los meridianos 71° 31' y 70° 00' de la longitud oeste. El área de estudio, con una superficie de 7.334 Km² se muestra en la Figura 1-1. En términos hidrogeológicos, el relleno del valle que conforma el acuífero de la cuenca del Aconcagua se encuentra subdividido en 9 sectores de aprovechamiento hidrogeológico común (SHAC), definidos por la DGA. La Figura 1-1 muestra la cuenca del Aconcagua, destacando la división en sectores acuíferos y la red hidrográfica principal.

1.1 OBJETIVOS DE LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS

El objetivo general de este estudio es realizar la actualización del modelo hidrológico numérico integrado del acuífero de Aconcagua a fin de estudiar y diagnosticar el acuífero de la cuenca del Aconcagua, así como definir la ubicación óptima para la construcción de nuevas baterías de pozos de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y ubicar sectores para hacer recarga artificial al acuífero, en sectores hidrogeológicos de aprovechamiento con disponibilidad de derechos de agua provisionales en comunas de Putaendo, San Felipe y Llay Llay.

Como objetivos específicos se cuentan:

- Realizar una recopilación de datos climáticos e hidrometeorológicos complementarios a los obtenidos al modelo realizado en el 2009.
- Realizar estimaciones del balance hídrico a nivel de cuenca en función de escenarios de proyección y modelación.
- Actualizar el modelo conceptual del Aconcagua.
- Elaborar un SIG (Sistema de Información Geográfica) que permita la presentación y despliegue de los resultados.
- Migrar el modelo Aconcagua Modflow_MOS a Modflow WEAP (Water Evaluation And Planning), de acuerdo a los cambios de alcance aprobados en la Resolución DGA N°1.692/2019.
- Capacitar al personal DGA en el uso de los datos generados por este trabajo.

1.2 ALCANCES Y METODOLOGÍA

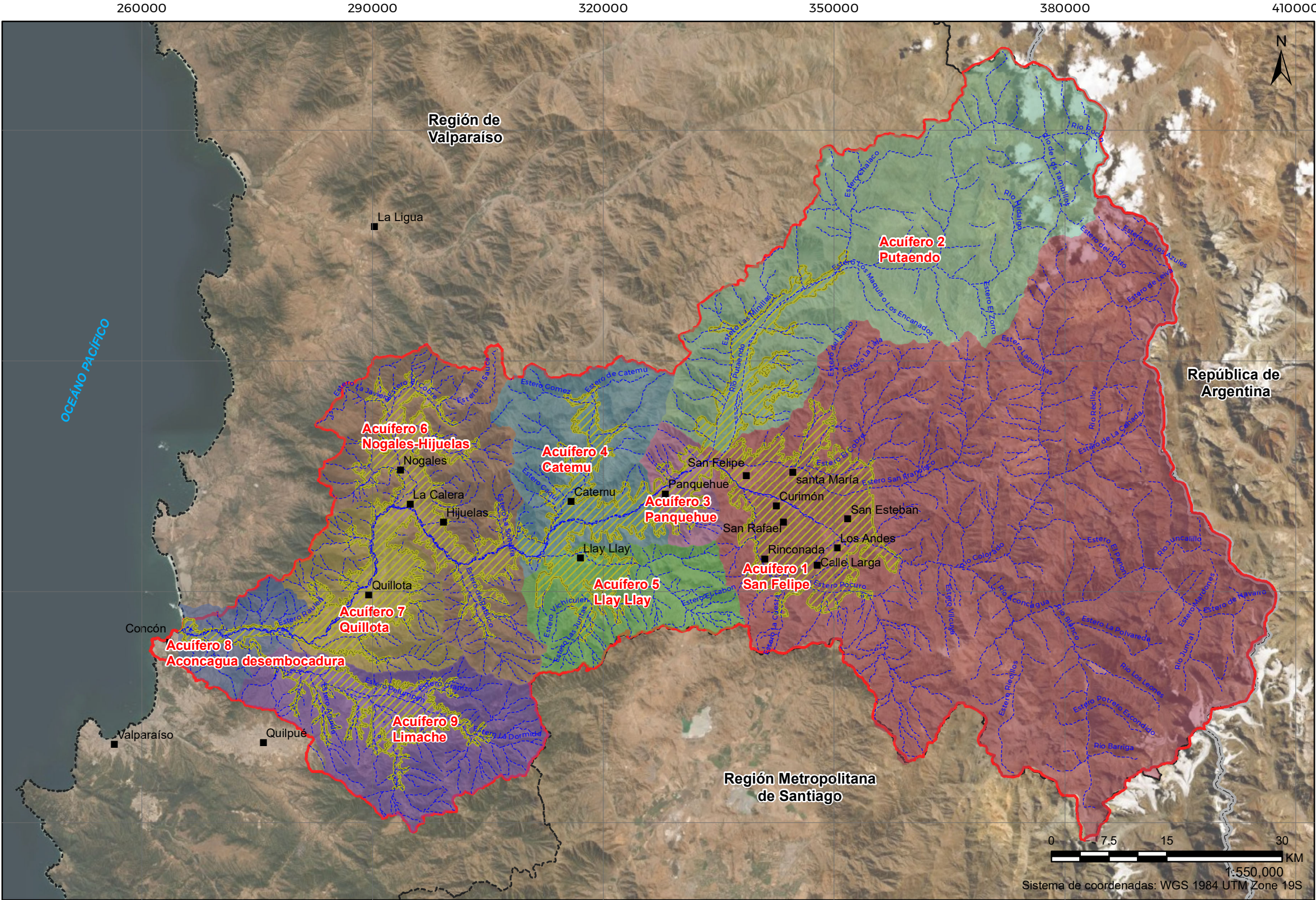
El presente estudio se desarrolla en 2 Etapas (Etapa 1 y Etapa 2), en base a los Términos de Referencia (TdR) que forman parte de la Resolución DGA N°264/2019.

En la primera etapa del estudio (Etapa 1) se realiza la actualización de la modelación integrada.

Dicha etapa inicia con la revisión de antecedentes y los estudios previos llevados a cabo en la cuenca, destacando la elaboración de fichas resumen con los resultados más significativos de estos trabajos aplicables al presente estudio.

Continúa con la actualización de la modelación hidrológica de la cuenca del río Aconcagua, la cual se enfoca en la caracterización de las variables hidrológicas: precipitación y caudal, así como en la descripción y actualización de los programas computacionales asociados. Se realiza la identificación de registros de precipitación y caudal en las estaciones pluviométricas y fluviométricas que se ubican en la cuenca, y se seleccionan de acuerdo a la longitud del periodo de registro, representatividad y a la consistencia de los datos de cada serie. Las series identificadas se completan y son utilizadas para identificar: precipitación anual, variación mensual de precipitaciones, caudal medio anual, variación mensual de caudales, análisis de años secos y el cálculo de los índices de sequía: IPE e ICE. Luego, se describe los criterios y la lógica del modelo MOS, cuya última actualización corresponde al DICTUC en el año 2009, incluyendo sus bondades y limitaciones, la metodología empleada para la actualización del MOS, considerando como periodo de calibración abril 1950 – marzo 2019, y los resultados de la validación del modelo de calibración. El modelo MOS actualizado a esta fecha se denomina con ocasión del presente trabajo, MOS ACN2019.

Path: \\cisc1200serv01\22-Projects\705_DCA\MOP0023\400_WIP\450_OIS_CAD\431_Map_Files\100_Entrega_Junio2019\Figura 1-1_Ubicación del área de estudio.mxd



LEYENDA

- Localidades
- Red hidrográfica
- Límite internacional
- Área de estudio
- Límite de modelo

Acuífero estudiado en Septiembre 2017

- Acuífero 1 - San Felipe
- Acuífero 2 - Putaendo
- Acuífero 3 - Panquehue
- Acuífero 4 - Catemu
- Acuífero 5 - Llay Llay
- Acuífero 6 - Nogales-Hijuelas
- Acuífero 7 - Quillota
- Acuífero 8 - Aconcagua desembocadura
- Acuífero 9 - Limache



Ubicación del área de estudio			
PREP.:	E.A.G.	FECHA:	Julio 2019
DIB.:	J.R.G.	N° PROY.:	MOP0023
APR.:	E.A.G.	N° TAREA:	01
PROYECTO:			Actualización de la Modelación Hidrológica Integrada del Aconcagua
CLIENTE:			Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas División de Estudios y Planificación
			Figura 1-1

A su vez, para la actualización de la modelación hidrogeológica se presenta la caracterización hidrogeológica de la cuenca del Aconcagua, que comprende la caracterización geológica y sus componentes geomorfológicos y estructurales, además de una caracterización hidrogeológica, que aborda la piezometría, la variación de niveles en el tiempo y, la definición de las unidades hidrogeológicas, haciendo hincapié en la revisión del modelo conceptual de DICTUC del año 2009, a la luz de los antecedentes generados en la cuenca durante los últimos años y reunidos por WSP. Luego, se revisa el modelo numérico disponible y su consistencia con el modelo conceptual de entonces, indicando los hallazgos realizados y oportunidad de mejoras. Finalmente, se presenta la actualización y validación del modelo Modflow disponible hasta marzo de 2019 (VM ACN 2019).

A partir de la herramienta actualizada (MOS ACN2019 y VM ACN 2019) se llevan a cabo tres escenarios predictivos, a saber, el caso base, correspondiente a la simulación de la demanda comprometida al mes de abril de 2019 (expresada como caudal nominal 59.842,5 l/s) y el escenario de nuevas extracciones DOH, incorporando los nuevos pozos proyectados (caudal nominal incremental de 7.067,5 l/s distribuido en 32 pozos) y finalmente, el escenario de evaluación de recarga artificial en la primera sección de riego como respaldo de las nuevas captaciones proyectadas por la DOH.

Por su parte, en la segunda etapa del estudio (Etapa 2) se realiza la migración de la modelación integrada.

Se efectúa la migración del modelo hidrológico MOS ACN 2019 de calibración (Etapa 1) al WEAP con la misma discretización temporal mensual (abril 1950 - marzo de 2019), con énfasis en el traspaso de la estructura del modelo MOS, haciendo hincapié en la conceptualización y topología del nuevo modelo WEAP incluyendo las simplificaciones realizadas. Los resultados de ambos modelos (MOS ACN 2019 y WEAP) son contrastados tanto en términos de los ajustes en las estaciones fluviométricas de control en el río Aconcagua como de la recarga generada al embalse subterráneo.

Luego, se ejecuta el desacople del modelo hidrogeológico Modflow (VM ACN 2019) de calibración de la Etapa 1 (abril de 1991 a marzo de 2019) de la plataforma Visual Modflow (VM), resultando en un paquete de archivos en lenguaje nativo que se ejecutan desde una pantalla de edición del sistema operativo de Windows (ventana de comandos), describiendo las instrucciones de uso. Los resultados son comparados a nivel de los ajustes en los pozos de monitoreo como de los balances de masa promedio del sistema subterráneo.

Este informe corresponde al Resumen Ejecutivo del estudio donde se describe la metodología y, los resultados y principales conclusiones obtenidas de los servicios comprometidos.

2 ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN INTEGRADA

En la Etapa 1 se realizó la actualización de la herramienta propiamente tal (MOS ACN 2019 y VM ACN 2019) con la cual fue posible estudiar y diagnosticar el acuífero de la cuenca del Aconcagua, así como evaluar la sustentabilidad de nuevas baterías de pozos de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Es importante tener siempre presente que la calibración y la simulación de los diversos escenarios para cada modelo por separado (MOS ACN 2019 y VM ACN 2019), requirió de su operación en forma conjunta, debido a que los resultados de recarga al acuífero obtenidos desde el MOS ACN 2019 se utilizaron como dato de entrada para VM ACN 2019. Esto permitió verificar los resultados de la operación de ambas herramientas por si solas, para un mismo recurso y sobre la misma unidad de control o cuenca, verificando así la consistencia de ambos modelos respecto de algunos parámetros subterráneos.

2.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para el desarrollo del presente estudio se ha reunido y revisado tanto información aportada por la DGA, como recopilada directamente por WSP, de preferencia desde ésta y otras reparticiones públicas.

Los antecedentes principales facilitados por la DGA para el desarrollo del presente servicio de consultoría corresponden a coberturas digitales georreferenciadas, planillas de cálculo, tablas, diagramas y documentos de texto de utilidad. Esta información incluye estadísticas de precipitación diaria, caudal medio diario, evaporación diaria, niveles de agua subterránea y, listados de derechos superficiales y subterráneos de la cuenca, entre otros.

Se pudieron revisar todos los estudios e informes elaborados por la DGA, con especial énfasis en aquellos antecedentes de utilidad en la cuenca del río Aconcagua para el período 2009 a 2018, los cuales entregan resultados para la gestión del recurso hídrico disponible, identificación de los acuíferos de aprovechamiento común, capacidad para otorgamiento de derechos de aprovechamiento, y detalle de las principales herramientas de modelación utilizadas para las evaluaciones del recurso en el sistema.

De la información reunida por WSP, destaca por sobre todo los aportes de ESVAL, consistentes básicamente en: a) Pruebas de bombeo y litología de pozos (45 nuevos sondeos construidos a partir de 2011 con información hidrogeológica relevante, de los cuales, 40 disponen de información sobre la litología atravesada y profundidad de la perforación), esta información fue esencial para revisar el modelo hidrogeológico conceptual de DICTUC de 2009, b) Convenios vigentes (ESVAL mantiene convenios para la compra de agua cruda a terceros, en particular la DOH), c) Protocolo PR018001 (Corresponde a la información oficial que ESVAL entrega a la SISS de las extracciones y niveles de las captaciones), esta última información se utilizó básicamente para mejorar el ajuste en el modelo matemático de los caudales alumbrados por el dren Las Vegas y d) Sistema de turnos históricos en la cuenca.

2.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica y manejo de agua de la cuenca del río Aconcagua se realiza mediante el modelo de operación del sistema, también conocido como MOS.

Se caracterizan las variables hidrológicas de precipitación, evaporación y caudal en las estaciones representativas de cada sección; que serán empleadas como datos de entrada al modelo MOS. Para el análisis de calidad de datos, se seleccionaron estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA con una extensión de 50 años de registros; los cuales fueron completados mediante técnicas clásicas. Fue parte de la caracterización el análisis de años secos y húmedos para estimar los coeficientes de sequías IPE e ICE.

El MOS es una herramienta usada en la cuenca Aconcagua porque representa el sistema superficial, los sistemas de riego y su vinculación con los sistemas subterráneos; y así caracteriza la situación de la cuenca evaluando, el efecto de la incorporación de obras de regulación, el cambio en la eficiencia del uso del agua en riego y el aumento en el uso del agua subterránea sobre la cantidad y distribución de los recursos hídricos de la cuenca.

La metodología empleada en la simulación del MOS permite generar caudal en diversos puntos de interés de la cuenca. Para los sectores de riego se incluyen procesos como el reuso de derrames de riego, lo que se traduce en una mayor eficiencia a nivel de sector. Los retornos desde los sectores de riego y las descargas desde los acuíferos, en conjunto con las capacidades máximas de transmisión de los mismos en lugares determinados, permiten representar las recuperaciones experimentadas por el río Aconcagua.

Las series de recarga generadas consideran la recarga proveniente de los sectores de riego por percolación profunda de los excedentes del riego y de las precipitaciones, además de la infiltración desde los tramos de río. A pesar de las capacidades de simulación del MOS, la componente subterránea simulada por el modelo, es una aproximación al sistema que en ningún caso permite determinar niveles freáticos en régimen transitorio. Por otro lado, la componente subterránea ha sido representada por un modelo tipo caja negra que se restringe a la ecuación de continuidad y considera las propiedades físicas de los acuíferos solamente en las secciones de entrada y salida que conforman los embalses subterráneos.

Todos estos procesos son representados por una serie de elementos regidos por la ecuación de continuidad y vinculados entre sí a través de sus respectivas entradas y salidas. Los principales elementos son: sectores de riego, áreas de contribución, tramos de río y nodos de distribución, embalses superficiales, canales de trasvase, acuíferos y demandas.

Para utilizar el MOS, se realiza una evaluación de las versiones anteriores del modelo y se analizan las brechas; luego se realiza la actualización de las variables hidrológicas y de condiciones operativas relevantes al alcance de este estudio; tales como demandas de riego, implementación de reservorio, y otros (MOS ACN 2019).

Los principales resultados de la modelación hidrológica se pueden resumir en:

- El análisis de los datos pluviométricos a escala anual, muestra un decrecimiento en la media de las precipitaciones. Las estaciones representativas de cada una de las secciones (Resguardo Los Patos, San Felipe, Los Aromos y Limache) muestran que la media de los últimos 20 años es menor a la media del registro completo en un 10%.
- El análisis de variabilidad de las series de precipitación y caudal, con los índices IPE e ICE, indicó que existen periodos de años secos con una duración de 10 años en promedio, seguidos de periodos de años húmedos de 5 años en promedio. El periodo de análisis de 69 años permitió identificar tres periodos de años secos y tres periodos de años normales a húmedos.
- El análisis de los datos fluviométricos a escala anual, verificó el comportamiento de la precipitación en los últimos 20 años, mostrando una reducción del 15% del caudal medio anual, con respecto al promedio de la serie total.
- El análisis de brechas muestra que es necesario realizar una actualización de algunos parámetros y datos de entrada que son utilizados por el modelo hidrológico Aconcagua-MOS pero debido al alcance del presente estudio, esto no se ha realizado. Sin embargo, los resultados obtenidos son acordes con el funcionamiento real de la cuenca del Aconcagua y se consideran representativos para ser usados en proyectos de planificación.
- La actualización del modelo MOS, además de la actualización de los datos hidrológicos considera la implementación de algunas de las limitaciones identificadas del estudio, pero es importante que para estudios futuros o de detalle operacional se implementen todas las consideraciones encontradas en el análisis de brechas y se actualicen los datos de entrada con datos tomados en terreno (como, por ejemplo, sectores de riego y derechos superficiales para uso industrial).
- La metodología que usa el MOS para la generación de caudales en la cuenca del río Aconcagua verifica su representatividad, al generar caudales en los puntos de control fluviométrico (nodo 07 y nodo 22) con porcentajes de error estadísticamente aceptables para series hidrológicas y mostrando la variabilidad estacional de la serie observada. Al analizar en detalle los caudales bajos, el error porcentual obtenido es menor que aquel que se obtiene de analizar la serie completa de caudales, lo que significa que la simulación de los caudales bajos se ajusta mejor a la serie de caudales observados. Así, los resultados de la calibración del modelo se consideran conservadores (Figura 2-1 y Figura 2-2).
- Considerando aceptables los caudales simulados para la primera y segunda sección, se aceptan que los caudales para la tercera y cuarta sección son válidos. No es posible validar las salidas de caudales de esas dos secciones porque no se dispone de registros fluviométricos en los nodos representativos de la tercera y cuarta sección (nodo 28 y nodo 36).

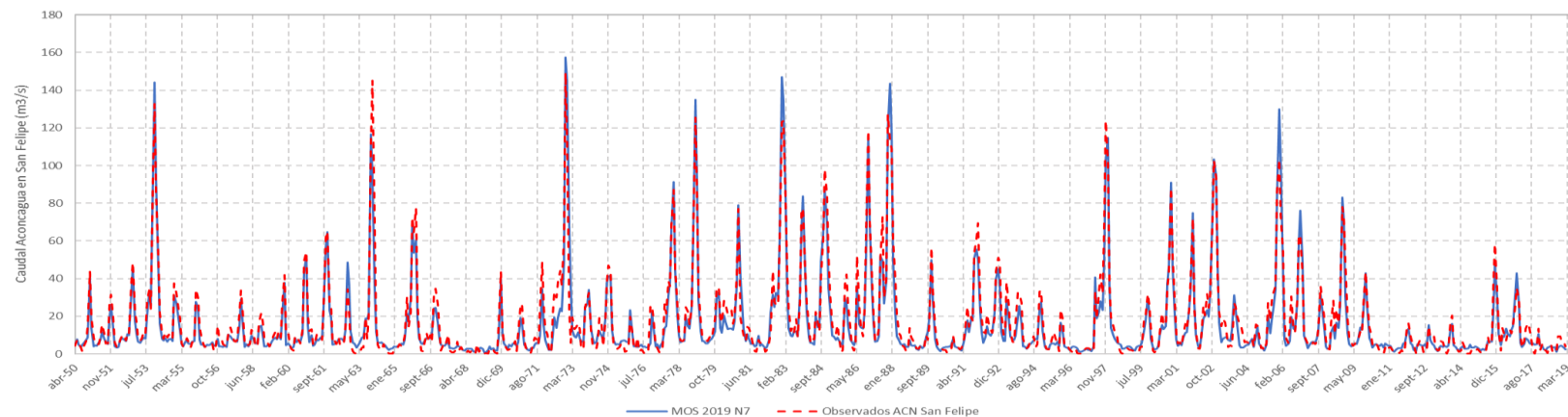


Figura 2-1: Comparación caudales medio mensuales N07 y estación DGA río Aconcagua en San Felipe, periodo completo

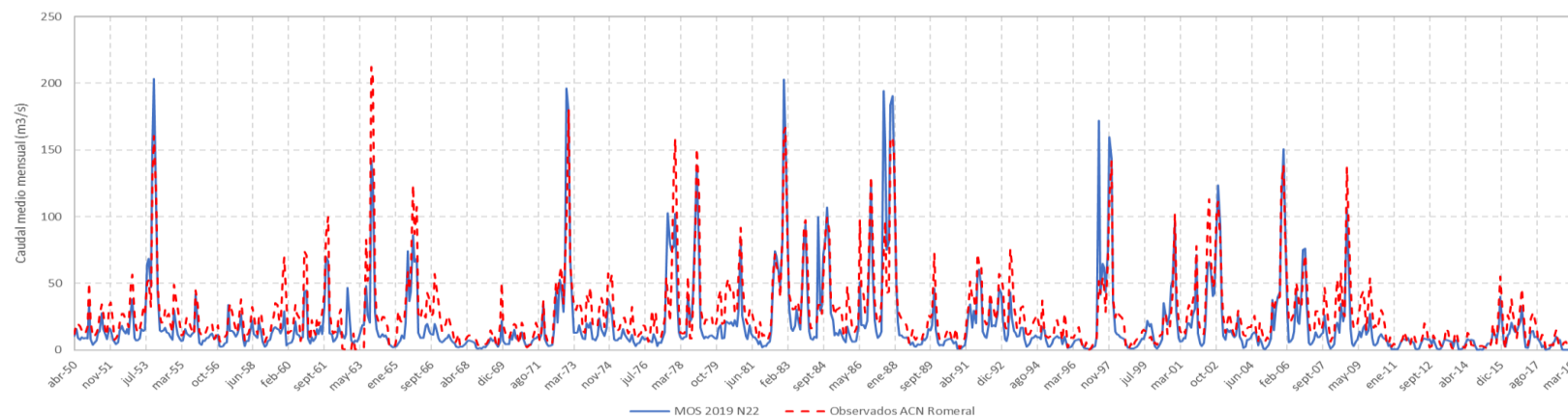


Figura 2-2: Comparación caudales medio mensuales N22 y estación DGA río Aconcagua en Romeral, periodo completo

- El modelo MOS entrega las entradas a los distintos acuíferos a través de los distintos mecanismos de recarga presentes, ya sea por excesos en los sectores de riego, infiltración en canales, percolación desde el río, etc. En este caso se considera como recarga el valor neto que entra a los distintos acuíferos por los distintos mecanismos (Figura 2-3). Estadísticamente hablando, esta serie presenta una media para el periodo 1991-2019 de 22,04 m³/s y de 19,04 m³/s para el periodo 1991-2001, valor ligeramente mayor a los 18,63 m³/s presentados por DICTUC 2009 (incrementa en un 2%).

Se debe hacer la distinción que esta serie no es la que finalmente es ingresada al modelo hidrogeológico ya que existen condiciones de bordes (tramos de río) que calculan parte de estos flujos en base a los distintos estados de las celdas del modelo. Por lo anterior, para el modelo hidrogeológico se genera una segunda serie que sólo considera los aportes impuestos, principalmente recargas provenientes de riego, canales y lluvia mientras en el caso de la recarga de los ríos, ésta sólo es impuesta para algunos nodos particulares (en la parte alta de los cursos principales). La media de la recarga superficial del periodo 1991 – 2006 fue de 20,62 m³/s en el estudio de DICTUC 2009 y lo obtenido en esta actualización para el mismo periodo fue de 20,16 m³/s; la media aumenta ligeramente a 20,70 m³/s si se considera el periodo completo de la serie de recarga (1991 – 2019).

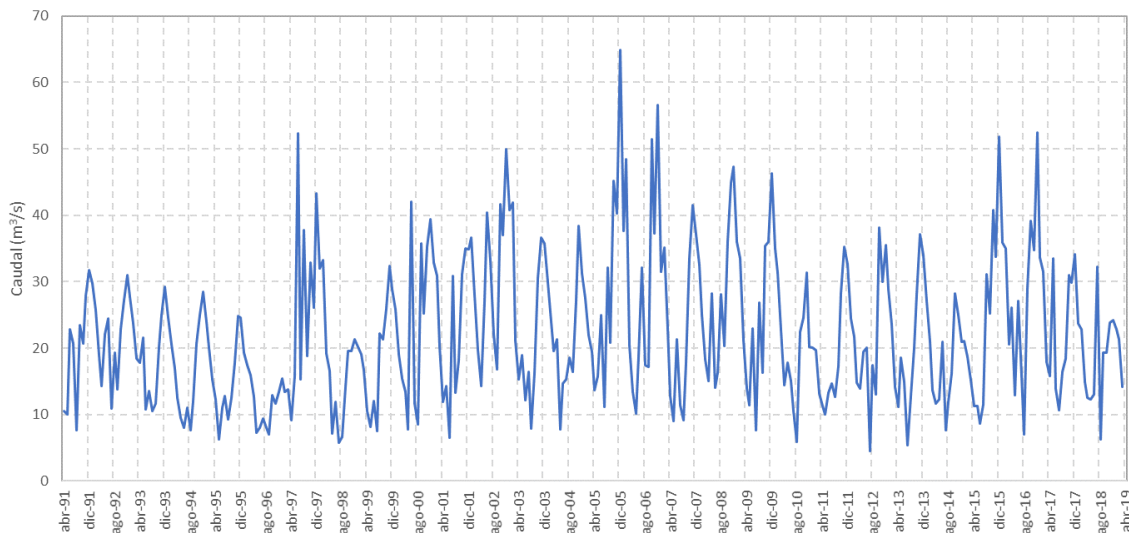


Figura 2-3: Salidas de MOS ACN 2019 a acuíferos (todas las fuentes)

- Finalmente, se obtuvo el grado de seguridad de riego por sección legal, identificando que en el mes de febrero se produce el menor valor (0,75 o 75%). También se identificó que la Cuarta sección es la que posee los valores más bajos de seguridad de riego, seguida por la Tercera sección.

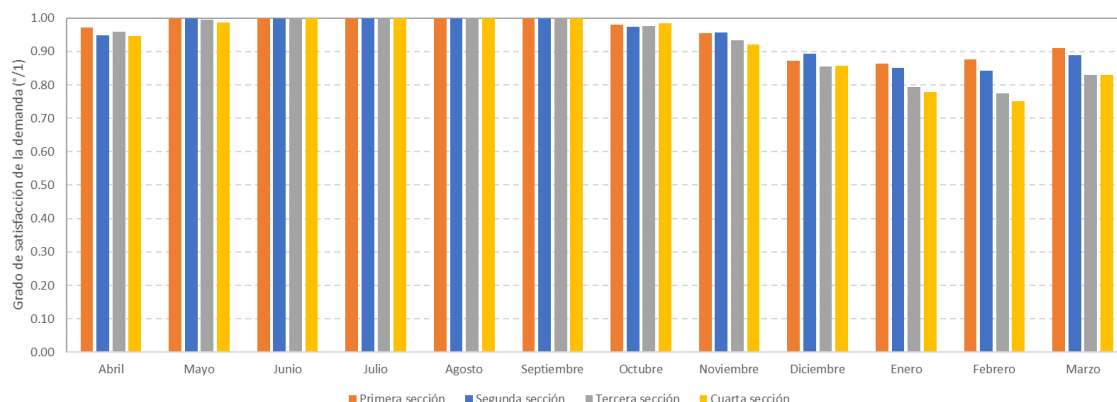


Figura 2-4: Grado de satisfacción de la demanda por sección legal

En general, los resultados obtenidos de la actualización del modelo MOS, nos indican que es un modelo representativo del sistema de la cuenca del río Aconcagua y que a pesar de sus limitaciones logra simular los caudales en el río y la serie de recarga que es utilizada en el modelo hidrogeológico. Igualmente, los resultados del MOS permiten la optimización del manejo del recurso hídrico en la cuenca y la planificación de medidas de manejo del agua futuros (mediante la simulación de escenarios); importantes para el desarrollo de la cuenca y sus usuarios.

2.3 MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El modelo Modflow disponible se actualiza y valida hasta marzo de 2019 (VM ACN 2019), haciendo hincapié antes en la revisión del modelo conceptual de DICTUC del año 2009, a la luz de los antecedentes generados en la cuenca durante los últimos años y reunidos por WSP, y además en la revisión del modelo numérico existente y su consistencia con el modelo conceptual de entonces, indicando los hallazgos realizados y oportunidad de mejoras.

Para lo anterior, se presenta la caracterización hidrogeológica de la cuenca del Aconcagua, que comprende la descripción geológica y sus componentes geomorfológicos y estructurales, además de una caracterización hidrogeológica, que aborda la piezometría, la variación de niveles en el tiempo y, la definición de las unidades hidrogeológicas.

Los principales resultados de la modelación hidrogeológica se pueden resumir en:

- En la recopilación de nuevos antecedentes se ha localizado 40 nuevos sondeos perforados entre 2011 y 2017, con información litológica que ha permitido corroborar la geometría del sistema, analizada en términos de la profundidad del basamento, en la mayor parte de los sectores acuíferos que conforman la cuenca del Aconcagua. Únicamente, en el acuífero 8 Aconcagua desembocadura, sería recomendable, llevar a cabo una revisión de la profundidad del basamento, con el

fin de identificar si las discrepancias detectadas producto de la incorporación de los los nuevos antecedentes corresponden a elevaciones locales del basamento.

- La elaboración de perfiles hidrogeológicos permite analizar de forma gráfica, las posibles modificaciones del basamento, definidas en base a los nuevos antecedentes, con respecto al modelo de elevaciones del basamento del modelo conceptual previo de Dictuc (2009).
- Respecto a la nueva información recopilada sobre el parámetro de permeabilidad, ha sido posible recopilar 23 nuevos datos factibles de asociar a una capa específica del modelo conceptual original, de los cuales, en el 60% de los nuevos antecedentes, se confirman los rangos de permeabilidad del modelo conceptual. Del resto de los sondeos, en solo 9, es decir en 21% de los nuevos sondeos (sobre un total de 41 nuevos sondeos reunidos con este tipo de datos), es posible afirmar que los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos, no confirman el modelo conceptual. En el resto de los casos (18 pozos), no es posible asignar los valores obtenidos en los ensayos a un único layer, y el contraste de permeabilidades entre las capas, hace que no sea correcto contrastar la información de los ensayos con el modelo conceptual.
- Con la actualización de la piezometría llevada a cabo en general se confirma el trabajo realizado por la DOH en 2009, fundamentalmente no varían las equipotenciales de la napa subterránea en la II y III sección de riego. La escala espacial utilizada no permite dar cuenta en general de los descensos menores que se observan a partir del año 2010 en dichas secciones, en cambio, donde si hay diferencias importantes es en la Cuarta y Primera sección de riego donde los niveles se han profundizado hasta poco más de 5 y 30 m respectivamente. La forma de las isopiezas se ha modificado substancialmente entre Los Andes y San Felipe (acuífero 1) con el desarrollo de un cono de depresión al surponiente del río Aconcagua debido a la gran cantidad de pozos que se reconocen en esa zona.
- El análisis de la evolución de los niveles piezométricos de la red de monitoreo de la Dirección General de Aguas, pone de manifiesto que, en términos generales se observa una tendencia descendente en todos los sectores acuíferos desde 2010 hasta la actualidad, siendo estos descensos más críticos en el acuífero 1 San Felipe, donde, existen piezómetros que han registrado descensos del orden de 20 m y en el acuífero 2 Putaendo, donde se han registrado descensos del orden de 10 m. En el sector del acuífero 8 Desembocadura los niveles muestran un descenso sostenido del orden de 8 m. Los descensos de la napa subterránea en la II y III Sección de riego son bastante menores.
- La revisión de VM ACN 2008 indica que fue elaborado rigurosamente sobre la base de un robusto modelo hidrogeológico conceptual reuniendo las mejores prácticas de modelación disponibles entonces. No obstante, es susceptible de mejorar como cualquier herramienta de este tipo, con una mayor base de datos subyacente, en especial, la representatividad de la galería Las Vegas de ESVAL, una mejor representación de la interacción del embalse Los Aromos con el sistema subterráneo a la salida del acuífero de Limache, un mejor control del volumen bombeado

efectivamente desde el valle, en particular de los pozos destinados para riego, y aforos en el río Aconcagua y sus afluentes, de manera de cuantificar recuperaciones para tramos específicos como blanco de calibración. Se considera que el modelo disponible no representa bien la complejidad hidrogeológica de los acuíferos de Limache y Llay Llay, la discretización vertical en profundidad (3 capas) se adapta bien al valle principal pero no a estos tributarios laterales.

- El modelo se actualizó contemplando la extensión a marzo de 2019 de la información de entrada requerida. El modelo VM ACN 2019 mantiene la misma geometría y parámetros hidrogeológicos de su antecesor, los cuales están respaldados por un robusto estudio conceptual hidrogeológico realizado en la cuenca del río Aconcagua. A fines de lograr una mayor representatividad de la galería subterránea Las Vegas, se modificó a su alrededor la condición de borde de río (Figura 2-5), según los ciclos de sequía registrados en la cuenca, buscando reproducir la variación observada en la producción del dren.
- La recarga superficial ocupada en VM ACN 2019 fue generada a partir del programa MOS ACN 2019. La serie de recarga generada considera la recarga proveniente de los sectores de riego por percolación profunda de los excedentes del riego y de las precipitaciones, además de la infiltración desde los tramos de río (Figura 2-6). La recarga superficial promedio para el periodo entre abril de 1991 y marzo de 2019 es de 20,7 m³/s. Por su parte, la actualización de las extracciones subterráneas se realizó en base a la demanda subterránea comprometida en la cuenca al mes de Abril de 2019, aplicando un determinado factor de corrección (factor de uso previsible) sobre los caudales nominales (Figura 2-7).

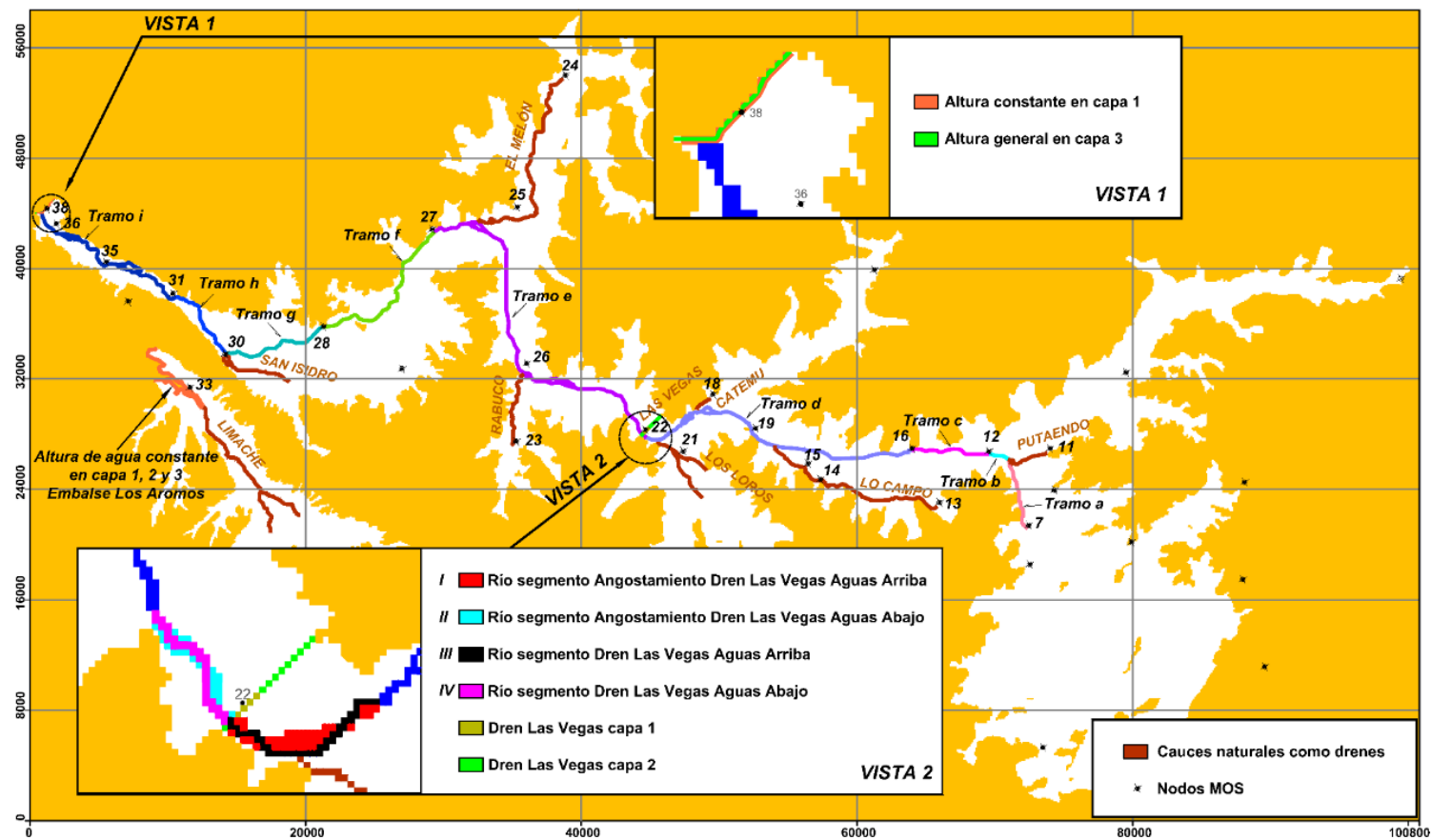


Figura 2-5: Ubicación condiciones de borde en el modelo, vista 2 corresponde a los sectores de río modificados

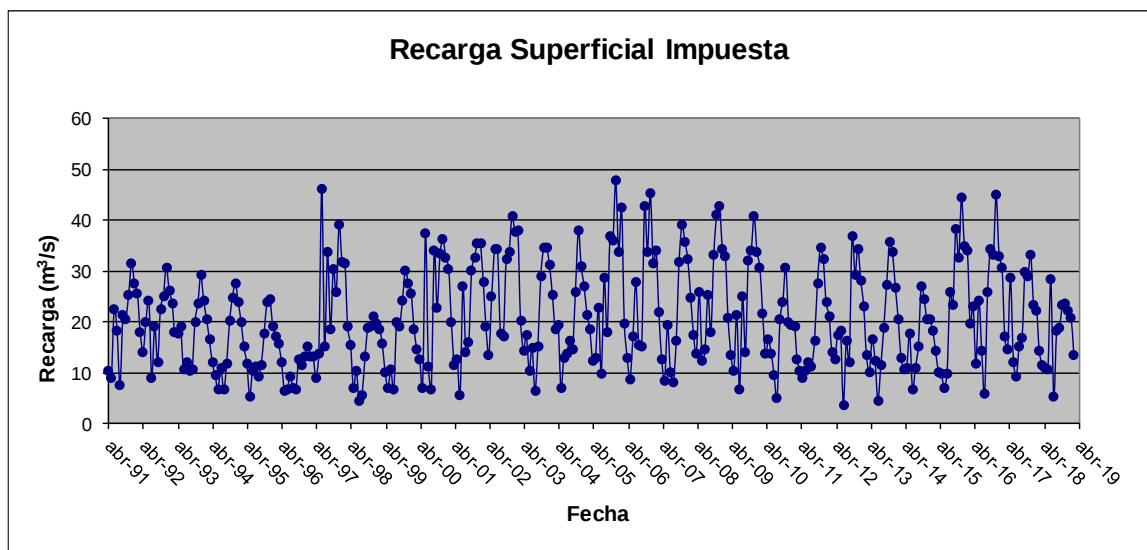


Figura 2-6: Serie de recarga superficial considerada desde el MOS



Figura 2-7: Serie de bombeo ingresada al modelo numérico

- El modelo actualizado logra en general mejorar los ajustes obtenidos en el modelo original, mejorando sustancialmente la representatividad del dren Las Vegas, manteniendo las propiedades hidráulicas originales (permeabilidad y almacenamiento) en el dominio de modelación. La nueva calibración cumple, en general, los principales criterios de modelación establecidos en la guía del SEA de 2012 respecto a los errores de cierre, preservación de variables impuestas, tendencia de los niveles y estadísticos asociados, concordancia de los balances y propiedades hidráulicas con el modelo conceptual.

En la Tabla 2-1 se presenta el balance de masas promedio de la cuenca completa para todo el período de modelación (1991-2019). Se logra un error de cierre de 0,01%, el cual es muy bueno.

Se observa que los ingresos subterráneos promedio de la cuenca se calculan en 27,1 m³/s que proviene fundamentalmente de infiltración de los principales ríos y esteros, así como desde los excedentes de riego (26,2 m³/s). Se observa que a nivel de toda la cuenca existe en promedio un vaciamiento del sistema para el periodo analizado (0,86 m³/s), concordante con la importante profundización de niveles de agua subterránea que se aprecia en los sectores superiores de la cuenca (acuíferos 1 y 2). Por otra parte, se observa que las extracciones mecánicas promedio desde el acuífero alcanzan los 8,9 m³/s considerando el periodo histórico analizado (1991-2019), si bien constituyen una importante descarga no corresponden a la principal salida del sistema la cual está asociada a los afloramientos naturales en los cursos superficiales (promedio de 16,9 m³/s). La galería Las Vegas constituye también una importante salida con una magnitud promedio para todo el periodo analizado de 1,2 m³/s.

La recuperación neta del río Aconcagua dentro de la segunda sección de riego se estima en 7,7 m³/s como promedio para el periodo analizado, valor concordante con las corridas de mediciones citadas en el estudio de la DOH de 2009 (entre 7 y 8 m³/s).

Tabla 2-1: Balance de masas promedio global de la cuenca del río Aconcagua para la calibración

Entradas (m ³ /s)	Recarga superficial	18,76
	Recarga lateral	0,00
	Recarga desde el río Aconcagua	7,43
	Entrada desde el mar	0,05
	Almacenamiento	0,86
	Entrada total	27,11
Salidas (m ³ /s)	Extracciones artificiales	8,92
	Descarga en otros cauces naturales	3,07
	Descarga dren Las Vegas	1,24
	Afloramiento río Aconcagua	13,79
	Descarga embalse Los Aromos	0,09
	Salida total	27,10
Error		0,01%

Las extracciones promedio del dren Las Vegas obtenidas con el modelo actualizado (VM ACN 2019) y su comparación con los registros medidos entre enero de 2002 y septiembre de 2010, así como entre octubre de 2010 y agosto de 2015 se resumen en la siguiente tabla (Tabla 2-2). Se observa una buena representación del comportamiento del dren Las Vegas, tanto en períodos normales como de sequía, según los valores reales. En años normales el dren produce del orden de 1,3 m³/s y no 1,6 m³/s determinado originalmente por la DOH (2009).

Tabla 2-2: Producción promedio dren Las Vegas para períodos seleccionados

Período	VMACN2019 (m ³ /s)	Extracción medida PR18 (m ³ /s)
enero de 2002- septiembre de 2010	1,35	1,34
octubre de 2010-agosto de 2015*	0,97	1,16

Nota: * El periodo octubre de 2010-agosto de 2015 es representativo de sequía

Respecto a los niveles calculados, se logró un NRMS general de 0,6%, el cual es muy bueno, considerando todos los pozos de observación del modelo. Lo anterior pese a que en la zona de Limache el modelo no reproduce en buena forma los niveles observados. El error medio absoluto es de 2,8 m (Figura 2-8), mucho menos del 5% de la diferencia de niveles máxima observada (5% de 700 m es 35 m).

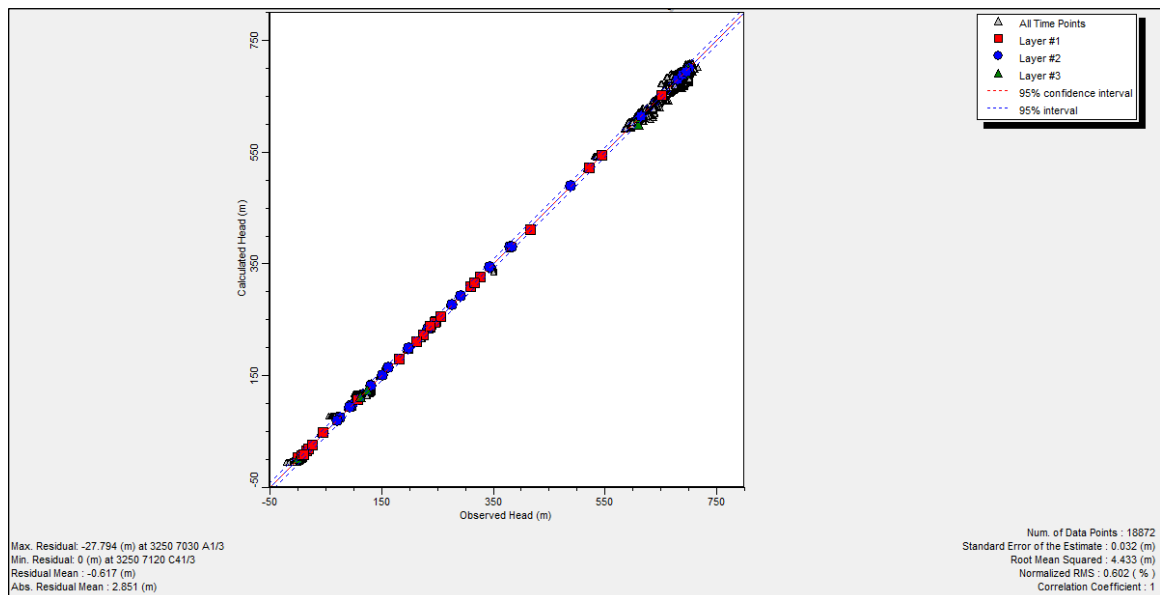


Figura 2-8: Niveles observados vs calculados sobre la recta Y=X (pantalla salida Visual Modflow)

- En general, se estima que el modelo está en condiciones de ser utilizado para modelar distintos escenarios predictivos de recarga y bombeo de los pozos de la DOH.

3 ESCENARIOS PREDICTIVOS

En esta sección se describen y resumen los resultados de los escenarios predictivos realizados con el modelo VM ACN 2019, para diferentes condiciones de bombeo y de recarga. Las simulaciones consideran un período de 50 años, desde abril de 2019 hasta marzo de 2069, y mantienen los parámetros hidrogeológicos de la calibración. Los escenarios predictivos se pueden resumir como sigue:

Escenario 1 Simulación base. Simulación de la demanda comprometida al mes de abril de 2019 expresada como caudal previsible (15.544 l/s), sin incluir la galería Las Vegas de ESVAL que es un resultado del modelo.

Escenario 2 Proyecto DOH. Simulación de las nuevas captaciones proyectadas por la DOH sobre el escenario anterior, a saber 32 pozos en sectores de San Felipe (25 pozos, 6.250 l/s en total), Putaendo (5 pozos, 537,5 l/s en total) y LLay llay (2 pozos, 280 l/s en total).

Escenario 3 Análisis de recarga artificial: Simulación de una recarga artificial en el acuífero 1 San Felipe durante el periodo que existe disponibilidad (promedio de 2,86 m³/s entre octubre y marzo) como respaldo de las nuevas captaciones proyectadas por la DOH.

Las simulaciones llevadas a cabo consideran como punto de partida la misma condición inicial, correspondiente a la posición del nivel de la napa asociada al mes de Marzo de 2019, último período de stress de la calibración del modelo en régimen transitorio.

Se consideró el cálculo del índice ICE en la estación Aconcagua en el Romeral para simular el comportamiento del río Aconcagua en el sector del dren Las Vegas. El modelo calcula el caudal de la galería para el horizonte simulado en cada escenario.

Las simulaciones consideran los embalses existentes (Chacrillas y Los Aromos) para todo el horizonte de tiempo modelado (50 años).

Los resultados se evalúan principalmente en términos de la comparación del balance hídrico promedio global del sistema subterráneo, el grado de interferencia sobre el río Aconcagua, la seguridad de riego y los niveles modelados en los nuevos pozos de la DOH contrastados con su profundidad de falla definida en este estudio como un 70% de la profundidad del pozo.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

3.1.1 EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS

La extracción artificial base (**Escenario 1**) considera la prolongación de la situación de bombeo al término de la calibración (marzo de 2019), correspondiente a la demanda comprometida al mes de abril de 2019, con los mismos factores de uso previsible según actividad económica, pero en forma continua en el año.

Las simulaciones incorporan la extracción de numerosas norias ubicadas originalmente en las quebradas que drenan al valle sobre las zonas inactivas de modelación (y que no fueron incluidas en la calibración) con tal de reflejar de mejor manera las demandas subterráneas sobre la cuenca.

El mismo criterio se usa para los pozos sin coordenadas en los archivos originales, agregando gran parte de esta extracción, para lo anterior se priorizó previamente las fuentes según la magnitud de su caudal. Las extracciones del caso base (**Escenario 1**) se resumen en la Tabla 3-1.

En tanto, el **Escenario 2** y el **Escenario 3** además de las captaciones anteriores (demanda comprometida al mes de abril de 2019) incluyen los nuevos pozos del proyecto DOH, tal como se indica en la misma tabla (Tabla 3-1). El caudal previsible asociado a todos estos nuevos sondeos es de 1.413,5 l/s, tomando el factor de uso asociado al riego predial (0,2).

Tabla 3-1: Demanda comprometida a abril de 2019 y caudal considerado en cada escenario

	Demanda Comprometida abril de 2019 (l/s)	Caudal Previsible			
		Escenario 1 (l/s)	Caudal Incremental Pozos DOH (l/s)	Escenario 2 (l/s)	Escenario 3 (l/s)
Sector 1 San Felipe	16.439,4	4.651	1.250 (25 pozos)	5.901	
Sector 2 Putaendo	919,9	379	107,5 (5 pozos)	486	
Sector 3 Panquehue	3.016,8	837	-	837	
Sector 4 Catemu	7.527,0	1.218	-	1.218	
Sector 5 Llay Llay	4.150,7	899	56,0 (2 pozos)	955	
Sector 6 Nogales-Hijuelas	7.810,2	2.414	-	2.414	
Sector 7 Quillota	9.972,3	2.781	-	2.781	
Sector 8 Aconcagua desembocadura	4.311,7	1.038	-	1.038	
Sector 9 Limache	5.694,5	1.326	-	1.326	
Total	59.842,5	15.544	1.413,5	16.958	

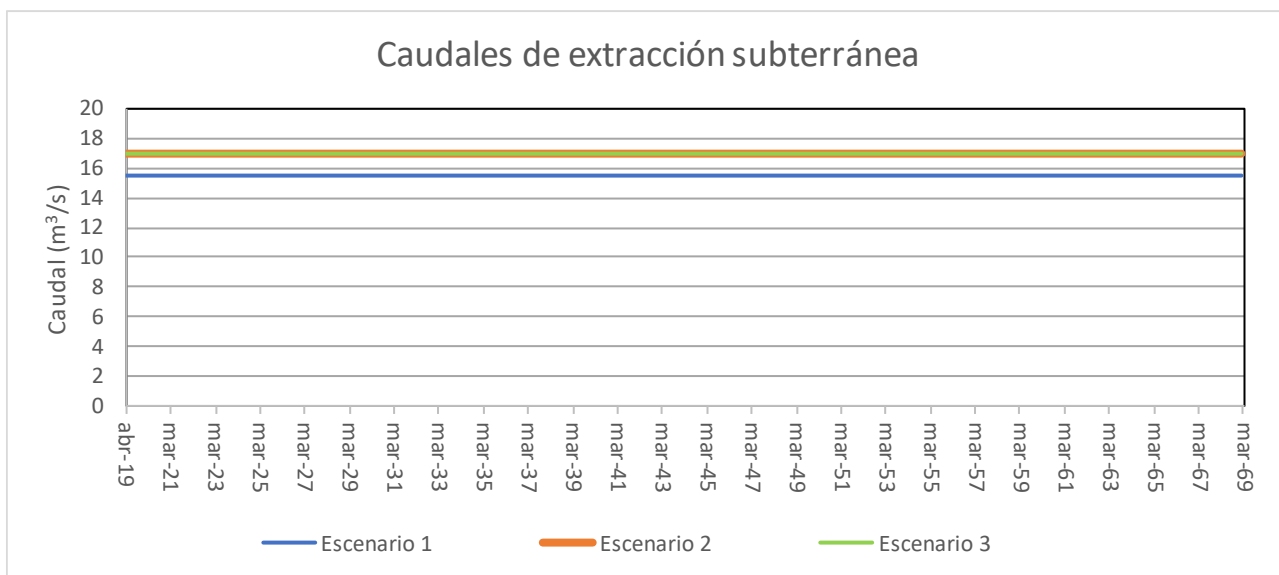


Figura 3-1: Bombeos impuestos en las simulaciones predictivas

3.1.2 RECARGA SUPERFICIAL

La recarga superficial se obtiene con el MOS ACN 2019, utilizando las precipitaciones entre abril de 1968 y marzo de 2018, incluyendo períodos secos y húmedos similares a la historia reciente.

La situación de demandas de riego en el MOS es la equivalente al final del período de calibración y los bombeos fueron definidos acorde al escenario simulado.

Además, en el MOS, la batería de pozos DOH fue ingresada directamente como caudal disponible a nodos cercanos a la extracción, de manera que queden disponibles a ser captados por los sectores de riego. Ese caudal es descontado, finalmente, del caudal disponible en el acuífero correspondiente. La excepción corresponde a los pozos colectivos de Llay Llay, en los cuales sólo un 40% se ingresa a los nodos, mientras que el 60% restante del derecho está destinado a agua potable. Además, se actualizan los estados de los acuíferos al inicio de la simulación (abril 2019) para coincidir con el final del periodo de calibración (marzo 2019).

En la Figura 3-2 se muestra las series de recarga superficial (obtenidas desde el MOS ACN 2019) impuestas en el modelo subterráneo para cada escenario, y son dependientes del nivel de explotación impuesto al acuífero en cada simulación.

Por su parte, en la Tabla 3-2 se presentan los valores promedios de recarga superficial para todo el horizonte de tiempo abordado (50 años) para cada escenario.

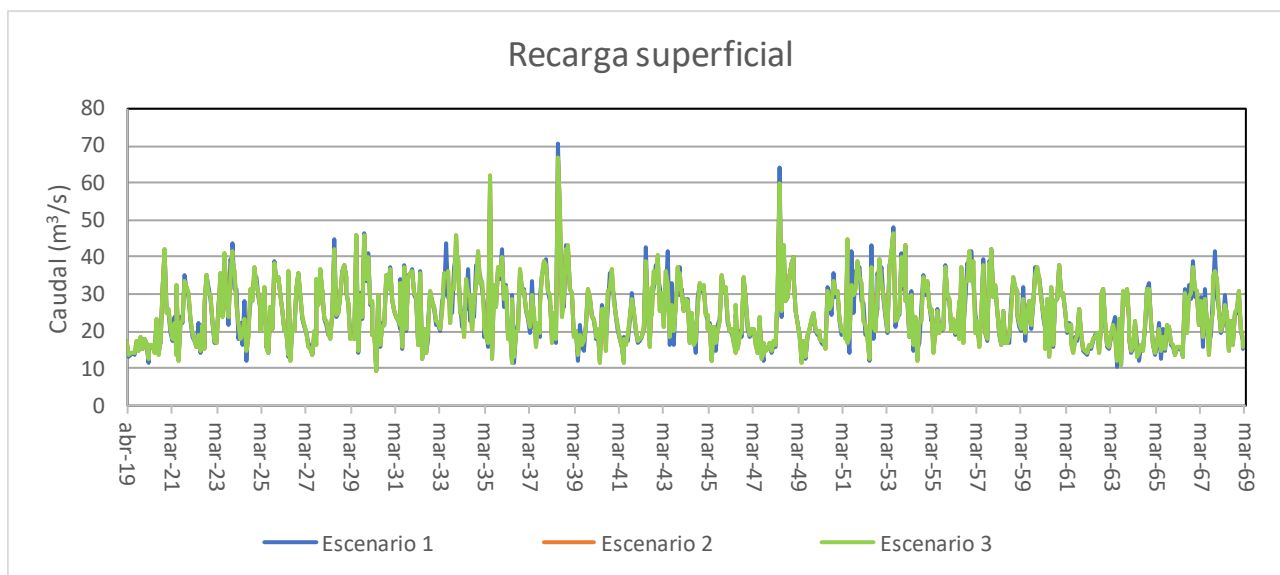


Figura 3-2: Recarga superficial impuesta en las simulaciones predictivas

Tabla 3-2: Recarga superficial promedio impuesta en cada escenario

Escenario 1 (m³/s)	Escenario 2 (m³/s)	Escenario 3 (m³/s)
24,88	24,91	24,91

3.1.3 RECARGA ARTIFICIAL

3.1.3.1 ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE RECURSOS SUPERFICIALES

Para analizar la disponibilidad de recursos superficiales que pueden ser utilizados para la recarga artificial, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Utilizar los caudales sobrantes del nodo 2 del MOS del **Escenario 1**. Se define como caudal sobrante del nodo, al caudal que fluye hacia el siguiente nodo del modelo, después de haber abastecido todas las demandas del nodo.
- Verificar la seguridad de riego de los sectores de todas las secciones, teniendo en cuenta que el periodo de superávit de la primera sección, es el periodo de déficit en la tercera y cuarta sección.

Se analizó la serie de caudales sobrantes del nodo 2, que se obtuvo del **Escenario 1** del MOS, teniendo en cuenta para ese tramo un caudal ecológico de 3 m³/s. Además, se tuvo en cuenta que, el derecho de agua considerado para la recarga artificial corresponde al derecho del embalse Puntilla del Viento, que era en promedio anual 5 m³/s. Así, se probó extraer en el periodo de superávit un caudal que varíe entre 1 m³/s y 5 m³/s; teniendo en cuenta que estas extracciones no deben afectar la disponibilidad de agua en las secciones aguas abajo del nodo 2.

Para seleccionar que caudal máximo puede ser extraído en el nodo 2, evitando en lo posible afectar el riego en las otras secciones, se utilizó como indicador la seguridad de riego. Se busca que el caudal máximo extraído no produzca un decremento significativo de la seguridad de riego en las secciones, es decir que la seguridad de riego no disminuya más del 1%.

La Tabla 3-3 muestra el caudal medio mensual disponible a ser extraído para alimentar la recarga artificial, considerando cinco diferentes escenarios de caudal máximo extraído.

Tabla 3-3: Caudal medio mensual disponible para recarga artificial

Caudal máximo extraído (m ³ /s)	Caudal medio mensual disponible ⁽¹⁾ (m ³ /s)						Caudal promedio disponible ⁽²⁾ (m ³ /s)
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	
1	0,60	0,88	0,90	0,86	0,72	0,41	0,73
2	1,03	1,64	1,72	1,58	1,18	0,57	1,29
3	1,45	2,39	2,52	2,28	1,60	0,72	1,83
4	1,87	3,11	3,32	2,96	2,02	0,86	2,36
5	2,29	3,80	4,10	3,61	2,42	0,98	2,86

Notas:

1. Los valores mostrados son el promedio de la serie de 50 años de caudales que han sido utilizados para la simulación del Escenario 1.
2. Corresponde al promedio del periodo de superávit (octubre – marzo), en el cual se extrae el caudal para la recarga artificial.

Para cada uno de los escenarios de caudal máximo extraído se estimó la seguridad de riego por sección (ver Tabla 3-4). Al comparar la seguridad de riego del **Escenario 1** con la estimada para cada uno de los escenarios de caudal máximo extraído se observa que, la diferencia es marginal; siendo la máxima diferencia 1% (cuando se extrae un caudal máximo de 5 m³/s). Por tal motivo, se decide considerar como caudal disponible para la recarga artificial, la serie generada por el caudal máximo extraído de 5 m³/s, la cual posee un caudal promedio de 2,86 m³/s (para el periodo octubre – marzo).

Tabla 3-4: Comparación de Seguridad de riego por sección con Escenario 1 (1)

Caudal máximo extraído (m ³ /s)	Promedio cuenca	1ra sección	2da sección	3era sección	4ta sección
Escenario 1	92,2%	94,5%	96,3%	90,4%	80,9%
1	92,0%	94,5%	96,2%	90,0%	80,6%
2	91,9%	94,5%	96,2%	89,9%	80,5%
3	91,8%	94,5%	96,2%	89,7%	80,3%
4	91,8%	94,5%	96,2%	89,6%	80,1%
5	91,7%	94,5%	96,2%	89,4%	79,9%

Notas:

1. Para que la seguridad de riego sea comparable con los resultados del Escenario 1, este ejercicio no considera la influencia de la recarga artificial en el cálculo de la seguridad de riego; ésta se usa como un indicador para seleccionar el caudal máximo a ser extraído.

3.1.3.2 DEFINICIÓN DE POZOS DE INYECCIÓN

En el **Escenario 3** se considera simular el efecto de la recarga artificial sobre el sector acuífero 1 San Felipe y analizar su repercusión en el sistema aguas abajo. Inicialmente, se consideraba analizar el efecto de una estación de recarga en superficie, constituida por piscinas de infiltración, con la capacidad de infiltrar un caudal de 5 m³/s.

En el análisis de los resultados de la prueba piloto de Curimón, para poder infiltrar un caudal promedio de 5 m³/s, sería necesario habilitar una superficie de infiltración mínima de 22 Há, sin considerar la superficie adicional que debe ser destinada al resto de infraestructuras que constituyen una planta de recarga artificial. Por esta razón, y después de obtener la aprobación de la Inspección Fiscal del presente estudio, se decidió simular el efecto de la recarga artificial considerando la inyección en el acuífero mediante pozos de inyección.

Para definir la mejor ubicación para el campo de pozos, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Se buscó los sectores del acuífero San Felipe con los parámetros hidráulicos más favorables, esto es, valores de transmisividad y porosidad de drenaje más elevados.
- Se buscó áreas con capacidad de almacenamiento suficientes entre el nivel piezométrico actual y la superficie del terreno.
- El campo de pozos debe estar suficientemente alejado de los cauces principales, de forma que, el incremento del nivel piezométrico local, que provoca la inyección, interfiera lo menos posible con la relación río-acuífero.

Es importante indicar que, para la ubicación del campo de pozos no se consideró la disponibilidad de espacio público, ni la proximidad a las posibles fuentes de agua, ya que se considera que estos análisis quedan fuera del alcance del presente estudio. Únicamente se tuvieron en cuenta, tal y como se mencionó, criterios hidrogeológicos. Tampoco, se han tenido en cuenta criterios de calidad del agua de inyección, la cual para evitar problemas de colmatación de los pozos (clogging) debe tener menos de 1 mg/L de total de sólidos disueltos. De esta forma, se seleccionó, preliminarmente, un sector localizado al sureste de la localidad de San Felipe, al norte de la ubicación de la nueva batería de pozos de la DOH en San Felipe.

El análisis elaborado con el modelo MOS ACN 2019 para comprobar la disponibilidad del recurso hídrico que podría ser destinado a recarga artificial, arrojó que, en promedio, sería posible disponer de un caudal de 2,86 m³/s entre los meses de octubre a marzo, tal y como se explica en el acápite precedente.

Considerando los valores que presentan los parámetros hidrodinámicos en el sector seleccionado se ha llevado a cabo un cálculo analítico destinado a establecer cuál sería el número de pozos activos que sería necesario considerar para inyectar de forma constante un caudal de 2,86 m³/s y el diseño de los mismos, esto considera implícitamente obras de regulación anexas a los pozos debido a que la disponibilidad es esencialmente variable.

Para ello se ha realizado un cálculo analítico utilizando el método de Jacob, para estimar el ascenso del nivel piezométrico como producto de la inyección de agua, teniendo en cuenta el efecto de la superposición de efectos del campo de pozos.

De esta forma se obtiene que para inyectar un caudal promedio de 2,86 m³/s sería necesario un total de 10 pozos activos, con una profundidad de 200 m y un diámetro de 600 mm y una capacidad de inyección de 290 l/s, en cada uno de ellos. El ascenso sobre el nivel piezométrico estático provocado en el centro del campo de pozos, al cabo de un año completo de inyección, sería del orden de 5 m.

3.2 RESULTADOS SEGURIDAD DE RIEGO

El grado de satisfacción de demanda es un indicador que muestra el porcentaje de demanda abastecida con respecto a la demanda total, en cada sector de riego. Para evaluar este indicador por sección, desde el MOS ACN 2019, se obtuvo el promedio mensual ponderado (por el área de cada sector de riego) del grado de satisfacción de demanda para los 50 años simulados. El resultado se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-5: Grado de satisfacción de la demanda (%).

Escenario	Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio anual
Escenario 1	Primera sección	95,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,8	96,3	90,1	85,1	81,9	86,7	94,5
	Segunda sección	95,9	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,3	93,3	87,2	88,8	91,2	96,3
	Tercera sección	96,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,6	90,2	81,1	69,8	61,1	88,6	90,4
	Cuarta sección	89,8	98,1	99,4	99,4	99,4	99,4	91,9	74,5	56,1	51,2	44,1	67,9	80,9
Escenario 2	Primera sección	95,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,8	96,3	90,1	85,1	81,9	86,7	94,5
	Segunda sección	96,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	93,5	87,9	89,6	91,5	96,5
	Tercera sección	97,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,3	91,6	82,1	72,1	64,3	90,8	91,4
	Cuarta sección	92,4	98,7	99,4	99,4	99,4	99,4	92,5	76,1	58,4	50,1	46,4	70,4	81,9

Se observa que, en el caso de la primera sección, el grado de satisfacción de riego se mantiene, esto se debe a que las medidas implementadas en el **Escenario 2** se encuentran ubicadas aguas abajo de la primera sección. Se observa un ligero incremento del grado de satisfacción de demanda en el **Escenario 2**, con respecto del **Escenario 1**. Para cuantificar este incremento se calculó la diferencia del grado de satisfacción de demanda del **Escenario 2** menos el **Escenario 1**, para cada uno de los meses de la serie de simulación y luego se estimó el promedio mensual de la serie; los resultados de esta estimación se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3-6: Diferencia de grado de satisfacción de la demanda entre Escenarios 2 y 1

Mes	Primera sección	Segunda sección	Tercera sección	Cuarta sección
Enero	0,0%	1,1%	4,8%	0,7%
Febrero	0,0%	1,0%	7,5%	7,0%
Marzo	0,0%	0,4%	2,7%	3,9%
Abril	0,0%	0,2%	1,3%	3,3%
Mayo	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%
Junio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Julio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Agosto	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Septiembre	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Octubre	0,0%	0,0%	0,9%	1,1%
Noviembre	0,0%	0,1%	2,4%	3,2%
Diciembre	0,0%	0,4%	2,7%	5,3%
Promedio anual	0,0%	0,3%	1,9%	2,1%

De la Tabla 3-6 se observa que, la sección en la cual la diferencia en el grado de satisfacción de la demanda es mayor, es la cuarta sección, en la cual el aumento del grado de satisfacción de demanda promedio anual es 2,1%, luego se encuentra la tercera sección, con un incremento de 1,9% y luego la segunda sección con un aumento de 0,3%. A nivel mensual, la diferencia del grado de satisfacción de la demanda entre los **Escenario 2 y 1** es mayor en el mes de febrero, se observa un incremento del 7,5% en la tercera sección y de 7,0% en la cuarta sección; así, podemos decir que la medida implementada por el **Escenario 2**, alcanza el objetivo de mejorar la satisfacción de la demanda en un mes en el cual la disponibilidad de agua en la tercera y cuarta sección es crítica.

En el caso del **Escenario 3**, la seguridad de riego no puede ser evaluada porque el MOS no está preparado para simular las condiciones de disponibilidad de agua con recarga artificial. Se requeriría cambios adicionales en la codificación del MOS que se encuentran fuera del alcance de este estudio.

3.3 RESULTADOS MODELACIÓN SUBTERRÁNEA

Los principales resultados del análisis de los escenarios predictivos con el modelo numérico VM ACN 2019 se pueden resumir en:

- El error de convergencia global es menor al 1% en todos los casos (Figura 3-3), valor dentro de los límites recomendados.
- Las diferencias entre las recargas impuestas y computadas se presentan en la Figura 3-4, la diferencia se debe a la pérdida volumétrica por secado de celda en los márgenes del valle. Lo propio para las extracciones computadas respecto a la ingresada al modelo (Figura 3-5).
- En la Tabla 3-7 se presenta el balance de masas de toda la cuenca para todo el período de modelación (50 años), para cada escenario. Se tiene un muy buen error de cierre 0,02%.

Tabla 3-7: Balance de masas promedio global en 50 años de la cuenca del río Aconcagua para las simulaciones

		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Entradas (m³/s)	Recarga superficial	22,37	22,39	22,37
	Recarga lateral	0,01	0,01	0,01
	Recarga desde río Aconcagua	7,68	7,86	7,58
	Recarga artificial en San Felipe	-	-	1,43
	Entrada desde el mar	0,09	0,09	0,09
	Almacenamiento	0,20	0,25	0,19
	Entrada total	30,34	30,59	31,67
Salidas (m³/s)	Extracciones artificiales	13,45	14,65	14,65
	Descarga dren Las Vegas	1,25	1,25	1,25
	Afloramiento en río Aconcagua	12,38	11,52	12,51
	Descarga en otros cauces naturales	3,15	3,06	3,16
	Descarga embalse Los Aromos	0,09	0,09	0,09
	Salida total	30,33	30,58	31,66
Error		0,02	0,02	0,02

Fuente: Elaboración propia.

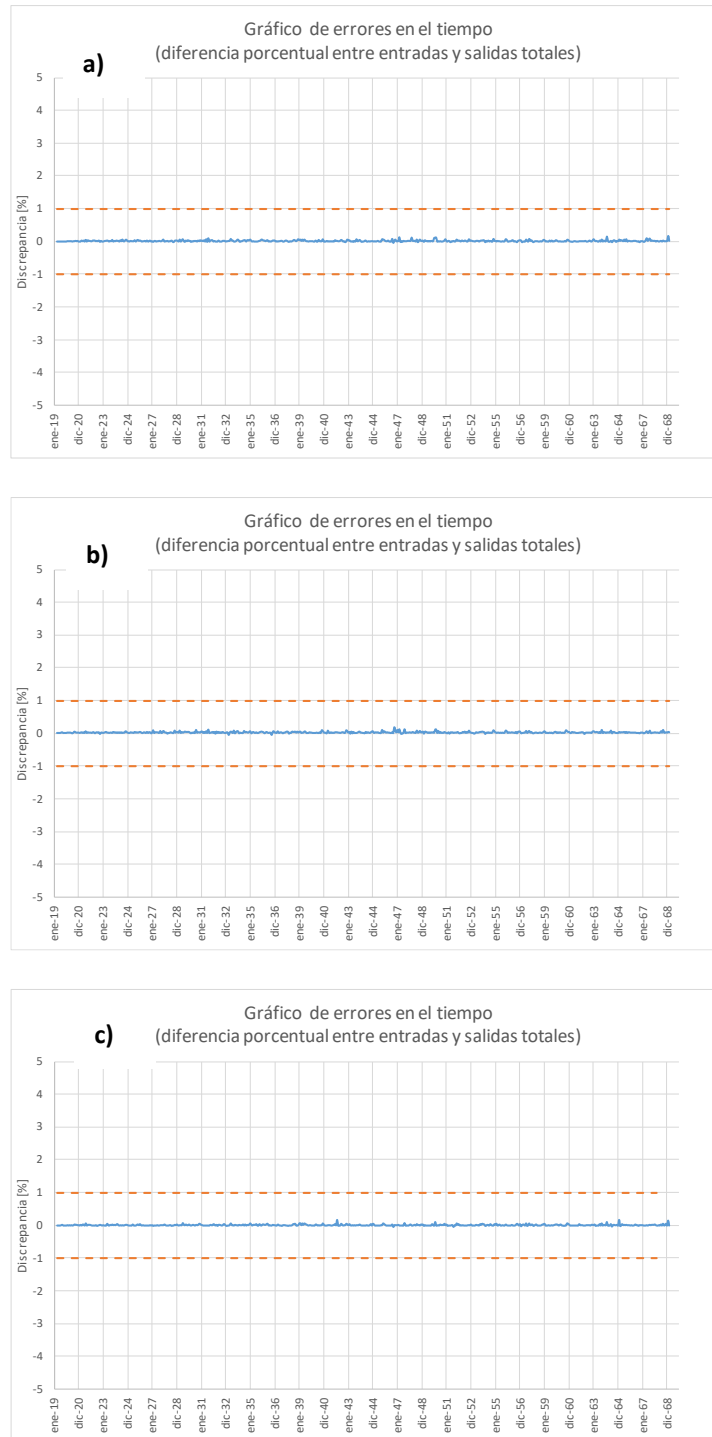


Figura 3-3: Discrepancia para el período de simulación a) Escenario 1, b) Escenario 2 y c) Escenario 3

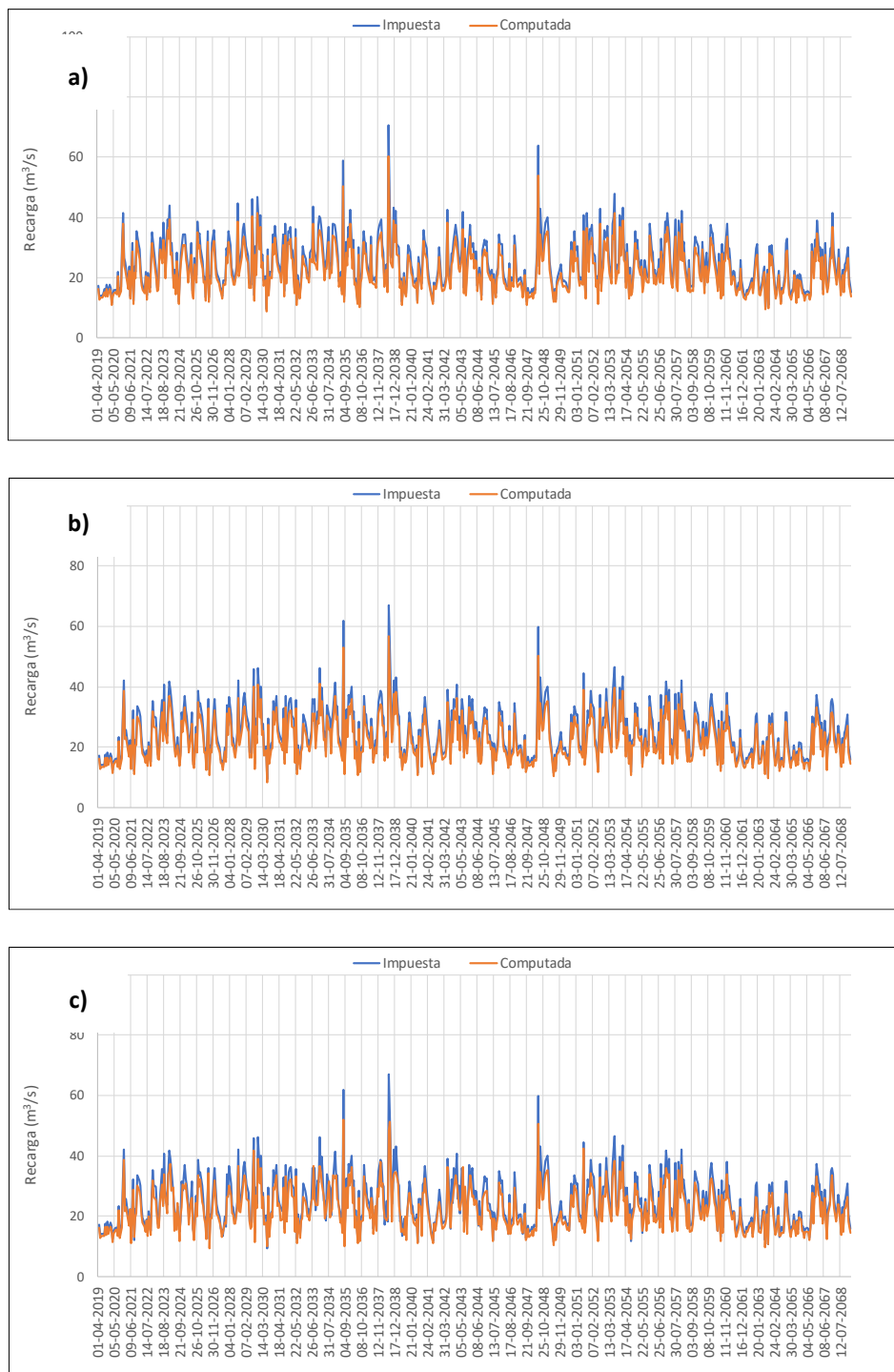


Figura 3-4: Recarga superficial impuesta vs computada a) Escenario 1, b) Escenario 2 y c) Escenario 3

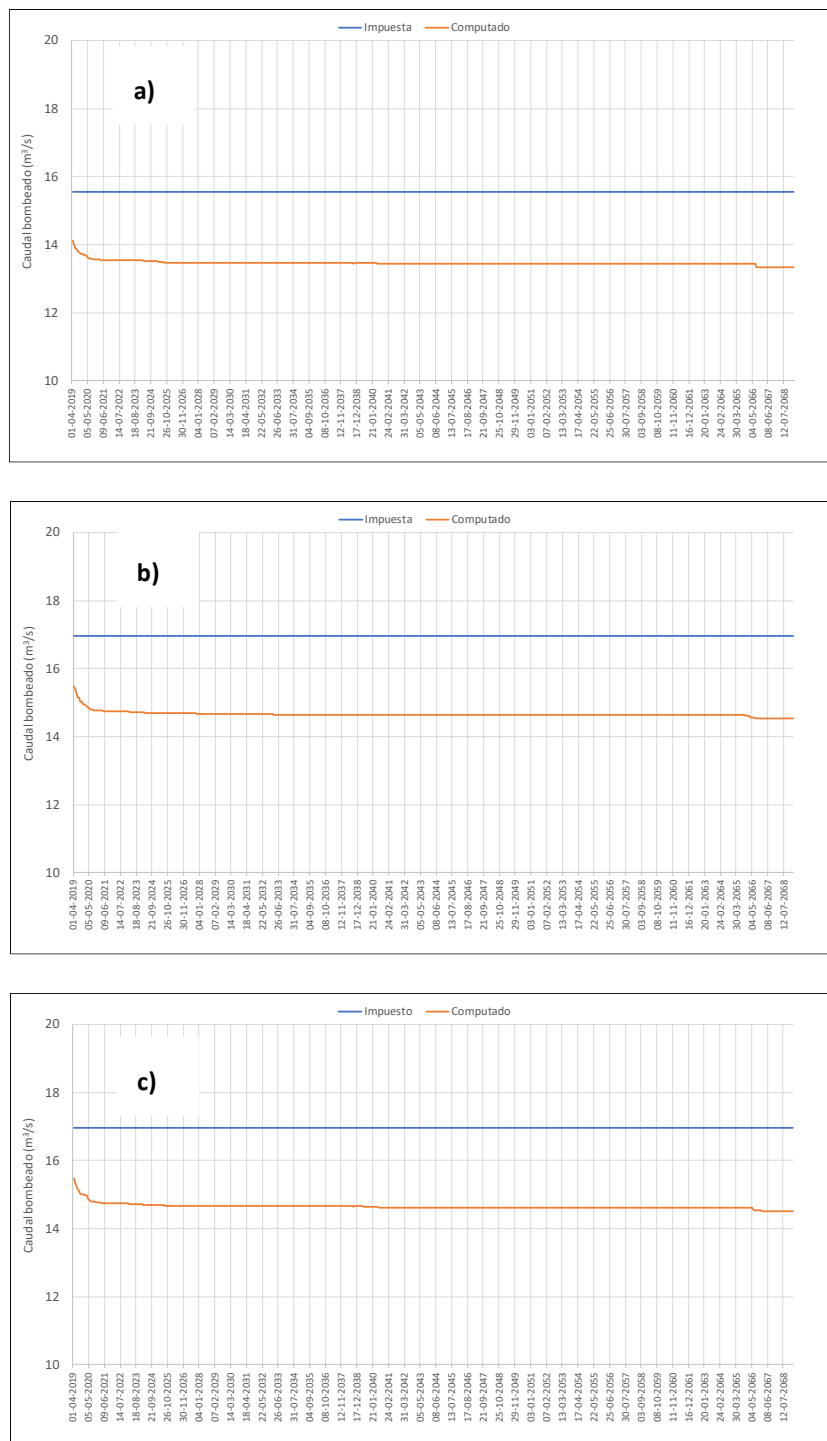


Figura 3-5: Extracciones impuesta vs computada a) Escenario 1, b) Escenario 2 y c) Escenario 3

- En los siguientes gráficos (Figura 3-6 a Figura 3-12) se presentan los niveles logrados en los nuevos pozos proyectados por la DOH, tanto para el **Escenario 2** como para el **Escenario 3**.

Para el análisis de estos resultados se recurre al concepto de nivel de caída del pozo o nivel de falla del pozo que corresponde al nivel de agua subterránea para el cual la operación del pozo comienza a ser claramente deficitaria, lo que se refleja en una caída de su caudal de explotación o en que el pozo quede colgado y, por ende, no pueda ser explotado.

Los pozos que fallan corresponden a aquellos en los cuales su nivel dinámico alcanza o se ubica bajo el nivel de falla definido. El que un pozo alcance su nivel de falla implica que queda fuera de servicio durante un determinado período de tiempo hasta que el pozo recupere su nivel o en su defecto, se debe disminuir su caudal de explotación para que este pueda mantenerse en operación. Desde la perspectiva del modelo Modflow, este continúa simulando el nivel de la napa aunque en la práctica el pozo haya fallado. Es así como algunos pozos durante la simulación fallan, luego se recuperan y posteriormente vuelven a fallar.

Por otro lado, los pozos que se secan corresponden a aquellos pozos en los cuales el nivel de agua subterránea llega al límite de la capa asignada al pozo (o al basamento). Esto indica que en la práctica estos pozos no pueden operar con el caudal impuesto debido a que el funcionamiento del acuífero no lo permite. Desde el punto de vista del modelo Modflow, los pozos que se secan dejan de operar y desaparecen del modelo.

En base a lo anterior, y considerando una profundidad de falla equivalente a un 70% de la profundidad del pozo (que se estima como una eficiencia representativa), se aprecia que los nuevos pozos DOH de Putaendo y Llay Llay presentarían un comportamiento estable en el largo plazo (50 años), es decir el nivel se mantiene siempre por sobre la profundidad de falla (Figura 3-6 y Figura 3-7).

Sin embargo, más de la mitad de los pozos de San Felipe fallarían en algún momento dado del tiempo (nivel simulado por debajo de la profundidad de falla) o se secan, la situación mejora para el **Escenario 3**; en efecto el hecho de disponer de recarga artificial ocasiona un peralte de los niveles en el acuífero 1 que produce que los pozos fallen y/o se sequen menos, tal como se visualiza en las Figura 3-8 a Figura 3-12 (5 pozos se secan en el **Escenario 2** y 4 pozos se secan en el **Escenario 3**).

- Pese a lo anterior, en términos generales de la Tabla 3-7 se desprende que en promedio, para toda la cuenca, la mayor extracción de los pozos DOH se ve levemente beneficiada por la recarga artificial, en efecto el incremento de recuperaciones en el río Aconcagua, comparando el **Escenario 3** con el **Escenario 2**, es del orden de 1 m³/s en promedio, es decir prácticamente un 70% del agua extraída desde el río regresa al río aguas abajo (entre la primera y segunda sección de riego básicamente). Asimismo, la infiltración natural del río al acuífero se reduce en 0,28 m³/s, por lo que el efecto neto sobre el río es aún menor. El aporte efectivo de la recarga artificial para un menor des-embalsamiento del acuífero se evalúa en promedio en 0,06 m³/s, es decir menos del 5% de la inyección antrópica promedio.

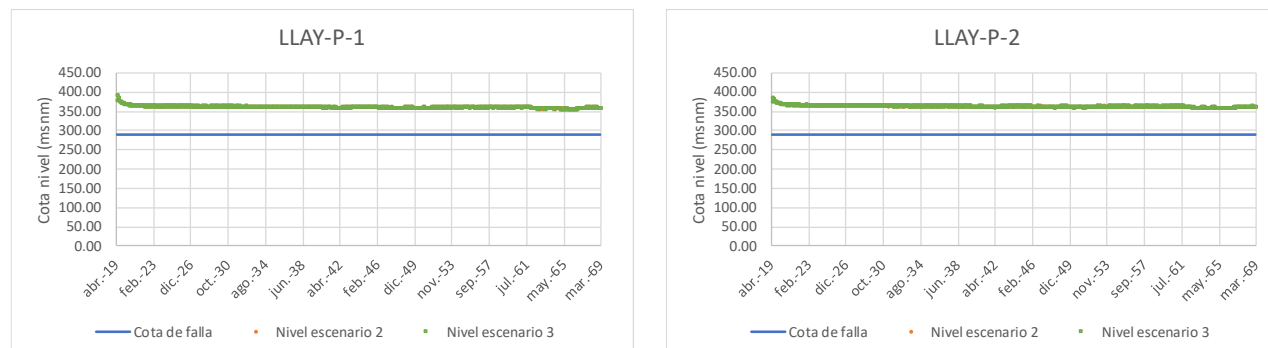


Figura 3-6: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de Llay Llay.

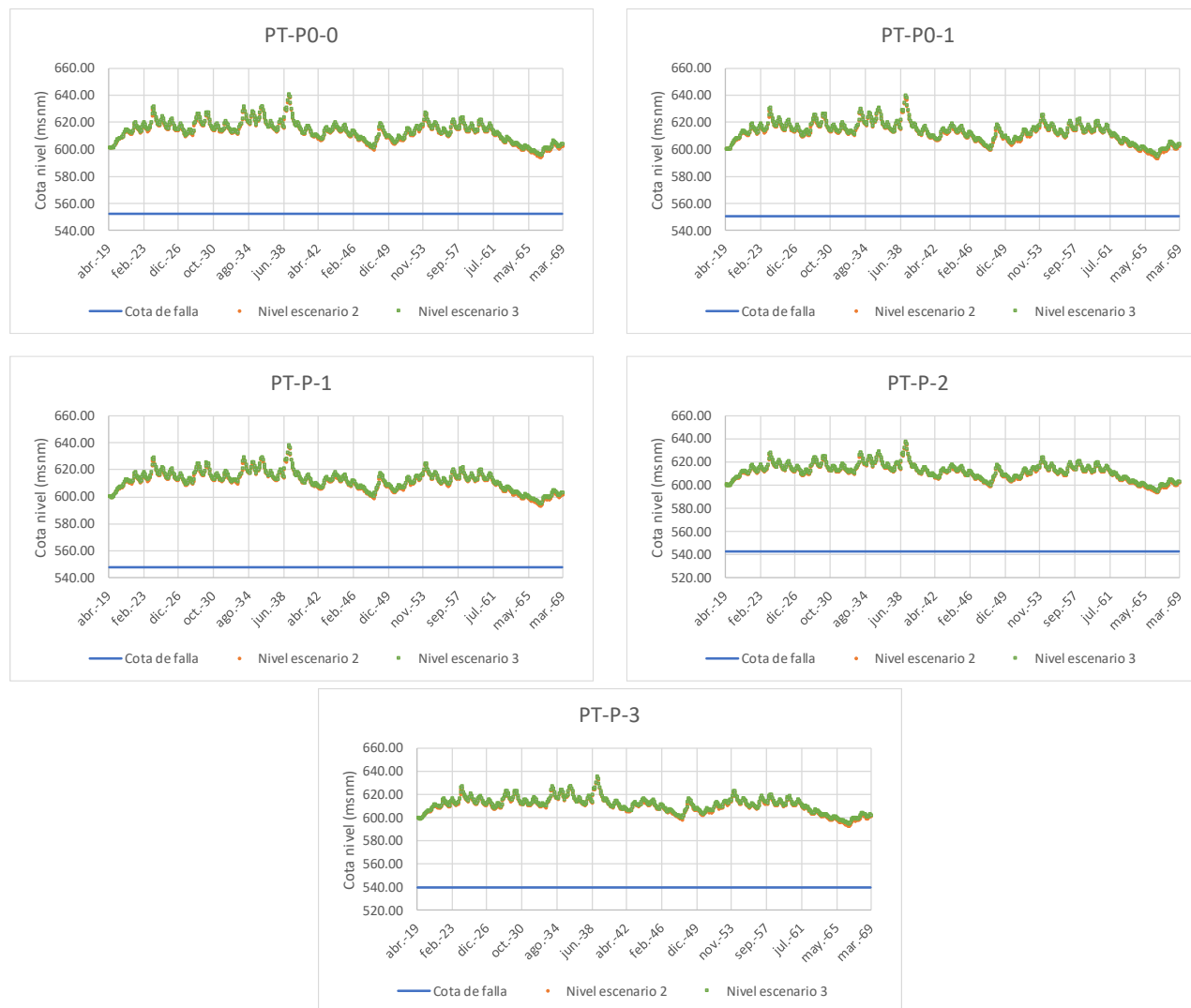


Figura 3-7: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de Putaendo

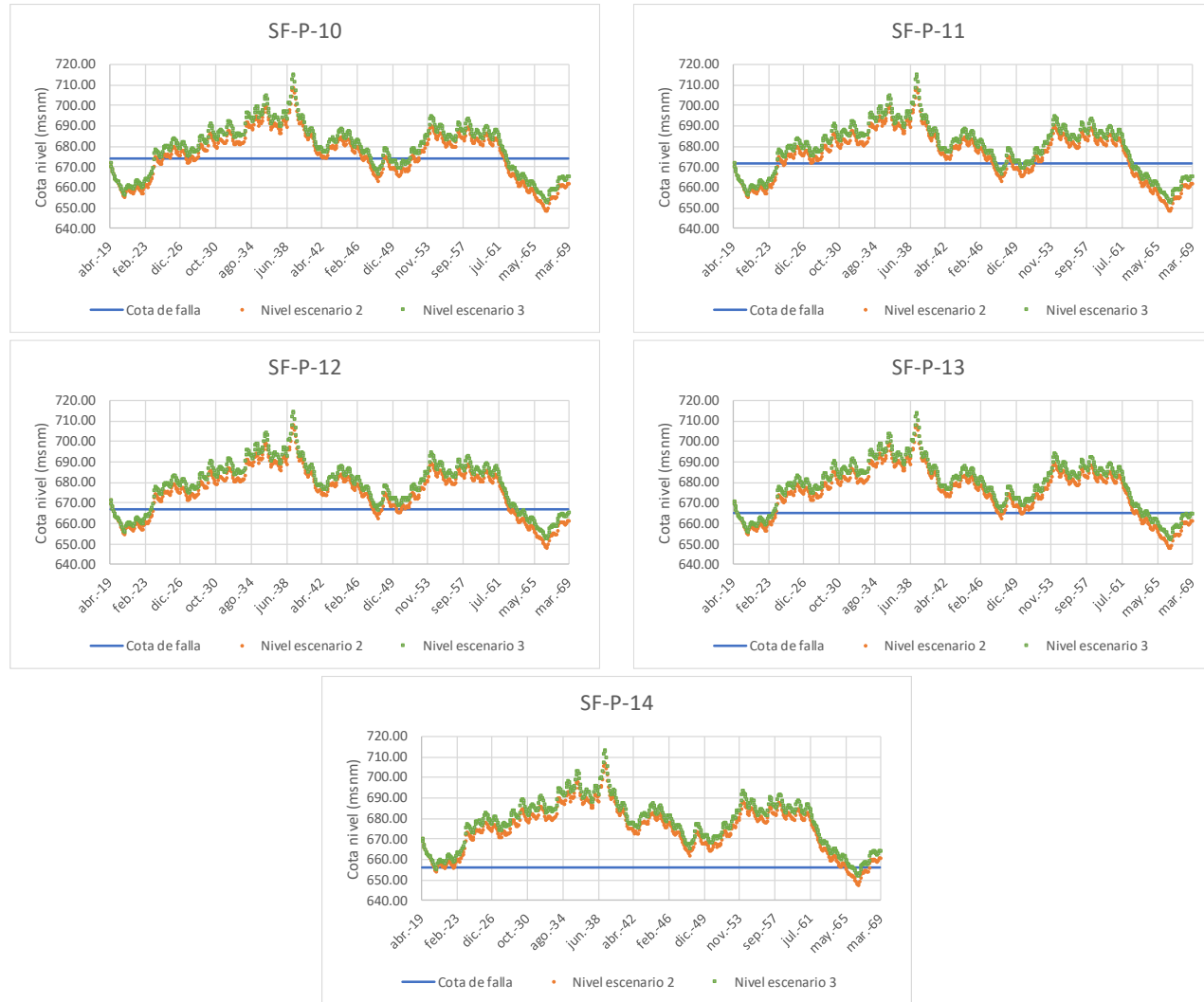


Figura 3-8: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe



Figura 3-9: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación)



Figura 3-10: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación)



Figura 3-11: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación)

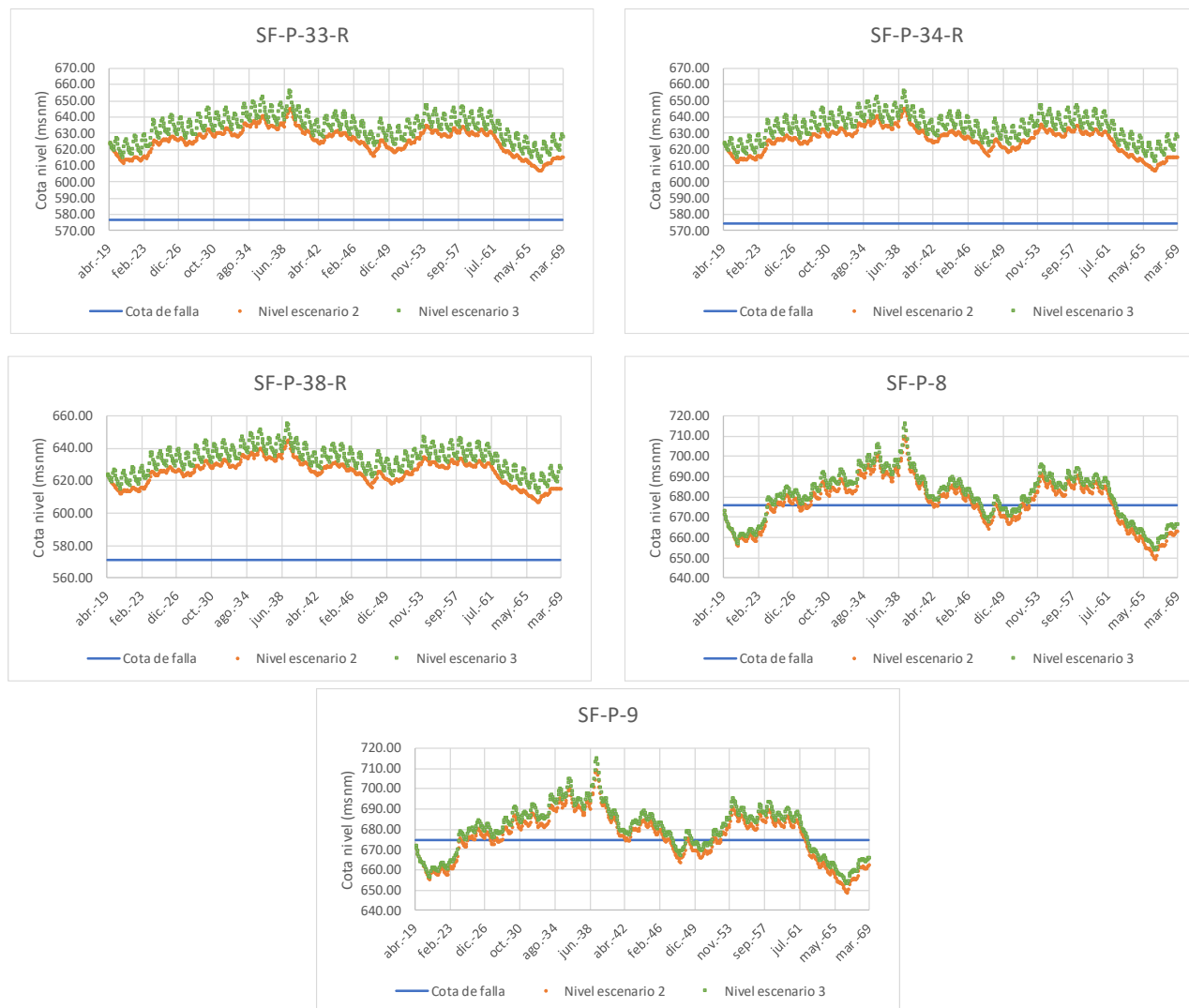


Figura 3-12: Evolución niveles en nuevos pozos DOH de San Felipe (continuación)

- Por último, en las siguientes tablas (Tabla 3-8 y Tabla 3-9) se resumen los resultados de interferencia con el río Aconcagua. Los caudales referenciales para comparación son los mismos usados en DICTUC de 2009 (Afloramiento promedio escenario base DICTUC). De la misma forma, el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia pasante en el río corresponde al definido en dicho estudio ($Q_{ANUAL, 85\%}$).

Para los **Escenarios 1 y 2**, respecto al caso base de DICTUC de 2009, se obtiene en los acuíferos 4 y 7 una disminución de la interferencia debido al incremento de las recuperaciones y menor percolación desde el río respectivamente. Por otra parte, el aumento de interferencia en el acuífero 6 entre el **Escenario 1** y el **Escenario 2** del presente estudio es marginal. Para este último escenario, el aumento es significativo en el acuífero 3, no obstante, este cálculo no considera que el agua subterránea bombeada desde los nuevos pozos DOH se destina al río por lo que en la práctica su efecto sobre el río también es menor. Se aprecia que la interferencia sobre el río es solamente mayor al 10% del $Q_{ANUAL, 85\%}$ en el acuífero 3, pero aquí aplica el mismo comentario anterior, gran parte del efecto se debe a los pozos de la DOH (históricos y proyectados) que devuelven el agua al río.

Tabla 3-8: Interferencia río-acuífero para el Escenario 1 (demanda comprometida a abril de 2019)

Acuífero	$Q_{ANUAL, 85\%}$ (m ³ /s)	Afloramiento promedio Escenario Base DICTUC (m ³ /s)	Afloramiento promedio Esc. 1 (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)	Grado de Interferencia (%)
3	3,41	5,98	5,04	0,94	27,6
4	2,25	1,31	1,61	-	-
6	8,97	-0,02	-0,05	0,03	0,3
7	3,77	-0,41	-0,37	-	-
8	13,31	-0,10	-0,28	0,18	1,4

Tabla 3-9: Interferencia río-acuífero para el Escenario 2 (proyecto DOH)

Acuífero	$Q_{ANUAL, 85\%}$ (m ³ /s)	Afloramiento promedio Escenario Base DICTUC (m ³ /s)	Afloramiento promedio Esc. 2 (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)	Grado de Interferencia (%)
3	3,41	5,98	4,49	1,49	43,7
4	2,25	1,31	1,61	-	-
6	8,97	-0,02	-0,06	0,04	0,4
7	3,77	-0,41	-0,38	-	-
8	13,31	-0,10	-0,28	0,18	1,4

4 MIGRACIÓN DE LA MODELACIÓN INTEGRADA

En la Etapa 2 del estudio se realiza la migración de la modelación integrada.

Se realiza la migración del modelo hidrológico MOS ACN 2019 de calibración (Etapa 1) al WEAP con la misma discretización temporal mensual (abril 1950 - marzo de 2019), con énfasis en el traspaso de la estructura del modelo MOS, haciendo hincapié en la conceptualización y topología del nuevo modelo WEAP incluyendo las simplificaciones realizadas. Los resultados de ambos modelos (MOS ACN 2019 y WEAP) son contrastados tanto en términos de los ajustes en las estaciones fluviométricas de control en el río Aconcagua como de la recarga generada al embalse subterráneo:

- El traspaso desde el MOS a WEAP no está exento de dificultad, por las diferencias en los métodos de cálculo de ambos códigos habiéndose simplificado algunos procesos hidrológicos involucrados. Este aspecto se traduce en algunas diferencias en la recarga obtenida que ingresa al acuífero, sin embargo, se mantiene la calidad del ajuste en las estaciones fluviométricas.
- El principal problema se debe a la incapacidad de la herramienta WEAP de limitar la recarga desde sectores de riego y nodos de río al espacio disponible en el acuífero, y de generar implícitamente el desfase que presenta la recarga al ingresar gravitacionalmente al acuífero subyacente. Esto genera eventos de recarga puntuales de un caudal alto poco representativos, en consecuencia, la recarga lograda desde WEAP es suavizada previo a su incorporación a Modflow.

Luego, se ejecuta el desacople del modelo hidrogeológico Modflow (VM ACN 2019) de calibración de la Etapa 1 (abril de 1991 a marzo de 2019) de la plataforma Visual Modflow (VM), resultando en un paquete de archivos en lenguaje nativo que se ejecutan desde una pantalla de edición del sistema operativo de Windows (ventana de comandos), describiendo las instrucciones de uso. Los resultados son comparados a nivel de los ajustes en los pozos de monitoreo como de los balances de masa promedio del sistema subterráneo:

- El nivel de convergencia de la ejecución en Modflow nativo es adecuado. En general, los resultados son comparados favorablemente a nivel de los ajustes en los pozos de observación como de los balances de masa promedio del sistema subterráneo.

5 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente estudio se desarrolla en 2 Etapas (Etapa 1 y Etapa 2), en base a los Términos de Referencia (TdR) que forman parte de la Resolución DGA N°264/2019.

En la Etapa 1 se realizó la actualización de la modelación integrada (MOS ACN 2019 y VM ACN 2019) con la cual fue posible estudiar y diagnosticar el acuífero de la cuenca del Aconcagua, así como evaluar la sustentabilidad de nuevas baterías de pozos de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

En la Etapa 2 se migra el modelo de calibración Aconcagua Modflow_MOS a Modflow WEAP (Water Evaluation And Planning), de acuerdo a los cambios de alcance aprobados en la Resolución DGA N°1.692/2019.

Del análisis realizado en la Etapa 1 se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se pudieron revisar todos los estudios e informes elaborados por la DGA, con especial énfasis en aquellos antecedentes de utilidad en la cuenca del río Aconcagua para el período 2009 a 2018, los cuales entregan resultados para la gestión del recurso hídrico disponible, identificación de los acuíferos de aprovechamiento común, capacidad para otorgamiento de derechos de aprovechamiento, y detalle de las principales herramientas de modelación utilizadas para las evaluaciones del recurso en el sistema.
- El análisis de los datos pluviométricos a escala anual, muestra un decrecimiento en la media de las precipitaciones. Las estaciones representativas de cada una de las secciones (Resguardo Los Patos, San Felipe, Los Aromos y Limache) muestran que la media de los últimos 20 años es menor a la media del registro completo en un 10%.
- El análisis de variabilidad de las series de precipitación y caudal, con los índices IPE e ICE, indicó que existen periodos de años secos con una duración de 10 años en promedio, seguidos de periodos de años húmedos de 5 años en promedio. El periodo de análisis de 69 años permitió identificar tres periodos de años secos y tres periodos de años normales a húmedos.
- El análisis de los datos fluviométricos a escala anual, verificó el comportamiento de la precipitación en los últimos 20 años, mostrando una reducción del 15% del caudal medio anual, con respecto al promedio de la serie total.
- El análisis de brechas muestra que es necesario realizar una actualización de algunos parámetros y datos de entrada que son utilizados por el modelo hidrológico Aconcagua-MOS pero debido al alcance del presente estudio, esto no se ha realizado. Sin embargo, los resultados obtenidos son acordes con el funcionamiento real de la cuenca del Aconcagua y se consideran representativos para ser usados en proyectos de planificación.
- La actualización del modelo MOS, además de la actualización de los datos hidrológicos considera la implementación de algunas de las limitaciones identificadas del estudio, pero es importante que para estudios futuros o de detalle operacional

se implementen todas las consideraciones encontradas en el análisis de brechas y se actualicen los datos de entrada con datos tomados en terreno (como, por ejemplo, sectores de riego y derechos superficiales para uso industrial).

- La metodología que usa el MOS para la generación de caudales en la cuenca del río Aconcagua verifica su representatividad, al generar caudales en los puntos de control fluviométrico (nodo 07 y nodo 22) con porcentajes de error estadísticamente aceptables para series hidrológicas y mostrando la variabilidad estacional de la serie observada. Al analizar en detalle los caudales bajos, el error porcentual obtenido es menor que aquel que se obtiene de analizar la serie completa de caudales, lo que significa que la simulación de los caudales bajos se ajusta mejor a la serie de caudales observados. Así, los resultados de la calibración del modelo se consideran conservadores.
- Considerando aceptables los caudales simulados para la primera y segunda sección, se aceptan que los caudales para la tercera y cuarta sección son válidos. No es posible validar las salidas de caudales de esas dos secciones porque no se dispone de registros fluviométricos en los nodos representativos de la tercera y cuarta sección (nodo 28 y nodo 36).
- El resultado más relevante del MOS es la serie de recarga; ésta fue verificada con la obtenida del modelo hidrogeológico, obteniéndose una validación aceptable.
- Se obtuvo el grado de seguridad de riego por sección legal, identificando que en el mes de febrero se produce el menor valor (0,75 o 75%). También se identificó que la Cuarta sección es la que posee los valores más bajos de seguridad de riego, seguida por la Tercera sección.
- En la recopilación de nuevos antecedentes se ha localizado 40 nuevos sondeos perforados entre 2011 y 2017, con información litológica que ha permitido corroborar la geometría del sistema, analizada en términos de la profundidad del basamento, en la mayor parte de los sectores acuíferos que conforman la cuenca del Aconcagua. Únicamente, en el acuífero 8 Aconcagua desembocadura, sería recomendable, llevar a cabo una revisión de la profundidad del basamento, con el fin de identificar si las discrepancias detectadas producto de la incorporación de los los nuevos antecedentes corresponden a elevaciones locales del basamento.
- La elaboración de perfiles hidrogeológicos permite analizar de forma gráfica, las posibles modificaciones del basamento, definidas en base a los nuevos antecedentes, con respecto al modelo de elevaciones del basamento del modelo conceptual previo de Dictuc (2009).
- Respecto a la nueva información recopilada sobre el parámetro de permeabilidad, ha sido posible recopilar 23 nuevos datos factibles de asociar a una capa específica del modelo conceptual original, de los cuales, en el 60% de los nuevos antecedentes, se confirman los rangos de permeabilidad del modelo conceptual. Del resto de los sondeos, en solo 9, es decir en 21% de los nuevos sondeos (sobre un total de 41 nuevos sondeos reunidos con este tipo de datos), es posible afirmar que los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos, no confirman el modelo conceptual. En

el resto de los casos (18 pozos), no es posible asignar los valores obtenidos en los ensayos a un único layer, y el contraste de permeabilidades entre las capas, hace que no sea correcto contrastar la información de los ensayos con el modelo conceptual.

- Con la actualización de la piezometría llevada a cabo en general se confirma el trabajo realizado por la DOH en 2009, fundamentalmente no varían las equipotenciales de la napa subterránea en la II y III sección de riego. La escala espacial utilizada no permite dar cuenta en general de los descensos menores que se observan a partir del año 2010 en dichas secciones, en cambio, donde si hay diferencias importantes es en la Cuarta y Primera sección de riego donde los niveles se han profundizado hasta poco más de 5 y 30 m respectivamente. La forma de las isopiezas se ha modificado substancialmente entre Los Andes y San Felipe (acuífero 1) con el desarrollo de un cono de depresión al surponiente del río Aconcagua debido a la gran cantidad de pozos que se reconocen en esa zona.
- El análisis de la evolución de los niveles piezométricos de la red de monitoreo de la Dirección General de Aguas, pone de manifiesto que, en términos generales se observa una tendencia descendente en todos los sectores acuíferos desde 2010 hasta la actualidad, siendo estos descensos más críticos en el acuífero 1 San Felipe, donde, existen piezómetros que han registrado descensos del orden de 20 m y en el acuífero 2 Putaendo, donde se han registrado descensos del orden de 10 m. En el sector del acuífero 8 Desembocadura los niveles muestran un descenso sostenido del orden de 8 m. Los descensos de la napa subterránea en la II y III Sección de riego son bastante menores.
- La revisión de VM ACN 2008 indica que fue elaborado rigurosamente sobre la base de un robusto modelo hidrogeológico conceptual reuniendo las mejores prácticas de modelación disponibles entonces. No obstante, es susceptible de mejorar como cualquier herramienta de este tipo, con una mayor base de datos subyacente, en especial, la representatividad de la galería Las Vegas de ESVAL, una mejor representación de la interacción del embalse Los Aromos con el sistema subterráneo a la salida del acuífero de Limache, un mejor control del volumen bombeado efectivamente desde el valle, en particular de los pozos destinados para riego, y aforos en el río Aconcagua y sus afluentes, de manera de cuantificar recuperaciones para tramos específicos como blanco de calibración. Se considera que el modelo disponible no representa bien la complejidad hidrogeológica de los acuíferos de Limache y Llay Llay, la discretización vertical en profundidad (3 capas) se adapta bien al valle principal pero no a estos tributarios laterales.
- El modelo se actualizó contemplando la extensión a marzo de 2019 de la información de entrada requerida. El modelo VM ACN 2019 mantiene la misma geometría y parámetros hidrogeológicos de su antecesor, los cuales están respaldados por un robusto estudio conceptual hidrogeológico realizado en la cuenca del río Aconcagua. A fines de lograr una mayor representatividad de la galería subterránea Las Vegas, se modificó a su alrededor la condición de borde de río, según los ciclos de sequía

registrados en la cuenca, buscando reproducir la variación observada en la producción del dren.

- La recarga superficial ocupada en VM ACN 2019 fue generada a partir del programa MOS ACN 2019. La serie de recarga generada considera la recarga proveniente de los sectores de riego por percolación profunda de los excedentes del riego y de las precipitaciones, además de la infiltración desde los tramos de río. La recarga superficial promedio para el periodo entre abril de 1991 y marzo de 2019 es de 20,7 m³/s. Por su parte, la actualización de las extracciones subterráneas se realizó en base a la demanda subterránea comprometida en la cuenca al mes de Abril de 2019, aplicando un determinado factor de corrección (factor de uso previsible) sobre los caudales nominales.
- El modelo actualizado logra en general mejorar los ajustes obtenidos en el modelo original, mejorando sustancialmente la representatividad del dren Las Vegas, manteniendo las propiedades hidráulicas originales (permeabilidad y almacenamiento) en el dominio de modelación. La nueva calibración cumple, en general, los principales criterios de modelación establecidos en la guía del SEA de 2012 respecto a los errores de cierre, preservación de variables impuestas, tendencia de los niveles y estadísticos asociados, concordancia de los balances y propiedades hidráulicas con el modelo conceptual.
- En general, se estima que el modelo está en condiciones de ser utilizado para modelar distintos escenarios predictivos de recarga y bombeo de los pozos de la DOH.
- Se realizaron tres escenarios de simulación para diferentes condiciones de bombeo y de recarga. Las simulaciones consideran un período de 50 años, desde abril de 2019 hasta marzo de 2069.
- La recarga superficial se obtiene con el MOS ACN 2019, utilizando las precipitaciones entre abril de 1968 y marzo de 2018, incluyendo períodos secos y húmedos similares a la historia reciente, y son dependientes del nivel de explotación impuesto al acuífero en cada una de las simulaciones predictivas. Las simulaciones consideran la operación de los embalses existentes (Chacillas y Los Aromos) durante todo el horizonte de tiempo que se modela (50 años).
- El **Escenario 1** o simulación base consiste en la simulación de la demanda comprometida al mes de abril de 2019 expresada como caudal nominal 59.842,5 l/s. El proyecto DOH se simula en el **Escenario 2** (caudal nominal incremental de 7.067,5 l/s distribuido en 32 pozos) y finalmente, el **Escenario 3** corresponde a la evaluación de recarga artificial en la primera sección de riego como respaldo de las nuevas captaciones proyectadas por la DOH.
- Los resultados se evalúan principalmente en términos de la comparación del balance hídrico promedio global del sistema subterráneo, el grado de interferencia sobre el río Aconcagua, la seguridad de riego y los niveles modelados en los nuevos pozos de la DOH contrastados con su profundidad de falla definida en este estudio como un 70% de la profundidad del pozo.

- Es importante señalar que en este estudio no se optimiza las extracciones desde el acuífero bajo los criterios de sustentabilidad DGA (descenso volumen embalsado, interferencia río acuífero, pozos secos e insatisfacción de demanda), tal como se realizó en el estudio anterior (Dictuc, 2009), considerando que la presente herramienta pudo ser validada sin cambios en los parámetros hidráulicos de los acuíferos, por lo que se espera que los resultados no deberían diferir significativamente.
- Un ejercicio como el anterior requeriría de decenas de simulaciones que escapan de los alcances del presente estudio, además que no se esperaría un aumento de oferta bajo los mismos criterios de sustentabilidad.
- El caudal previsible optimizado en dicho estudio (Dictuc, 2009) bajo los criterios de sustentabilidad oficiales es de 16,45 m³/s (ver resultados Escenario 2 de Dictuc), que es menor al modelado en el **Escenario 2** del presente estudio (16,96 m³/s), es decir con el nuevo proyecto DOH se excederían los caudales máximos determinados por Dictuc (2009). La extracción máxima previsible según los criterios oficiales de Dictuc de 2009 es: acuífero 1 (4,01 m³/s), acuífero 3 (0,56 m³/s), acuífero 4 (0,94 m³/s) y acuífero 5 (0,83 m³/s), todas sobrepasadas en los presentes escenarios del estudio actual. En los otros acuíferos, en tanto, la extracción modelada en el presente estudio es inferior.
- Del análisis hidrológico realizado se obtiene que la disponibilidad efectiva para recarga artificial en la zona de San Felipe corresponde a un valor promedio de 2,86 m³/s durante el periodo comprendido entre octubre y marzo. La inyección en el acuífero se modela mediante pozos de inyección, alternativa que se considera más viable frente a las piscinas de infiltración.
- La materialización de los nuevos pozos de la DOH produciría una mejora en la seguridad de riego, en particular en la Cuarta y Tercera sección de riego, en la cual el aumento del grado de satisfacción de demanda promedio anual es 2,1% y 1,9% respectivamente. A nivel mensual, la diferencia del grado de satisfacción de la demanda es mayor en el mes de febrero, apreciándose un incremento del 7,5% en la Tercera sección y de 7,0% en la Cuarta sección; así, podemos decir que mediante los nuevos pozos DOH se alcanza el objetivo de mejorar la satisfacción de la demanda en un mes en el cual la disponibilidad de agua en la Tercera y Cuarta sección es crítica.
- Respecto a la interferencia con el río Aconcagua, esta se calcula siguiendo la metodología del estudio previo (Dictuc, 2009) y utilizando la misma base de comparación. Así, para la situación de demanda comprometida a abril de 2019 (**Escenario 1**) se aprecia que sólo la interferencia en el acuífero 3 de Panquehue es mayor al 10% del Q_{ANUAL, 85%} (e igual al 27,6% del Q_{ANUAL, 85%}). Con los nuevos pozos DOH el aumento de la interferencia es significativo en este mismo acuífero 3 (43,7% del Q_{ANUAL, 85%}), sin embargo, en la práctica, el agua bombeada desde los nuevos pozos DOH se destinaría al mismo río Aconcagua por lo que el grado de interferencia real sería menor. En cuanto a los otros acuíferos modelados, estos no presentarían

problemas de interferencia usando el mismo patrón de comparación del estudio anterior.

- Para el análisis de los resultados de niveles en los pozos DOH se recurre al concepto de nivel de caída del pozo o nivel de falla del pozo que corresponde al nivel de agua subterránea para el cual la operación del pozo comienza a ser claramente deficitaria, lo que se refleja en una caída de su caudal de explotación o en que el pozo quede colgado y, por ende, no pueda ser explotado.
- En base a lo anterior, y considerando una profundidad de falla equivalente a un 70% de la profundidad del pozo (que se estima como una eficiencia representativa), se aprecia que los nuevos pozos DOH de Putaendo y Llay Llay presentarían un comportamiento estable en el largo plazo (50 años), es decir el nivel se mantendría siempre por sobre la profundidad de falla.
- Sin embargo, más de la mitad de los nuevos pozos de San Felipe fallarían en algún momento dado del tiempo (nivel simulado por debajo de la profundidad de falla) o se secarían. La recarga artificial en la zona de San Felipe (**Escenario 3**) ocasiona un peralte de los niveles en el acuífero 1, lo que ayudaría a que estos pozos fallen y/o se sequen menos.
- Pese a lo anterior, en base a los balance hídrico subterráneo promedio para toda la cuenca logrados por el modelo en cada caso, se puede apreciar que la mayor extracción de los pozos DOH se ve levemente beneficiada por la incorporación de recarga artificial, en efecto el incremento de recuperaciones en el río Aconcagua, comparando el **Escenario 3** con el **Escenario 2**, es del orden de 1 m³/s en promedio, es decir prácticamente un 70% del agua extraída desde el río regresa al río aguas abajo (entre la Primera y Segunda sección de riego básicamente). Asimismo, la infiltración natural del río al acuífero se reduce en 0,28 m³/s, por lo que el efecto neto sobre el río es aún menor. El aporte efectivo de la recarga artificial para un menor des-embalsamiento del acuífero se evalúa en promedio en 0,06 m³/s, es decir menos del 5% de la inyección antrópica promedio.
- Se concluye que la recarga artificial en el acuífero 1 de San Felipe debido a sus características hidrogeológicas (de alta transmisividad) no constituiría la mejor solución para aumentar la disponibilidad hídrica de la cuenca. Lo anterior, sin considerar que los pozos del sector acuífero 1 se verán favorecidos por el aumento de nivel.

Por su parte, respecto a la migración del modelo hidrológico MOS ACN 2019 de calibración al WEAP (Etapa 2) se mantiene la misma discretización temporal mensual (abril 1950 - marzo de 2019). El énfasis está puesto en el traspaso de la estructura del modelo MOS, haciendo hincapié en la conceptualización y topología del nuevo modelo WEAP incluyendo las simplificaciones realizadas. Los resultados de ambos modelos (MOS ACN 2019 y WEAP) son contrastados tanto en términos de los ajustes en las estaciones fluviométricas de control en el río Aconcagua y seguridad de riego de las secciones legales de la cuenca, como de la recarga generada al embalse subterráneo:

- El traspaso desde el MOS a WEAP no está exento de dificultad, por las diferencias en los métodos de cálculo de ambos códigos habiéndose simplificado algunos procesos hidrológicos involucrados. Este aspecto se traduce en algunas diferencias en la recarga obtenida que ingresa al acuífero, sin embargo, se mantiene la calidad del ajuste en las estaciones fluviométricas.
- El principal problema se debe a la incapacidad de la herramienta WEAP de limitar la recarga desde sectores de riego y nodos de río al espacio disponible en el acuífero, y de generar implícitamente el desfase que presenta la recarga al ingresar gravitacionalmente al acuífero subyacente. Esto genera eventos de recarga puntuales de un caudal alto poco representativos, en consecuencia, la recarga lograda desde WEAP es suavizada previo a su incorporación a Modflow.

En tanto, el desacople del modelo hidrogeológico Modflow (VM ACN 2019) de calibración (abril de 1991 a marzo de 2019) de la plataforma Visual Modflow (Etapa 2), resulta en un paquete de archivos en lenguaje nativo que se ejecutan flexiblemente desde una pantalla de edición del sistema operativo de Windows (ventana de comandos):

- El nivel de convergencia de la ejecución en Modflow nativo es adecuado. En general, los resultados son comparados favorablemente a nivel de los ajustes en los pozos de observación como de los balances de masa promedio del sistema subterráneo.

