



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

**DIAGNÓSTICO Y MEJORA DE LA REPRESENTACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DE PETORCA, REGIÓN DE
VALPARAÍSO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MARIANA DEL PILAR NOVA VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LINDA DANIELE
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
2023

DIAGNÓSTICO Y MEJORA DE LA REPRESENTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DE PETORCA, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

El presente informe técnico tiene como base el modelo acoplado WEAP-MODFLOW del Plan Estratégico de Recursos Hídricos para las cuencas de La Ligua, Petorca y Quilimarí (PEGH). Este modela la oferta y demanda hídrica con proyecciones a 30 años. El objetivo de la memoria es mejorar la representación de agua subterránea, incorporando las profundidades de las captaciones y evaluar situaciones en que el nivel del acuífero se ubica por debajo de la profundidad de las captaciones.

Para cumplir el objetivo, se realiza una recopilación de antecedentes del PEGH para comprender el funcionamiento interno del acople, sus condiciones iniciales, de borde y limitaciones. Luego se incorporan las profundidades de los pozos/norias en WEAP, condicionando las captaciones para que extraigan lo que les permita su profundidad. Es un proceso iterativo de prueba y error, donde se verifica la respuesta del modelo en WEAP con rutinas de Python.

Posteriormente, los resultados de Python son exportados a QGIS con el fin de visualizar espacialmente que tan somero se encuentra el acuífero con respecto a la topografía. El análisis de los resultados se dividen en el período histórico (1980-2018) y el escenario proyectado MIROC (2020-2060).

Luego de analizar los resultados, se concluye que el período histórico presenta un decrecimiento constante en los niveles del acuífero con una ligera recuperación los últimos años. Mientras que la proyección MIROC entrega un descenso más suave conforme más pozos dejan de bombear. El funcionamiento intermitente de los pozos por pinchar al acuífero esporádicamente, es prueba de la recuperación del mismo. En ambos períodos los SHACs (Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común) más afectados fueron el 194 y 195, en otras palabras, el sector central de la cuenca.

En síntesis, es posible incluir que esta modificación en los modelos de acople WEAP-MODFLOW, reproduce más fielmente la dinámica entre un acuífero y las captaciones. Es útil tanto para simular mejor el período histórico y/o proyectar escenarios futuros más certeros.

*¿Cuándo? -
le pregunto prosaicamente.*

Sylvia Plath

Agradecimientos

Mis agradecimientos son para todos aquellos que me acompañaron en este logro. En primer lugar mi mamá y papá que siempre han estado presentes en mi vida, ellos han sido un pilar fundamental en mi formación como persona y profesional. Su guía y consejos han permitido que haya cumplido esto. También les agradezco a mis hermanas, la Vale y la Luciana, con quienes nunca me faltaron risas. Las tardes de anime o juegos el Athos, fueron la liberación de estrés perfecta al final de la semana.

No podría dejar de mencionar a mis amigos/as/es que he hecho en la universidad. En especial al Paulo, Felipe, Sofí, Paula, Diego, Nico, Joaquín, los Mati, Faffi, Javi, Francys, Bryan, Iquique, Ale, Chelo, Martin, Dani y los chicos de la salita de memoristas. También a mis amigas del colegio que siempre están en mi corazón: la Andrea, Priscilla y la Caro.

Quiero agradecer a la universidad por todo lo que me ha entregado, a los profesores del departamento y a la Jacki. A los profesores por aceptar formar parte de mi comisión; Marcelo Olivares, Carlos Espinoza y Linda Daniele. Quienes estuvieron disponibles para responder cada vez que lo necesité.

Por último agradezco al resto de mi familia; mi abuelita, tías, tíos, primas y mis sobrinas revoltosas. Por darme siempre una palabra de apoyo, muchas gracias por todo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Caracterización de la cuenca	2
2.2. Escenarios de cambio climático	6
3. Modelo de Simulación Existente	7
3.1. Demandas de agua	7
3.2. Fuentes de agua	8
3.3. Acople WEAP - MODFLOW	12
4. Cambios propuestos	20
4.1. Incorporación de las profundidades de pozos en WEAP	20
4.2. Validación de las modificaciones en Python	23
5. Principales resultados y análisis	25
5.1. Representación en QGIS	25
5.2. Período histórico 1980-2018	26
5.3. Proyecciones MIROC 2018-2060	34
6. Conclusión	42
Bibliografía	43
ANEXOS	44
Anexo A. Modelo Superficial para acople	44
Anexo B. WEAP	46
Anexo C. Códigos	47
C.1. Python	47
C.2. VBA	56
Anexo D. Acuíferos	58
D.1. Período histórico	58
D.2. MIROC	61
Anexo E. Diferencia entre el acuífero y la topografía	64

E.1. Período histórico	64
E.2. MIROC	67
Anexo F. Niveles del acuífero, bombeo y límite de pozo	69
F.1. Período histórico	69
F.2. MIROC	82

Índice de Tablas

3.1.	Recarga directa promedio decadal Petorca	11
3.2.	Criterios de ajuste	17
4.1.	Profundidad de los pozos en la cuenca río Petorca	20
5.1.	Pozos colgados 1980 y 2018	30
5.2.	Bombeo hipotético con profundidad de los pozos idéntica al espesor del acuífero. 1980-2018.	33
5.3.	Proyección MIROC. Pozos colgados 2020 y 2060	38
5.4.	Bombeo hipotético con profundiad de los pozos idéntica al espesor del acuífero. Proyección MIROC 2020-2060.	41

Índice de Ilustraciones

2.1.	Área de estudio de Petorca (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	3
2.2.	Media móvil de precipitaciones, estación DGA Longotoma (<i>Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	4
2.3.	Acuífero modelado en la cuenca (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	5
2.4.	Ubicación de las estaciones de niveles de pozos presentes en la cuenca del Río Petorca. (<i>Elaboración propia</i>)	6
3.1.	Evolución histórica y proyectada de consumo de agua potable en la cuenca del río Petorca (<i>Fuente: Elaboración propia a partir del PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	7
3.2.	Demanda agrícola real para el año 2018 en las cuencas La Ligua y Petorca. (<i>Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	8
3.3.	Curva de variación estacional, estación fluviométrica “Río Pedernal en Tejada” y “Río sobrante en Piñadero”. Intervalo 1979 - 2018., cuenca río Petorca (<i>Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	9
3.4.	Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) y pozos en Petorca. (<i>Elaboración propia</i>)	10
3.5.	Recarga sistema Ligua - Petorca (<i>Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	11
3.6.	Tipos de recarga en la cuenca Petorca (<i>Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	12
3.7.	Flujos de intercambio en el acople WEAP - MODFLOW. (<i>Fuente: SEI, 2019</i>) .	13
3.8.	Esquema de representación de los elementos en WEAP (<i>Fuente: Modificado del PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019</i>)	14
3.9.	Diagrama de los elementos de río que se definen en el modelo hidrológico de las cuencas Ligua-Petorca. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	16
3.10.	Área activa modelo MODFLOW Ligua-Petorca. (<i>Fuente: DGA, 2019</i>)	17
3.11.	Rendimiento específico S_y . (<i>Fuente: DGA, 2019</i>)	18
3.12.	Carga constante, cuenca Ligua - Petorca. (<i>Fuente: DGA, 2019</i>)	19
4.1.	Ejemplo de uso <i>Expression Builder</i> en Calle Larga. (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	22
4.2.	Startup Year (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	23
5.1.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 1980 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	26
5.2.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2018 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	27
5.3.	Topografía (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	28
5.4.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 1980 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	29

5.5.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2018 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	30
5.6.	Trapiche Longotoma. Niveles del acuífero, bombeo y límite del pozo (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	32
5.7.	Acuífero en la cuenca Río Petorca. 1era semana de Abril, 2020. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	34
5.8.	Acuífero en la cuenca Río Petorca. 1era semana de Abril, 2060. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	35
5.9.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2020. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	36
5.10.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2050. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	37
5.11.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2060. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	38
5.12.	Proyección MIROC. Los Comunes. Niveles del acuífero, bombeo y límite del pozo (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	40
A.1.	Esquemático de las cuencas Ligua-Petorca. (<i>Fuente:Elaboración propia</i>)	44
D.1.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 1990 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	58
D.2.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2000 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	59
D.3.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2010 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	60
D.4.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2030. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	61
D.5.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2040. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	62
D.6.	Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2050. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	63
E.1.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 1990 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	64
E.2.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2000 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	65
E.3.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2010 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	66
E.4.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2030. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	67
E.5.	Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2040. Proyección MIROC (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	68
F.1.	APU Chicolco (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	69
F.2.	APU Petorca (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	70
F.3.	Artificio Pedegua (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	70
F.4.	Calle Larga (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	71
F.5.	El Francés San Ramón (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	71
F.6.	El Sobrante (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	72
F.7.	Hierro Viejo (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	72
F.8.	La Canela (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	73

F.9.	La Canelilla (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	73
F.10.	La Nipa (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	74
F.11.	Los Comunes (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	74
F.12.	Manuel Montt (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	75
F.13.	Padre Hurtado (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	75
F.14.	Palquico (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	76
F.15.	Artificio Paradero 4 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	76
F.16.	Pedegua (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	77
F.17.	Parcelas San Manuel La Victoria (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	77
F.18.	Pullancon (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	78
F.19.	Quebrada de Castro (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	78
F.20.	Quebrada Honda Artificio (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	79
F.21.	Santa Marta (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	79
F.22.	San Lorenzo Casas Viejas (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	80
F.23.	Teresita de Santa Julia (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	80
F.24.	Villa Alberto Callejas (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	81
F.25.	Valle Los Olmos (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	81
F.26.	APU Chicolco (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	82
F.27.	APU Petorca (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	82
F.28.	Artificio Pedegua (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	83
F.29.	Calle Larga (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	83
F.30.	El Francés San Ramón (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	84
F.31.	El Sobrante (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	84
F.32.	Hierro Viejo (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	85
F.33.	La Canela (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	85
F.34.	La Canelilla (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	86
F.35.	La Nipa (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	86
F.36.	Trapiche Longotoma (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	87
F.37.	Manuel Montt (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	87
F.38.	Padre Hurtado (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	88
F.39.	Palquico (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	88
F.40.	Artificio Paradero 4 (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	89
F.41.	Pedegua (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	89
F.42.	Parcelas San Manuel La Victoria (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	90
F.43.	Pullancon (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	90
F.44.	Quebrada de Castro (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	91
F.45.	Quebrada Honda Artificio (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	91
F.46.	Santa Marta (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	92
F.47.	San Lorenzo Casas Viejas (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	92
F.48.	Teresita de Santa Julia (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	93
F.49.	Villa Alberto Callejas (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	93
F.50.	Valle Los Olmos (<i>Fuente: Elaboración propia</i>)	94

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo comienza con el análisis del Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las Cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí (PEGH), que utiliza como base la modelación superficial en la plataforma WEAP y la modelación hidrogeológica en MODFLOW. A partir de él se elaboran las estrategias de desarrollo con el fin de tomar decisiones, entrega la oferta y demanda de agua, establece un balance hídrico y plantea sus proyecciones a 30 años (DGA, 2020).

El foco está en la cuenca del río Petorca, que ha sido declarada como zona de prohibición por la Resolución Afecta DGA N°19 del 25 de julio del 2018 (DGA, 2019). El uso excesivo del recurso condujo a la sobreexplotación hídrica en la cuenca (Panez A., 2017) y que su oferta provenga principalmente de aguas subterráneas (DGA, 2020).

Estudiar el modelo subterráneo, sus extracciones y las limitaciones que genera el tener captaciones colgadas, permitirá simular mejor la demanda hídrica suplida. El modelo incluye más de 30 pozos de bombeo de APR (Agua Potable Rural) y APU (Agua Potable Urbana), distribuidos en el sector acuífero donde hay más depósitos fluviales. La información es asociada a cada asociación, a nivel espacial y temporal con el nivel de interconexión entre ellas y el entorno observado en campo.

Para efectos de este trabajo el objetivo es mejorar la representación de agua subterránea, incorporando las profundidades de las captaciones y evaluar situaciones en que el nivel del acuífero se ubica por debajo de la profundidad de las captaciones. Es un proceso iterativo de prueba y error, donde se verifica la respuesta del modelo en WEAP con rutinas de Python.

Para ello se recopilan los principales antecedentes del PEGH (DGA, 2020) con el fin de comprender las bases del modelo y posteriormente manejar el funcionamiento interno del acople WEAP-MODFLOW, en lo que atañe al objetivo del trabajo. Luego se incorpora la modificación en WEAP y se verifica su funcionamiento con Python. Por último, mediante la representación de los niveles de acuífero en QGIS, se analiza su dinámica con las extracciones.

En síntesis, este informe técnico mediante el desarrollo de sus secciones pretende demostrar que: es posible incluir esta modificación en los modelos de acople WEAP-MODFLOW y es útil tanto para análisis del período histórico como para proyección de escenarios futuros.

Capítulo 2

Antecedentes

El objetivo del modelo PEGH (DGA, 2020) es contribuir a la toma de decisiones mediante la construcción de estrategias de desarrollo y proyectar escenarios futuros que incluyan información respecto al balance hídrico total, la oferta y la demanda . El alcance de este trabajo se limita a Petorca, por lo que sólo se expondrá información referente a esta cuenca.

2.1. Caracterización de la cuenca

La cuenca del Río Petorca se ubica en la Región de Valparaíso, en la provincia de Petorca. La superficie total es de 1.988 km². Inicia a 4.100 m.s.n.m con el Estero del Sobrante (Sanhueza Herrera et al., 2016). Su principal cauce es el río Petorca, proveniente de la unión de los ríos Sobrantes y Pedernal. El río Petorca también recibe aportes del Estero Las Palmas y el Estero Ossandon (Figura 2.1).

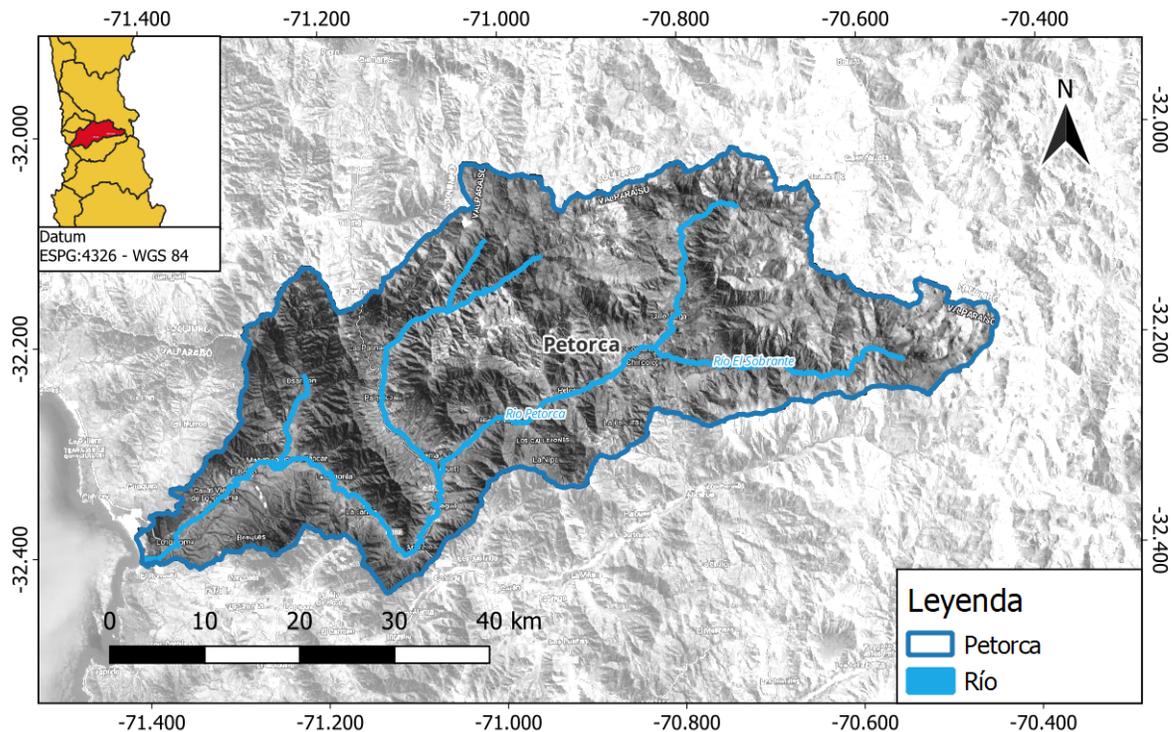


Figura 2.1: Área de estudio de Petorca (Fuente: *Elaboración propia*)

El valle del río Petorca está delimitado por dos ejes montañosos que lo desvían primero al sur y después hacia el norte, produciendo un trazado sinuoso relativamente angosto de bordes irregulares con 500 a 2000 m de longitud. El fondo del valle consta de una o dos terrazas fluviales que son sobrepuestas por los conos aluviales erosionados en el frente al alcanzar los canales de escurrimiento, por ello presentan taludes verticales (SIT-RURAL, 2016).

Con respecto a la población de Petorca, consta con 78.299 habitantes en el año 2017 (INE, 2019). Dado el aumento de la población entre 2002 y 2017, las proyecciones de crecimiento poblacional para el 2035 es de 8.05 % (INE, 2019).

Por otro lado, las condiciones climáticas según la clasificación de Köppen es mayoritariamente del tipo BSks, Semiárido Templado con lluvias invernales (SIT-RURAL, 2016). Los caudales presentan un régimen mixto nivopluvial. Se destaca un déficit del recurso hídrico en la cuenca, por una fuerte utilización del mismo con respecto a su abastecimiento (DGA, 2020). Según el Balance Hídrico Nacional del año 2019, las precipitaciones medias anuales han disminuido un 22 % en los últimos 10 años (DGA, 2017) (Figura 2.2).

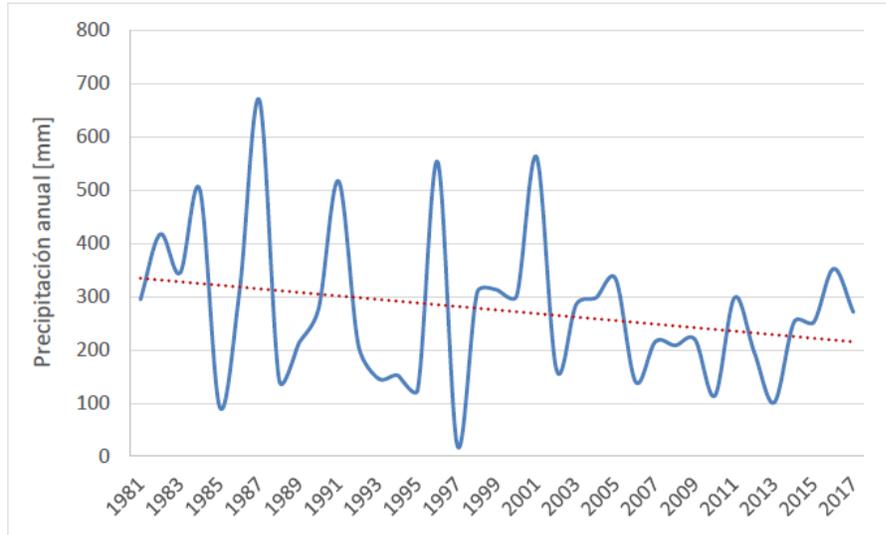


Figura 2.2: Media móvil de precipitaciones, estación DGA Longotoma
(Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

En lo que se refiere al acuífero, según el estudio desarrollado por AC ingenieros (DGA, 2014), son considerados volumen útil de acuífero las áreas con unidades geológicas de sedimentos fluviales. Esto lo cumple algunos sectores de los primeros 100 [m] de la capa más superficial (la capa aluvial) del acuífero. Por debajo de 100 [m], están compuestos por estratos más cementados y hay una mayor presencia de finos. Por esto se infiere que no hay presencia de acuífero más allá de los 100[m] bajo la superficie.

En consecuencia, el acuífero se encuentra principalmente en el valle de los esteros donde se presentan rellenos permeables, ubicados alrededor del cauce del Río Petorca y en la desembocadura (Figura 2.3). En la sección 3.3, se ahondará más cómo está modelado.

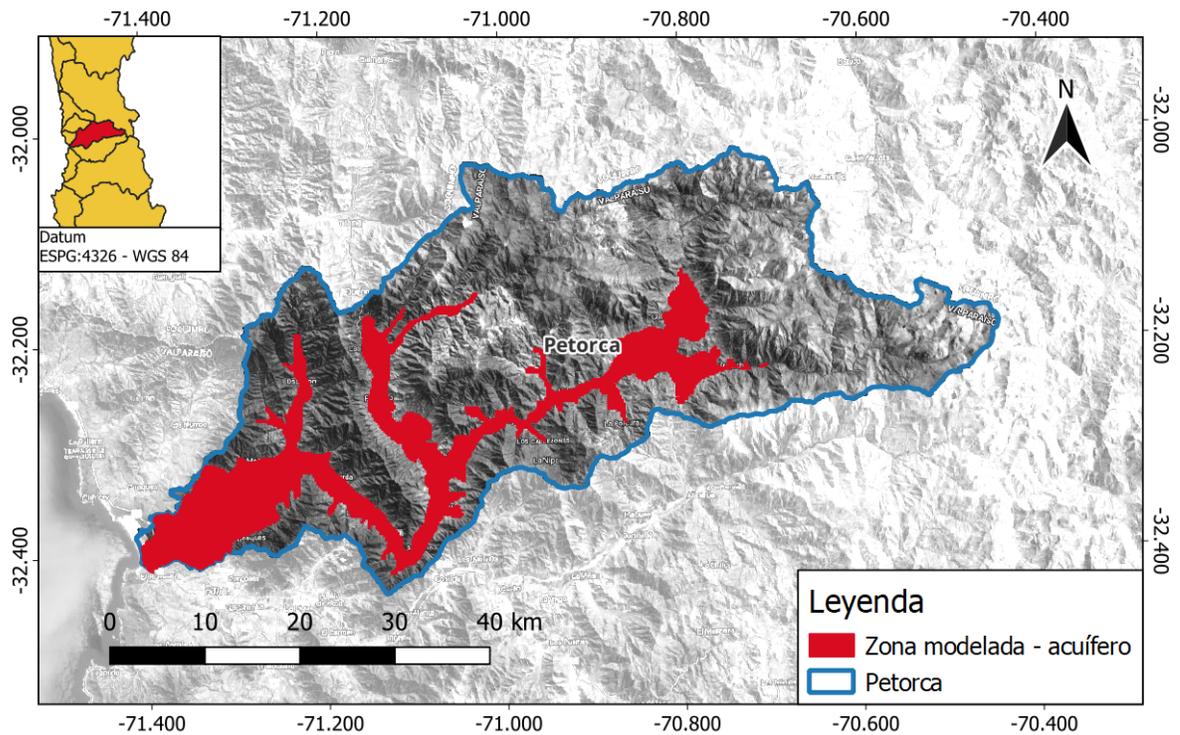


Figura 2.3: Acuífero modelado en la cuenca (Fuente: Elaboración propia)

Las estaciones de monitoreo en la cuenca del río Petorca, del total de estaciones vigentes, 4 son fluviométricas, 14 meteorológicas, 20 pozos de nivel, 14 de calidad de agua y una fluviosedimentológica (DGA, 2020). El trabajo actual se centra en la red de pozos (Figura 2.4) y su interacción con el acuífero. Si bien hay multitud de pozos destinados a fines agrícolas, para efectos de la memoria sólo se estudian los pozos de APR (Agua Potable Rural) y APU (Agua Potable Urbana).

Evaluar cómo afecta a estos pozos, incorporar la profundidad en su bombeo. Permite concluir cuándo aproximadamente las APRs o APU dependerán completamente de camiones aljibe, pues el o los pozos destinados a consumo humano dejaron de bombear.

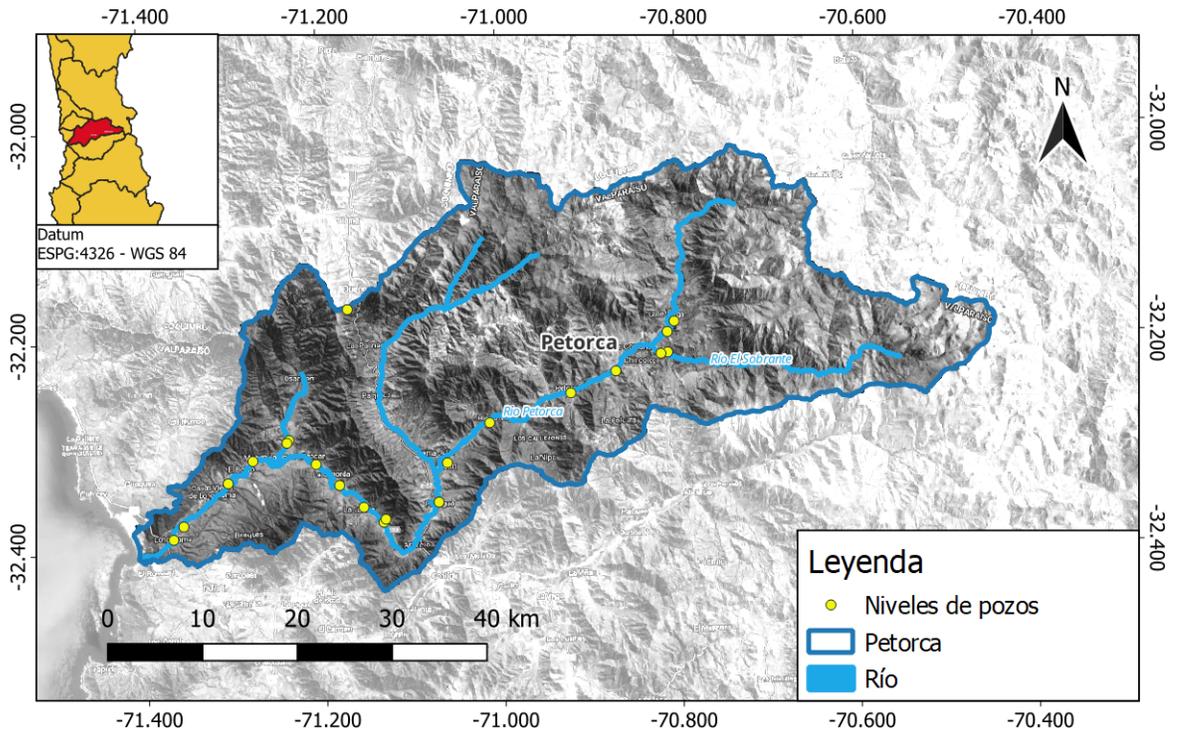


Figura 2.4: Ubicación de las estaciones de niveles de pozos presentes en la cuenca del Río Petorca. *(Elaboración propia)*

2.2. Escenarios de cambio climático

El escenario escogido es el MIROC-ESM por su sensibilidad alta moderada a la precipitación y temperatura (según la actualización del Balance Hídrico Nacional)(DGA, 2017). Su particularidad reside en la química atmosférica y reproducción razonable de las variaciones transientes de las temperaturas del aire en la superficie terrestre para el período 1850-2005 en Chile continental (Watanabe et al., 2011).

La simulación MIROC-ESM (en adelante MIROC) es un modelo de circulación general o modelo de clima global (GCM en inglés). Este representa los procesos físicos que ocurren en la atmósfera, océanos, criósfera y superficie terrestre, junto con el cómo son afectados por las concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero (GEI). Su finalidad es simular la historia y evolución futura del clima global con diversas forzantes, desde emisiones de GEI hasta escenarios de desarrollo económico (DGA, 2017).

El escenario MIROC, para Chile presenta una disminución anual de la precipitación anual del orden de 20 %, siendo más drástico de septiembre a diciembre (coincide con la época de riego) y expone un aumento de la temperatura promedio en 1 % (DGA, 2020).

Capítulo 3

Modelo de Simulación Existente

3.1. Demandas de agua

La cuenca del río Petorca presenta un mayor uso agrícola que humano. Y si bien existen otros usos como el industrial, su consumo es menor a los dos primeros.

La demanda de consumo humano se determinó en base a la dotación anual dada por la DOH ($79 \text{ m}^3/\text{año}/\text{hab}$) (MOP, 2005) multiplicada por la población. La población histórica se obtuvo a partir de los Censos de Población y Vivienda del año (INE, 2019) y la población establecida por la DGA (DGA, 2019). Para su proyección se considero un crecimiento anual por APR y APU del 1.5% y 1.8% respectivamente (DGA, 2019) (Figura 3.1).

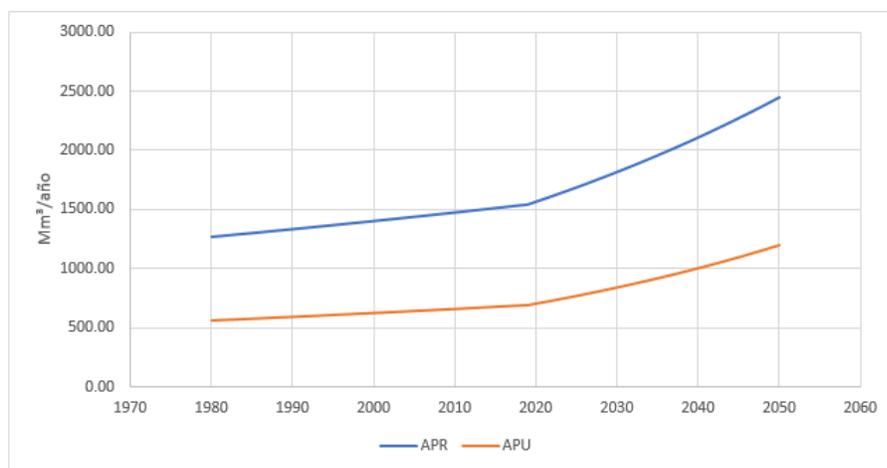


Figura 3.1: Evolución histórica y proyectada de consumo de agua potable en la cuenca del río Petorca (Fuente: *Elaboración propia a partir del PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019*)

Por otro lado, la demanda neta agrícola es calculada en base al tipo de cultivo, el área cultivada y el tipo de riego (DGA, 2020). Se estima que 9936 há de la cuenca del río Petorca se encuentra bajo riego. En la Figura 3.2, se muestra la variación de la demanda agrícola en los meses de Septiembre-Marzo.



Figura 3.2: Demanda agrícola real para el año 2018 en las cuencas La Ligua y Petorca. (Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

A nivel histórico, la demanda agrícola ha aumentado de forma sostenida desde el año 1985. Sin embargo esto no se traduce que el aumento se mantenga en el tiempo, pues por salidas a terreno se verificó que la disponibilidad hídrica no permite un aumento en la superficie de cultivo. Por ello la demanda agrícola no sufre un incremento con respecto a la demanda actual.

La simulación de la eficiencia de riego depende principalmente del sistema de distribución y el tipo de cultivo. Por ejemplo, para canales de hormigón un 10 % de pérdidas y para canales de tierra, un 60 %.

3.2. Fuentes de agua

Las únicas zonas que presentan caudales superficiales en la cuenca son las zonas cordilleras y precordilleras, más específicamente en la subcuenca del río Sobrante. Al ser su oferta muy baja, la demanda hídrica es principalmente suplida por el agua subterránea (Figura 3.3).

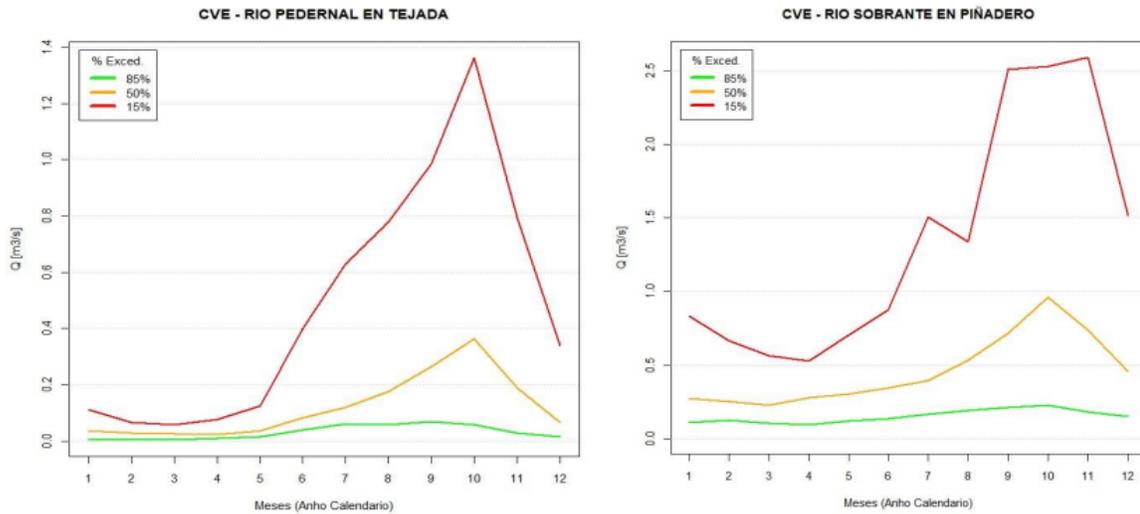


Figura 3.3: Curva de variación estacional, estación fluviométrica “Río Pedernal en Tejada” y “Río sobrante en Piñadero”. Intervalo 1979 - 2018., cuenca río Petorca (Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

El acuífero de la cuenca está compuesto por 5 SHAC (Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común) (Figura 3.4). En la mayoría de los sectores, la extracción supera la oferta hídrica sustentable de largo plazo. Como cada SHAC presenta descensos sostenidos del acuífero en el tiempo, esto indica un déficit permanente y no un efecto temporal. En consecuencia, su simulación expondrá una tendencia a la baja en los niveles del acuífero por SHAC en el tiempo (DGA, 2020).

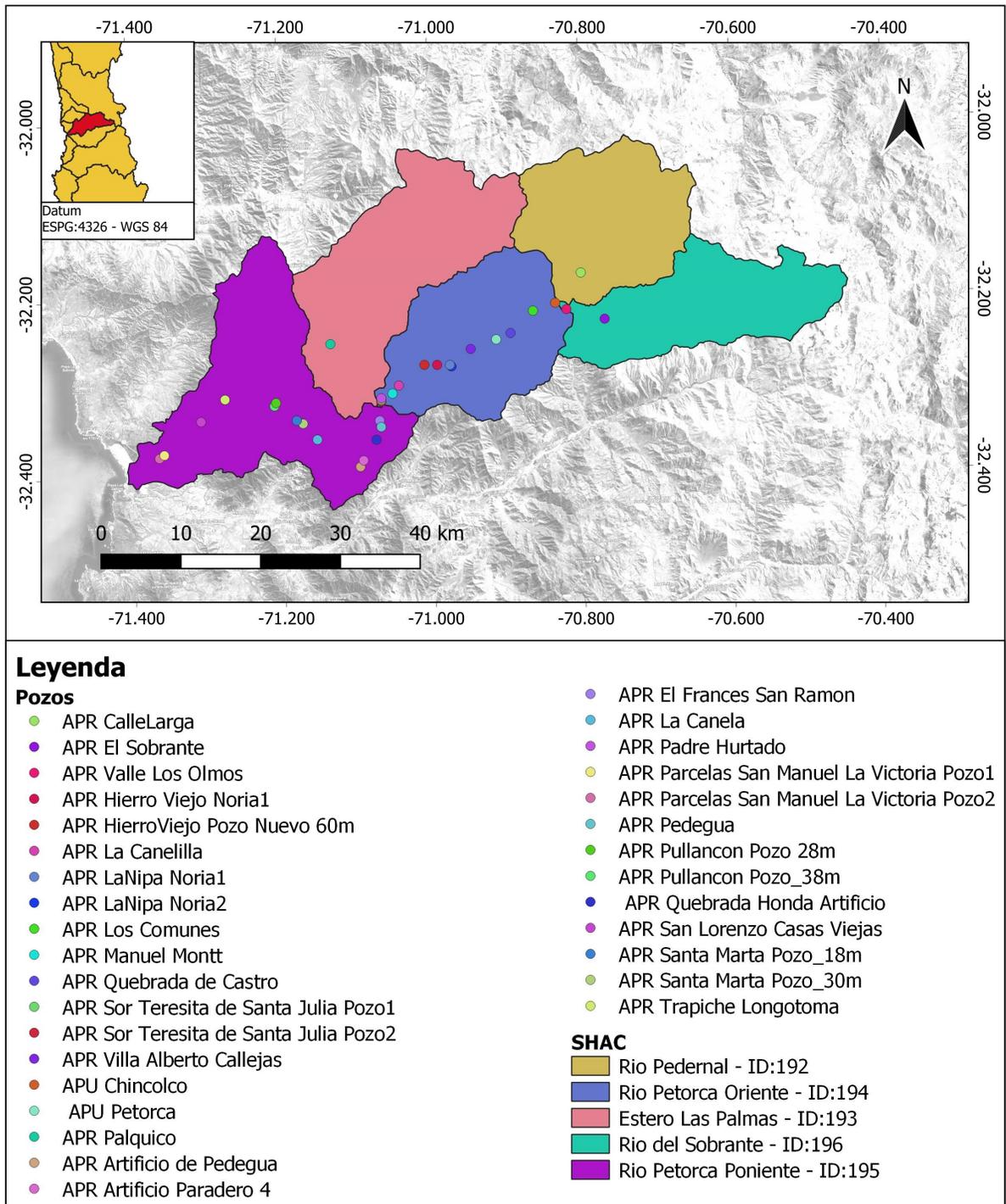


Figura 3.4: Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) y pozos en Petorca. *(Elaboración propia)*

La recarga en el modelo está en función de la precipitación directa sobre la zona aluvial, la distribución espacial de los aportes laterales y los excedentes de riego de las zonas cultivadas. La recarga directa del sistema general para el sistema Ligua - Petorca, presento un descenso en la última década (2010 - 2017) debido a la megasequía que azotó al país. (Henríquez, Aspee y Quense, 2016) (Figura 3.5).

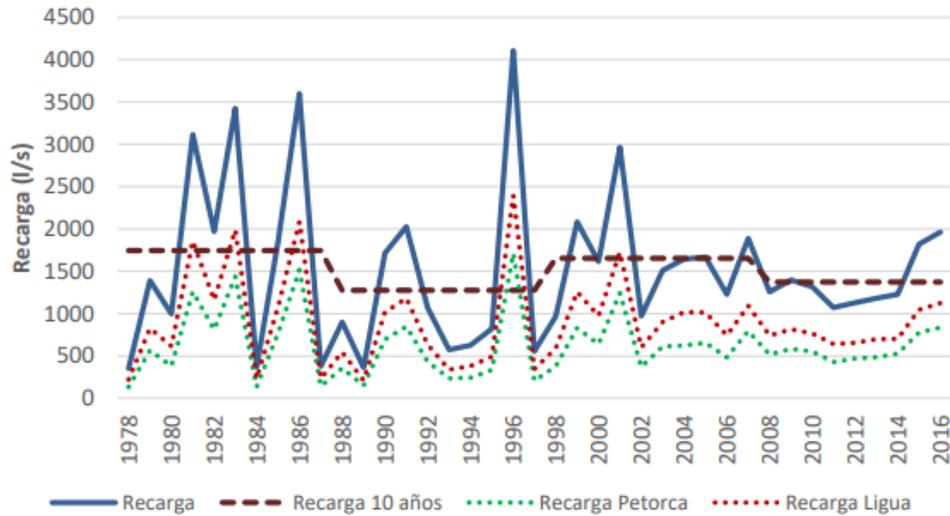


Figura 3.5: Recarga sistema Ligua - Petorca (Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

En la cuenca de Petorca (Tabla 3.1) los aportes de las cuencas de ladera, son los que más influyen en la recarga del acuífero. La recarga lateral corresponde a un 69 % en promedio del total de recarga, mientras que las recarga directa entrega un 22 % en promedio y las zonas cultivadas un 9 % (Figura 3.6).

Tabla 3.1: Recarga directa promedio decadal Petorca

Década	Recarga promedio (l/s)			
	Ladera	Agro	Directa	Total
1980	1962	50	703	2715
1990	1307	93	438	1838
2000	1431	187	493	2111
2010	863	268	311	1442

Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019

Este descenso sostenido de la recarga lateral y directa entre 2008-2015, indica que esta tendencia al descenso se mantiene en el contexto de cambio climático. Pese al posterior repunte en 2016-2017 (Figura 3.5) , esta tendencia a la baja continua siendo más significativa que la recarga desde laderas (DGA, 2020).

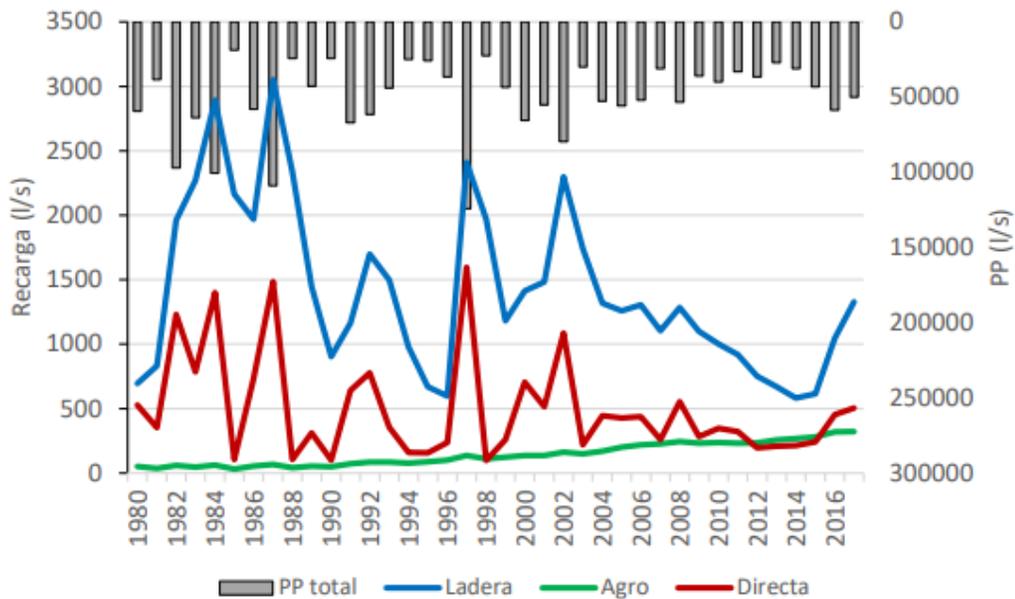


Figura 3.6: Tipos de recarga en la cuenca Petorca (Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

3.3. Acople WEAP - MODFLOW

La plataforma Water Evaluation And Planning (WEAP) es una herramienta computacional que sirve para la planificación de los recursos hídricos. Esta realiza su apoyo mediante el balance de oferta de agua (a través de módulos físicos de tipo hidrológico) con la demanda de agua (asociada un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta)(Jack Sieber, 2015).

Por otro lado, MODFLOW es un programa que modela tridimensionalmente aguas subterráneas con distribución discreta creado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Este modelo permite estimar la variación del nivel freático, incorporar extracciones puntuales, drenes y la interacción río - acuífero (Niswonger, Panday e Ibaraki, 2011).

Si bien, WEAP y MODFLOW ambos modelan agua subterránea, sus formas de hacerlo son muy diferentes entre sí. Mientras que un nodo de agua subterránea de WEAP, se representa como un “cubo” que caracteriza los flujos internos, MODFLOW simula el agua subterránea como una red multicapa de celdas independientes, cada una con sus propios parámetros de flujo y ecuaciones que modelan flujos entre ellas (Jack Sieber, 2015).

El acople entre WEAP y MODFLOW indica que los resultados fluyen entre ellos para cada paso de tiempo. Desde WEAP hacia MODFLOW entrega cálculos de infiltración, extracciones, nivel de agua en un río y escorrentía de aguas superficiales. En cambio desde MODFLOW a WEAP, traspasa datos del nivel de aguas subterráneas, variación de nivel, flujos laterales entre acuíferos e interacciones de agua superficial y subterránea (Figura 3.7)(DGA, 2020).

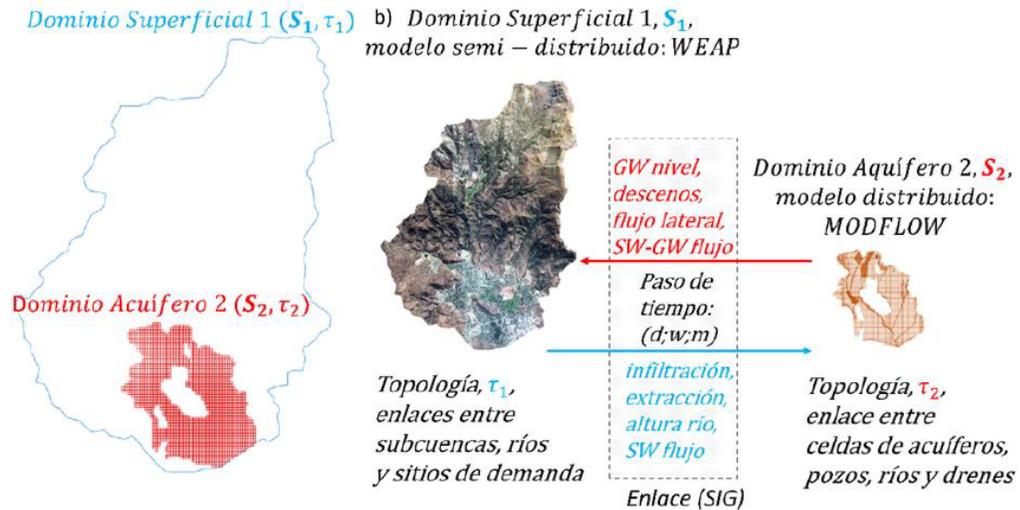


Figura 3.7: Flujos de intercambio en el acople WEAP - MODFLOW.
(Fuente: SEI, 2019)

El modelo utilizado es trabajo de un consultor a cargo del estudio. Es una integración de las cuencas La Ligua y Petorca, ya que ambas cuencas comparten parte del acuífero de desembocadura, y por lo tanto era necesaria su modelación conjunta. Para esto se usó WEAP para simular el balance hídrico superficial y el MODFLOW para modelar la hidrogeología de la zona.

Como consideraciones generales de este acople:

- La versión de MODFLOW usada es MODFLOW-NWT
- Para vincular el modelo MODFLOW a WEAP, este debe estar calibrado por fuera de WEAP
- El paso de tiempo es de 1 semana, donde se ejecutan los resultados de MODFLOW y luego se recuperan los resultados del acople.

Por otro lado, el modelo superficial para el acople tiene 6 puntos importantes a destacar (Figura 3.8):

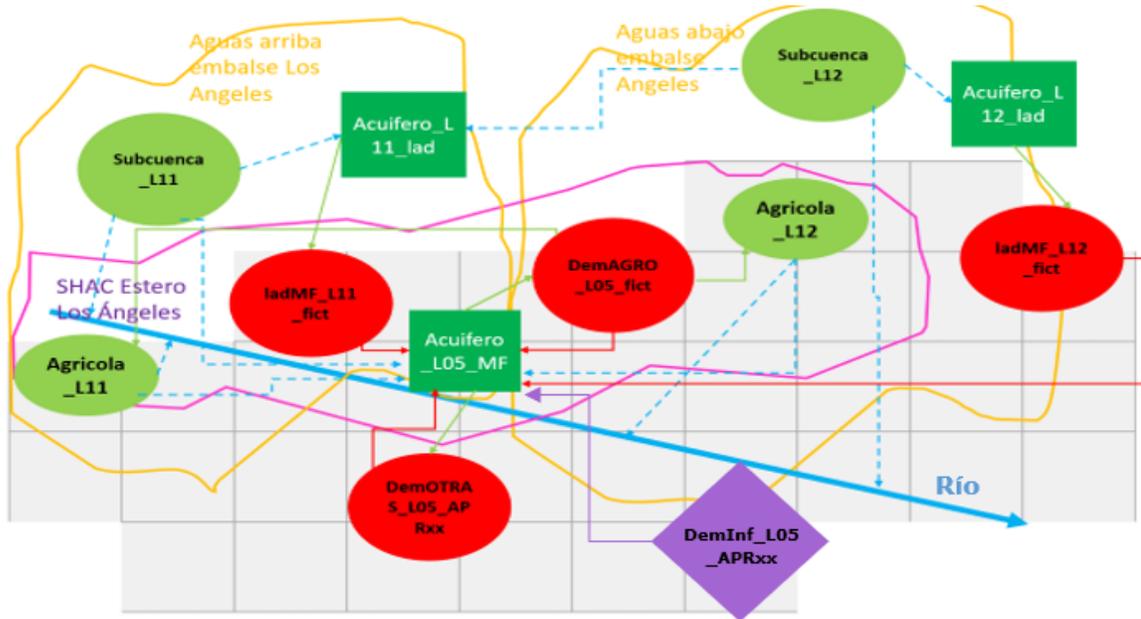


Figura 3.8: Esquema de representación de los elementos en WEAP (Fuente: Modificado del PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

1) Recarga de ladera:

Para simular los flujos subsuperficiales de ladera, provenientes de los acuíferos laterales (de ladera), se genera un nodo de demanda ficticio. Este nodo demanda 1.5% del volumen acumulado en el *Acuífero_Lxx_lad* o *Acuífero_Pxx_lad*.

2) Supuestos de bombeo:

El modelo PEGH con el que se partió no cuenta con el bombeo en función de la profundidad de los pozos. La profundidad de los pozos es el espesor del acuífero, es decir, dejan de bombear cuando la zona del acuífero en la que está el pozo, se seca.

La extracción de agua potable por camiones aljibe a las cuencas se incorpora como nodos de demanda “*DemOTRAS_Lxx_CamionesAljibe*” y “*DemOTRAS_Pxx_CamionesAljibe*”.

3) Agua subterránea para el acople

Este modelo está compuesto por 40 elementos de agua subterránea en WEAP. Trece de ellos están conectados a MODFLOW (*Acuífero_MF*), mientras 27 elementos representan a acuíferos de ladera (*Acuífero_Lad*).

En particular, los acuíferos de ladera se alimentan de la hidrología natural y los procesos agrícolas. La percolación dependerá de sus condiciones de humedad, parámetros de la capa y precipitaciones. Por otro lado, los procesos agrícolas están conectados a los acuíferos laterales debido a que algunos pozos están fuera del dominio de MODFLOW (DGA, 2020).

4) Sitios de Demanda:

En WEAP se tienen 124 sitios de demanda, los cuales actúan distinto en función de su categoría.

- **DemOTRAS:**

El nivel de actividad anual en este tipo de nodos queda determinado en función de la población y presenta una evolución temporal. La demanda semanal se supone proporcional para la semana.

- **DemAGRO:**

Modelan el proceso de extracción de agua desde los nodo de acuífero a los nodos de demanda ficticia. Los nodos de demanda ficticia agrupan a varias celdas del modelo MODFLOW donde se ubican los distintos pozos de extracción en el área de la subcuenca.

El nodo tiene una demanda anual fija en 100 [millones de m³] y dividida en partes iguales en las 52 semanas de modelación anual y el remanente no usado por los *catchments* agrícolas asociados al nodo de demanda ficticia, vuelve a los pozos en la misma proporción de agua extraída.

- **LadMF:**

Sirven para conectar los nodos acuíferos de ladera y los elementos acuíferos conectados a MODFLOW. La simulación de esta conexión se realizó a partir del volumen almacenado en cada paso de tiempo en los acuíferos laterales.

- **DemInfiltracion:**

Los nodos de demanda para infiltración funcionan similar a los otros elementos de demanda ficticia. En este caso sirven para generar infiltración desde distintos elementos hacia los distintos SHACs donde estén ubicados en el modelo subterráneo.

5) Ríos:

En el modelo se incluyen 2 cursos principales con celdas de río, el río Petorca y La Ligua. Dado el tamaño de las cuencas, se definieron 7 cuerpos fluviales que aportan a los ríos principales. De ellos sólo los ríos Sobrante y Petorca tienen un flujo base preestablecido de 0.2 m³/s y 0.7 m³/s respectivamente (Figura 3.9).



Figura 3.9: Diagrama de los elementos de río que se definen en el modelo hidrológico de las cuencas Ligua-Petorca. (Fuente: *Elaboración propia*)

6) Conducciones/Transmission Links:

Ellos son responsables de transferir agua desde nodos de acuíferos o ríos, hacia nodos de demanda. Según cuál sea el nodo al que está conectado, las propiedades son distintas.

- **Conducciones a nodos de demanda ficticia:**
Representan el flujo natural entre dos acuíferos, por lo que no presentan restricción de ningún tipo. Su prioridad de abastecimiento es 1.
- **Conducciones a nodos de demanda APU/APR/Minería:**
No tienen restricciones de volumen de agua.
- **Conducciones a nodos de agricultura:**
Se restringen en función de los derechos de aprovechamiento.

En lo que se refiere a las forzantes meteorológicas, se mantiene la elección considerada por los productos de la Actualización del Balance Hídrico Nacional de la DGA (DGA, 2017) para el territorio de Chile continental:

- Precipitación y temperaturas del Centro del Clima y la Resiliencia CR2. Con escala espacial de 5km entre 1979 - 2018
- Velocidad del viento, humedad relativa e índice de nubosidad obtenida del Reanalysis ERA5 escalado.

Los límites y geometría del modelo, delimita la unidad espacial en metros y su geometría bajo los siguientes criterios de ajuste (Tabla 3.2):

Tabla 3.2: Criterios de ajuste

Propiedad	Valor
Filas	350 de 200m de largo
Columnas	476 de 200mm de ancho
Layers	1
Períodos de Estrés	1
Total de celdas	166,600
Celdas activas	18,940
Origen X	272,200 WGS84 - UTM 19S
Origen Y	6,386,600 WGS84 - UTM 19S
Rotación	0°

Fuente: PEGH de las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019

El acuífero de las cuencas Ligua - Petorca, esta modelado como un cuerpo de agua compartido por ambas cuencas. El área activa (área modelada) considerada es la que contiene depósitos fluviales en mayor proporción (Figura 3.10) (DGA, 2019). Pues el estudio (DGA, 2020) concluyó que es el área que desempeña un papel más relevante en la representación del balance hídrico de la cuenca.

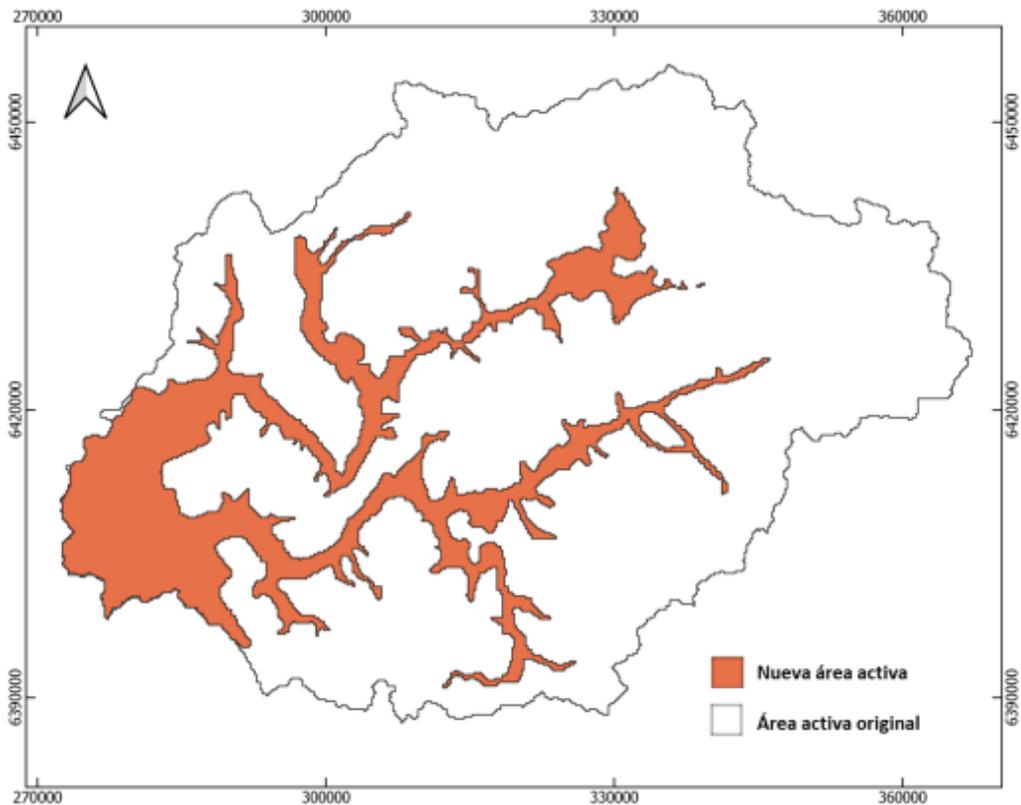


Figura 3.10: Área activa modelo MODFLOW Ligua-Petorca. (Fuente: DGA, 2019)

La zonificación del dominio activo, en otras palabras, la división por zonas del mismo está

en el paquete ZONE BUDGET (*.zbr), donde se ubica el análisis de distribución de variables hidráulicas del acuífero. Debido a esto y al carácter transiente del modelo, la propiedad de almacenamiento del acuífero está definida en función del almacenamiento específico (S_s) y rendimiento específico (S_y). Como se trata de un acuífero libre, el almacenamiento específico es superado ampliamente por el rendimiento específico ($S_s \ll S_y$). En consecuencia, el almacenamiento está dividido en 14 zonas (Figura 3.11).

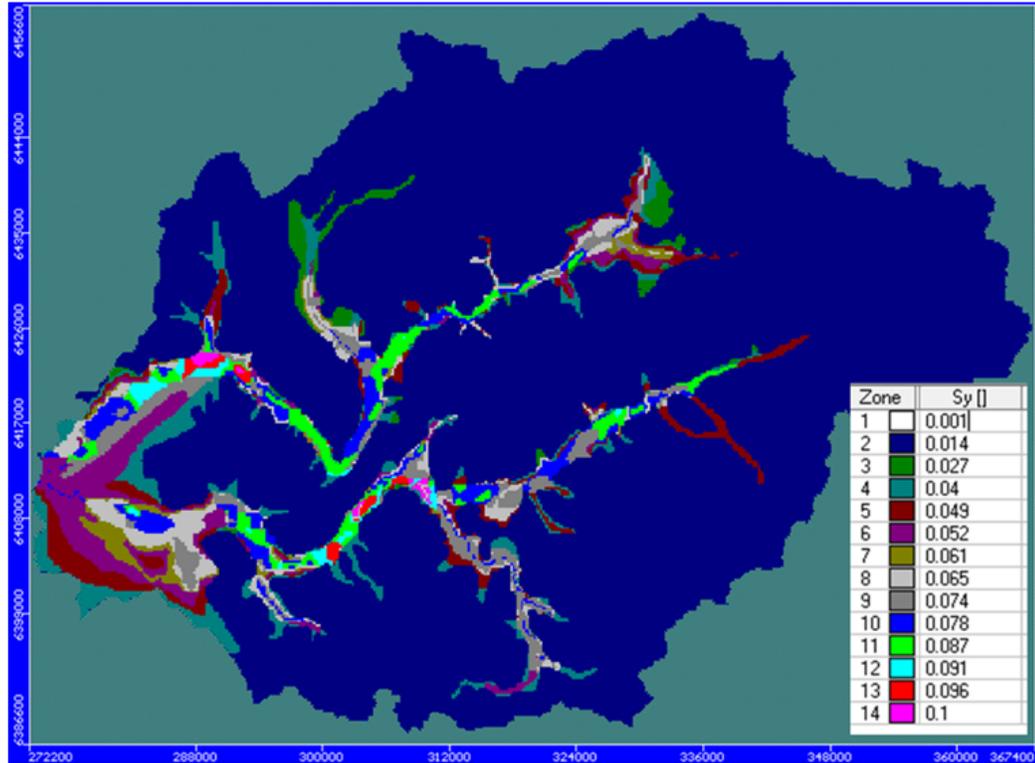


Figura 3.11: Rendimiento específico S_y . (Fuente: DGA, 2019)

Con respecto a las condiciones de borde e iniciales, en la simulación esta fijada una altura inicial igual a la cota de terreno. La recarga está delimitada por zonas, siguiendo la sectorización por conductividad hidráulica (DGA, 2020). La interacción acuífero - río, está modelada mediante el mismo atributo RIVER, tanto el ingreso de agua superficial al acuífero como los afloramientos desde el acuífero hacia el río (DGA, 2019).

Las cuencas están delimitadas por completo con un borde impermeable (DGA, 2019) y están definidas con una condición de carga constante en el sector de la desembocadura al mar de los ríos Petorca y Ligua. La carga se fija en 0 m.s.n.m. representando la salida al mar (DGA, 2019) (Figura 3.12).

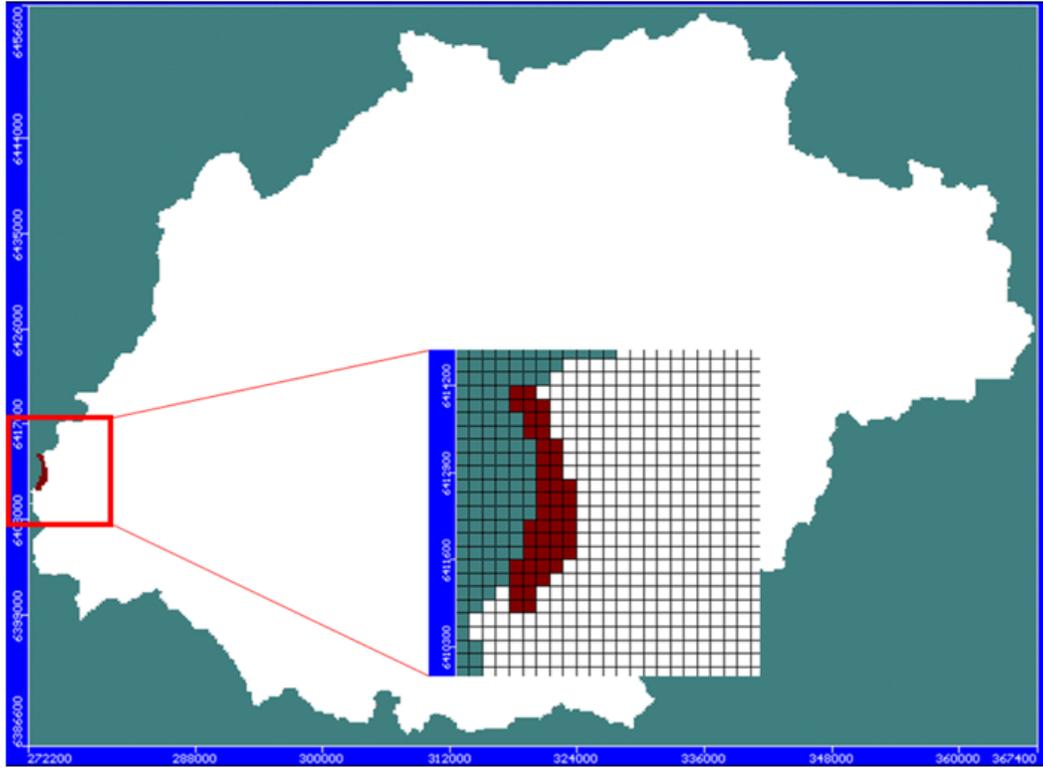


Figura 3.12: Carga constante, cuenca Ligua - Petorca. (Fuente: DGA, 2019)

Capítulo 4

Cambios propuestos

4.1. Incorporación de las profundidades de pozos en WEAP

La profundidad de los pozos se encuentra ingresada en WEAP dentro de la pestaña *Data-View*, carpeta *Key assumptions* → *Profundidad de pozos*. Las *Key assumptions* son variables definidas por el usuario que pueden ser referenciadas durante el análisis. Si bien el valor de la profundidad de los pozos varía en el período histórico (1980-2018), para efectos de este trabajo sólo se usará los datos más actuales del “Informe APR Petorca” (MINAGRI, 2018) (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Profundidad de los pozos en la cuenca río Petorca

Pozos	Profundidad [m]
APR Artificio de Pedegua	35
APR Artificio Paradero 4	40
APR Parcelas San Manuel LaVictoria Pozo2	10
APR Parcelas San Manuel LaVictoria Pozo1	10
APR La Canela	12
APR Quebrada Honda Artificio	30
APR Petorca Camiones Aljibe	70
APR Pedegua	60
APR Santa Marta Pozo 30m	30
APR Santa Marta Pozo 18m	18
APR San Lorenzo Casas Viejas	14
APR El Frances San Ramon	50
APR Pullancon Pozo 38m	38
APR Pullancon Pozo 28m	28
APR Sor Teresita de Santa Julia Pozo1	10
APR Sor Teresita de Santa Julia Pozo2	46
APR Trapiche Longotoma	22

Fuente: Elaboración propia a partir de la información MINAGRI (2018)

Tabla 4.1 – continua de la página anterior

Pozos	Profundidad [m]
APR Padre Hurtado	60
APR Manuel Montt	60
APR La Canelilla	60
APR La Nipa Noria1	12
APR La Nipa Noria2	12
APR Hierro Viejo Pozo Nuevo	60
APR Hierro Viejo Noria1	30
APR Villa Alberto Callejas	60
APR Palquico	14
APU Petorca	70
APR Quebrada de Castro	10
APR El Sobrante	15
APR Los Comunes	10
APR Valle Los Olmos	10
APU Chicolco	30
APR Las Palmas	42
APR Calle Larga	80

Fuente: Elaboración propia a partir de la información MINAGRI (2018)

Mediante el elemento *Transmission Link*, la conducción se modifica en función de la profundidad del pozo y el nivel de agua disponible. Para hacer uso de él, se sigue la ruta: *Data View* → *Supply and Resources* → *Transmission Link*. En esta pestaña están las conducciones a nodos de demanda, agricultura y demanda ficticia: *DemAGRO/Minería/LadMF/OTRAS*.

Los nodos de agricultura simbolizan la extracción de agua del acuífero en WEAP, al nodo de demanda ficticio en MODFLOW (incluye varias celdas con pozos de extracción). En otras palabras es una conexión entre los acuíferos de MODFLOW-WEAP y satisface la demanda agrícola. Está restringido por derechos de aprovechamiento.

Los nodos de demanda ficticia, representan el flujo natural entre dos acuíferos (lateral y principal). No presentan restricción de ningún tipo y tiene prioridad 1. Con respecto a los nodos de demanda asociados a minería, como no hay en Petorca, se descarta este caso.

Por último los nodos de demanda *DemOTRAS_APR/APU*, en el modelo PEGH no tiene restricciones en volúmenes de agua. En comparación con los otros nodos, es el más débil representando las captaciones. Asume que la profundidad de los pozos es del ancho del acuífero (100 [m]). Realizar cambios en él, cumple el objetivo de mejorar la “Mejorar la representación de captaciones de agua subterránea”.

La mejora de la simulación, implica detener el bombeo cuando las cribas dejen de estar en contacto con el acuífero. Esto puede pasar a X metros de la superficie y no sólo cuando se

supere los 100 [m] del acuífero. Para cortar la conexión, se modifica el volumen de máximo flujo en el *Expression Builder* según el caso.

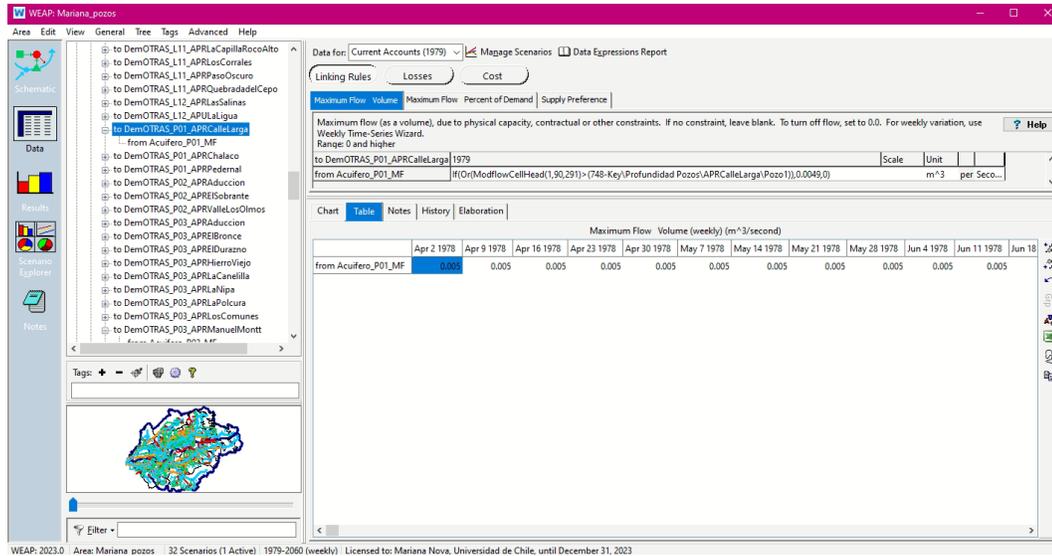


Figura 4.1: Ejemplo de uso *Expression Builder* en Calle Larga. (Fuente: *Elaboración propia*)

Para ello, en primer lugar se modifica la expresión (Figura 4.1) con la función *ModflowCellHead*, devuelve la elevación del nivel del agua subterránea a partir de los resultados de MODFLOW del paso de tiempo anterior para la celda especificada por Capa, Fila, Columna. Si los resultados de MODFLOW aún no se han calculado, el resultado será 0. Las celdas inactivas devolverán el código numérico para celdas inactivas (-999) y las celdas secas devolverán el código numérico para celdas secas (-888).

$$ModflowCellHead(1, 90, 201) \quad (4.1)$$

Luego, llama al valor guardado con la profundidad del pozo en estudio y lo resta con la altura del terreno 748[m.s.n.m] (obtenido a partir *STRM Downloader* de *QGIS*).

$$748 - Key \backslash Profundidad Pozos \backslash APR Calle Larga \backslash Pozo1 \quad (4.2)$$

Compara el nivel de elevación de agua del acuífero con la profundidad del pozos, ambas en m.s.n.m. Si se cumple esa condición, entregará *True*.

$$Or(Eq(4.1) > Eq.(4.2)) \quad (4.3)$$

La función *If* entrega 0.0049 (el valor máximo de volumen impuesto por el MOP) si recibe un *True*, en caso contrario da cero (corta el flujo de agua hacia la APR).

$$If(Eq(4.3), 0.0049, 0) \quad (4.4)$$

En caso de que haya más de 1 pozos, el proceso es análogo (Revisar Anexo B).

Para el escenario futuro (2018-2060), en MIROC se mantienen sólo las condiciones climáticas del modelo PEGH original. El enfoque del trabajo es estudiar el impacto de las forzantes

climáticas sobre el acuífero y sus pozos, sin más variables. En la Figura 4.2.a están las condiciones del MIROC original. Para cambiar esto, se sigue la ruta *Data View* → *Demand Sites and Catchments* → *Startup Year*. Al cambiar los valores a cero indican que no estarán disponibles las operaciones (Figura 4.2.b).

Startup Year		Startup Year	
The first year of operation/availability. If not active in this scenario, enter 0.		The first year of operation/availability. If not active in this scenario, enter 0.	
Demand Sites and Catchment	Startup Year	Demand Sites and Catchment	Startup Year
DemInfiltracion_EmbalseAngeles_fict	0	DemInfiltracion_EmbalseAngeles_fict	0
DemInfiltracion_EmbalseLaChupalla_fict	0	DemInfiltracion_EmbalseLaChupalla_fict	0
DemInfiltracion_EmbalseLasPalmas_fict	1978	DemInfiltracion_EmbalseLasPalmas_fict	0
DemInfiltracion_EmbalsePederal_fict	0	DemInfiltracion_EmbalsePederal_fict	0
DemOTRAS_L01_APRConduccionAlicahue	1978	DemOTRAS_L01_APRConduccionAlicahue	0
DemOTRAS_L02_APRConduccionAlicahue	1978	DemOTRAS_L02_APRConduccionAlicahue	0
DemOTRAS_L06_APRConduccionAlicahue	1978	DemOTRAS_L06_APRConduccionAlicahue	0
DemOTRAS_P02_APRAduccion	1978	DemOTRAS_P02_APRAduccion	0
DemOTRAS_P03_APRAduccion	2022	DemOTRAS_P03_APRAduccion	0
DemOTRAS_P08_APRAduccion	2021	DemOTRAS_P08_APRAduccion	0
Aux_PI_EsteroAlicahue	0	Aux_PI_EsteroAlicahue	0
Aux_PI_RioLiguaOriente_EsteroAngeles	0	Aux_PI_RioLiguaOriente_EsteroAngeles	0
Aux_PI_RioLiguaCabildo_EsteroPatagua	0	Aux_PI_RioLiguaCabildo_EsteroPatagua	0
Aux_PI_RioPederal_RioSobrante	0	Aux_PI_RioPederal_RioSobrante	0
Aux_PI_RioPetorcaOriente_EsteroLasPalmas	0	Aux_PI_RioPetorcaOriente_EsteroLasPalmas	0

(a) MIROC Original

(b) MIROC Adaptado

Figura 4.2: Startup Year (*Fuente: Elaboración propia*)

Una vez realizado esto, se incorporan las profundidades de las captaciones con una metodología idéntica a la expuesta anteriormente para el período histórico.

4.2. Validación de las modificaciones en Python

Primero se manejan los archivos nativos de entrada y de resultados del acople WEAP-MODFLOW, tanto binarios como no binarios. Luego para verificar que el pozo se apaga en el paso de tiempo en que *ModflowCellHead* es menor a la altura de las cribas, se estudian los niveles y bombeos. Los niveles se pueden ver dentro del mismo WEAP, aunque sólo permite descargar la matriz de datos semana a semana.

Como los períodos a analizar superan los 40 años, se revisan los archivos binarios **.hed* con las rutinas. El código base usado para ello proviene del PEGH (DGA, 2020). Con el fin de ajustarlo a los objetivos del trabajo. La primera parte consiste en importar todas las librerías necesarias para el funcionamiento del código.

Luego se usó el paquete ZONE BUDGET, junto con la librería FloPy de Python, así como otras librerías más generales de Python. El ZONE BUDGET permite ordenar los archivos binarios por zonas y mantener la organización por celdas que aparece en el visor de WEAP (Código C.1). El balance hídrico se realiza en todas las zonas del modelo, por Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) (Código C.4).

Se prepara la data para que los archivos de salida tengan el mismo formato de filas y columnas visibles en WEAP (Código C.5). Esta rutina itera sobre los archivos de **.hed* en

la carpeta generada por WEAP, para luego obtener los valores celda a celda y exportarlo en un archivo *.csv. Cada uno de ellos contendrá una matriz con los valores por semana de los niveles del acuífero en [m.s.n.m] (Código C.6). Son estas matrices luego importadas a QGIS donde se visualiza el estado general del acuífero.

Por último, para identificar los niveles de acuífero de los pozos, se implementa otra rutina en Python (Código C.7), donde después de importar las librerías necesarias, se ingresan las rutas para buscar los *.csv con las matrices con niveles y un excel con las celdas de interés. Los niveles de los pozos son incorporados a un archivo nuevo con los niveles de los pozos en todas las semanas del período en estudio.

Con respecto a los bombeos al igual que otros resultados como la cobertura de la demanda y volumen de flujo, pueden ser descargados de WEAP. Sin embargo, al guardar esta vista como favorito, se pueden extraer de forma sencilla mediante una rutina Python.

A partir de las rutas de las carpetas de WEAP y donde se guardarán los resultados, abre WEAP y activa el área escogida. Luego busca el escenario de interés (con los resultados previamente guardados) y exporta los valores/ gráficos/ esquemas guardados en las carpetas “MODFLOW y Acuíferos” y “TODOS” (Código C.8).

Capítulo 5

Principales resultados y análisis

5.1. Representación en QGIS

Primero, se ingresan los archivos *.csv, provenientes de los archivos *.hed. Estos son matrices con los valores de los niveles del acuífero en [m.s.n.m] en el entorno modelado. El formato para agregarlos como capa compatibles al modelo QGIS del PEGH (DGA, 2020), es un *.csv conformado por X columnas (Código C.9).

- **Rw:** las filas de la matriz de uno los archivos *.csv de interés.
- **Clmn:** las columnas de la matriz del *.csv anterior.
- **Rw_ clmn:** los valores de “Rw” y “Clmn” separados por una coma.
- **Año XXXX:** los niveles ubicados en (Rw, Clmn) del *.csv. Es posible agregar cuantas columnas como años a analizar. Dado que todos los archivos tienen el mismo formato con las ubicaciones de los niveles de WEAP.

El nuevo *.csv se agrega con la opción *Layer* de la barra de herramientas de QGIS. La ruta es *Layer* → *Add Layer* → *Add Delimited Layer* → *Buscar ubicación del archivo*.

Luego, mediante el archivo *Linkeage_v26.shp* del modelo PEGH (DGA, 2020), se establece el enlace con la capa y se agregan cuantas columnas con datos se quiera analizar. Para ello, en la capa *Propiedades* → *Join Layer*, se toma la columna con el formato *Rw_ Clmn* del *.csv.

La interpolación de los datos con *TIN Interpolation* genera un raster con la información de niveles del acuífero en [m.s.n.m] de las cuencas Ligua - Petorca. Dado que el enfoque es Petorca se corta el raster que pertenece a Petorca con *Raster Extraction*. Luego se define el estilo final mediante cambios en el estilo de la figura.

Por último, con el fin de calcular la diferencia entre el acuífero y el terreno. Se usa el plugin *STRM Downloader*, quien descarga la información topográfica recogida por una satélite de la NASA *Shuttle Radar Topography Mission*. Su resolución raster es de 30[m], mayor a la disponible por el PEGH (DGA, 2020) de 200[m]. La diferencia entre ambos se realizó con *Raster Calculator*.

5.2. Período histórico 1980-2018

El PEGH (DGA, 2020) sólo modeló una parte del acuífero en la cuenca, esta era la que contaba con mayores sedimentos fluviales. En QGIS la parte no modelada se coloreó negra (-1) y lo modelado con tonalidades verde desde el blanco (0 como celdas secas) hasta el valor máximo en verde oscuro [m.s.n.m]. Los años en estudio son [1980, 1990, 2000, 2018].

Al comparar el primer año histórico con el último, hay una disminución en los niveles de acuífero en un 59 % y sectores más cercanos al blanco (según la simbología) en el 96 % de la zona modelada. Las zonas más cercanas al límite del dominio, el 4 % restante, presentan un aumento en los niveles por sobre el 50 % debido a la modelación de los acuíferos de ladera (su principal fuente de recarga) en el PEGH (DGA, 2020) (Figura 5.1 y 5.2).

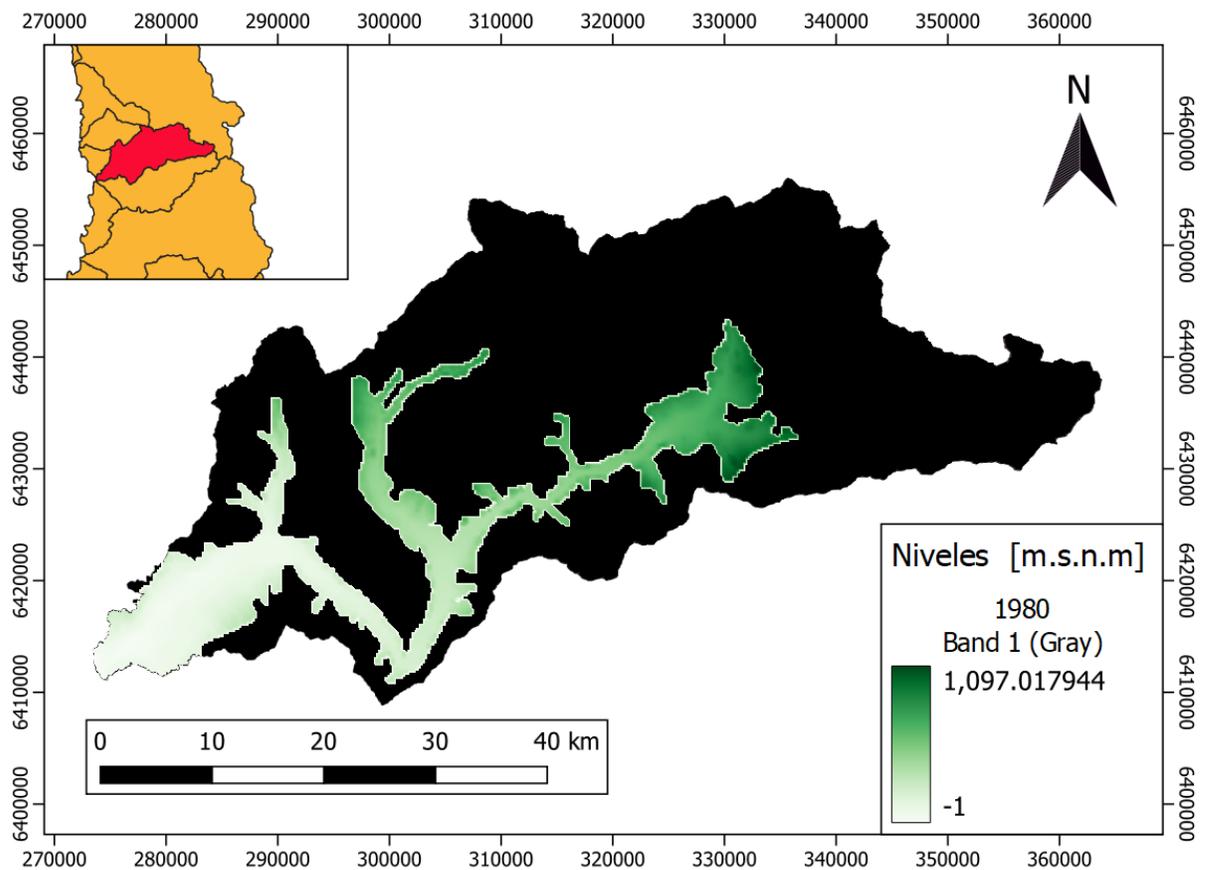


Figura 5.1: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 1980
(Fuente: *Elaboración propia*)

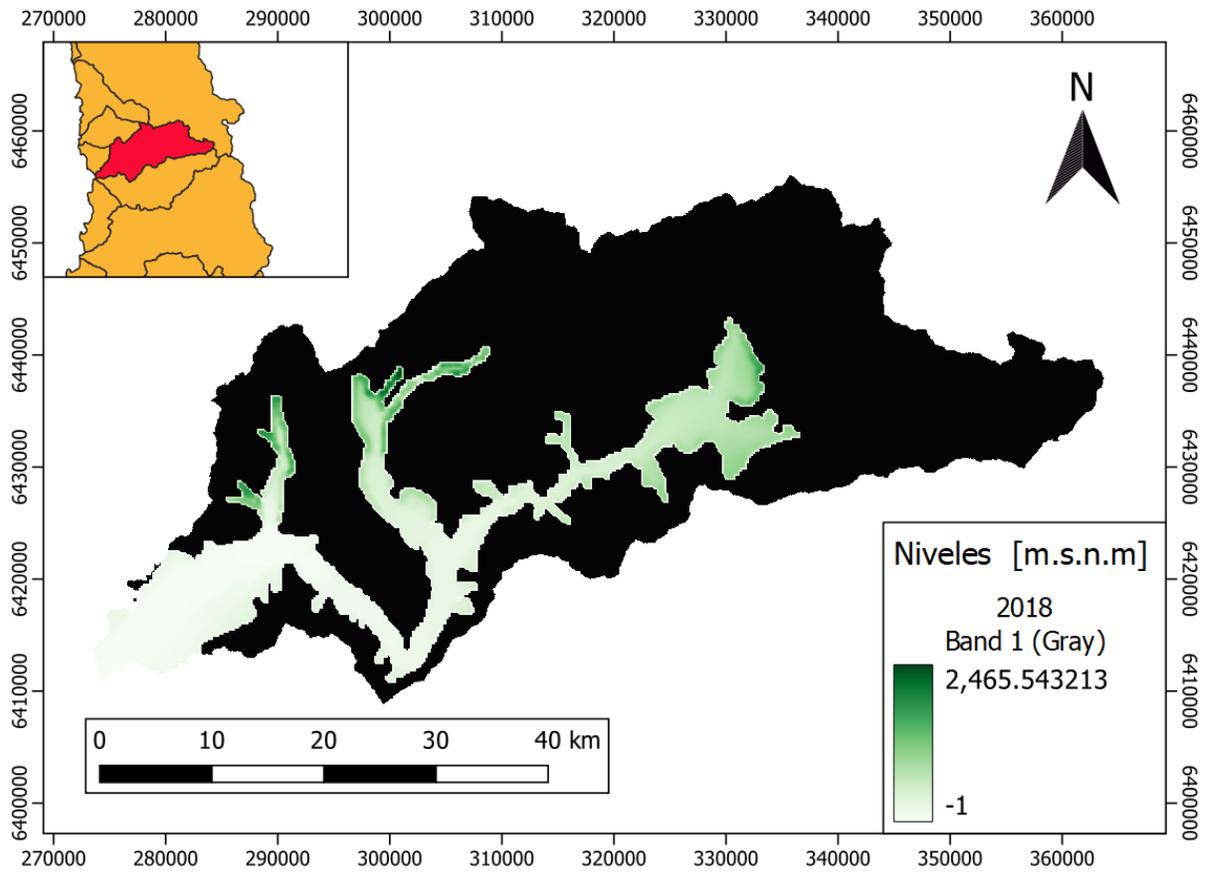


Figura 5.2: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2018
(Fuente: Elaboración propia)

Las diferencias de altura del acuífero en una semana corresponden a las características topográficas de la cuenca, con un aumento de la altura desde la salida al mar hasta la zona precordillerana. Donde solía ubicarse el río Petorca es de las zonas más bajas, junto con el Estero Pedernal, El Sobrante y Petorca Oriente. En síntesis, la roca basal del acuífero sigue la topografía de la zona (Figura 5.3).

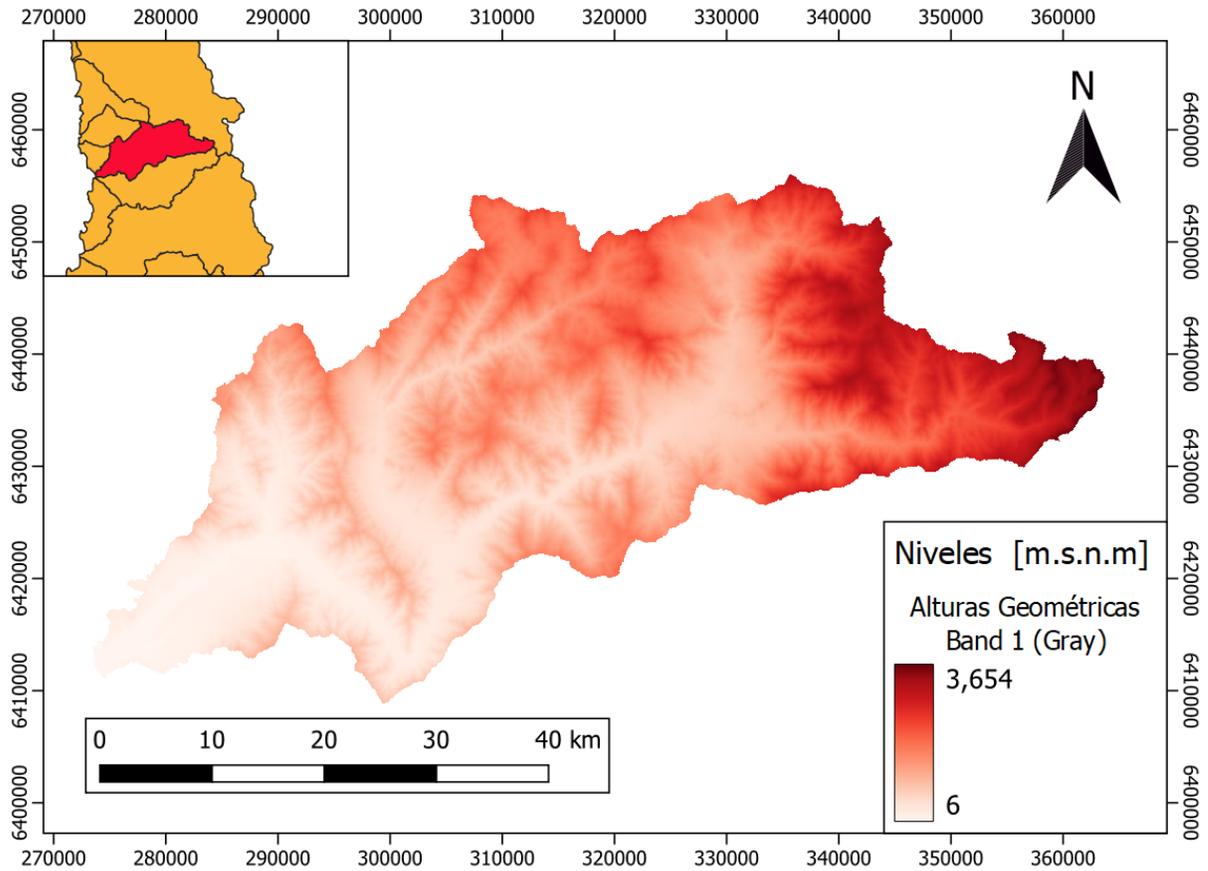


Figura 5.3: Topografía (Fuente: *Elaboración propia*)

La diferencia entre el acuífero y el terreno permite ver que tan somero está el acuífero del terreno (Figura 5.4 y 5.5). En la simbología se impone como máximo de altura 100 [m] pues tal como se dijo en el Modelo de simulación existente (Capítulo 3), más allá del valor implica que no hay acuífero por las diferencias de características del suelo. En otras palabras, el azul oscuro con 100[m] implica que esta seca la zona.

Respecto a el concepto de “pozo colgado” se usará para definir el estado en que un pozo ya no es capaz de bombear agua, ya sea porque el nivel del acuífero es más profundo que las cribas del pozo o porque la zona está seca (supera los 100 [m]).

Con los dos primeros conceptos en mente, se observa que a inicios de 1980 no hay pozos colgados, mientras que al término del período histórico se han apagado 14 de los 32 pozos en funcionamiento. En función de que tan somero esté el acuífero y la profundidad de los pozos, se define si se colgará o no la captación en una determinada semana.

Esto explica porque pozos con profundidad de 10[m] como “San Manuel La Victoria” no se cuelgan en la totalidad del período histórico. Su ubicación cercana a la salida del mar les entrega una posición ventajosa para bombear agua. Por otro lado, APRs como “Manuel Montt” (con profundidad de 60[m]) al estar en una zona donde el acuífero no está lo suficientemente somero, son incapaces de pinchar el acuífero (Tabla 5.1).

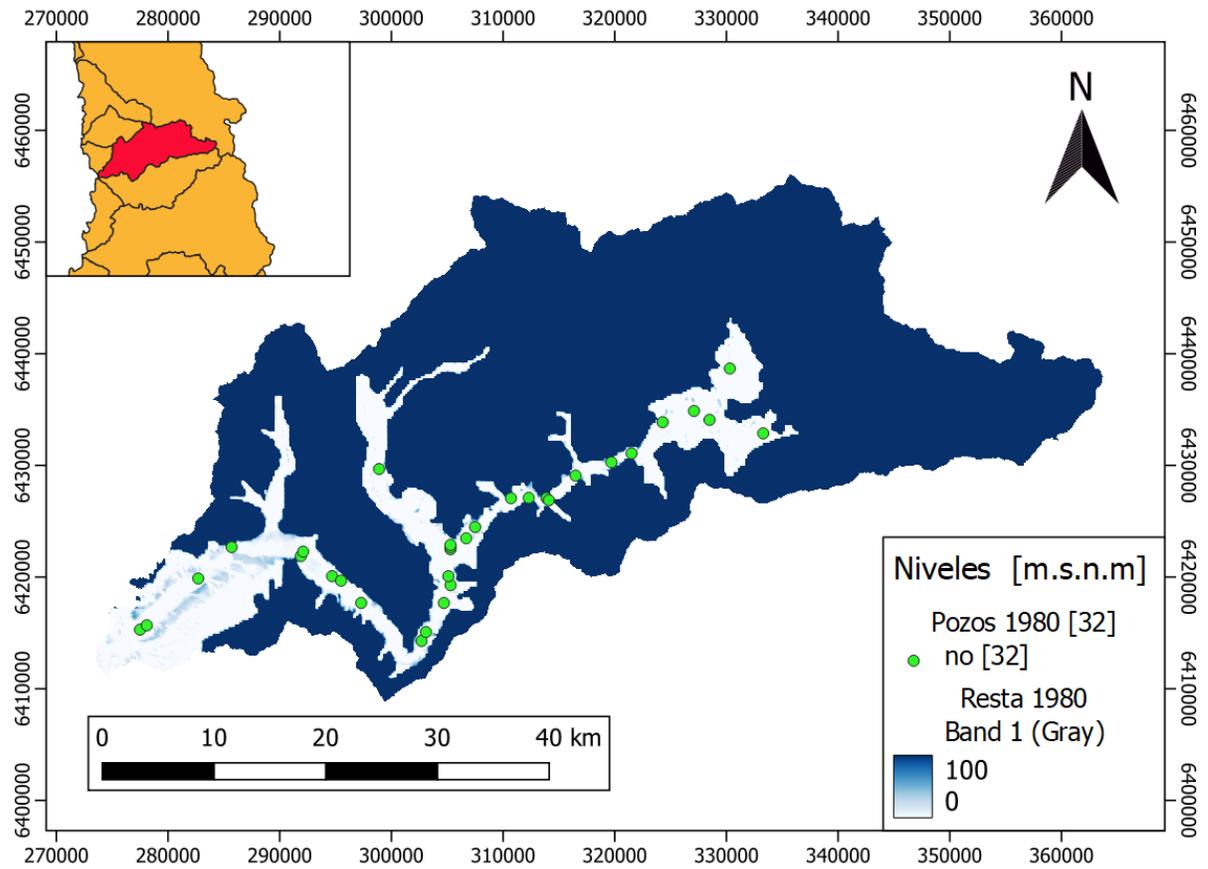


Figura 5.4: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 1980 (*Fuente: Elaboración propia*)

La distribución espacial de la cuenca está contenida en 3 SHACs: 194, 195 y 196. Los pozos colgados están entre el SHAC 194 y 195 para el año 2018, en otras palabras es el sector central de la cuenca quien concentra las zonas con menor disponibilidad hídrica.

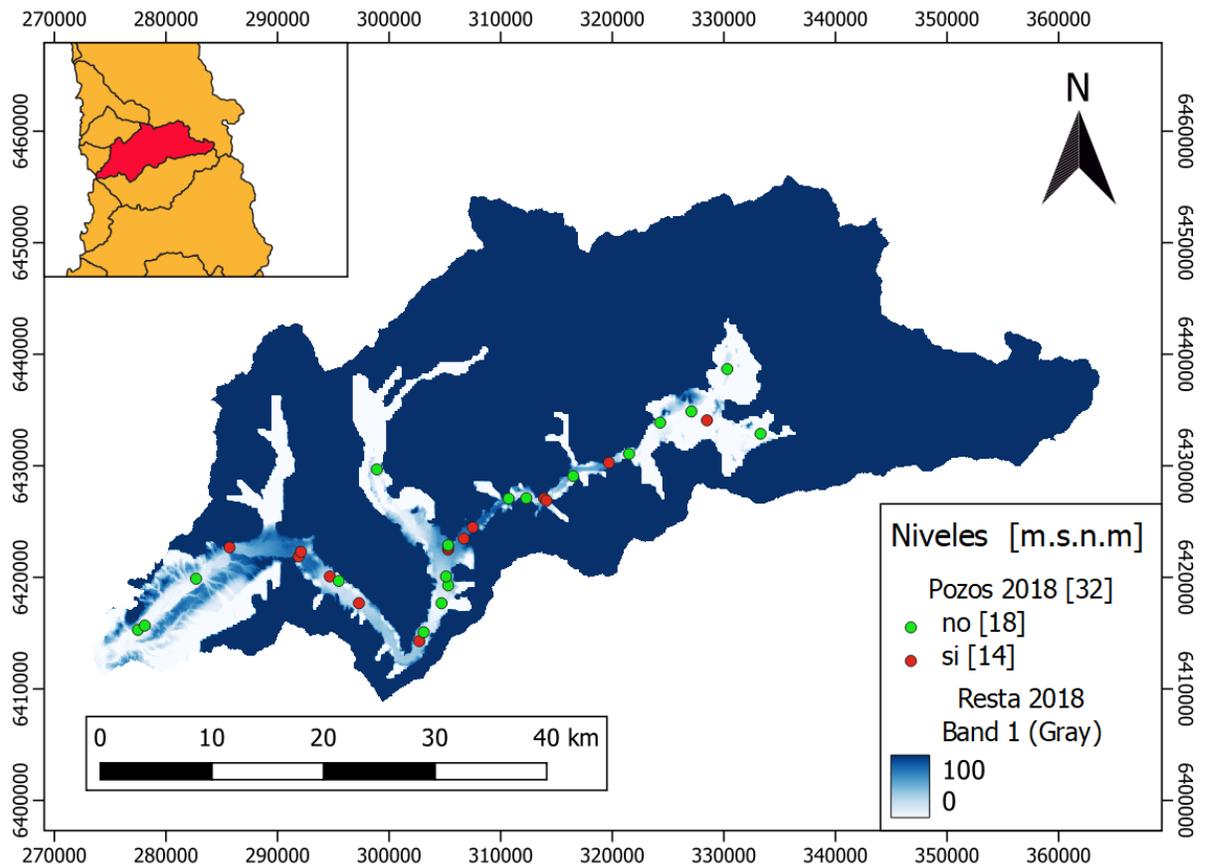


Figura 5.5: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2018 (*Fuente: Elaboración propia*)

Tabla 5.1: Pozos colgados 1980 y 2018

Pozos	Profundidad [m]	1980	2018
APR Parcelas San Manuel La Victoria pozo1	10	No	No
APR Parcelas San Manuel La Victoria pozo2	10	No	No
APR San Lorenzo Casas Viejas	14	No	No
APR Trapiche Longotoma	22	No	Si
APR Pullancon pozo38m	38	No	Si
APR Pullancon pozo28m	28	No	Si
APR Santa Marta pozo18m	18	No	Si
APR Santa Marta pozo30m	30	No	No
APR La Canela	12	No	Si
APR Palquico	14	No	No
APR Artificio Pedegua	35	No	Si

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1 – continua de la página anterior

Pozos	Profundidad [m]	1980	2018
APR Artificio de Paradero4	40	No	No
APR Quebrada Honda Servicio	30	No	No
APR Pedegua	60	No	No
APR El Frances San ramon	50	No	No
APR Teresita de Santa Julia pozo46m	46	No	Si
APR Teresita de Santa Julia pozo10m	10	No	Si
APR Padre Hurtado	60	No	Si
APR Manuel Montt	60	No	Si
APR La Canelilla	60	No	Si
APR Hierro Viejo pozo	60	No	Si
APR Hierro Viejo noria	30	No	No
APR La Nipa noria1	12	No	Si
APR La Nipa noria2	12	No	Si
APR Villa Alberto Callejas	60	No	Si
APU Petorca	70	No	Si
APR Quebrada Castro	10	No	No
APR Los Comunes	10	No	No
APU Chicolco	30	No	No
APR Valle Los Olmos	10	No	Si
APR Calle larga	80	No	No
APR El Sobrante	15	No	No

Fuente: Elaboración propia

Al apagarse varios pozos, el acuífero comienza a recuperarse. El descenso de niveles es más suave. Un ejemplo de esto ocurre en el pozo de “Trapiche Longotoma”, donde el nivel de la zona oscila en el límite de profundidad de las cribas y el bombeo se prende/apaga. Este comportamiento lo mantiene unas semanas hasta que el pozo deja de pinchar el acuífero (Figura 5.6).

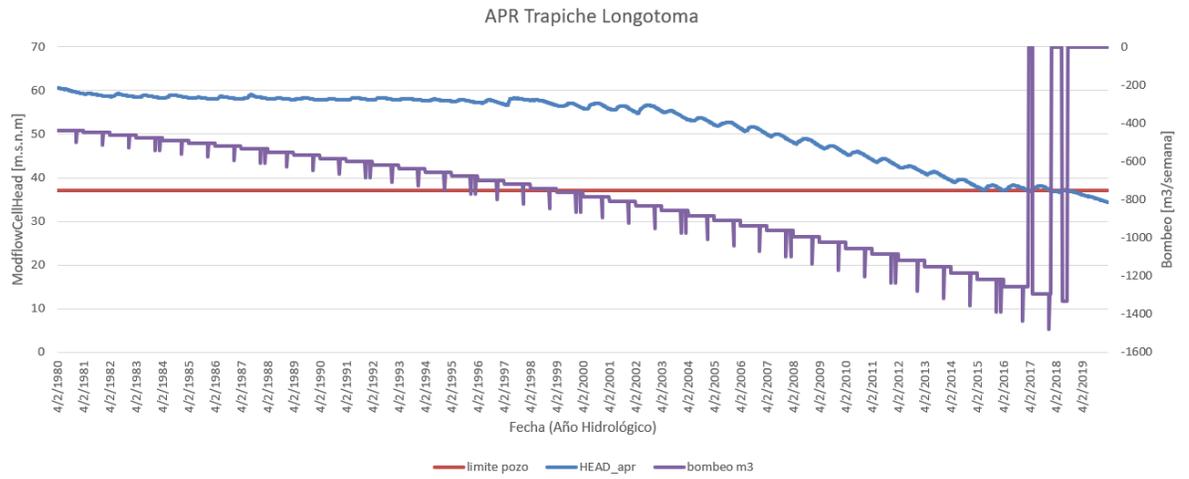


Figura 5.6: Trapiche Longotoma. Niveles del acuífero, bombeo y límite del pozo (Fuente: *Elaboración propia*)

El comportamiento de recuperación del acuífero, se explica por el estrés al que ha estado sometido producto de los bombeo disminuyen. Para el año 2018, producto del cese de bombeo en algunas APRs 6,149,098 [m³] no fueron extraídos del acuífero (Tabla 5.2). La ligera recuperación de este no es suficiente para que los pozos se activen de forma sostenida por el tiempo, pero sí para que los niveles de acuífero decaigan de forma menos abrupta que los años anteriores.

Tabla 5.2: Bombeo hipotético con profundidad de los pozos idéntica al espesor del acuífero. 1980-2018.

APRs	Bombeo [m³]
APR CalleLarga	-
APR Pedernal	-
APR El Sobrante	-
APR Valle Los Olmos	3,294,135
APR Hierro Viejo	-
APR La Canelilla	75,632
APR La Nipa	1,069,740
APR Los Comunes	-
APR Manuel Montt	499,500
APR Quebrada de Castro	-
APR Sor Teresita de Santa Julia	246,016
APR Villa Alberto Callejas	-
APUChincolco	-
APU Petorca	205,632
APR Palquico	-
APR Artificio de Pedegua	6,894
APR Artificio Paradero4	-
APR El Frances San Ramon	-
APR La Canela	750,375
APR Padre Hurtado	-
APR Parcelas San Manuel La Victoria	-
APR Pedegua	-
APR Pullancon	1,064
APR Quebrada Honda Artificio	-
APR San Lorenzo Casas Viejas	-
APR Santa Marta	-
APR Trapiche Longotoma	110
Suma	6,149,098

Fuente: Elaboración propia

5.3. Proyecciones MIROC 2018-2060

Las opciones de estilo para simbolizar lo modelado en el PEGH (DGA, 2020) se mantienen del período histórico. Los años en los que se enfocó el análisis son [2020, 2030, 2040, 2050, 2060] (Anexos F.2).

A diferencia del período histórico, las zonas límites del modelo con incremento de niveles por sobre el 50 %, han disminuido a 2% con respecto al total. Mientras que el descenso del acuífero es de 23 % en promedio. La estabilización del descenso de 59 % a 23 % es un síntoma de la recuperación del mismo.

El efecto de recuperación no implica que el acuífero deje de descender, sólo que lo hace a un ritmo menos abrupto. Las Figuras 5.7 y 5.8 presentan su evolución.

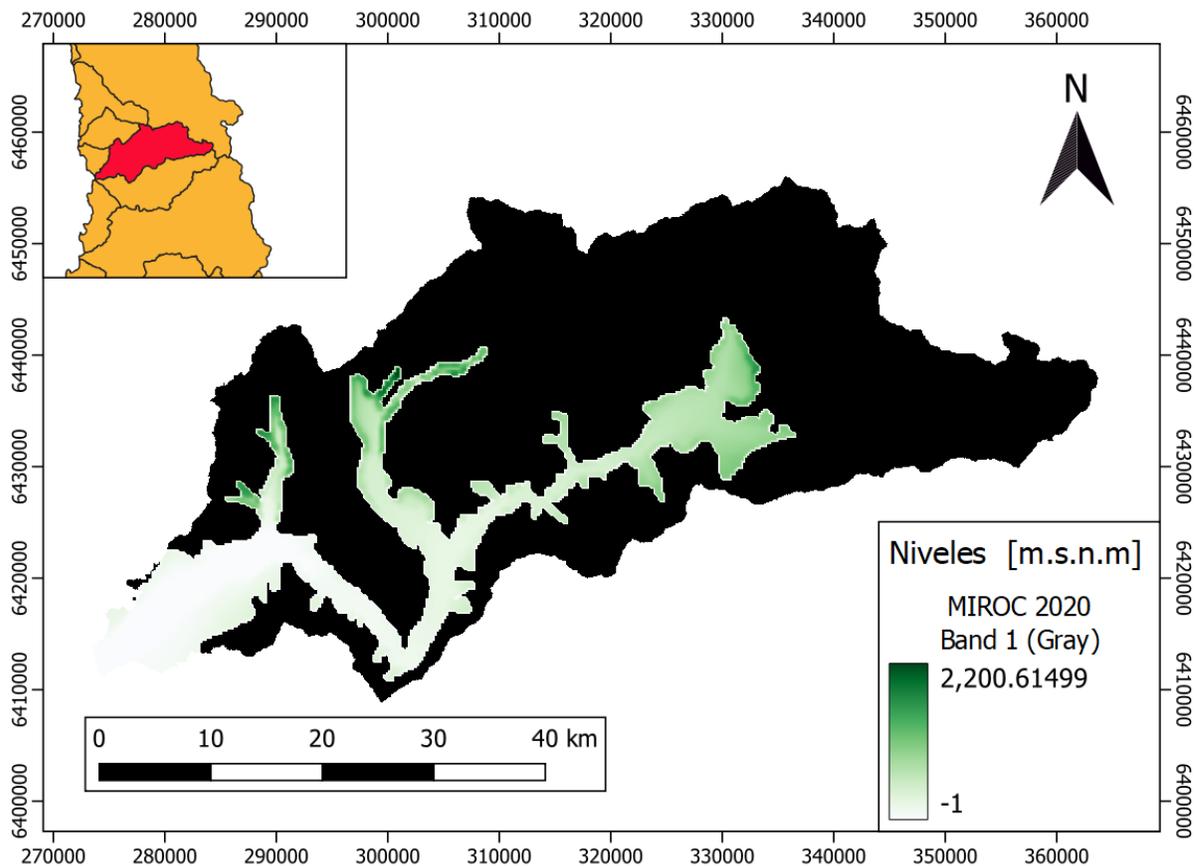


Figura 5.7: Acuífero en la cuenca Río Petorca. 1era semana de Abril, 2020. Proyección MIROC (Fuente: *Elaboración propia*)

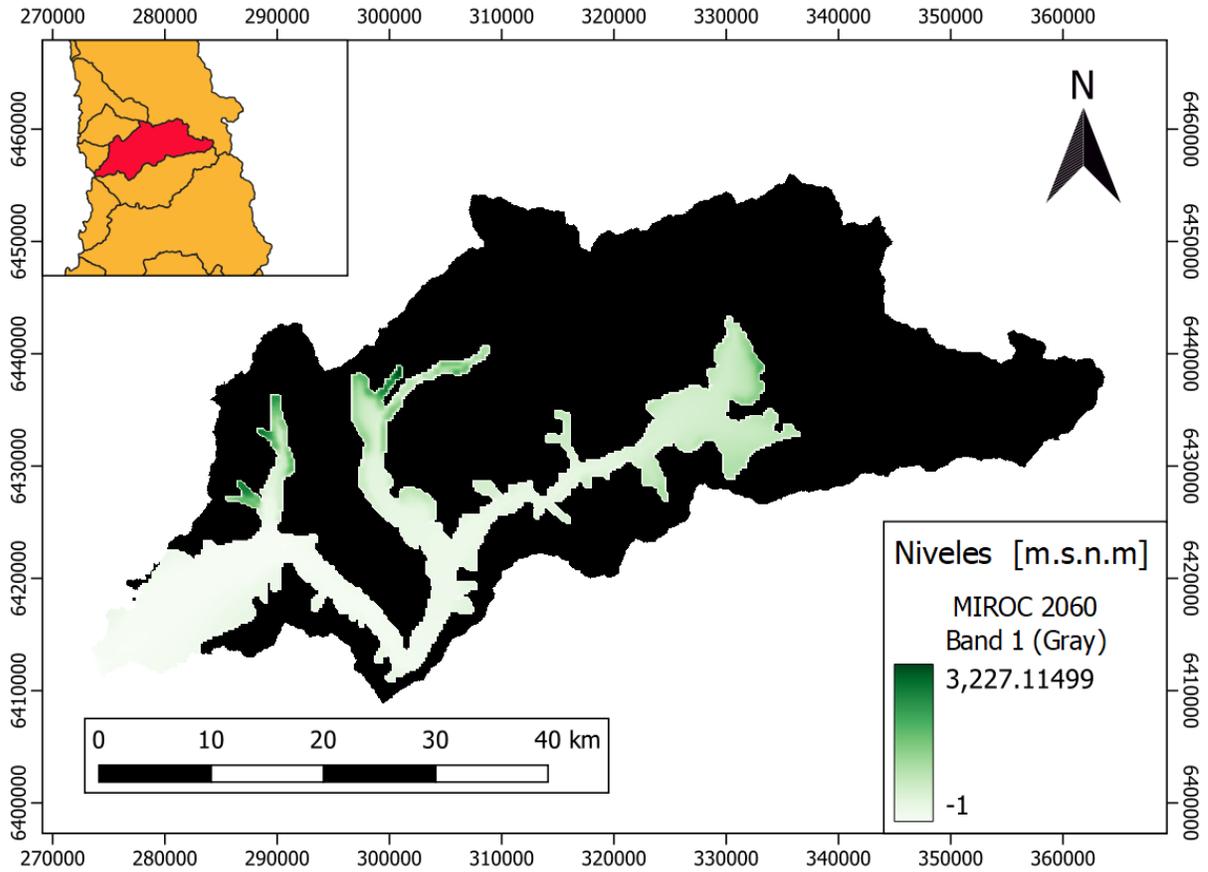


Figura 5.8: Acuífero en la cuenca Río Petorca. 1era semana de Abril, 2060. Proyección MIROC (Fuente: *Elaboración propia*)

En la proyección MIROC, 2020 presenta 17 pozos colgados y en 2060 aumenta a 22. Su distribución se concentra en los SHACs 194 y 195, quienes presentan niveles de acuíferos más profundos y por lo tanto menos accesibles por los pozos.

Los sectores que aún pueden bombear son los cercanos a la salida del mar (“APR Parcelas San Manuel La Vistoria”) y los más cercanos a la cordillera, por ejemplo “Calle Larga”. Ambos debido a la topografía, la diferencia radica en que “APR Parcelas San Manuel La Vistoria” (Tabla 5.3) presentan carga constante de 0[m.s.n.m] por la salida al mar, mientras que los cercanos a la cordillera son recargados por las precipitaciones (Figura 5.9).

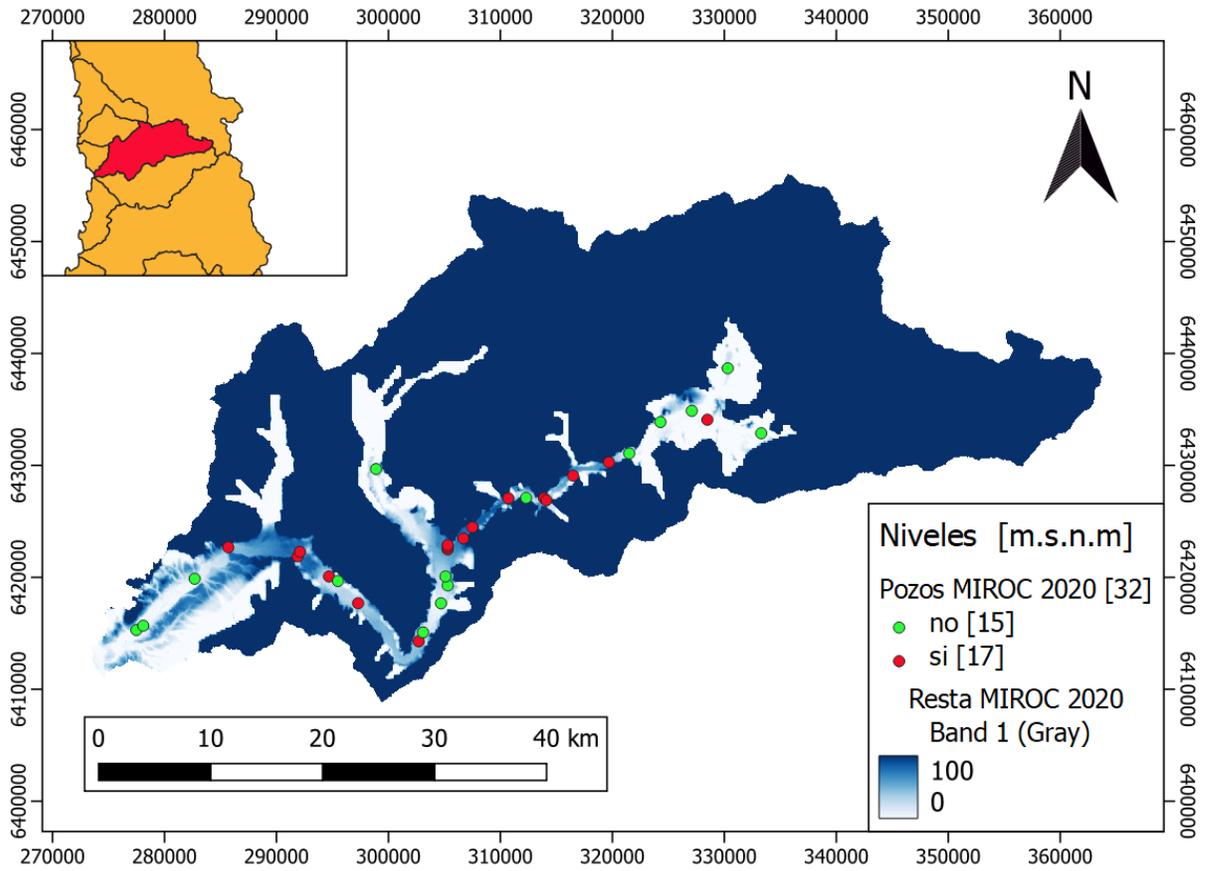


Figura 5.9: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2020. Proyección MIROC (*Fuente: Elaboración propia*)

Los años 2050 y 2060 (Figura 5.10 y 5.11) no aumenta la cantidad de pozos colgados. Esto indica la recuperación del acuífero (por el cese de bombeo) lo suficiente para que los pozos no colgados continúen bombeando sin problemas, en otras palabras, una estabilización en los descensos de los niveles.

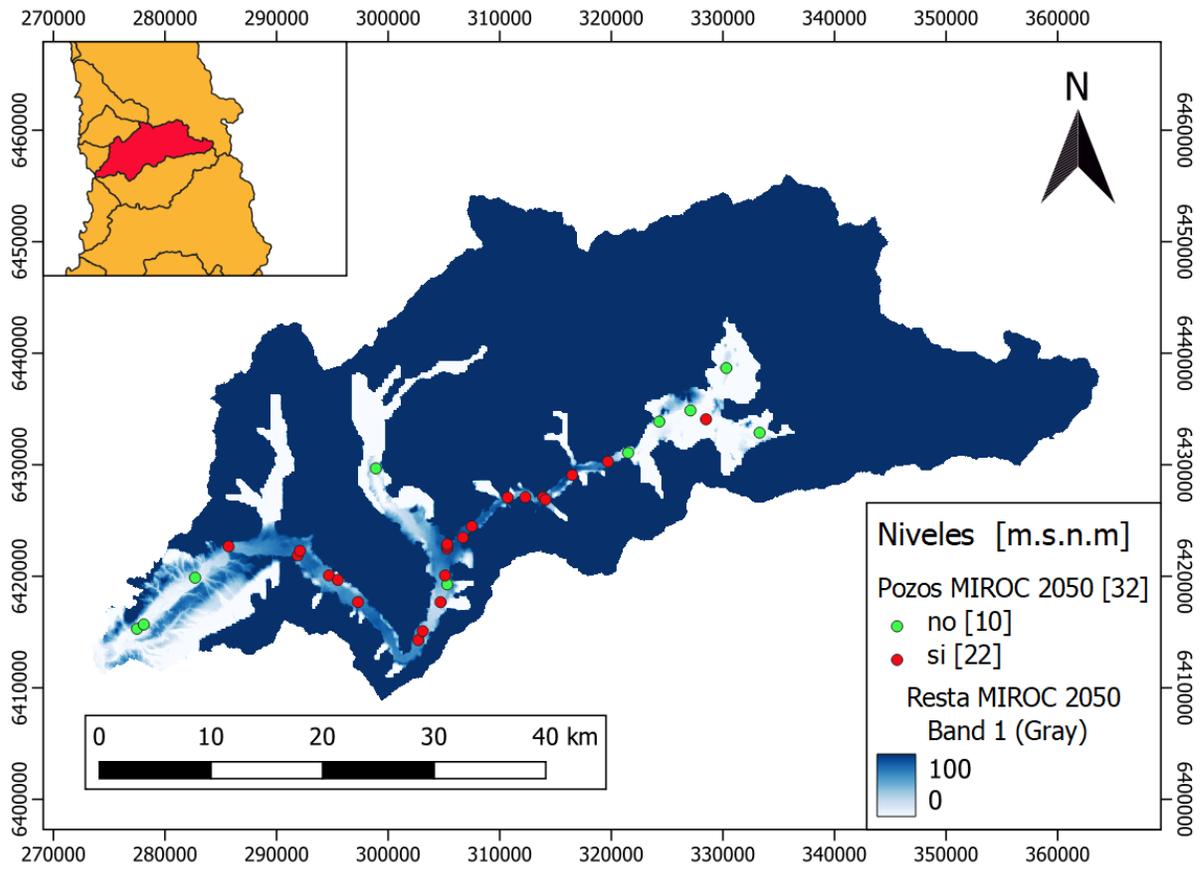


Figura 5.10: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2050. Proyección MIROC (*Fuente: Elaboración propia*)

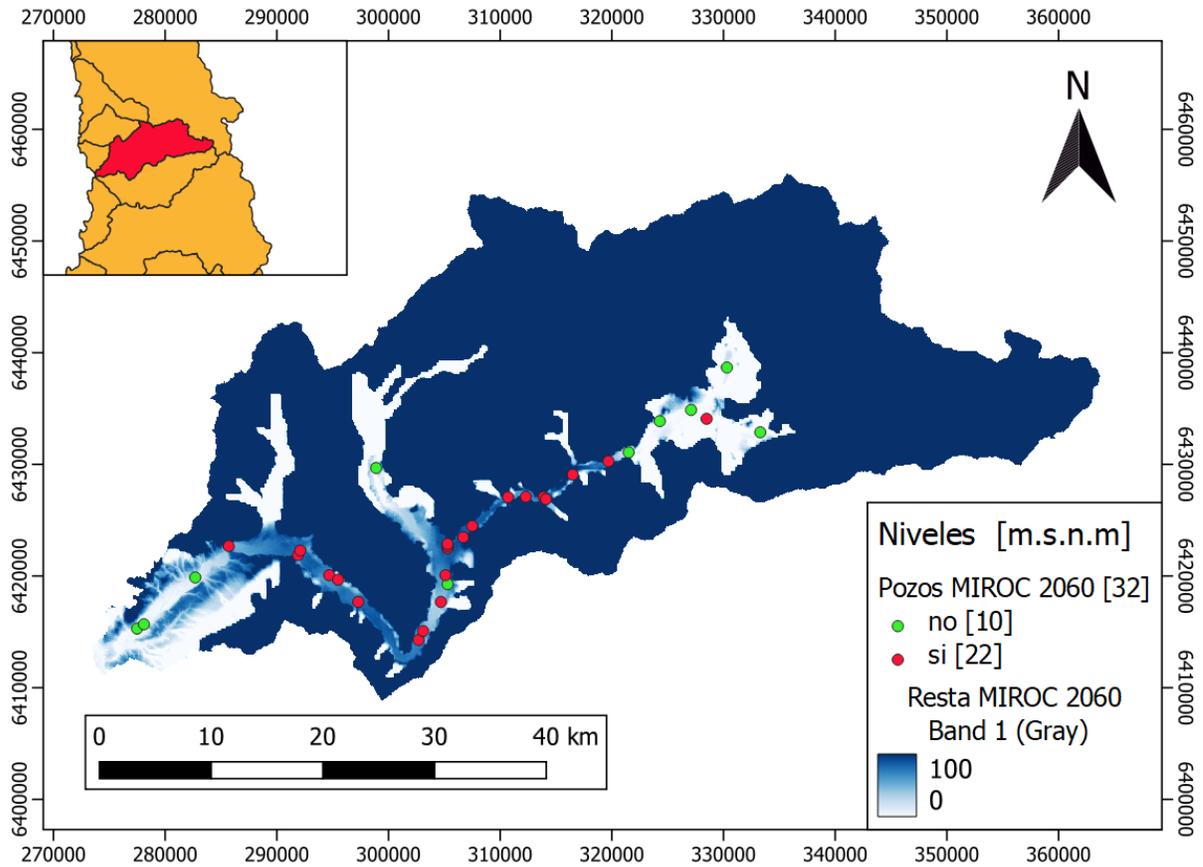


Figura 5.11: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2060. Proyección MIROC (Fuente: *Elaboración propia*)

Tabla 5.3: Proyección MIROC. Pozos colgados 2020 y 2060

Pozos	Profundidad [m]	2020	2060
APR Parcelas San Manuel La Victoria pozo1	10	No	No
APR Parcelas San Manuel La Victoria pozo2	10	No	No
APR San Lorenzo Casas Viejas	14	No	No
APR Trapiche Longotoma	22	Si	Si
APR Pullancon pozo38m	38	Si	Si
APR Pullancon pozo28m	28	Si	Si
APR Santa Marta pozo18m	18	Si	Si
APR Santa Marta pozo30m	30	No	Si
APR La Canela	12	Si	Si
APR Palquico	14	No	No
APR Artificio Pedegua	35	Si	Si

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3 – continua de la página anterior

Pozos	Profundidad [m]	2020	2060
APR Paradero4	40	No	Si
APR Quebrada Honda Servicio	30	No	Si
APR Pedegua	60	No	No
APR El Frances San ramon	50	No	Si
APR Teresita de Santa Julia pozo46m	46	Si	Si
APR Teresita de Santa Julia pozo10m	10	Si	Si
APR Padre Hurtado	60	Si	Si
APR Manuel Montt	60	Si	Si
APR La Canelilla	60	Si	Si
APR Hierro Viejo pozo	60	Si	Si
APR Hierro Viejo noria	30	No	Si
APR La Nipa noria1	12	Si	Si
APR La Nipa noria2	12	Si	Si
APR Villa Alberto Callejas	60	Si	Si
APU Petorca	70	Si	Si
APR Quebrada Castro	10	No	No
APR Los Comunes	10	No	No
APU Chicolco	30	No	No
APR Valle Los Olmos	10	Si	Si
APR Calle larga	80	No	No
APR El Sobrante	15	No	No

Fuente: Elaboración propia

La proyección MIROC y los datos históricos son graficados juntos, con el objetivo de visualizar el quiebre de pendiente entre ambas líneas de datos. Esto indica un descenso más suave en los niveles del acuífero. Un ejemplo, es en la “APR Los Comunes” (Figura 5.12) quien no sólo muestra la recuperación en el cambio de pendiente, sino que también el funcionamiento intermitente del pozo (Figura 5.12).

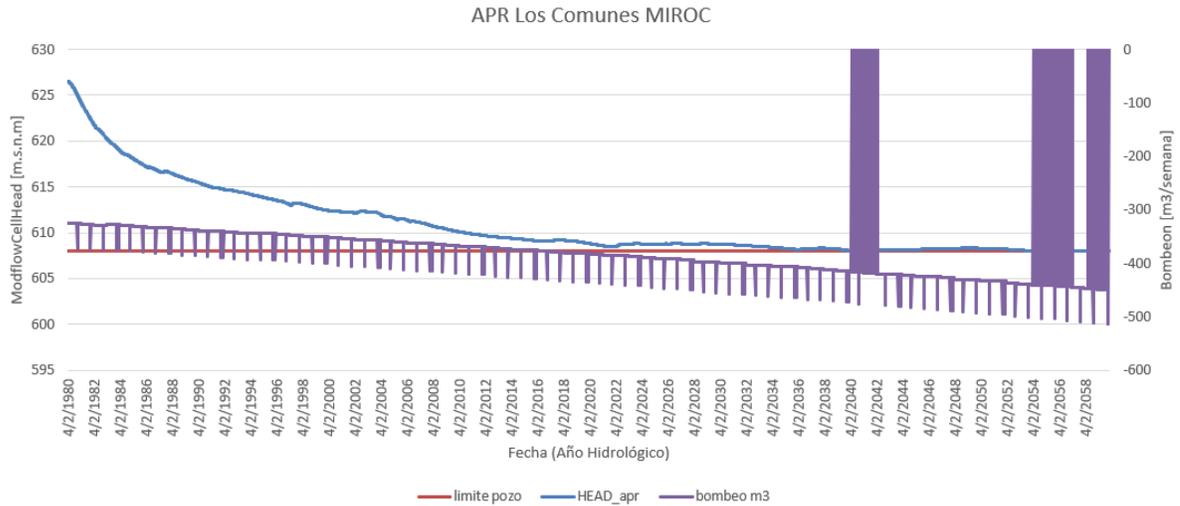


Figura 5.12: Proyección MIROC. Los Comunes. Niveles del acuífero, bombeo y límite del pozo (*Fuente: Elaboración propia*)

Entre 2020 y 2060, no se bombearon 84,315,511 [m³] de las APRs (Tabla 5.4). A comparación del período histórico, lo supera por un amplio margen debido a:

- Los pozos colgados en el período anterior continúan colgados, pero no el aumento de demanda. El patrón de bombeo en incremento constante en función de la demanda se mantiene, por lo que aumentan las extracciones hipotéticas no bombeadas en la proyección.
- Otros pozos de gran envergadura, como “Santa Marta” o “Hierro Viejo”, se cuelgan y elevan el bombeo proyectado.

Tabla 5.4: Bombeo hipotético con profundidad de los pozos idéntica al espesor del acuífero. Proyección MIROC 2020-2060.

APRs	Bombeo [m³]
APR CalleLarga	-
APR Pedernal	-
APR El Sobrante	-
APR Valle Los Olmos	3,652,155
APR Hierro Viejo	5,628,000
APR La Canelilla	347,190
APR La Nipa	30,440,745
APR Los Comunes	63,168
APR Manuel Montt	2,356,925
APR Quebrada de Castro	-
APR Sor Teresita de Santa Julia	2,128,994
APR Villa Alberto Callejas	2,982,480
APU Chincolco	-
APU Petorca	14,274,538
APR Las Palmas	-
APR Palquico	-
APR Artificio de Pedegua	7,675,250
APR Artificio Paradero4	1,306,349
APR El Frances San Ramon	1,207,310
APR La Canela	2,184,483
APR Padre Hurtado	1,054,845
APR Parcelas San Manuel La Victoria	-
APR Pedegua	-
APR Pullancon	3,119,256
APR Quebrada Honda Artificio	137,112
APR San Lorenzo Casas Viejas	122,946
APR Santa Marta	2,765,975
APR Trapiche Longotoma	2,867,790
Suma	84,315,511

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6

Conclusión

La incorporación de la profundidad de las captaciones en WEAP al modelo desarrollado por el PÉGH DGA, 2020, implicó realizar un diagnóstico al mismo. Desde leer el informe principal, los anexos y sus fuentes hasta tener conocimiento de las bases del modelo acoplado; las características físicas con que describía la cuenca, el clima y sus recursos hídricos. El conjunto de estas acciones, permitieron entender los componentes y el funcionamiento interno del acople WEAP-MODFLOW.

En función de ello, se identificó la carencia de información respecto a las captaciones, en particular de su profundidad y cómo afectaba a los niveles del acuífero. Con el objetivo de mejorar el modelo, se realiza la incorporación de bombeo en función de la profundidad de las captaciones en WEAP, verificación de los resultados con rutinas de Python y evaluar sus consecuencias en el sistema.

Los efectos observados producto de la modificación fueron la aparición de pozos colgados, la recuperación del acuífero y su descenso sostenido. De ello se desprende que las captaciones colgadas están concentradas en los SHAC 194 y 195, es decir, la parte central de la cuenca con menor disponibilidad hídrica. El período 1980-2018 presenta un descenso en los niveles (más suave los últimos años) y la proyección MIROC para 2040-2060 pronostica su estabilización, más no el cese del descenso del acuífero.

En síntesis, incluir esta modificación es posible en los modelos de acople WEAP-MODFLOW y reproduce más fielmente la dinámica entre un acuífero y sus extracciones. Útil tanto para simular mejor el período histórico y/o proyectar escenarios futuros.

Bibliografía

- Niswonger, Richard G, Sorab Panday y Motomu Ibaraki (2011). «MODFLOW-NWT, a Newton formulation for MODFLOW-2005». En: *US Geological Survey Techniques and Methods* 6.A37, pág. 44.
- Watanabe, S. et al. (2011). «MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments». En: *Geoscientific Model Development* 4.4, págs. 845-872. DOI: [10.5194/gmd-4-845-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011). URL: <https://gmd.copernicus.org/articles/4/845/2011/>.
- DGA (2014). *Modelación hidrogeológica de los acuíferos de Ligua y Petorca: informe final*. Inf. téc. Realizado por: Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores Ltda. DOH.
- Henríquez, Cristián, Nicolle Aspee y Jorge Quense (2016). «Zonas de catástrofe por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgo climático». En: *Revista de Geografía Norte Grande* 63, págs. 27-44.
- Sanhueza Herrera, Miguel et al. (2016). «Estudio básico Diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca: informe final.» En.
- SIT-RURAL (2016). «Región de Valparaíso, provincia de Petorca, Comuna de Petroca, Recursos Naturales y Proyectos». En: URL: <http://www.sitrural.cl/>.
- DGA (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional*. SIT N° 417. Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.
- Panez A. Faúndez R., Mansilla C. (2017). «Politización de la crisis hídrica en Chile. Análisis del conflicto por el agua en la provincia de Petorca». En: *Agua y territorio = Water and Landscape* 10. ISSN 2340-8472, págs. 131-148.
- MINAGRI (2018). *Informe APR Petorca*. Inf. téc. Comisión público-privada.
- DGA (2019). *Desarrollo de herramienta para el análisis de gestión en el marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos*. SIT N°445. Realizado por: DICTUC S.A. & SEI. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación.
- INE (2019). «División Político Administrativa y Censal, Región de Valparaíso. Departamento de Geografía». En: URL: <https://bibliotecadigital.indh.cl/bitstream/handle/123456789/774/mision-petorca-2018.pdf?sequence=7&isAllowed=y>.
- DGA (2020). *Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las cuencas Ligua, Petorca y Quilimarí*. SIT N°458. Realizado por: UTP Plataforma de investigación en ecohidrología y ecohidráulica limitada ECOHYD y Universidad de Valparaíso UV. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Dirección Regional de Aguas - Región de Valparaíso.
- MOP (2005). N°743. Por medio del cual se expide el Ministerio de Obras Públicas. 30 de Diciembre.
- Jack Sieber, David Purkey (2015). *WEAP. Water Evaluation And Planning System. User Guide*. Stockholm Environment Institute. U.S. Cente.

ANEXOS

Anexo A

Modelo Superficial para acople

La cuenca del río Petorca y la Ligua está dividida en 20 y 23 zonas respectivamente, de forma que cada una es descrita por tener los siguientes elementos (DGA, 2020):

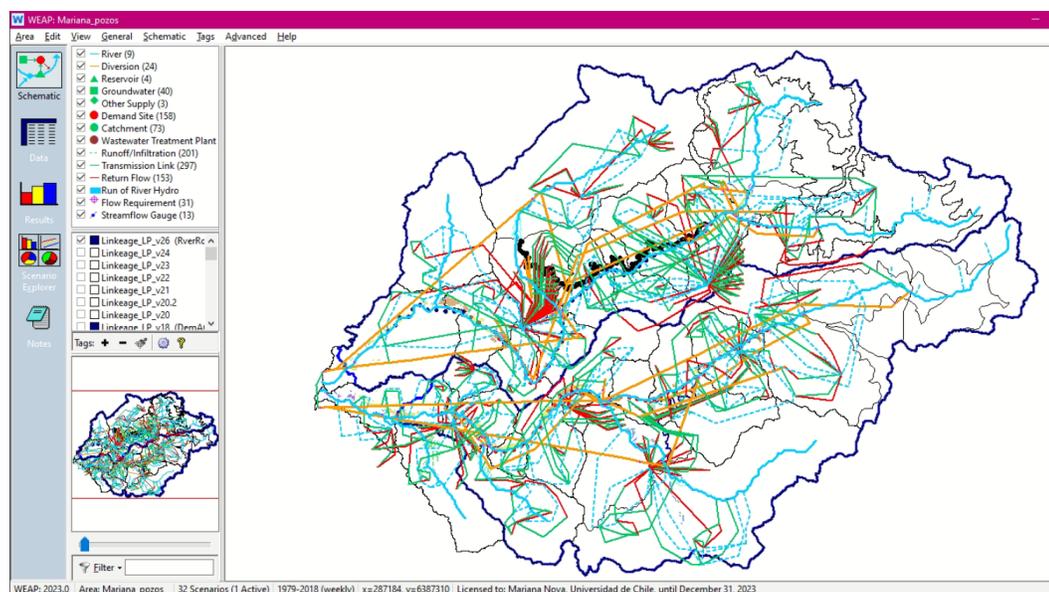


Figura A.1: Esquemático de las cuencas Ligua-Petorca. (Fuente:Elaboración propia)

- Un nodo principal, el *catchment*, los círculos verdes, en donde se genera la hidrología natural (parte de la escorrentía superficial) en zonas geográficas de modelación *Subcuenca_Lxx_MF* y/o *Subcuenca_Lxx_lad* y los procesos agrícolas (riego, recarga e ineficiencias del mismo) *Agricola_Lxx* y *Agricola_Pxx*.

A partir ellos se entrega agua a los ríos y acuíferos, por escorrentía o por infiltración. Se simbolizan con flechas celestes.

- Un nodo de acuífero (cuadros verdes). Los sectores que están sobre el acuífero son *Acuífero_Lxx_MF* y *Acuífero_Pxx_MF*. Los que no están sobre este son *Acuífero_Lxx_lad* y *Acuífero_Pxx_lad*
- Un nodo de demanda (círculos rojos) para representar el consumo de agua potable y de minería.
 - *DemOTRAS_Lxx_APR/APU/Minería*
 - *DemOTRAS_Pxx_APR/APU/Minería*
- Un nodo de demanda ficticio (círculos rojos) para representar los flujos de un acuífero a las demandas agrícolas.
 - *DemAGRO_Lxx_fict*
 - *DemAGRO_Pxx_fict*
- Un nodo de demanda ficticio (círculos rojos) para representar los flujos de un acuífero de ladera al acuífero principal de la cuenca.
 - *ladMF_Lxx_fict*
 - *ladMF_Pxx_fict*
- Un elemento de derivación (flecha naranja), que representa un canal
- Un elemento de río (líneas azules), que simboliza el curso principal del río.
- Un elemento de conducción (flechas verdes):
 - Entre un nodo de *catchment* y el de acuífero
 - Entre un nodo de *catchment* y el río
 - Desde un nodo de demanda ficticia al nodo agrícola
 - Desde un nodo de río al nodo agrícola
 - Desde la derivación al *catchment*
- Un elemento de flujo de retorno (flechas rojas)
 - Desde el nodo de demanda ficticia hacia el acuífero
 - Desde el nodo de demanda de APR/APU/Minería hacia el acuífero
 - Desde el nodo de demanda ficticia de infiltración hacia el acuífero principal MF
- Un elemento de esorrentía/infiltración (flecha punteada azul)
 - Desde el *catchment* hacia el acuífero
 - Desde el *catchment* hacia el río

Anexo B

WEAP

Para el caso que haya más de 1 pozo en la APR/APU, Los dos primeros pasos anteriores son análogos, pero se hace x veces, uno para cada pozo.

$$\begin{aligned} & \text{ModflowCellHead}(1, 174, 99) > \\ & (103 - \text{Key}\backslash\text{ProfundidadPozos}\backslash\text{APRPullancon}\backslash\text{Pozo1}) \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{aligned} & \text{ModflowCellHead}(1, 172, 100) > \\ & (107 - \text{Key}\backslash\text{ProfundidadPozos}\backslash\text{APRPullancon}\backslash\text{Pozo2}) \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Si las 2 expresiones son verdaderas, entrega *True*. De otra forma es *False*.

$$\text{And}(\text{Eq}(\text{B.1}), \text{Eq}(\text{B.2})) \quad (\text{B.3})$$

Si alguna de las dos expresiones se cumple, el valor es *True*. En caso contrario, es *False*.

$$\text{Or}(\text{Eq}(\text{B.1}), \text{Eq}(\text{B.2})) \quad (\text{B.4})$$

Si el condicional *If* recibe un *True*, entrega 0.04187 (el mayor volumen máximo impuesto por el MOP entre los pozos MINAGRI, 2018). De otra forma se corta el bombeo (valor cero).

$$\text{If}(\text{Eq}(\text{B.4}), 0.04187, 0) \quad (\text{B.5})$$

La ecuación final B.6 si recibe *True* como resultado de la Ecuación B.3, entrega 0.08374 (la suma de los volúmenes máximos de los 2 pozos impuestos por el MOP). De otra forma ingresa en la Ecuación B.5. La conducción se apaga cuando ambos pozos dejan de bombear.

$$\text{If}(\text{Eq}(\text{B.3}), 0.08374, \text{Eq}(\text{B.5})) \quad (\text{B.6})$$

Anexo C

Códigos

C.1. Python

Código C.1: Importe de librerías (*Fuente: Adaptado de PEGH de las cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019*)

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 from pandas.core.common import flatten
4 from pandas import DataFrame, melt
5 import math
6 import os
7 from os import walk
8 from matplotlib import cm
9 import matplotlib.pyplot as plt
10 from pylab import rcParams
11 import time
12 import csv
13 from itertools import zip_longest
14 import flopy.utils as fpu
15 from flopy.utils.zonbud import ZoneBudget
16 from flopy.utils.zonbud import read_zbarray
17 import flopy.utils.binaryfile as bf
18 from datetime import datetime as dt
19 from datetime import timedelta
20 import glob
21 from random import randint
22 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
23 import statistics
24 import itertools
25 from itertools import chain
26 from itertools import groupby
27 import subprocess
```

Código C.2: Rutas y ZoneBudget (*Fuente: Adaptado de PEGH de las cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019*)

```
1 start_time = time.time()
```

```

2 current_path = os.path.abspath(os.getcwd()) # Es la ruta del WEAP Area a analizar
3 nombre_carpeta_results = 'RESULTADOS_apr' # Carpeta donde se encuentran los
    ↪ resultados. Esta sujeta a versiones.
4 nombre_carpeta_MF = 'MODFLOW_NWT_apr' # Carpeta donde se encuentran
    ↪ los resultados MODFLOW. Esta sujeta a versiones.
5 prj = 'con_dren_sin_aisladas_NWT' # Nombre de archivos MODFLOW. Esta
    ↪ sujeto a versiones.
6 diferencia_TS = 0 # Cantidad de tiempo desfasado hacia atras en
    ↪ relacion a enero. Ej: Si simulacion empieza en abril, son 39 semanas.
7
8 zonas = ['Rio_Pedernal',
9          'Estero_Las_Palmas',
10         'Rio_del_Sobrante',
11         'Rio_Petorca_Poniente',
12         'Estero_Alicahue',
13         'Rio_La_Ligua_Oriente',
14         'Rio_La_Ligua_Cabildo',
15         'Rio_La_Ligua_Pueblo',
16         'Estero_Los_Angeles',
17         'Rio_Petorca_Oriente',
18         'Rio_La_Ligua_Costa',
19         'Estero_Patagua']
20
21 # Alias Zone Budget Zone
22 alias = {1:'Rio_Pedernal',
23          2:'Estero_Las_Palmas',
24          3:'Rio_del_Sobrante',
25          4:'Rio_Petorca_Poniente',
26          5:'Estero_Alicahue',
27          6:'Rio_La_Ligua_Oriente',
28          7:'Rio_La_Ligua_Cabildo',
29          8:'Rio_La_Ligua_Pueblo',
30          9:'Estero_Los_Angeles',
31          10:'Rio_Petorca_Oriente',
32          11:'Rio_La_Ligua_Costa',
33          12:'Estero_Patagua'}
34
35 cell_A = 200*200 # Tamaño celda, info que se debe extraer manualmente de la grilla
    ↪ MODFLOW
36 rows = 350 # Cantidad de filas, info que se puede extraer de la grilla MODFLOW, el .
    ↪ dis, .zbr o el .zb_zones
37 columns = 476 # Cantidad de columnas, info que se puede extraer de la grilla
    ↪ MODFLOW, el .dis, .zbr o el .zb_zones

```

Código C.3: Creación de carpeta (Fuente: Adaptado de PEGH de las cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

```

1 Pth_Out_CS1 = current_path + '\\'+nombre_carpeta_results+'\\CS1' # path del Out file
2
3 try:
4     os.mkdir(Pth_Out_CS1)

```

```

5 except:
6     pass

```

Código C.4: Balance (Fuente: Adaptado de PEGH de las cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

```

1 def get_scenari(temp):
2     """
3     Selecciona el escenario de los resultados.
4
5     Parametters
6     -----
7     temp :   Str
8             Nombre del archivo de resultado
9
10    Returns
11    -----
12    retorno : Str
13             Escenario asociado al archivo resultado
14
15    """
16    retorno = temp[-15:-12]
17
18    return retorno
19
20
21
22 def get_date(temp):
23     """
24     Selecciona el espacio temporal de los resultados.
25
26     Parametters
27     -----
28     temp :           Str
29             Nombre del archivo de resultado
30
31    Returns
32    -----
33    temp_les_offset : Date
34                     Fecha asociada al archivo resultado. Se resta una diferencia ya que los
35                     ↪ nombres del acople pueden diferir
36                     de los reales si no se comienza en enero
37
38    """
39    temp1 = '1_' + temp[-11:-4]
40    temp2 = dt.strptime(temp1, '%w_%Y_%W')
41    temp_les_offset = temp2 - pd.DateOffset(weeks=diferencia_TS)
42
43    return temp_les_offset
44

```

```

45 def get_TS(directorio, zone_analysis, output):
46     """
47     Agrupa los archivos resultado segun SHAC
48
49     Parametters
50     -----
51     directorio :   Str
52                   Ruta donde se encuentran los resultados (balance)
53     zone_analysis : Str
54                   Nombre del SHAC
55     output : -
56                   Variable silenciosa que recopila informacion de resultados segun SHAC-
57                   ↪ Escenario-Timestep
58     """
59
60     new_df = pd.DataFrame()
61     os.chdir(directorio) #cambia el path del directorio
62     for file in glob.glob('!MF!con_dren_sin_aisladas_NWT_*.csv'):# busca archivos .csv
63         df = pd.read_csv(file)#lee el archivo
64         melted = df.melt(id_vars=['name'], value_vars=zones)#busca la palabra name
65         wk2 = melted.loc[melted['variable'] == zone_analysis]#setting un valor en el
66         ↪ DataFrame
67         wk2 = wk2.drop(['variable'], axis=1)#me borra una fila
68         wk2 = wk2.T#trasponer el DataFrame
69         wk2['name_file'] = file#cambia el nombre de una celda del DataFrame
70         new_df = pd.concat([wk2, new_df])#concatena en un nuevo DataFrame
71         #os.remove(file)
72     new_df.columns = new_df.iloc[0]#le cambia el nombre a las etiquetas de las columnas
73     ↪ por la fila cero
74     new_df = new_df.drop(['name'], axis=0)#borra una columna llamada name
75     column_list = list(new_df.columns.values)#lista de los headers de las columnas de
76     ↪ new_df
77     last_name = column_list[-1]#cambia el nombre a la última columna
78     new_df.rename(columns={last_name: 'file'}, inplace=True)#renombrar la columna del df
79     ↪ en el original
80     new_df['Scenario'] = new_df.apply(lambda x: get_scenari(x['file']), axis=1)#aplica la
81     ↪ funcion get_scenari en cada file dentro de una fila
82     new_df['date'] = new_df.apply(lambda x: get_date(x['file']), axis=1)
83     new_df.set_index('date', inplace=True)
84     new_df = new_df.sort_values(['date'],ascending=True)# pone la fecha como indice
85     new_df.drop(['file'], axis=1, inplace=True)
86
87     dir_out = output + '/' + zone_analysis + '.csv'
88     new_df.to_csv(dir_out)
89
90
91 def get_full_balance(path_balance, path_ZB, dir_exit):
92     """
93     Realiza el balance a partir de los resultados del acople (.hed)
94
95     Parametters
96     -----

```

```

91 path_balance : Str
92     Ruta donde se encuentran los resultados (balance)
93 path_ZB :     Str
94     Ruta donde se encuentra el archivo de zonas .zbr
95 dir_exit :   Str
96     Ruta donde se guardan los csv generados a partir del balance
97 """
98
99 zonefile = read_zbarray(Pth_ZB) # Archivo con zonas
100 new_df = pd.DataFrame()
101 # Leer binarios de la carpeta WEAP
102 for file in os.listdir(path_balance):
103     filename = os.fsdecode(file)
104     if filename.endswith(".ccf"):
105         t = path_balance + '/' + filename[:-4] + '.csv'
106         zb = ZoneBudget(path_balance + '\\\ ' + filename, zonefile, aliases=aliases)
107         zb.to_csv(t)
108         print(t)
109         break
110
111 # for zone in zones:
112 #     get_TS(path_balance, zone, dir_exit)
113
114 # filelist = [ f for f in os.listdir(path_balance) if f.endswith(".csv") ]
115 # for f in filelist:
116 #     os.remove(os.path.join(path_balance, f))
117
118
119 get_full_balance(path_balance, Pth_ZB, path_balance)

```

Código C.5: Preparación de la data (Fuente: Adaptado de PEGH de las cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019)

```

1 Shac = len(zones)
2
3 # Leer archivo .DIS para extraer info de TOP y BOTTOM
4
5 f = open(Pth_DIS,'r')
6 DIS_T = []
7 DIS_B = []
8
9 count = 0
10
11 for line in f:
12     if 'TOP' in line or 'BOTM' in line:
13         count += 1
14
15     if '#' in line:
16         continue
17
18     if count == 1:

```

```

19     line = line[1:]
20     line = line.split(' ')
21
22     if line == ['']:
23         continue
24     else:
25         line = [float(x) for x in line]
26         DIS_T.append(line)
27
28     if count == 2:
29         line = line[1:]
30         line = line.split(' ')
31
32         if line == ['']:
33             continue
34         else:
35             line = [float(x) for x in line]
36             DIS_B.append(line)
37
38     if 'NSTEP' in line:
39         break
40
41 f.close
42
43 # Arreglo de info row,columns
44
45 DIS_B = np.array(list(chain(*DIS_B)))
46 DIS_B.resize((rows, columns), refcheck=False)
47 DIS_T = np.array(list(chain(*DIS_T)))
48 DIS_T.resize((rows, columns), refcheck=False)
49
50 # Leer archivo .ZBR para extraer info de ZoneBudgets
51
52 data = []
53
54 for line in lines[2:]:
55     data.append([int(v) for v in line.split()])
56
57
58 Zones = np.array(list(chain(*data)))
59 Zones.resize((rows,columns), refcheck=False)
60
61 # Extraer Ss partir de .upw y .zon
62
63
64
65
66 Values_Ss = []
67 lines_to_read = list(range(33612, 50411))
68
69
70 for position, line in enumerate(f):

```

```

71     if position in lines_to_read:
72         line = line[2:]
73         line = line.split(' ')
74         line = [float(x) for x in line]
75         Values_Ss.append(line)
76
77 f.close
78
79 Ss_mod = np.array(list(chain(*Values_Ss)))
80 Ss_mod.resize((rows,columns), refcheck=False)
81
82
83
84 Values_Sy = []
85 lines_to_read = list(range(50413, 67212))
86
87
88 for position, line in enumerate(f):
89     if position in lines_to_read:
90         line = line[2:]
91         line = line.split(' ')
92         line = [float(x) for x in line]
93         Values_Sy.append(line)
94
95 f.close
96
97 Sy_mod = np.array(list(chain(*Values_Sy)))
98 Sy_mod.resize((rows,columns), refcheck=False)

```

Código C.6: Extracción de archivos HEAD en .csv (Fuente: *Elaboración propia*)

```

1  # Leer archivo .hed o .cbb para extraer flujo en las celdas y volúmenes
2  filelisthed = glob.glob(path_balance+'\\*.hed')
3  key_hed = lambda s: s.rsplit('_')[-3]    # Con esto selecciono el escenario con el cual
      ↪ generaré grupos
4
5  Scenario = [] #Genero una lista con todos los escenarios posibles
6
7  for i in range(len(filelisthed)-1):
8      if key_hed(filelisthed[i]) == 'S00' or key_hed(filelisthed[i]) == 'S01': #Descarto corrida 0
          ↪ y año base
9          pass
10     elif key_hed(filelisthed[i]) in Scenario:
11         continue
12     else:
13         Scenario.append(key_hed(filelisthed[i]))
14
15 def find_indices(lst, condition):
16     """
17     Selecciona los índices(elementos) de la lista según una condición particular

```

```

18
19 Parametters
20 -----
21 lst : List
22     Lista de elementos
23
24 Returns
25 -----
26 retorno : List
27     Lista de indices que se asocian a elementos que cumplen una condicion
28
29 """
30 retorno = [x for x, elem in enumerate(lst) if condition(elem)]
31
32 return retorno
33
34
35 #Guarda las series de volumenes segun shac en cada escenario, VOLSZB[escenario][shac]
36 VOLSZB = [[] for i in range(len(Scenario))]
37
38 #Son los archivos .hed agrupados
39 subHed = [[] for i in range(len(Scenario))]
40
41
42 for i in range(len(Scenario)):
43     # Selecciona los elementos (indices) que comparten escenario
44     index_listhed = find_indices(filelisthed, lambda s: s.rsplit('_')[-3]==Scenario[i])
45     subHed[i] = filelisthed[index_listhed[0]:index_listhed[len(index_listhed)-1]+1]
46
47 year = [[] for i in range(len(Scenario))]
48
49 for f in range(len(Scenario)):
50     volZB = [[] for i in range(Shac+1)]
51     HEAD = []
52     for file in subHed[f]:
53         filename = os.fsdecode(file)
54         hds = filename
55         sp = filename[-11:-4]
56         cut_ = sp.index("_")+1
57         year_ = int(sp[0:4])
58         week_ = int(sp[cut_:])
59         time_ = year_+round((week_-1)/52,3)
60         HedF = bf.HeadFile(hds, precision='single')
61         Hd = HedF.get_data(kstpkper=(0,0))
62         Hd = Hd[0]
63         Hd = np.where(Hd==-999., -999, Hd) #cero para el plot
64         Hd = np.where(Hd==-888., -888, Hd) #cero para el plot
65         HEAD.append(Hd)
66
67 contador=1
68 for matrix in HEAD:
69     MODFLOW_Cell_Head=pd.DataFrame(matrix)

```

```

70 MODFLOW_Cell_Head.to_csv(Pth_CS1+'/HEAD'+str(contador)+'.csv')
71 contador+=1

```

Código C.7: Niveles de pozos/noria por semana (*Fuente: Elaboración propia*)

```

1
2 start_time = time.time()
3 current_path = os.path.abspath(os.getcwd()) # Es la ruta del WEAP Area a analizar
4 nombre_carpeta_results = 'RESULTADOS_t'
5 read_aprs=pd.read_excel('aprs.xlsx')
6 head1=pd.read_csv('HEAD1.csv')
7
8 HEAD_hv=pd.DataFrame()
9
10 for file in glob.glob('HEAD*.csv'):
11     for fila in read_aprs.itertuples():
12         HEAD_hv.loc[int(file[4:-4]),fila.name]=pd.read_csv(file).iloc[fila.row-1,fila.column]
13
14 HEAD_hv.sort_index(inplace=True)
15
16 HEAD_hv.to_csv(current_path+'/H_orig'+'.csv')

```

Código C.8: Expotación de favoritos (*Fuente: Adaptado de PEGH de las cuencas La Ligua, Petorca y Quilimarí, 2019*)

```

1 root_folder_py = "C:/Users/Estudios/Desktop/Resultados"
2
3 weap_folder_py = "C:/Users/Estudios/Documents/WEAP Areas/_Backup"
4
5
6 #Iniciar API de weap
7 WEAP = win32com.client.Dispatch("WEAP.WEAPApplication")
8
9 #se define el area de trabajo
10 WEAP.activeArea = "Mariana_pozos_2023_07_14_13_58_14"
11
12 #se activa el escenario
13 #WEAP.ActiveScenario = 'Futuro Base MIROC'
14 WEAP.ActiveScenario = 'Reference'
15
16 #Periodo de modelo
17 WEAP.BaseYear = 1980
18 WEAP.EndYear = 2020
19
20 WEAP.Verbose = 4
21
22 root_folder_py = weap_folder_py + "\\Mariana_pozos_2023_07_14_13_58_14" # sin la
    ↪ licencia reqla
23
24 carpeta_output_results= "C:\\Users\\Estudios\\Desktop\\Resultados"

```

```

25
26
27 def Exporter(fav_name,favorite, key_assumption, route, a, b, c, d):
28     export_routnname = route + "\\\" + fav_name + \"_\" + str(key_assumption) + \".csv\" #
        ↪ Ruta de exportacion
29     WEAP.LoadFavorite(favorite) # Cargar el favorito
30     WEAP.ExportResults(export_routnname, a, b, c, d) # Exportar los resultados. Las
        ↪ variables a, b, c y d hacen referencia a variables de la función de WEAP.
31
32 def Exporter_Scenario(favorite, key_assumption, route, a, b, c, d):
33     export_routnname = route + "\\\" + str(favorite) + \"_\" + str(key_assumption) + \".csv\"
        ↪ # Ruta de exportacion
34     WEAP.LoadOverview(favorite) # Cargar el favorito
35     WEAP.ExportResults(export_routnname, a, b, c, d) # Exportar los resultados. Las
        ↪ variables a, b, c y d hacen referencia a variables de la función de WEAP.
36
37
38 def clean_up_str(data):
39     rep=data.replace('\\','_')
40     rep=rep.replace(' ','_')
41     return rep
42
43 a = 11 #WEAP.Scenarios.count
44
45 for sc in range(1,a,1):
46     scenario=WEAP.Scenarios[sc].name
47     WEAP.Scenarios[sc-1].ResultsShown = 'false'
48     WEAP.Scenarios[sc].ResultsShown = 'true'
49     #WEAP.Calculate()
50     for i in range(1, len(WEAP.Favorites), 1):
51         fav0=WEAP.Favorites[i].name
52         fav=fav0.split('\\')
53         # if "MODFLOW y Acuíferos" in fav0:
54         #     fav_name=str(WEAP.Favorites[i].name.split("\\")[len(WEAP.Favorites[i].name.
        ↪ split("\\))-1])
55         #     Exporter(fav_name,WEAP.Favorites[i].name, scenario, carpeta_output_results +
        ↪ "\\MODFLOW y Acuíferos" , True, True, True, True)
56         if "TODOS" in fav0:
57             fav_name=str(WEAP.Favorites[i].name.split("\\")[len(WEAP.Favorites[i].name.split
        ↪ ("\\))-1])
58             Exporter(fav_name,WEAP.Favorites[i].name, scenario, carpeta_output_results + "
        ↪ \\TODOS" , True, True, True, True)

```

C.2. VBA

Código C.9: VBA

```

1 Sub ConvertTable()
2 Dim Rng As Range
3 Dim cRng As Range

```

```

4 Dim rRng As Range
5 Dim xOutRng As Range
6 xTitleId = "KutoolsforExcel"
7 Set cRng = Application.InputBox("Select your Column labels", xTitleId, Type:=8)
8 Set rRng = Application.InputBox("Select Your Row Labels", xTitleId, Type:=8)
9 Set Rng = Application.InputBox("Select your data", xTitleId, Type:=8)
10 Set outRng = Application.InputBox("Out put to (single cell):", xTitleId, Type:=8)
11 Set xWs = Rng.Worksheet
12 k = 1
13 xColumns = rRng.Column
14 xRow = cRng.Row
15 For i = Rng.Rows(1).Row To Rng.Rows(1).Row + Rng.Rows.Count - 1
16     For j = Rng.Columns(1).Column To Rng.Columns(1).Column + Rng.Columns.Count - 1
17         outRng.Cells(k, 1) = xWs.Cells(i, xColumns)
18         outRng.Cells(k, 2) = xWs.Cells(xRow, j)
19         outRng.Cells(k, 3) = xWs.Cells(i, j)
20         k = k + 1
21     Next j
22 Next i
23 End Sub

```

Anexo D

Acuíferos

D.1. Período histórico

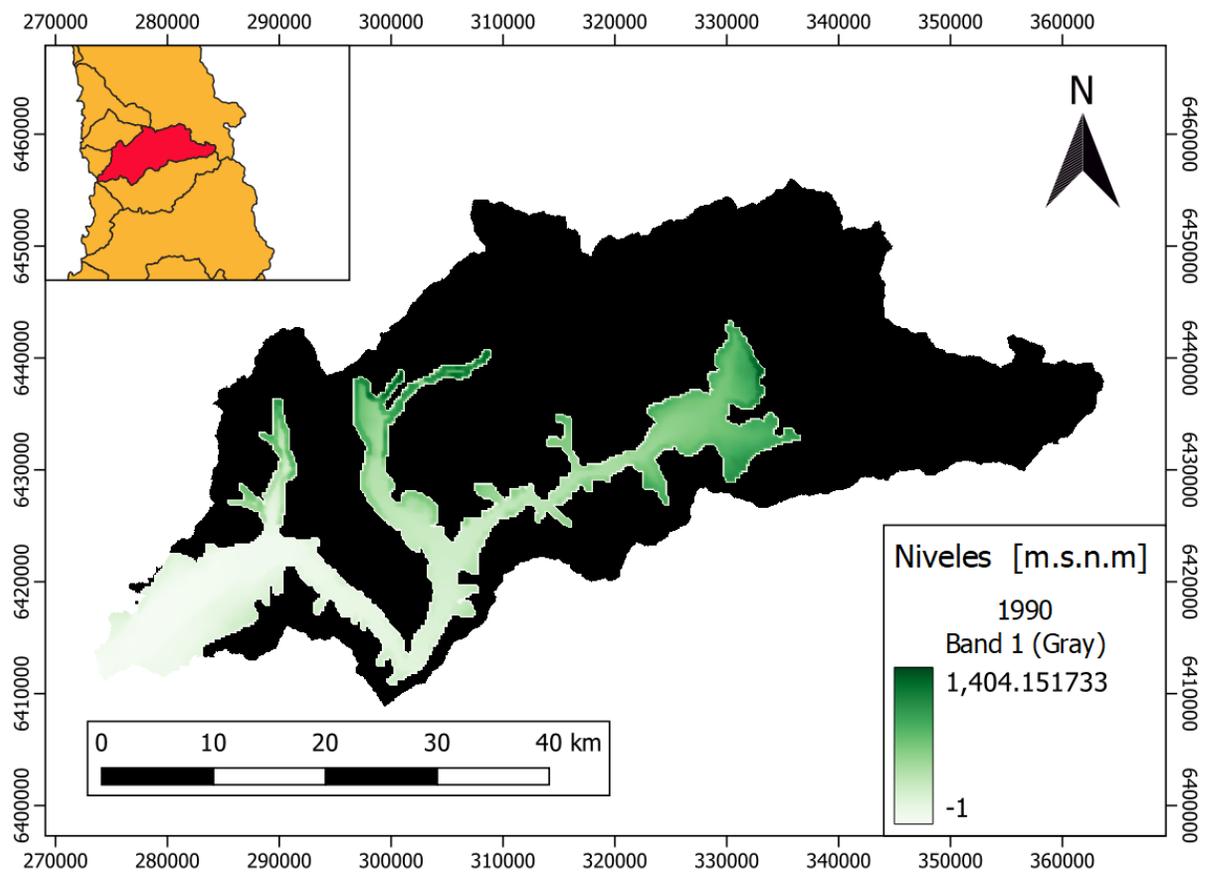


Figura D.1: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 1990
(Fuente: *Elaboración propia*)

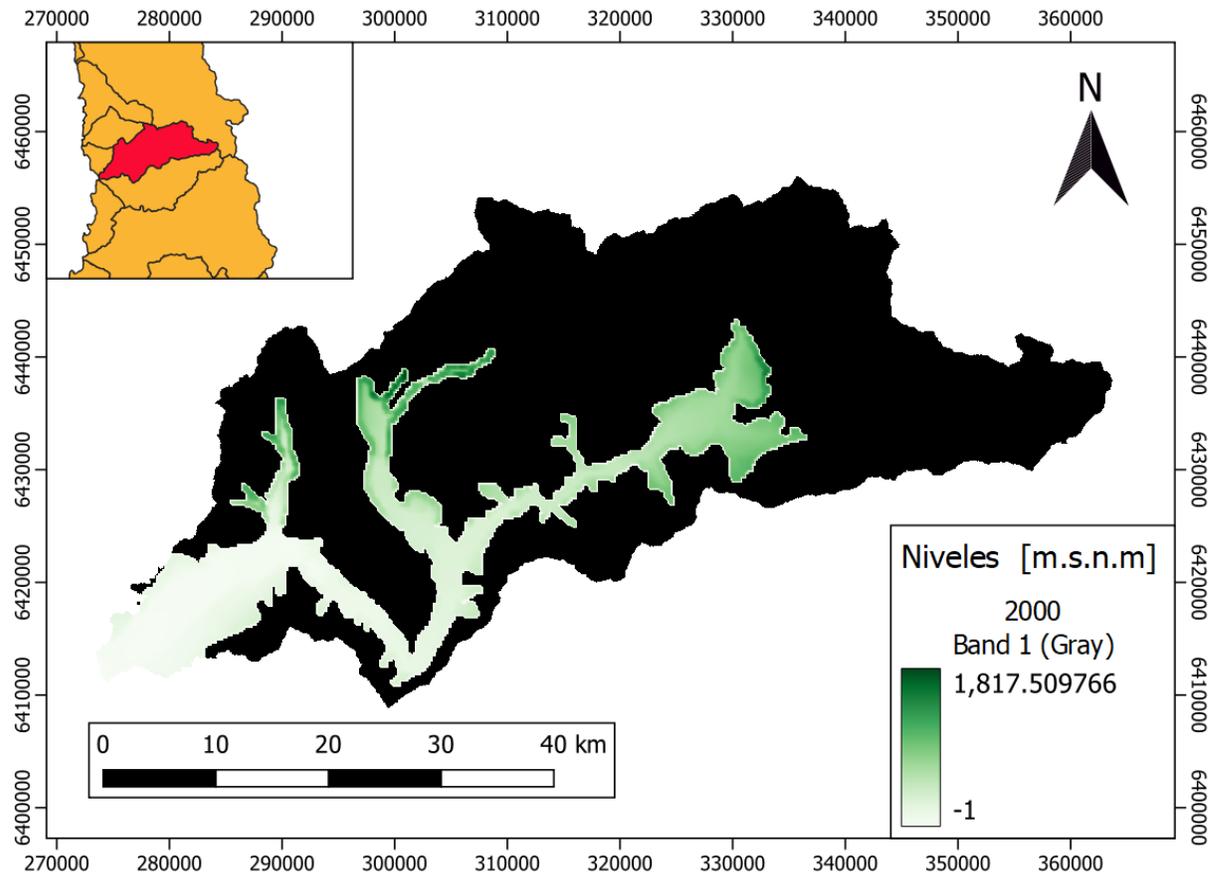


Figura D.2: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2000
(Fuente: Elaboración propia)

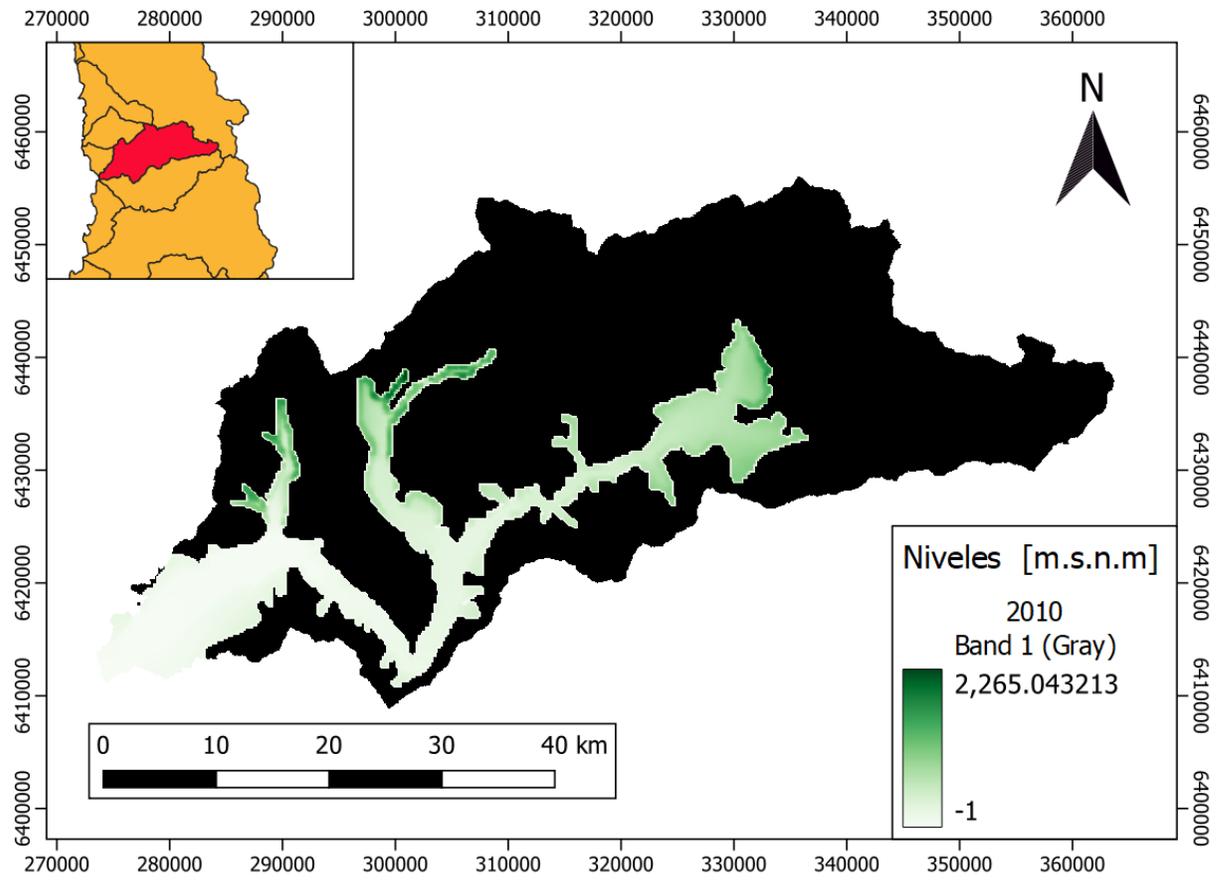


Figura D.3: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2010
(Fuente: Elaboración propia)

D.2. MIROC

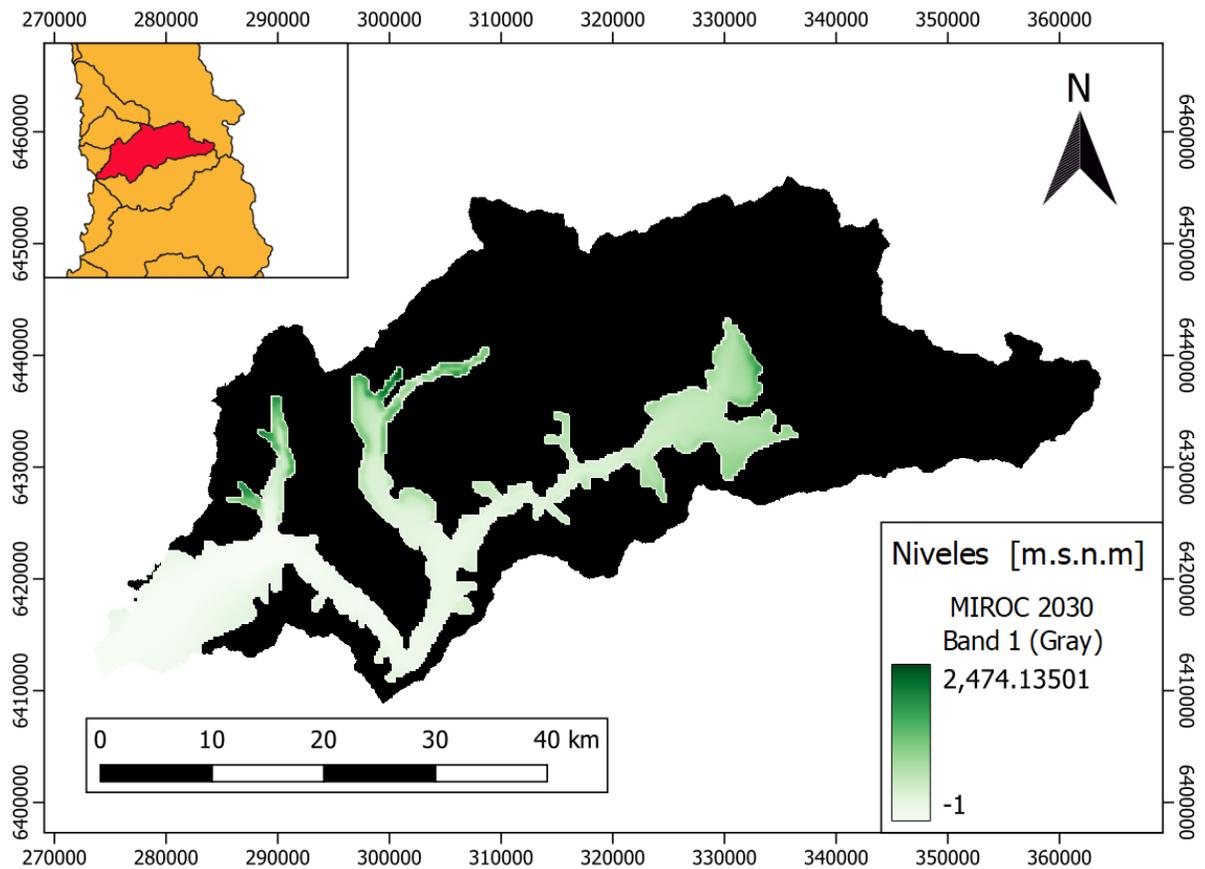


Figura D.4: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2030.
Proyección MIROC (Fuente: *Elaboración propia*)

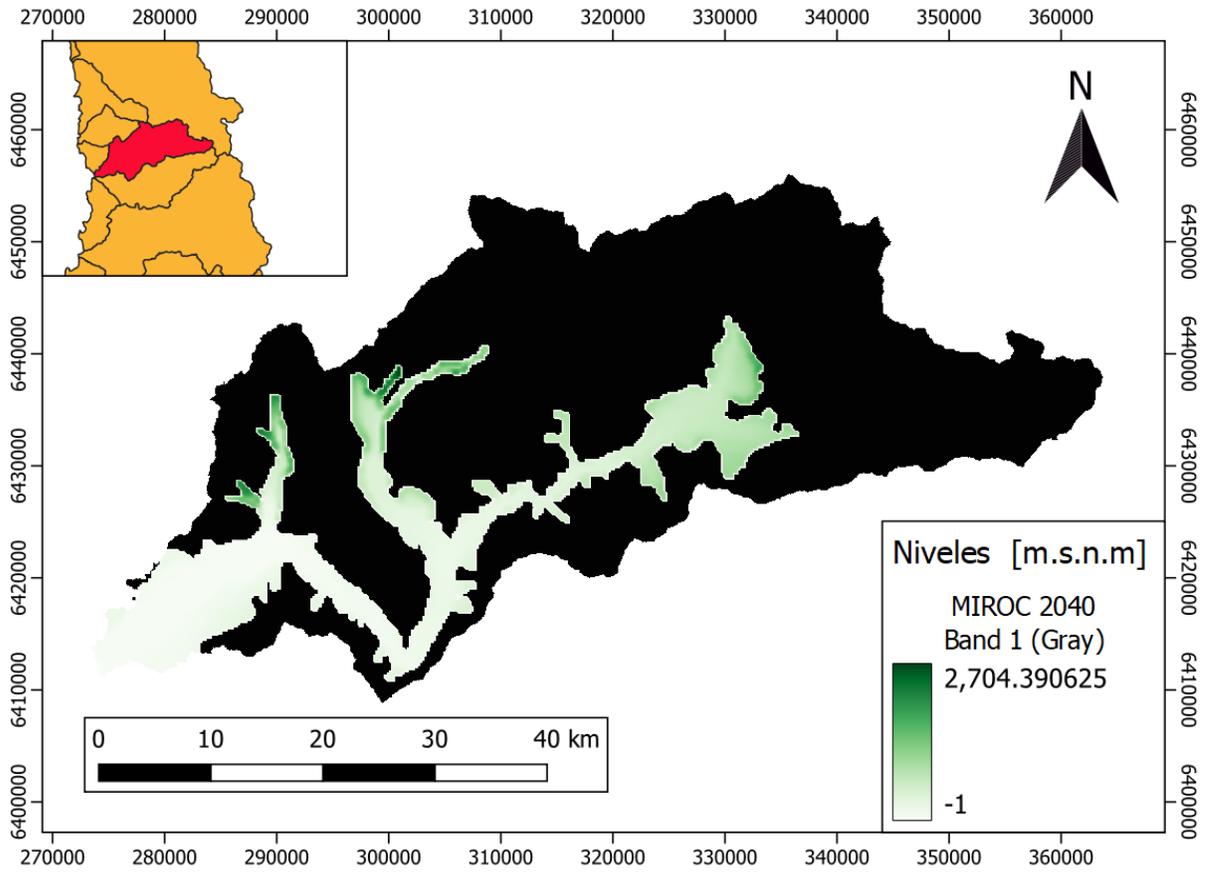


Figura D.5: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2040.
 Proyección MIROC (Fuente: *Elaboración propia*)

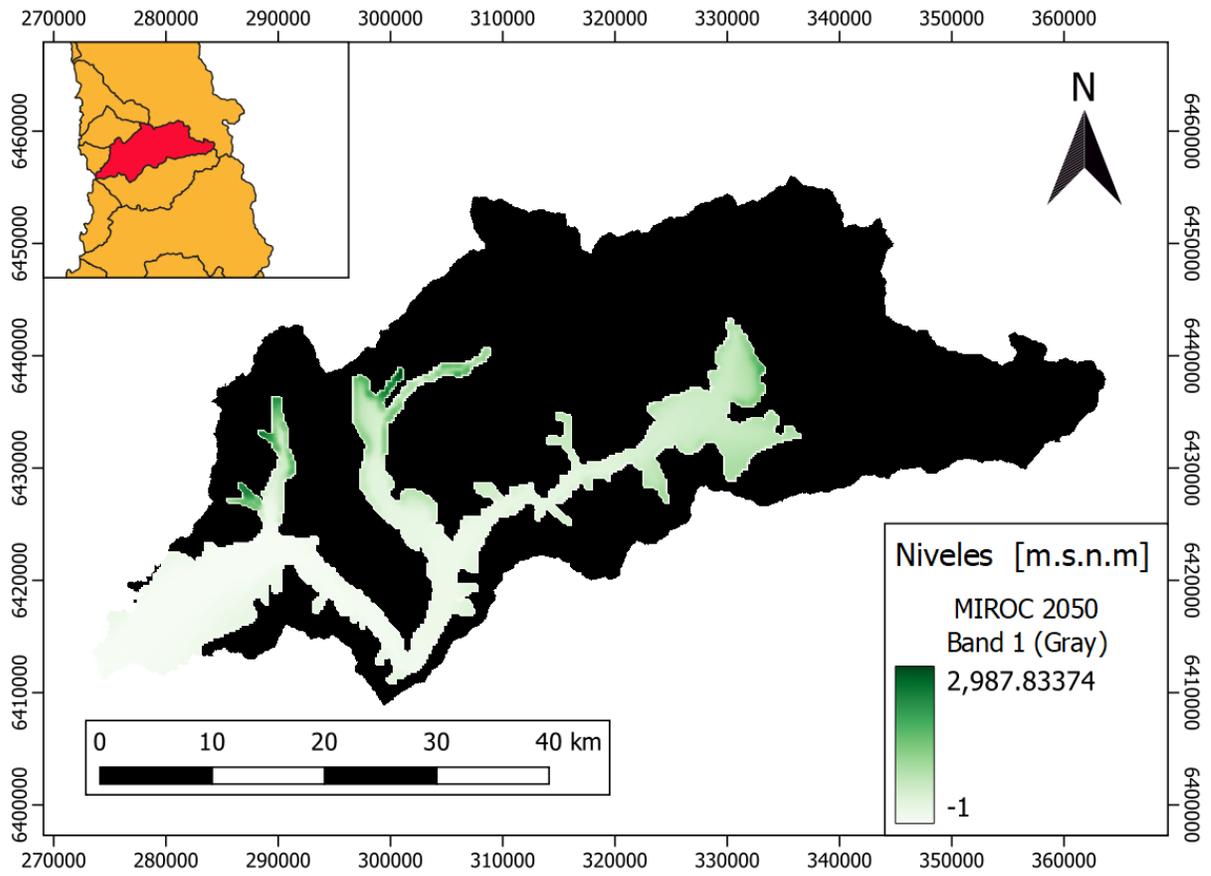


Figura D.6: Acuífero en la cuenca Río Petorca 1era semana de Abril, 2050.
 Proyección MIROC (Fuente: *Elaboración propia*)

Anexo E

Diferencia entre el acuífero y la topografía

E.1. Período histórico

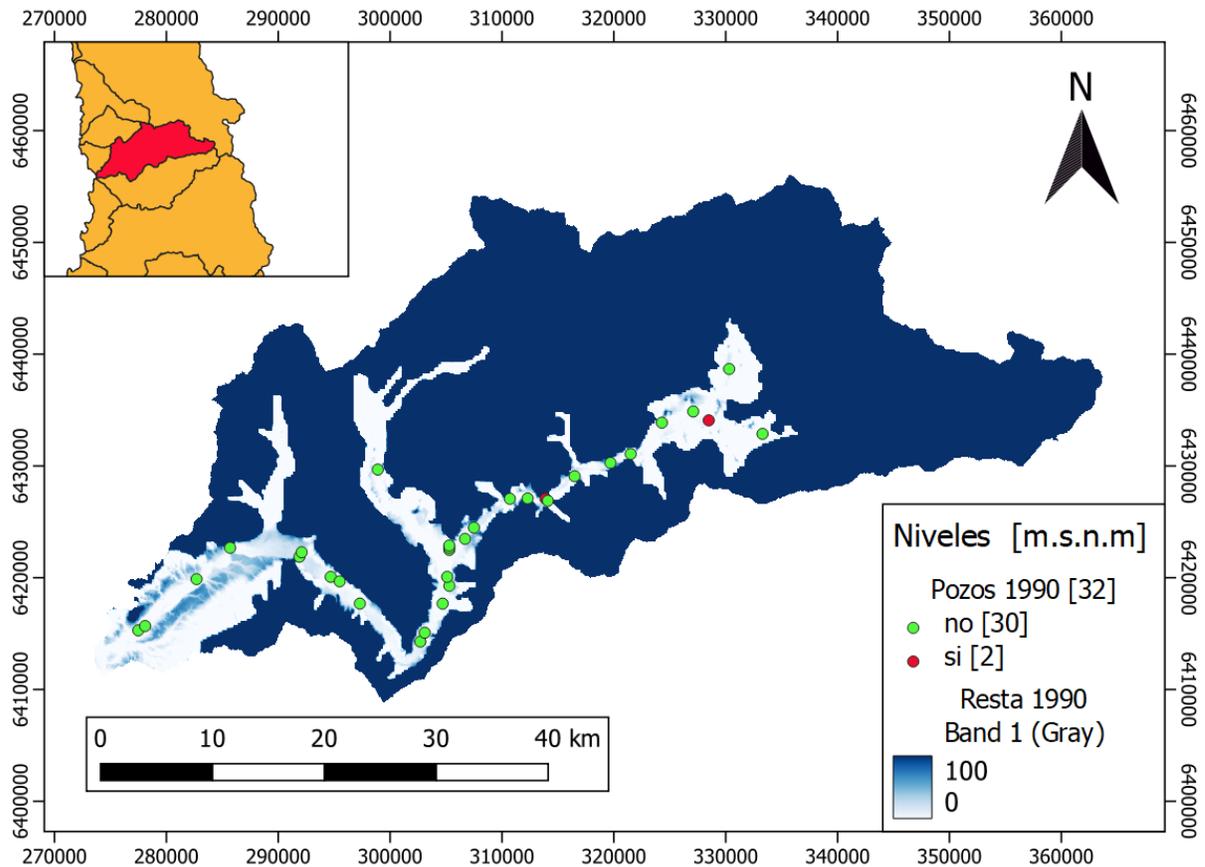


Figura E.1: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 1990 (*Fuente: Elaboración propia*)

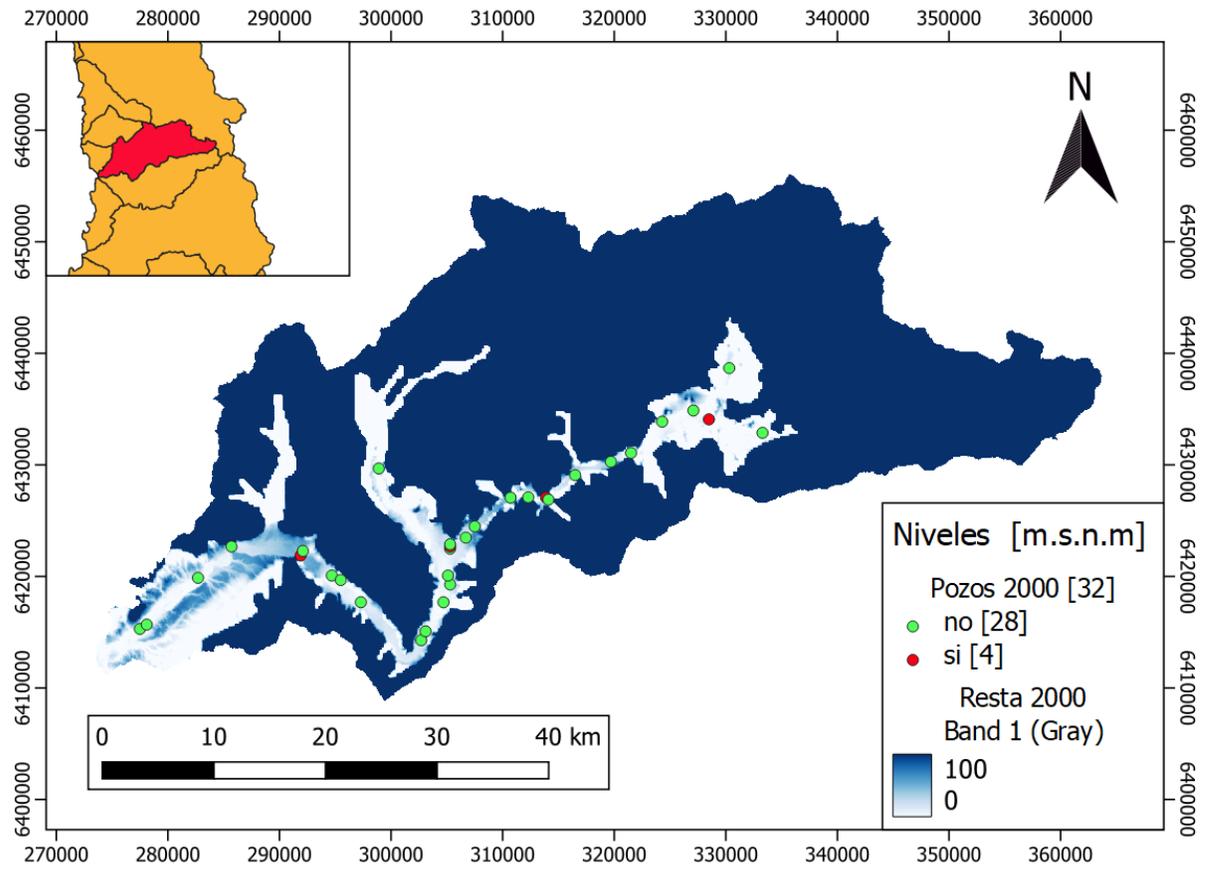


Figura E.2: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2000 (*Fuente: Elaboración propia*)

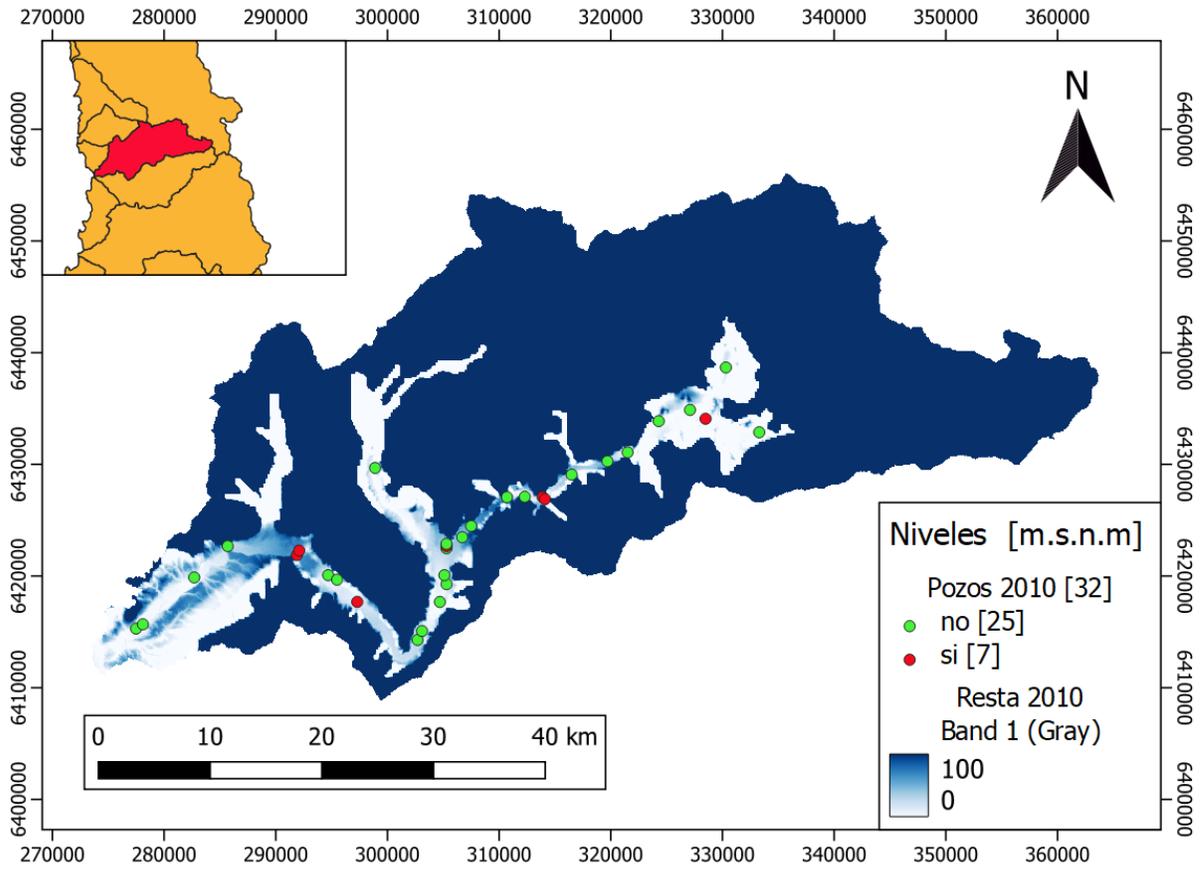


Figura E.3: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2010 (*Fuente: Elaboración propia*)

E.2. MIROC

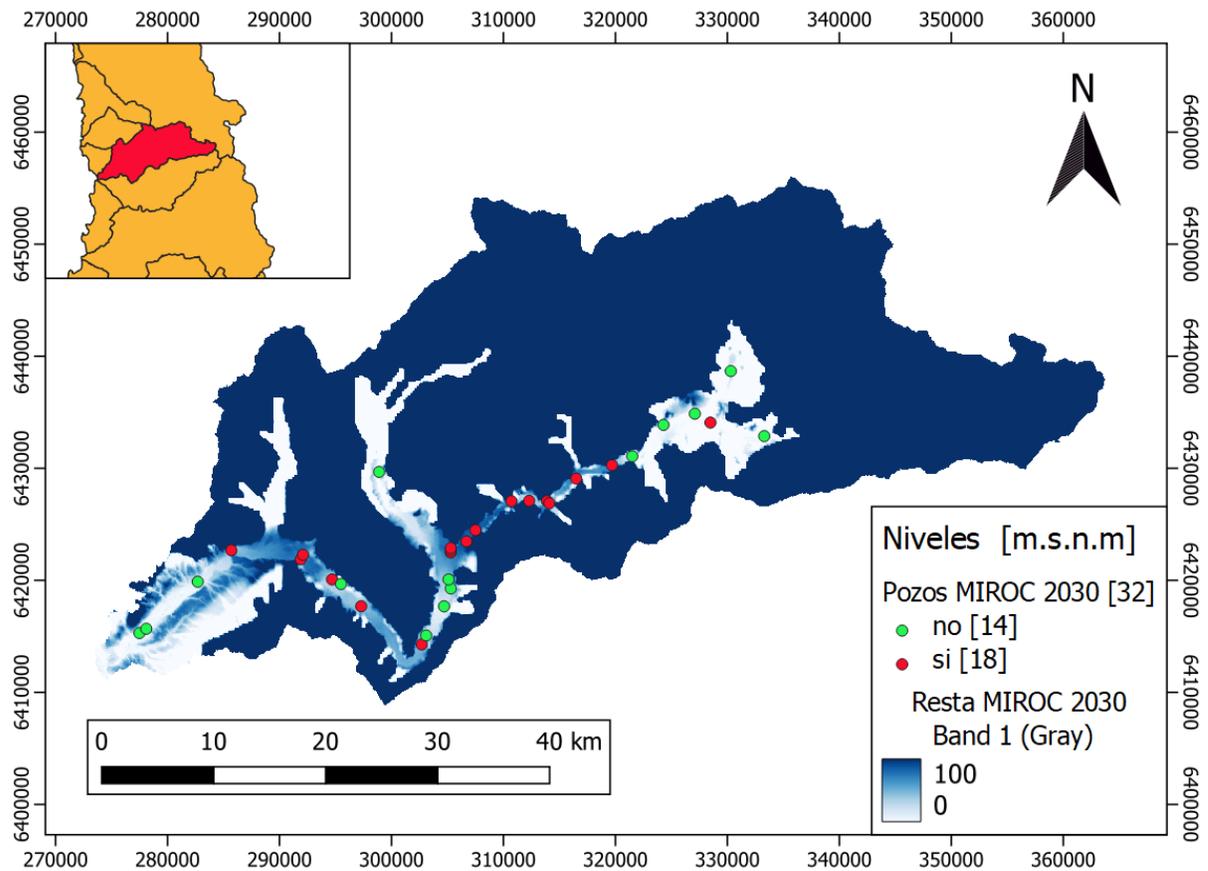


Figura E.4: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2030. Proyección MIROC (*Fuente: Elaboración propia*)

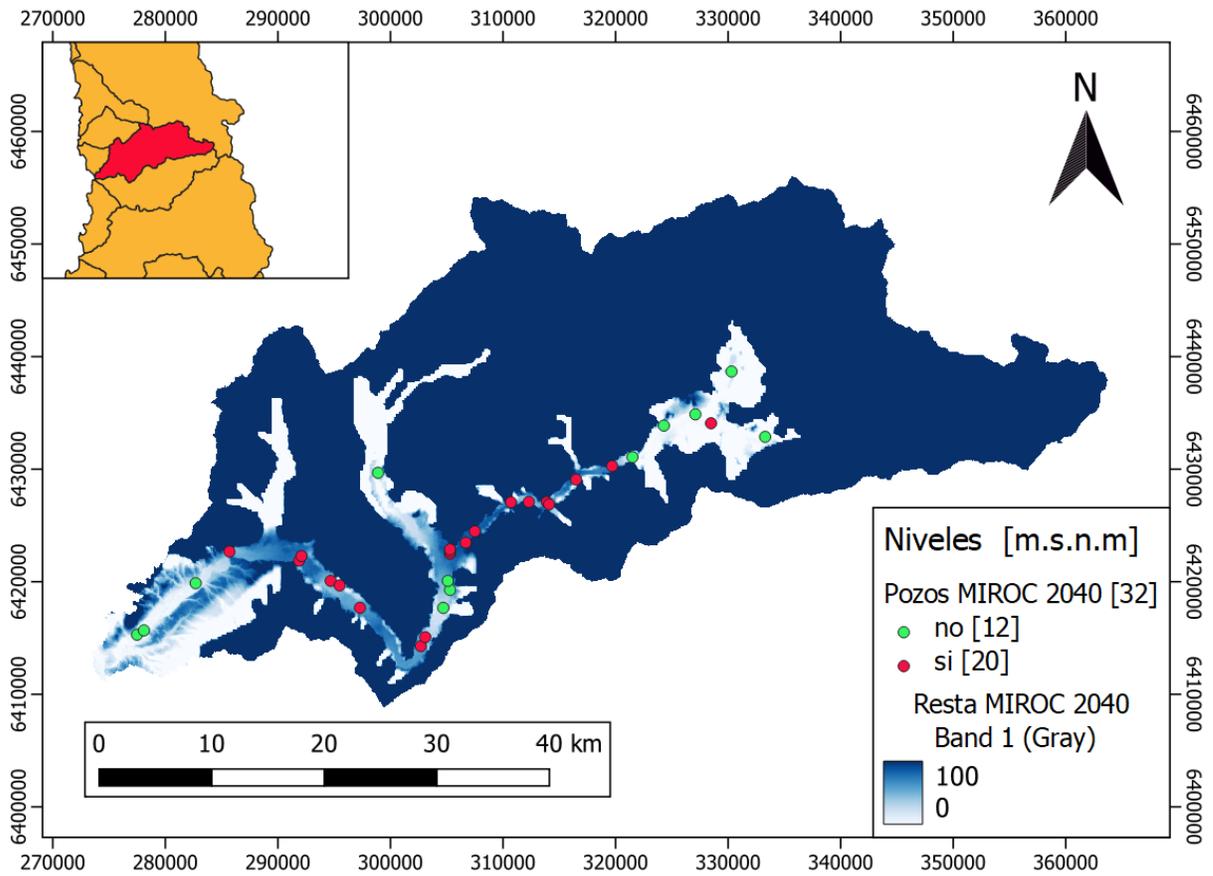


Figura E.5: Diferencia entre el acuífero y la topografía. 1era semana de Abril, 2040. Proyección MIROC (*Fuente: Elaboración propia*)

Anexo F

Niveles del acuífero, bombeo y límite de pozo

F.1. Período histórico

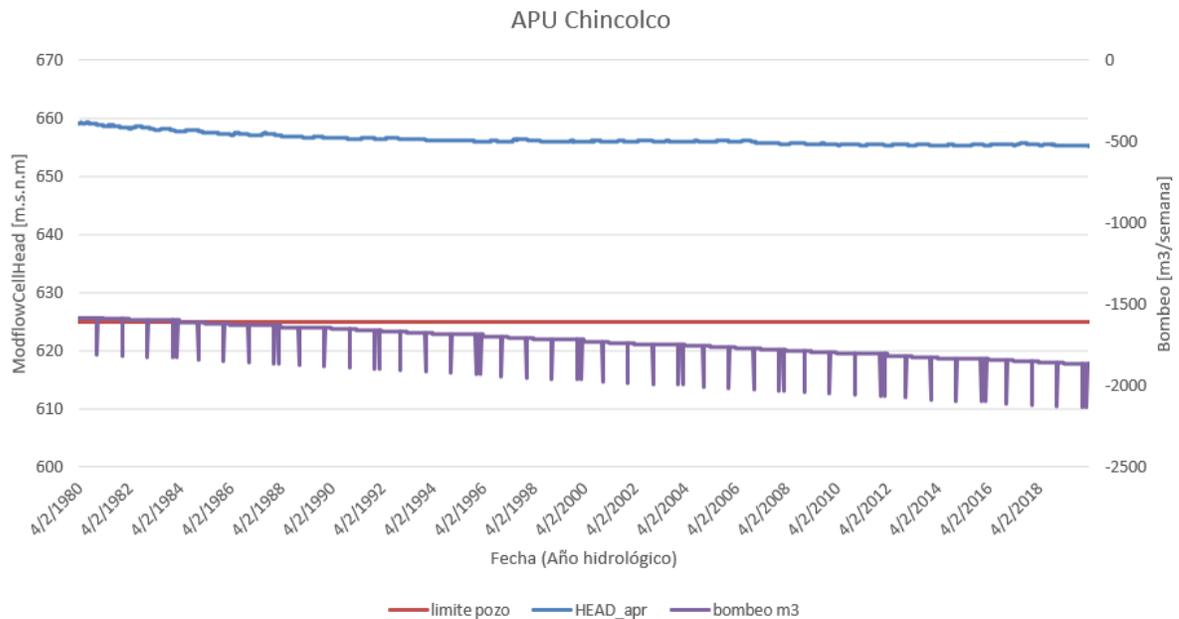


Figura F.1: APU Chincolco (*Fuente: Elaboración propia*)

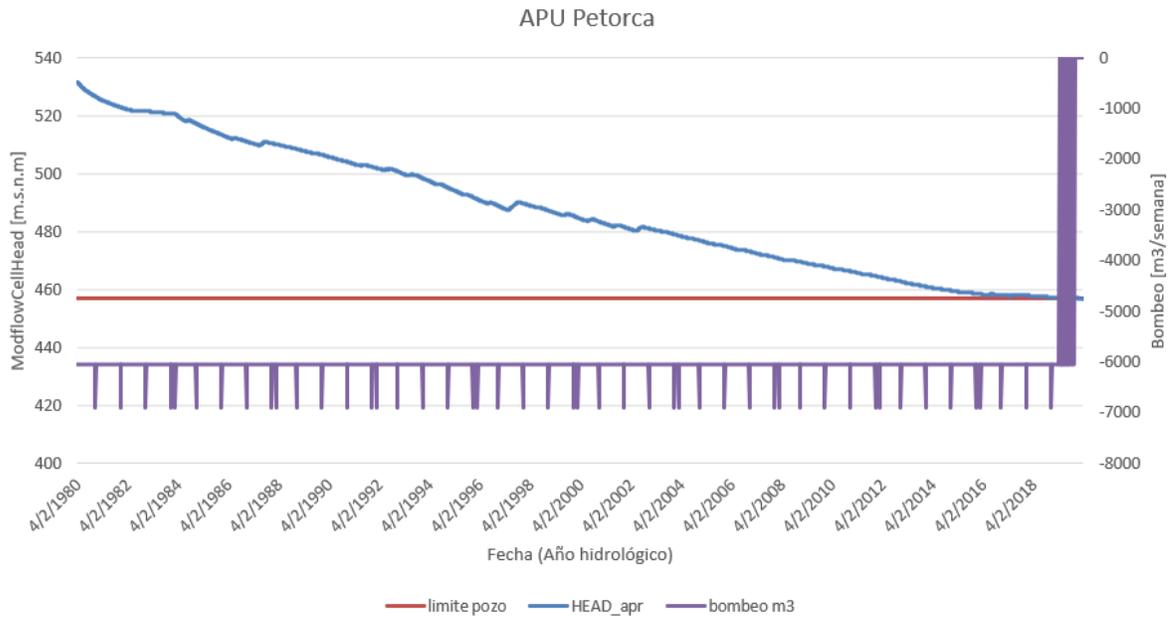


Figura F.2: APU Petorca (Fuente: Elaboración propia)

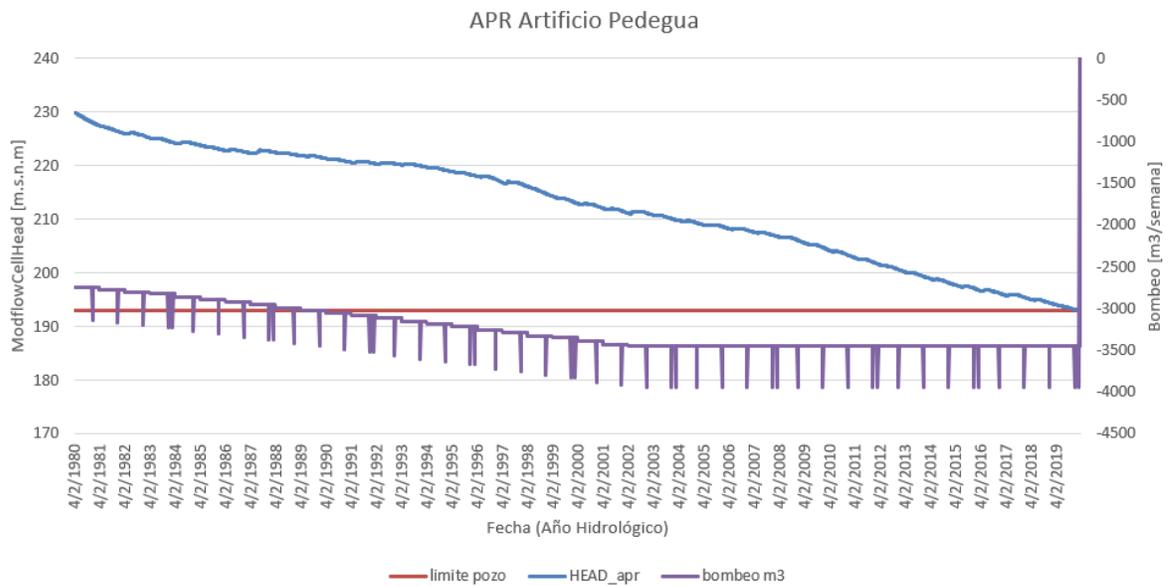


Figura F.3: Artificio Pedegua (Fuente: Elaboración propia)

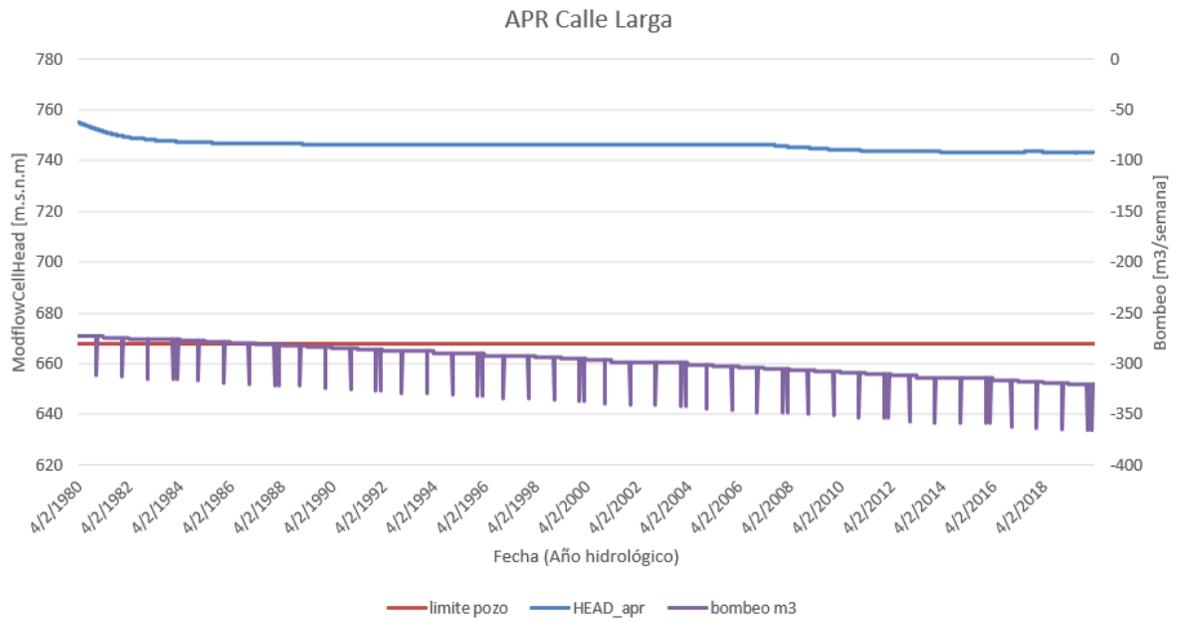


Figura F.4: Calle Larga (Fuente: Elaboración propia)

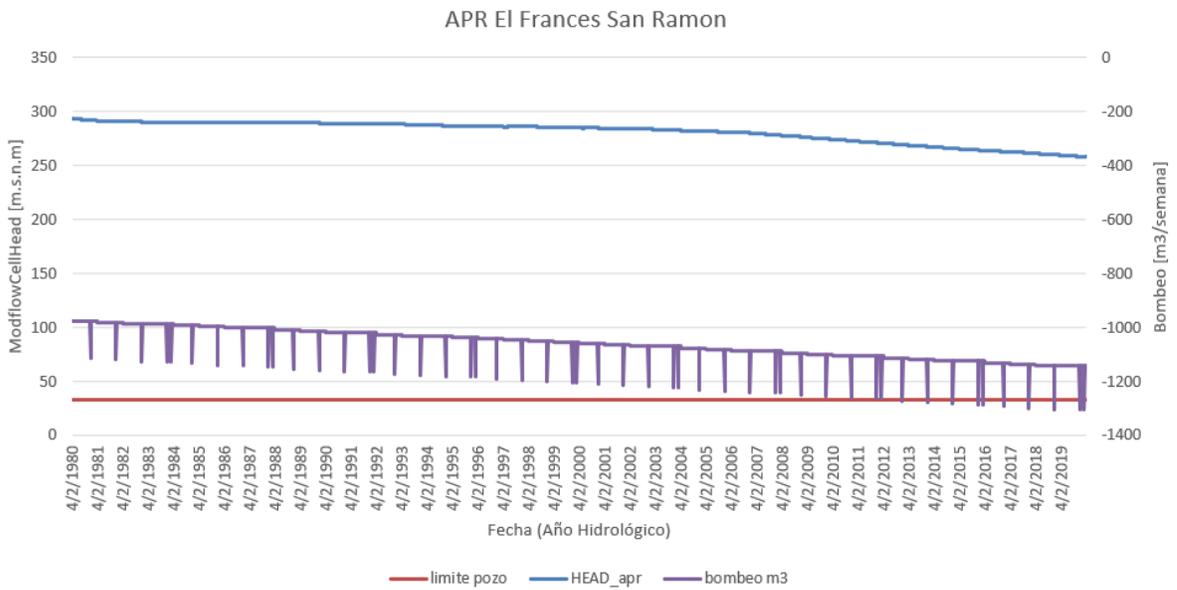


Figura F.5: El Francés San Ramón (Fuente: Elaboración propia)

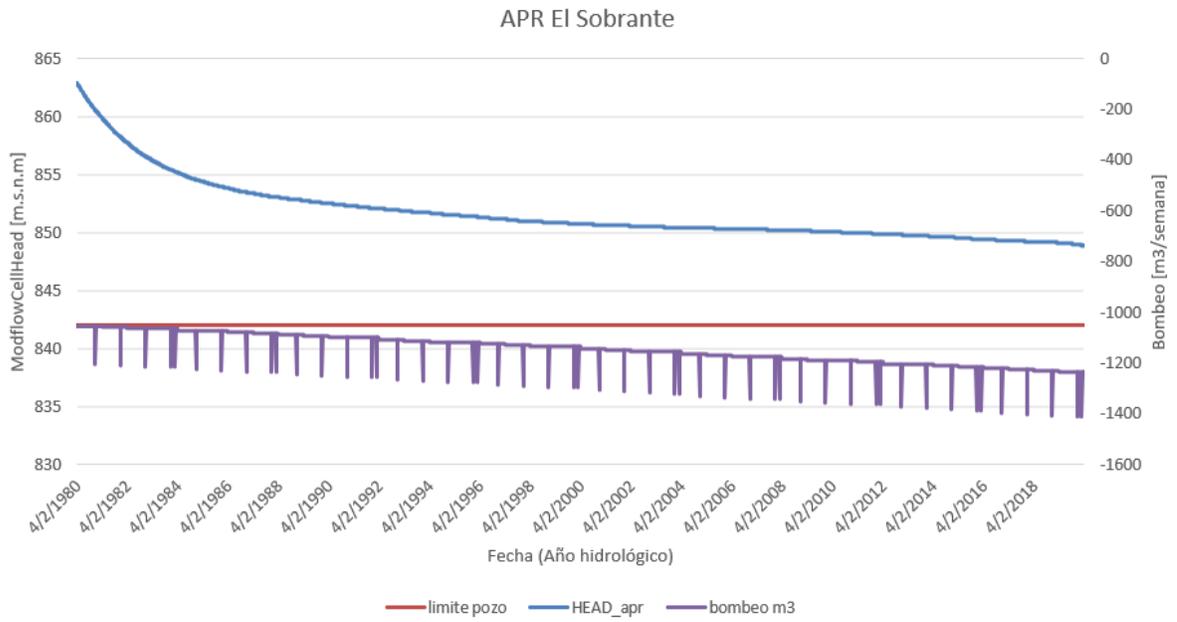


Figura F.6: El Sobrante (Fuente: Elaboración propia)

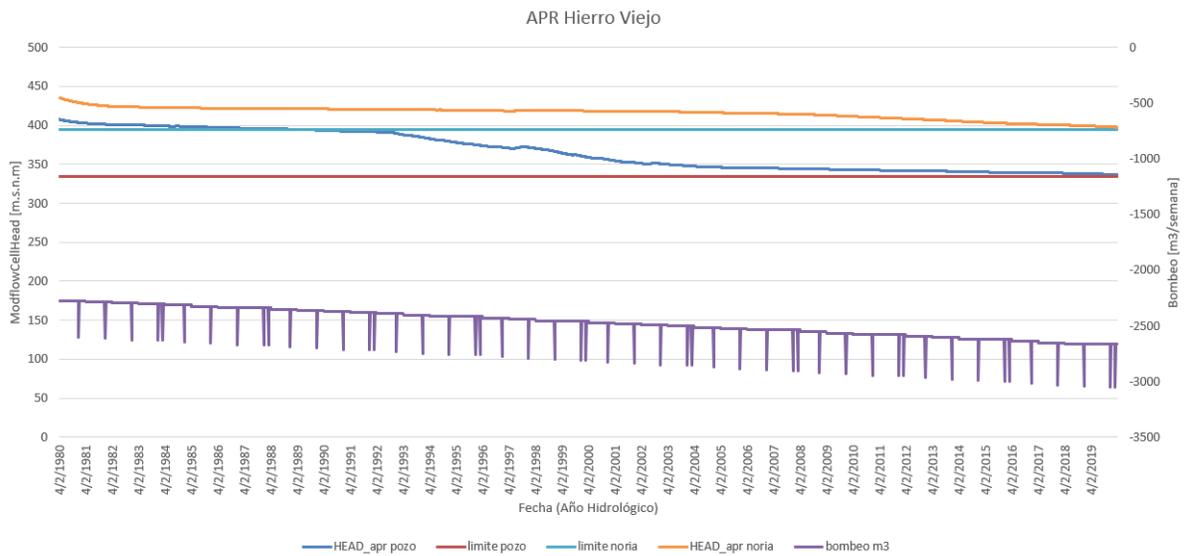


Figura F.7: Hierro Viejo (Fuente: Elaboración propia)

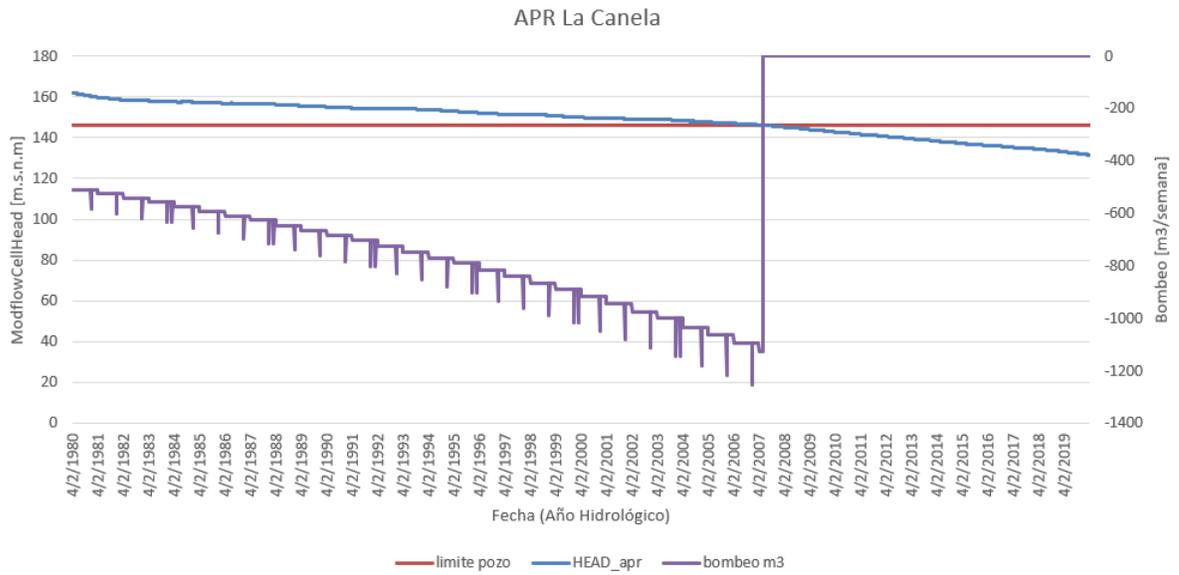


Figura F.8: La Canela (Fuente: Elaboración propia)

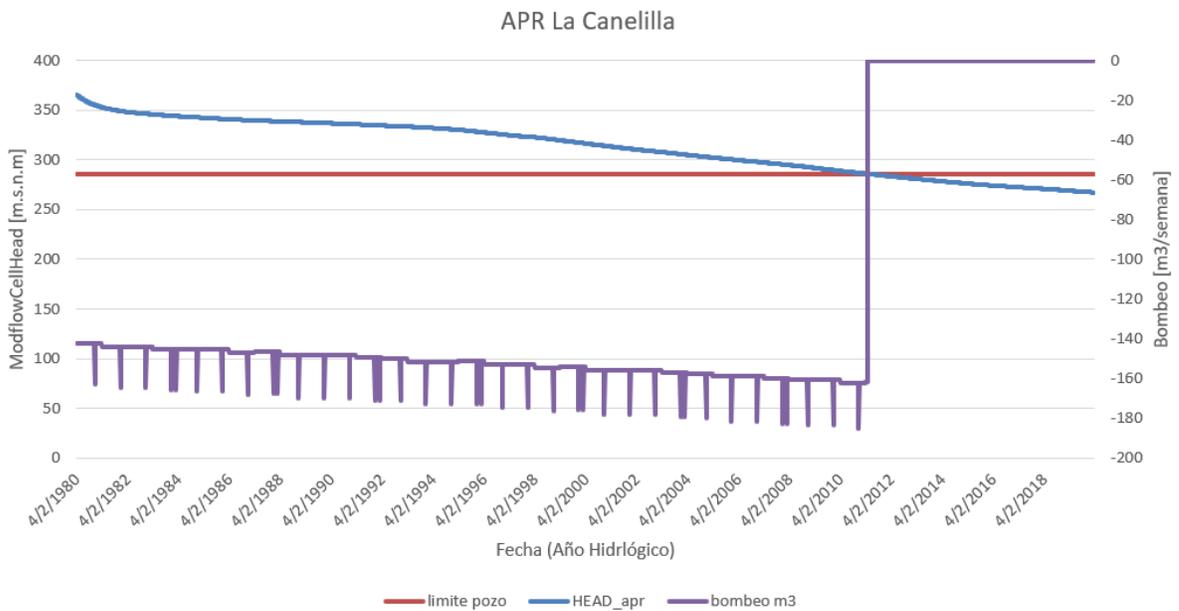


Figura F.9: La Canelilla (Fuente: Elaboración propia)

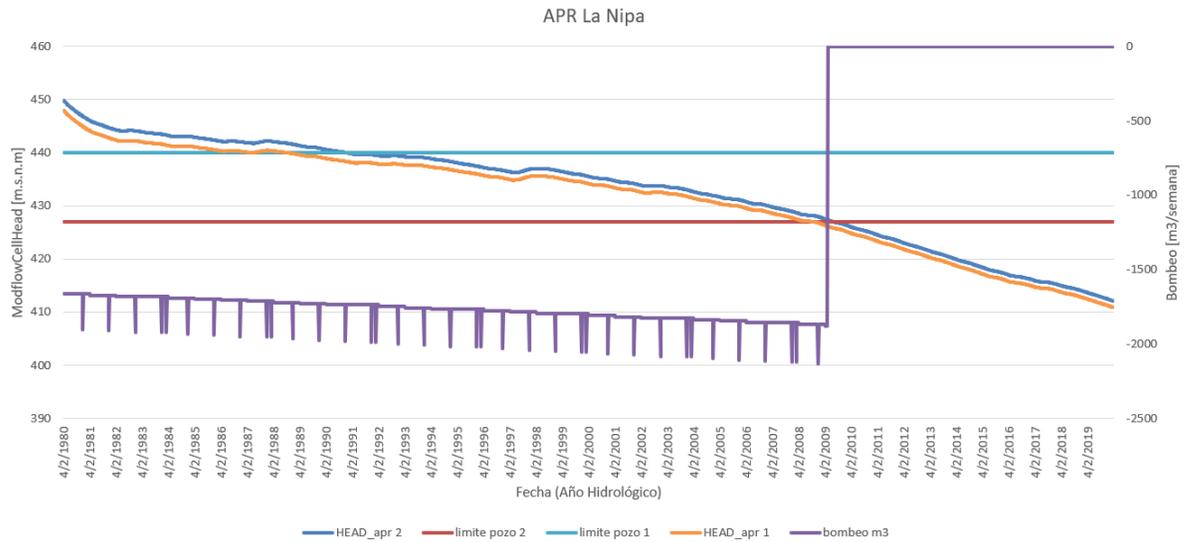


Figura F.10: La Nipa (*Fuente: Elaboración propia*)

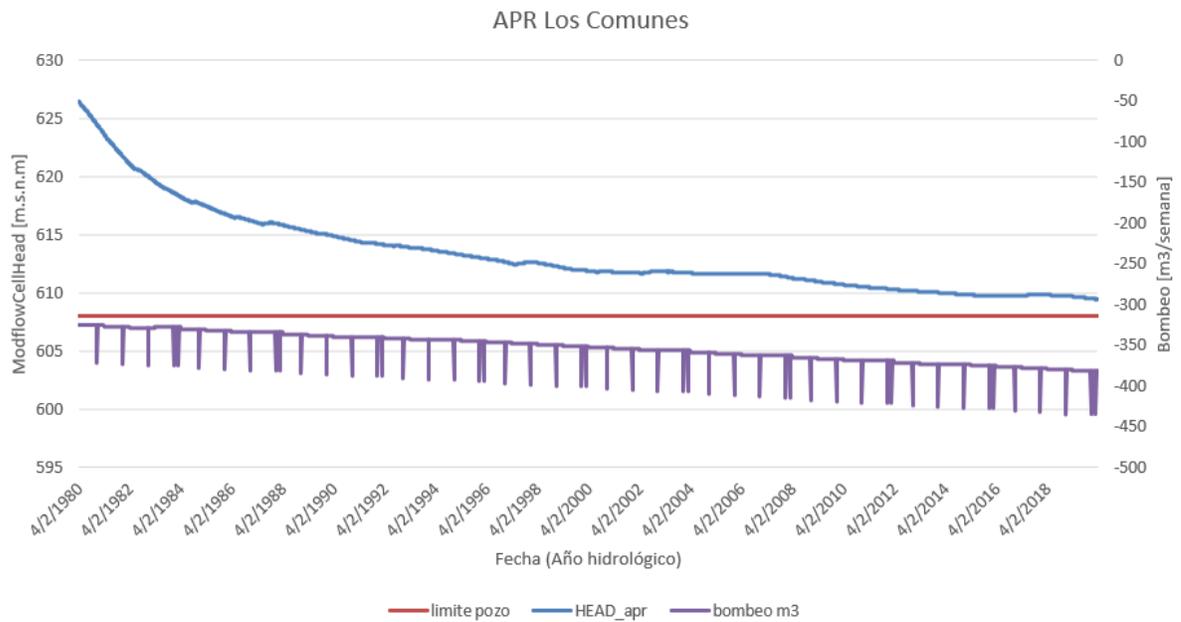


Figura F.11: Los Comunes (*Fuente: Elaboración propia*)

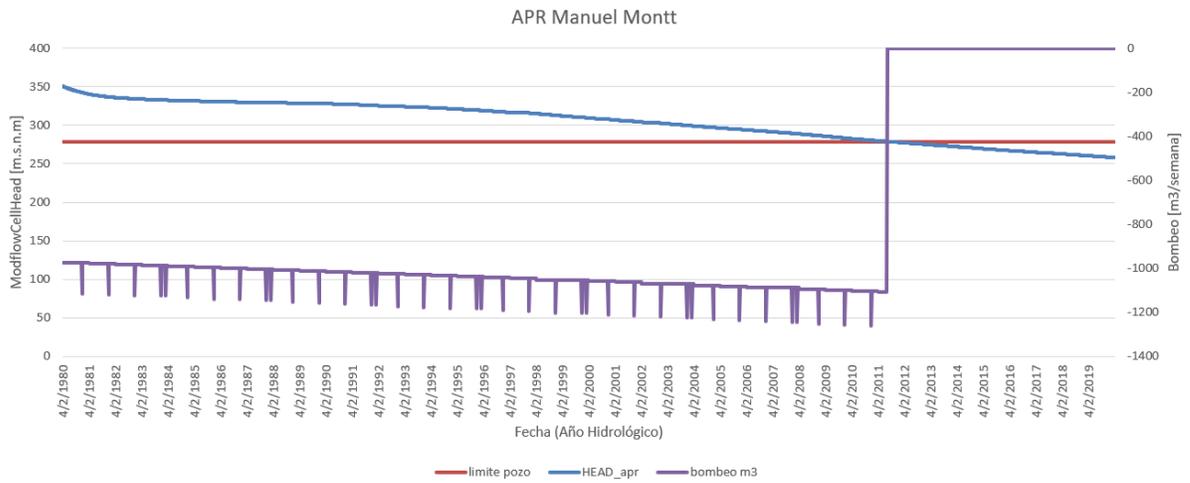


Figura F.12: Manuel Montt (Fuente: Elaboración propia)

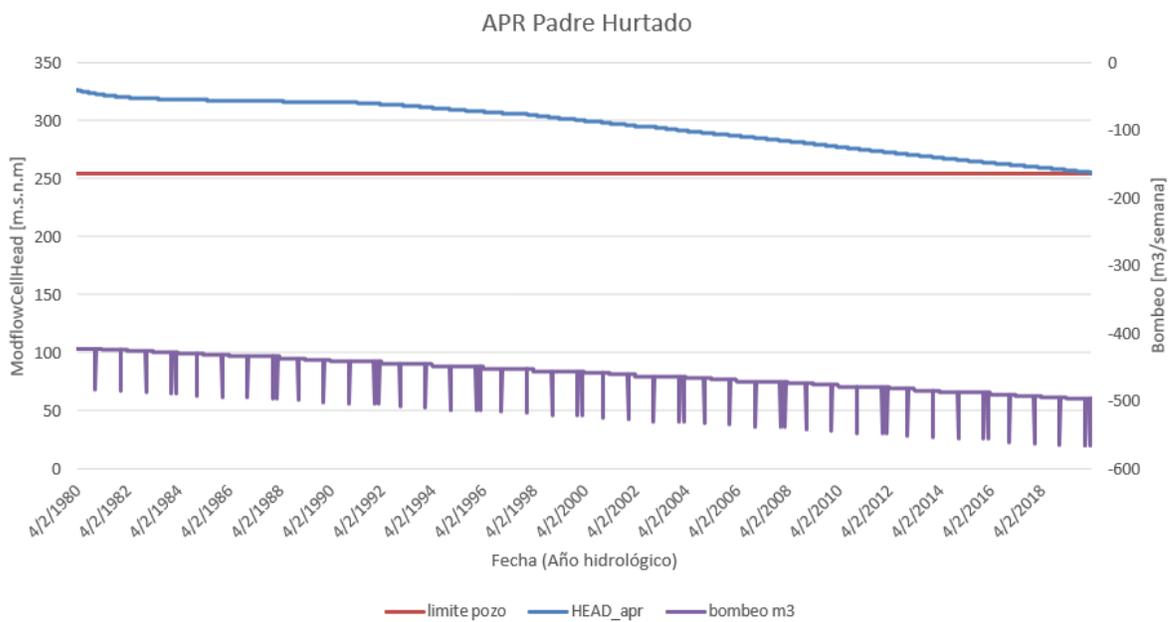


Figura F.13: Padre Hurtado (Fuente: Elaboración propia)

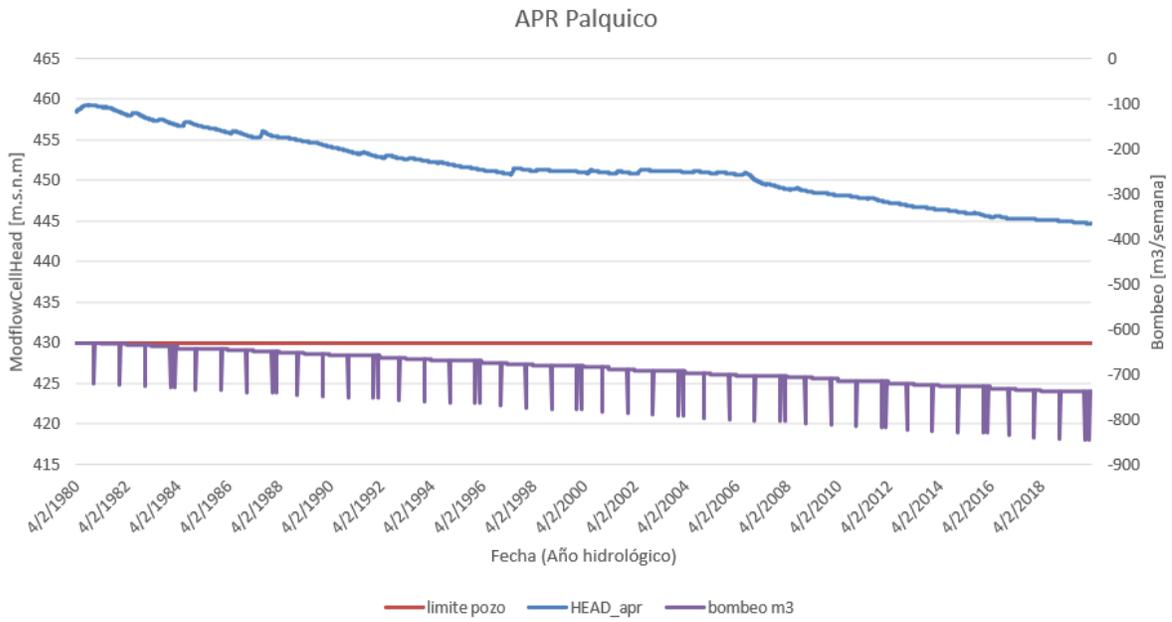


Figura F.14: Palquico (Fuente: Elaboración propia)

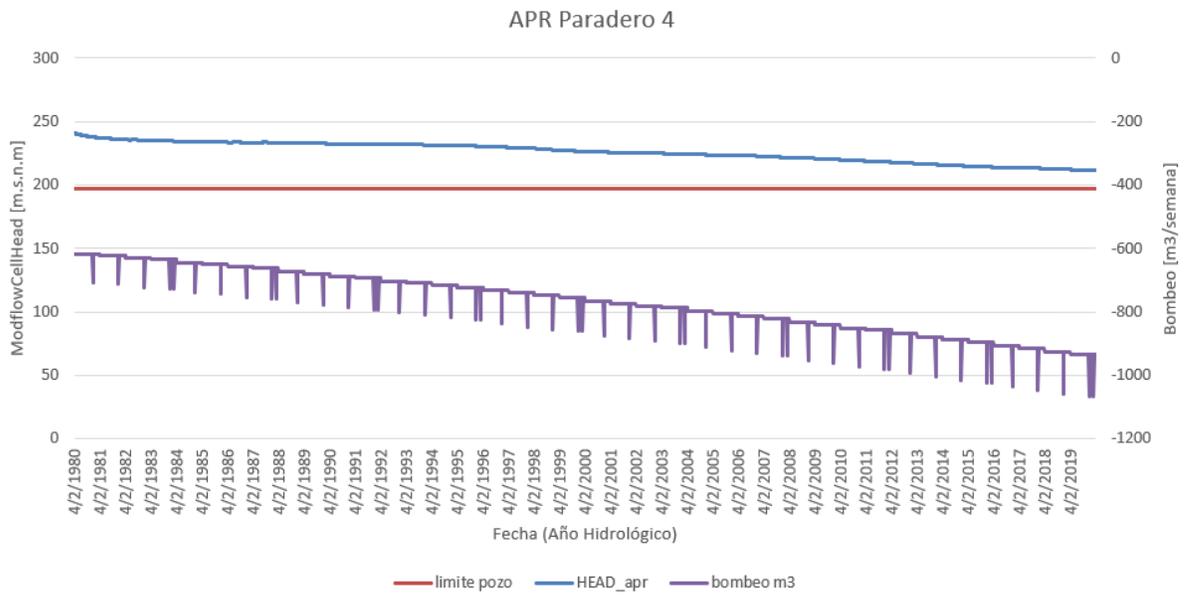


Figura F.15: Artificio Paradero 4 (Fuente: Elaboración propia)

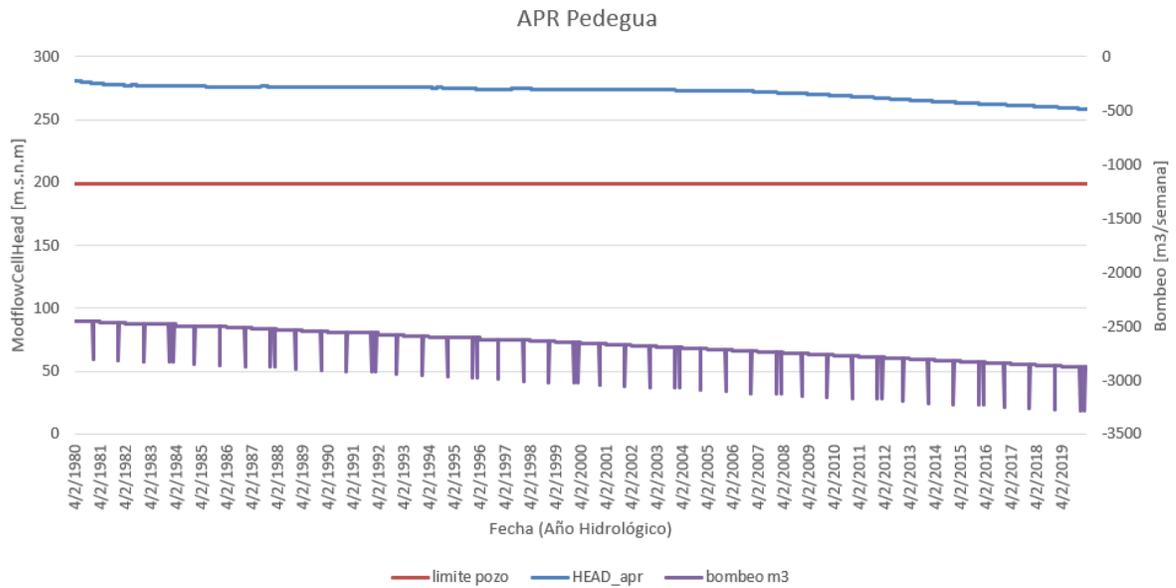


Figura F.16: Pedegua (Fuente: Elaboración propia)

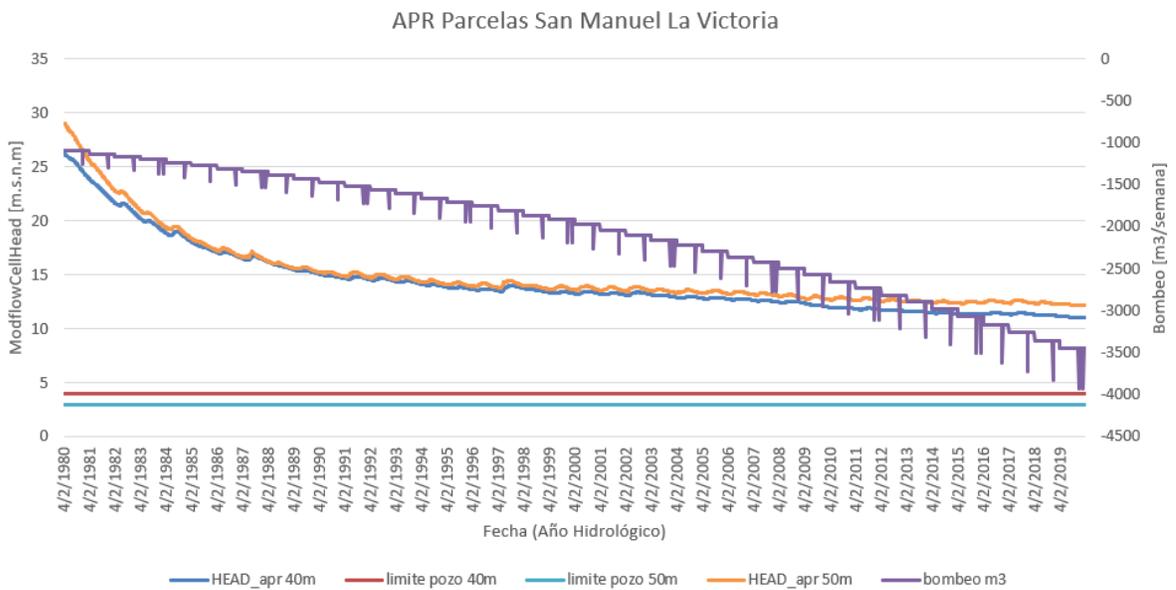


Figura F.17: Parcelas San Manuel La Victoria (Fuente: Elaboración propia)

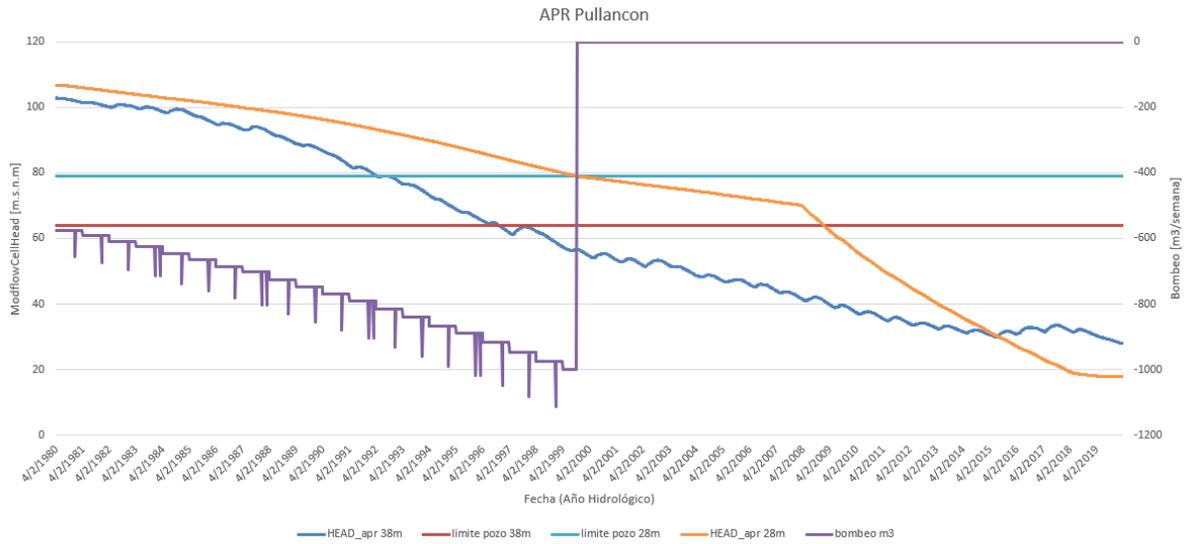


Figura F.18: Pullancon (Fuente: Elaboración propia)

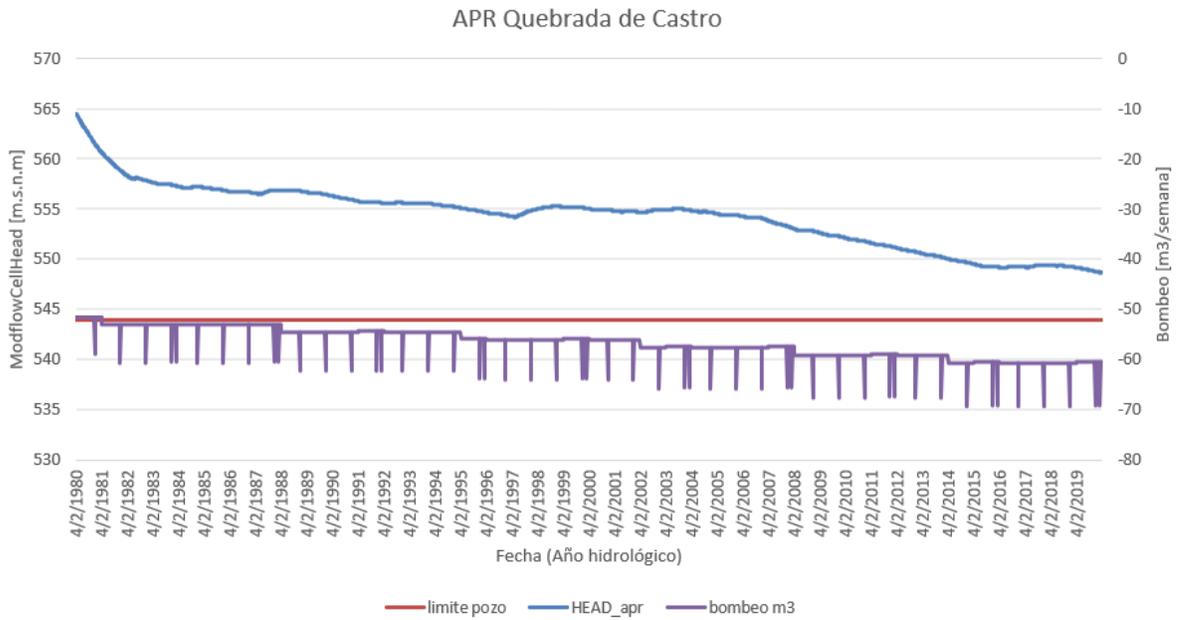


Figura F.19: Quebrada de Castro (Fuente: Elaboración propia)

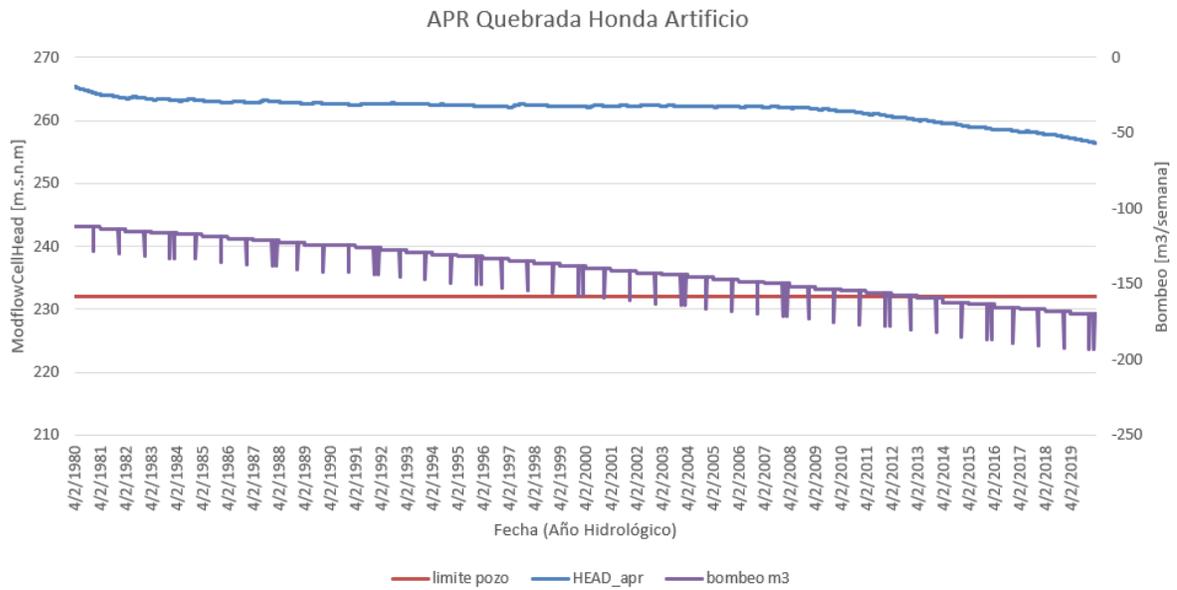


Figura F.20: Quebrada Honda Artificio (Fuente: Elaboración propia)

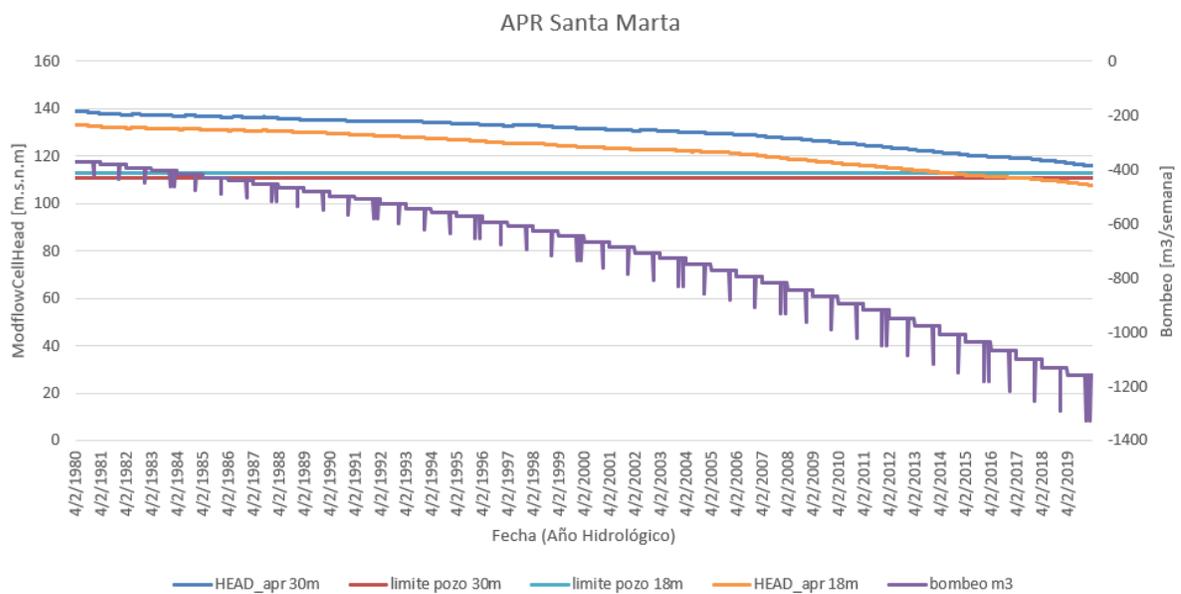


Figura F.21: Santa Marta (Fuente: Elaboración propia)

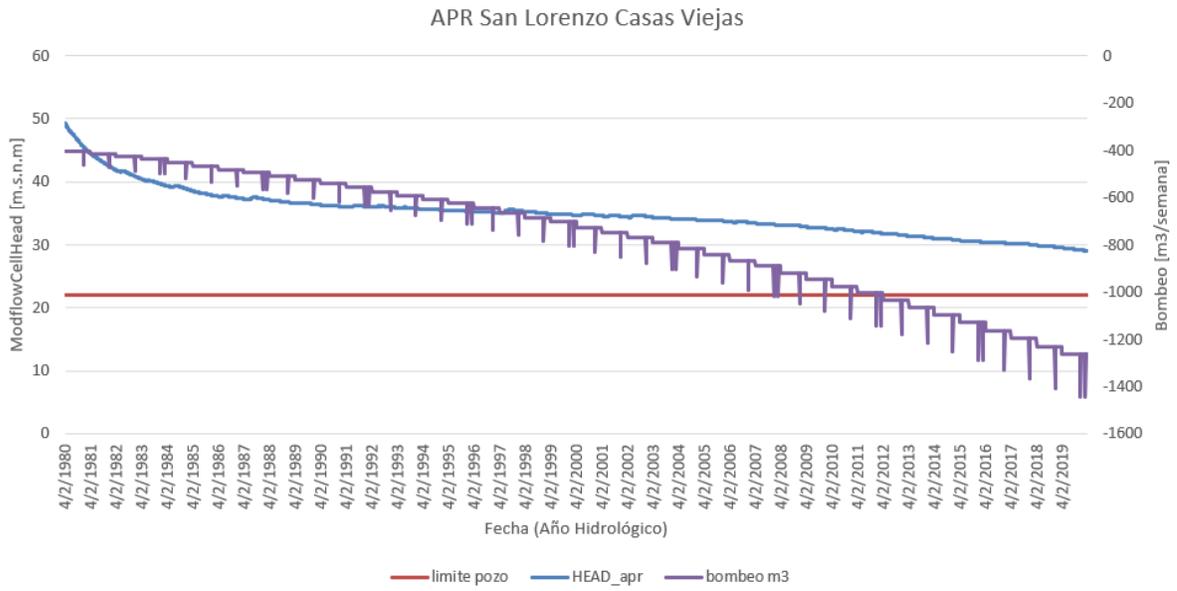


Figura F.22: San Lorenzo Casas Viejas (Fuente: Elaboración propia)

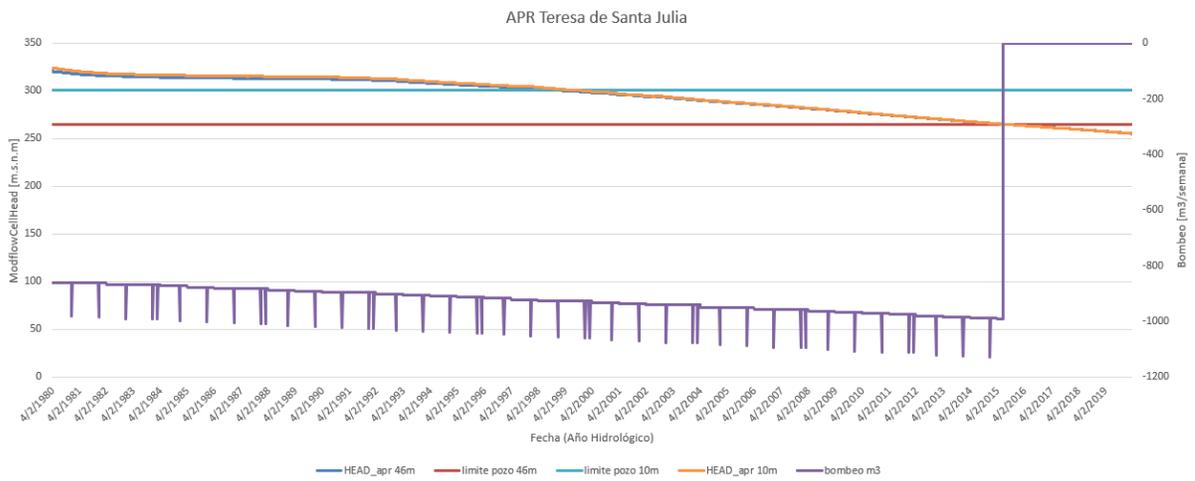


Figura F.23: Teresita de Santa Julia (Fuente: Elaboración propia)

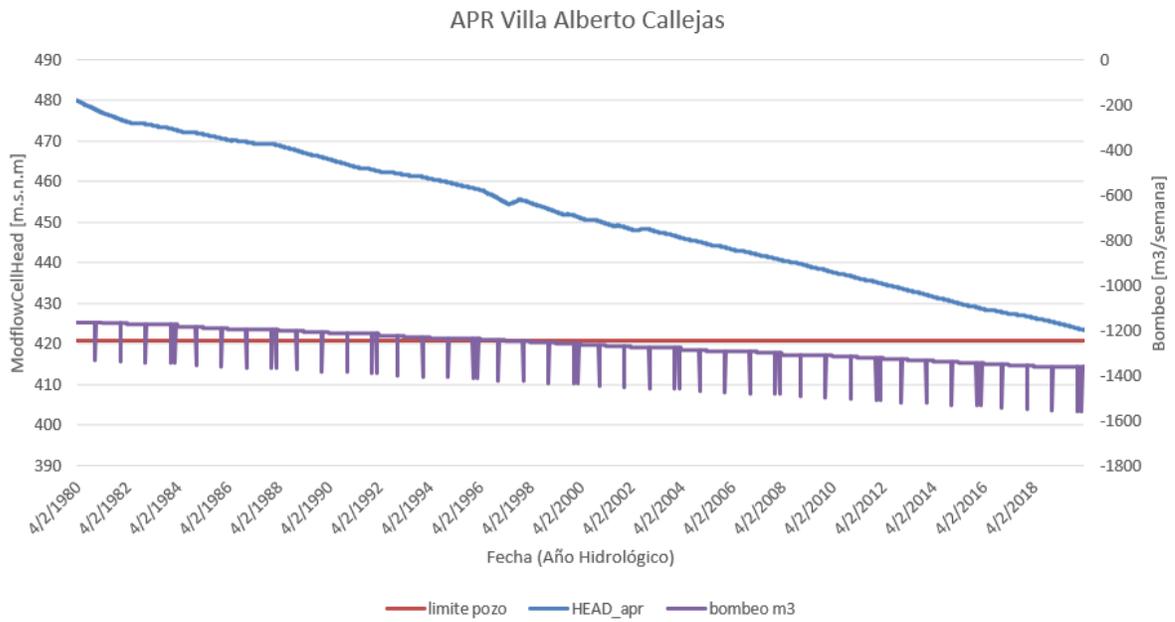


Figura F.24: Villa Alberto Callejas (Fuente: Elaboración propia)

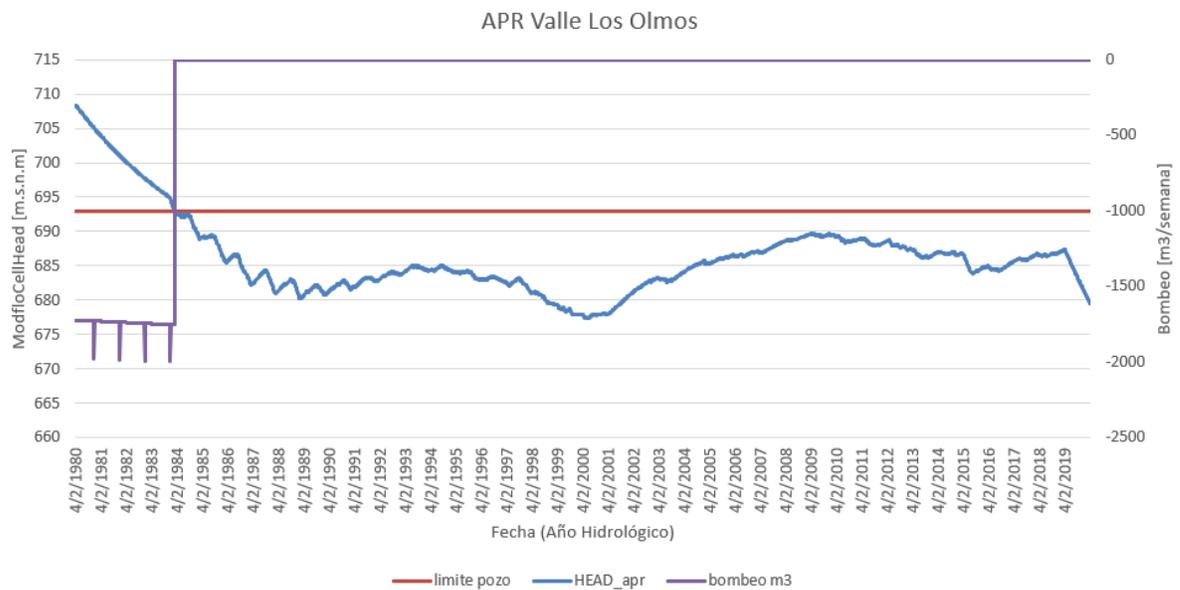


Figura F.25: Valle Los Olmos (Fuente: Elaboración propia)

F.2. MIROC

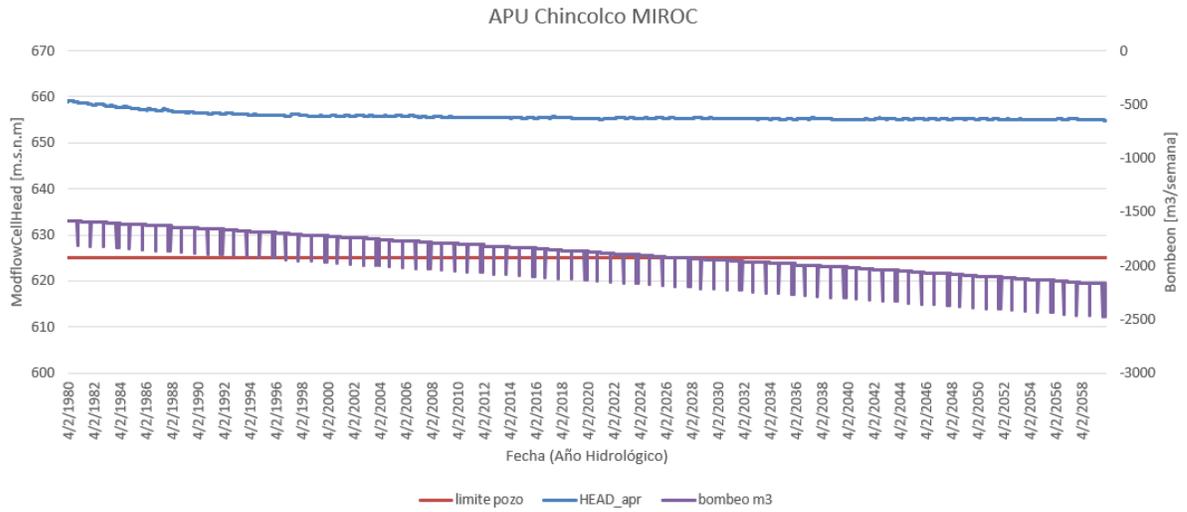


Figura F.26: APU Chincolco (Fuente: Elaboración propia)

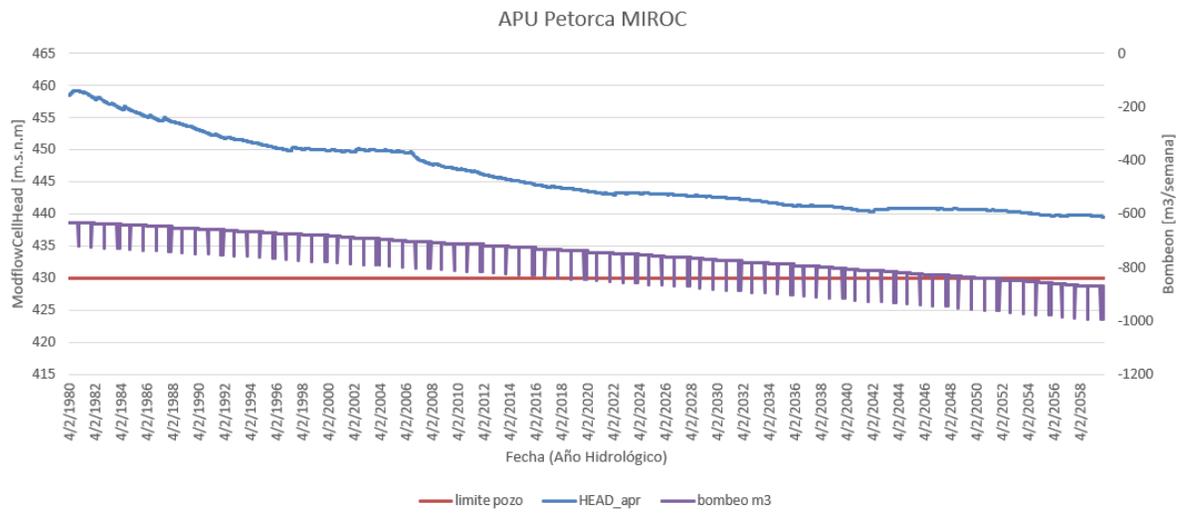


Figura F.27: APU Petorca (Fuente: Elaboración propia)

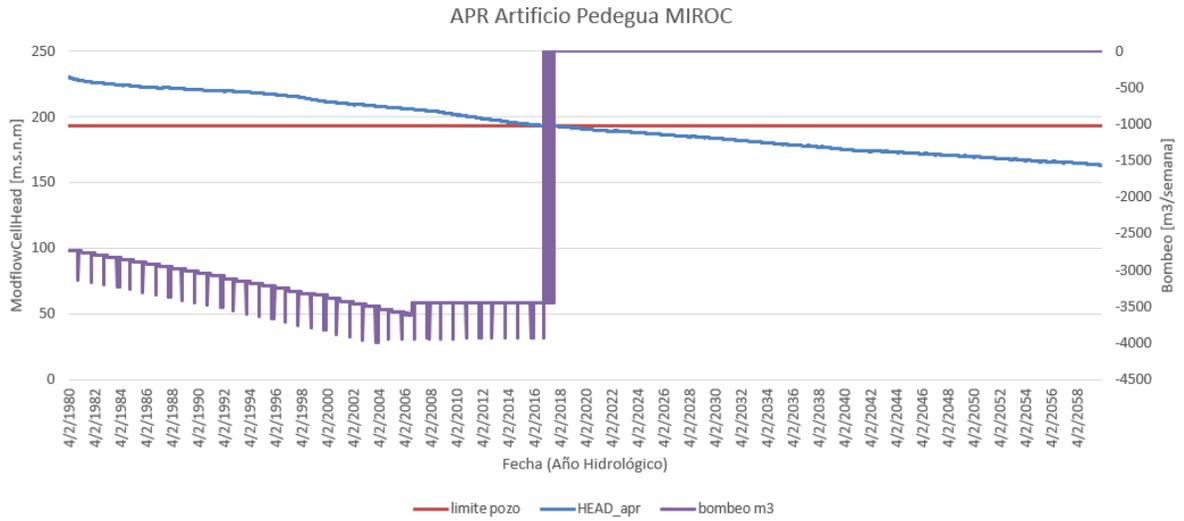


Figura F.28: Artificio Pedegua (Fuente: Elaboración propia)

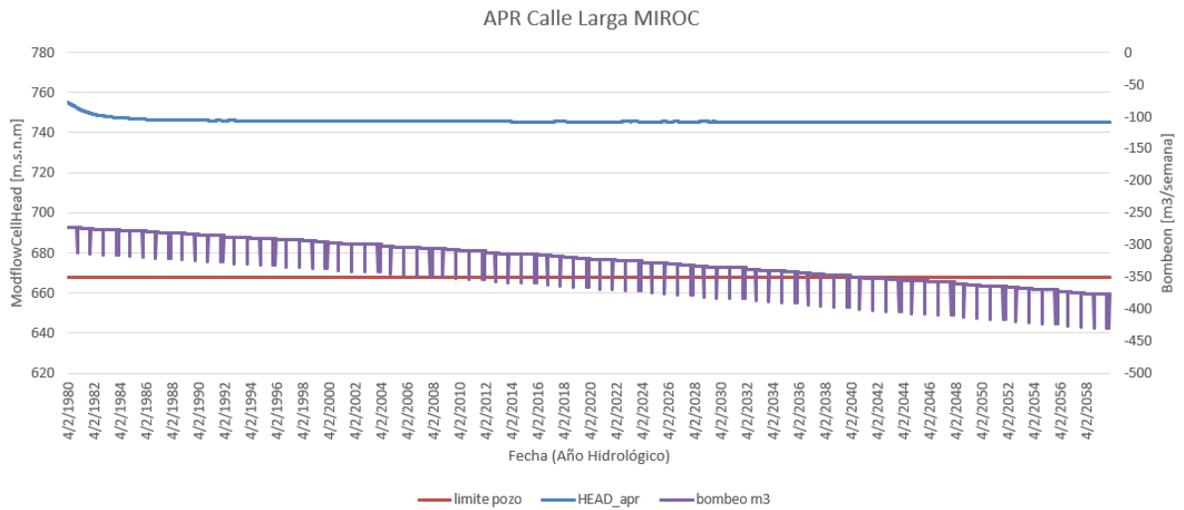


Figura F.29: Calle Larga (Fuente: Elaboración propia)

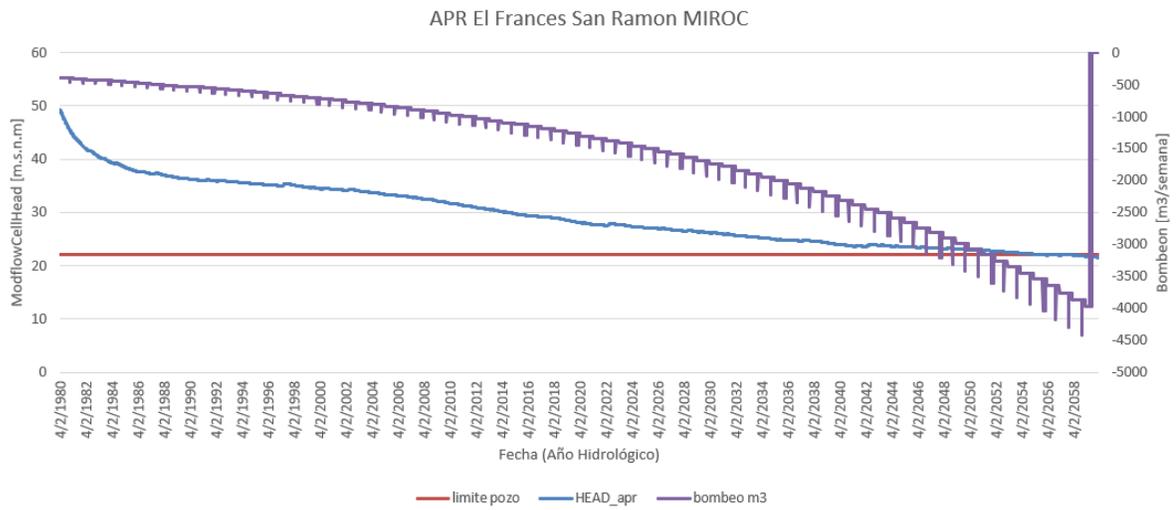


Figura F.30: El Francés San Ramón (*Fuente: Elaboración propia*)

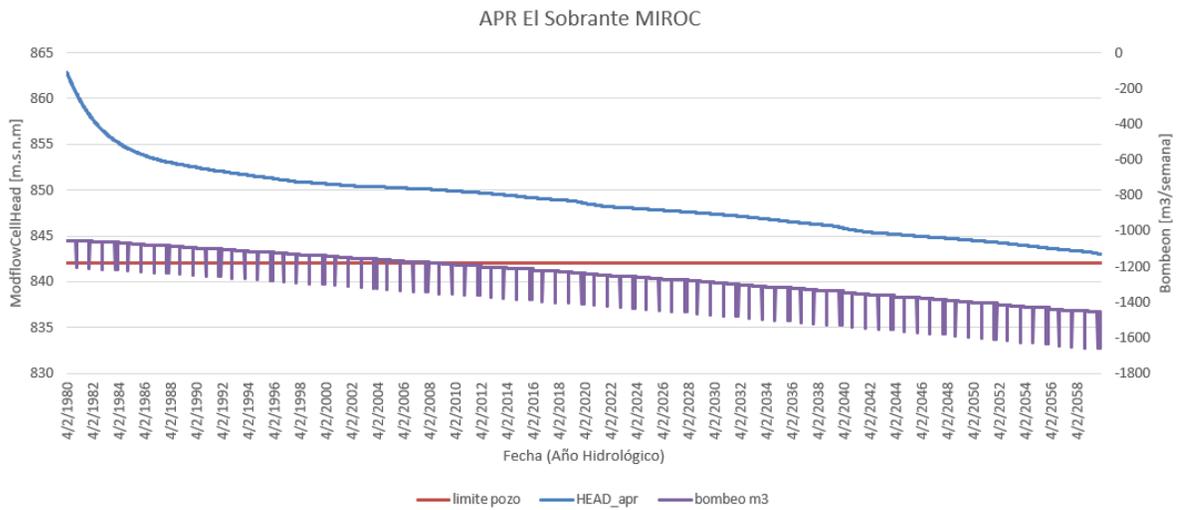


Figura F.31: El Sobrante (*Fuente: Elaboración propia*)

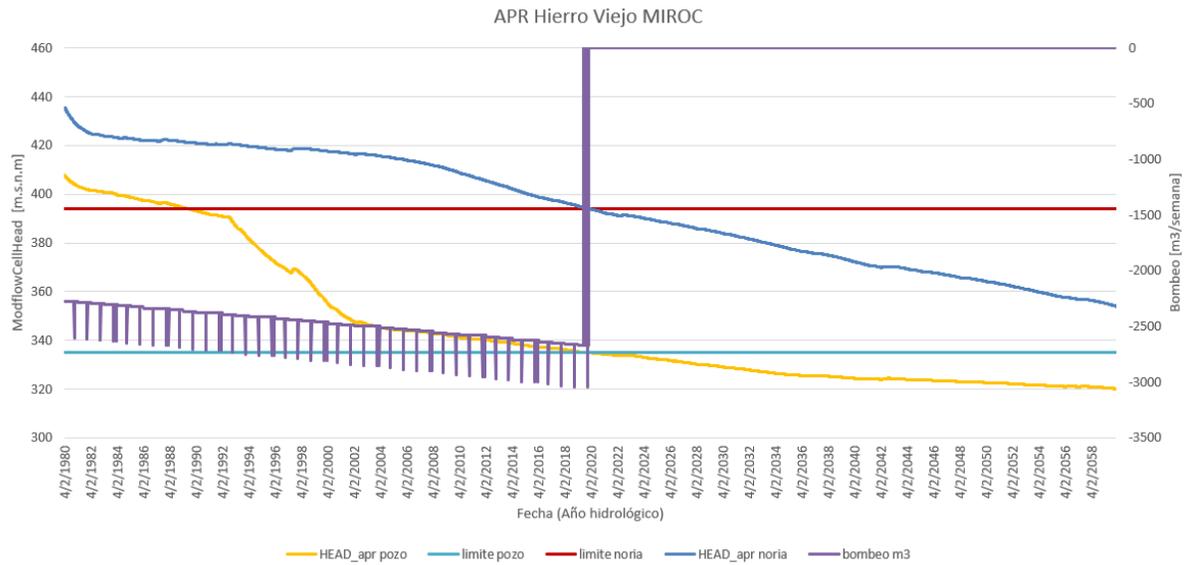


Figura F.32: Hierro Viejo (Fuente: Elaboración propia)

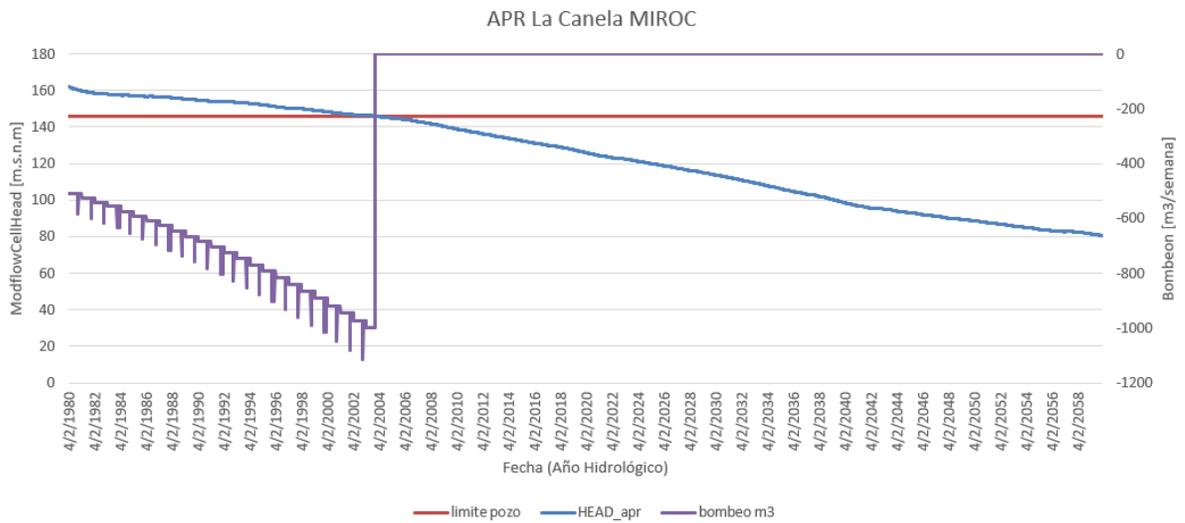


Figura F.33: La Canela (Fuente: Elaboración propia)

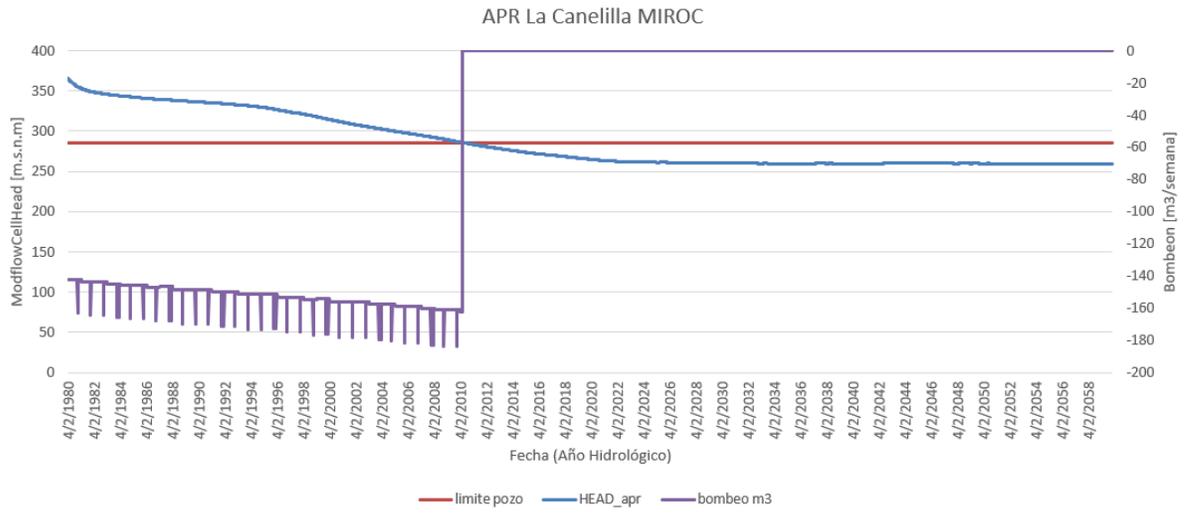


Figura F.34: La Canelilla (Fuente: Elaboración propia)

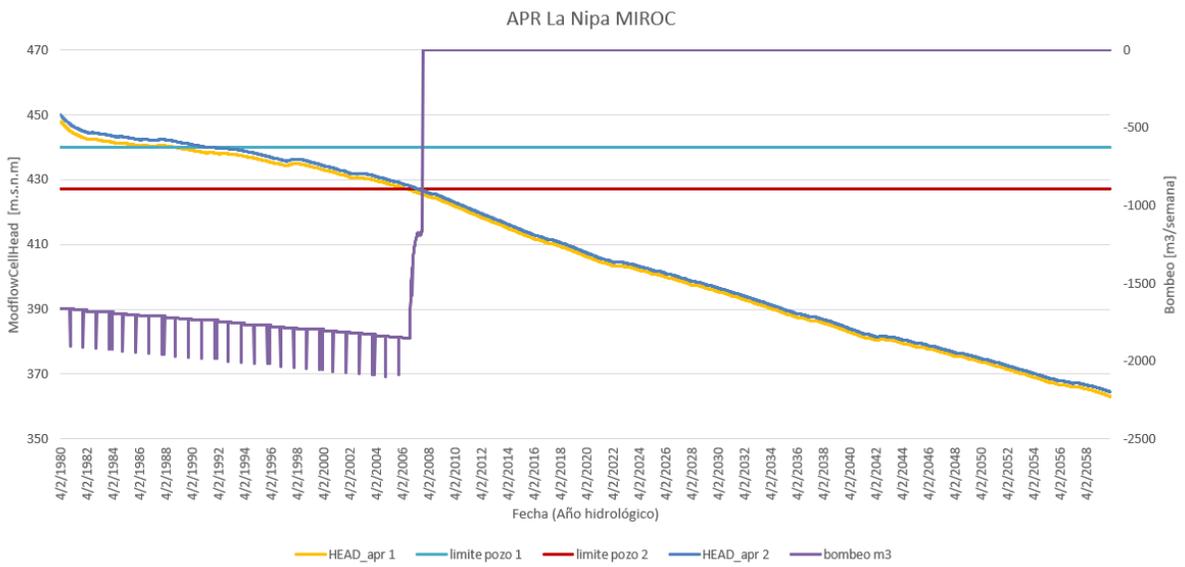


Figura F.35: La Nipa (Fuente: Elaboración propia)

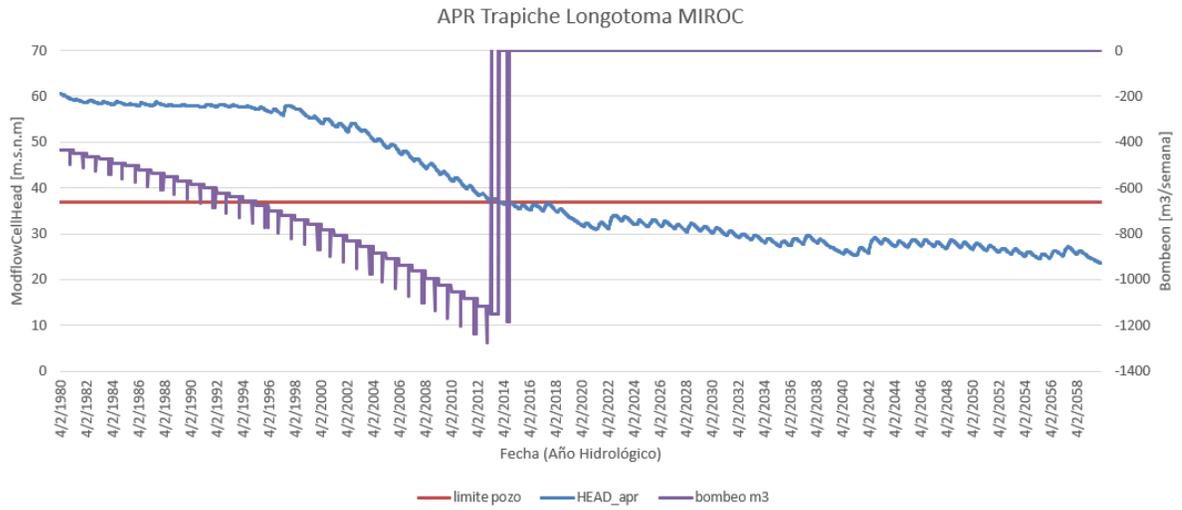


Figura F.36: Trapiche Longotoma (Fuente: Elaboración propia)

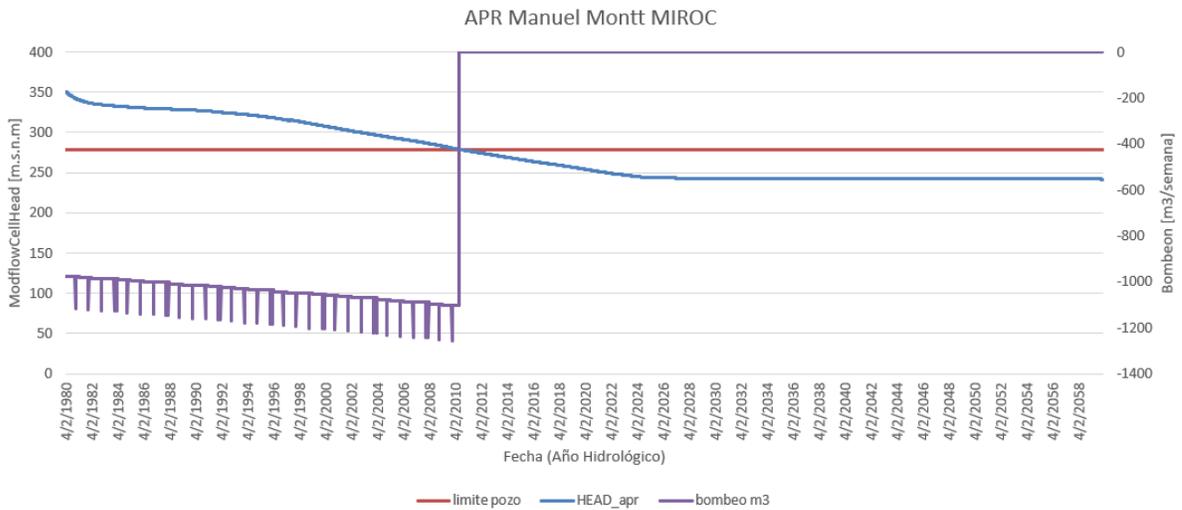


Figura F.37: Manuel Montt (Fuente: Elaboración propia)

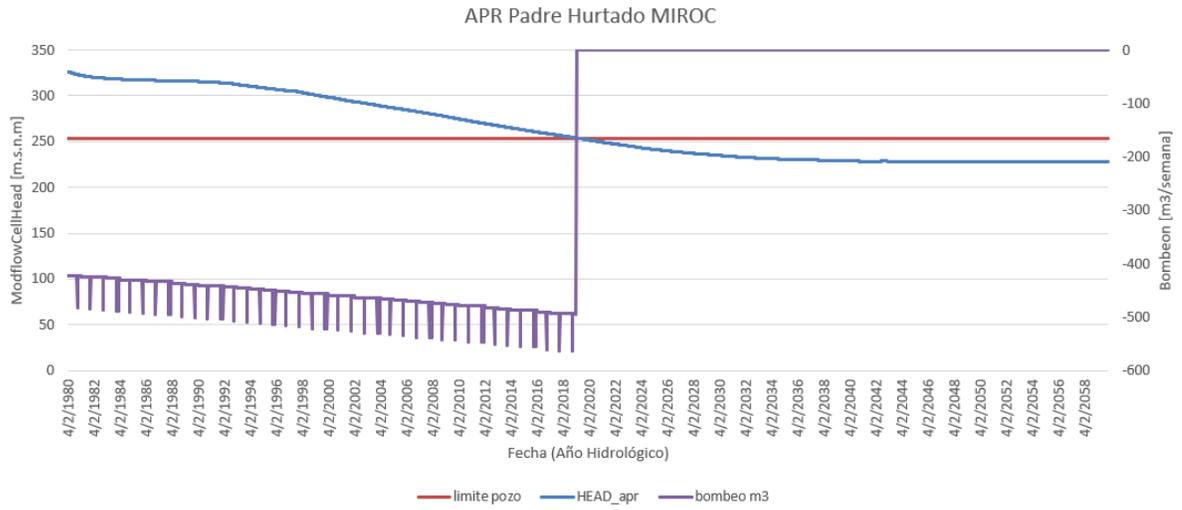


Figura F.38: Padre Hurtado (Fuente: Elaboración propia)

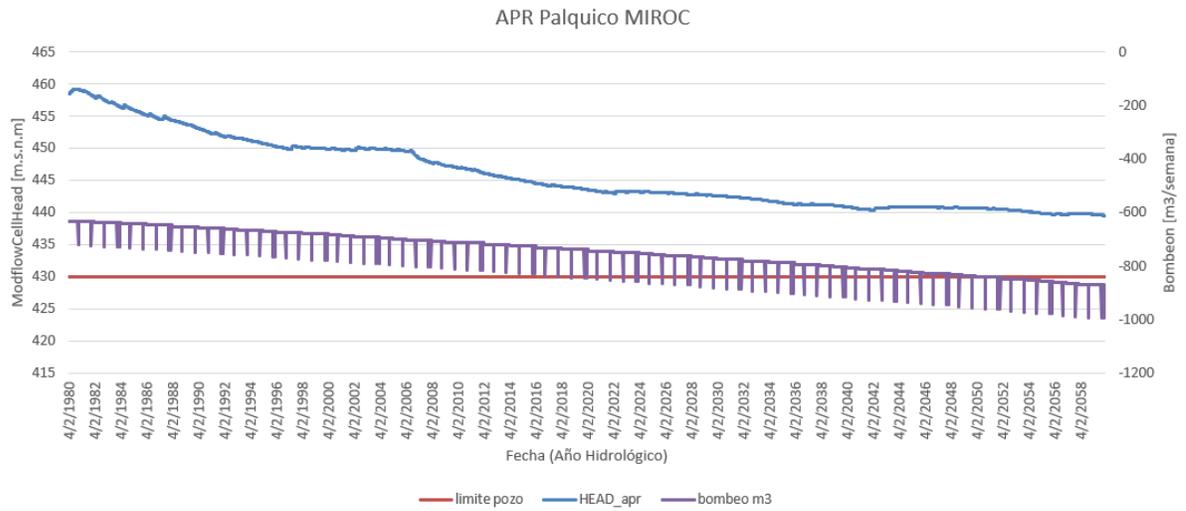


Figura F.39: Palquico (Fuente: Elaboración propia)

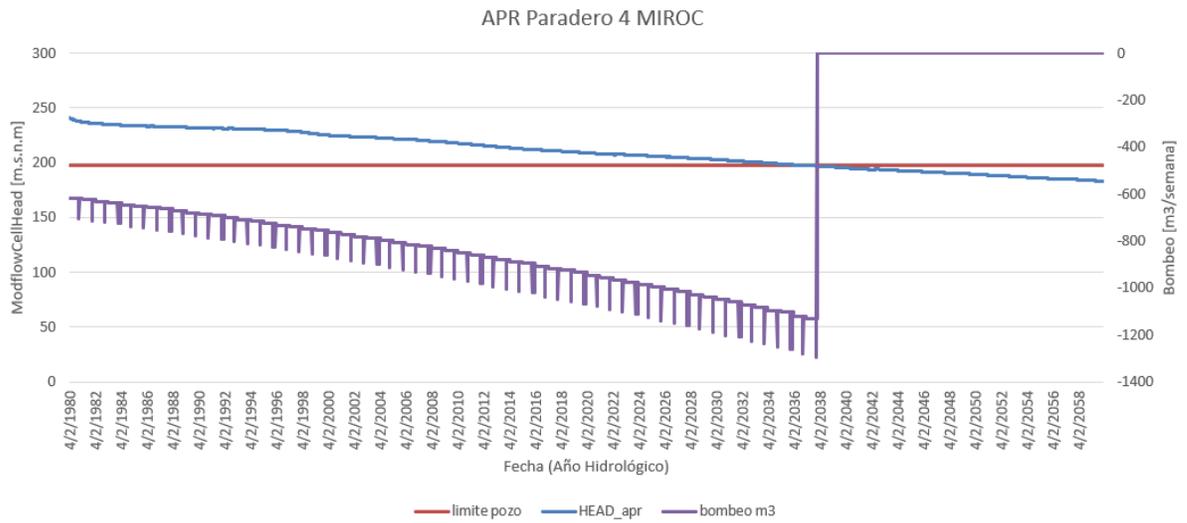


Figura F.40: Artificio Paradero 4 (Fuente: Elaboración propia)

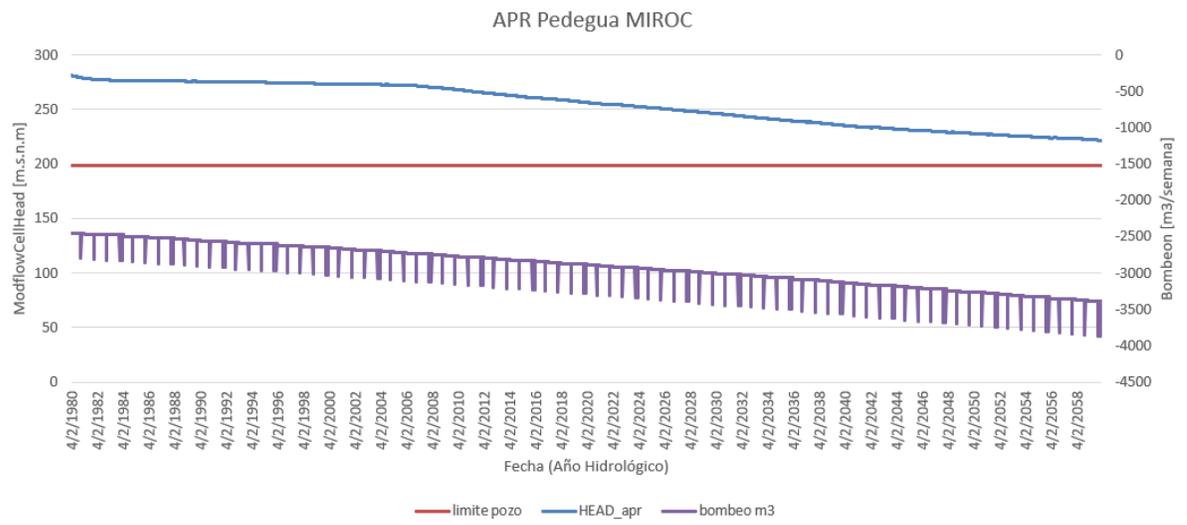


Figura F.41: Pedegua (Fuente: Elaboración propia)

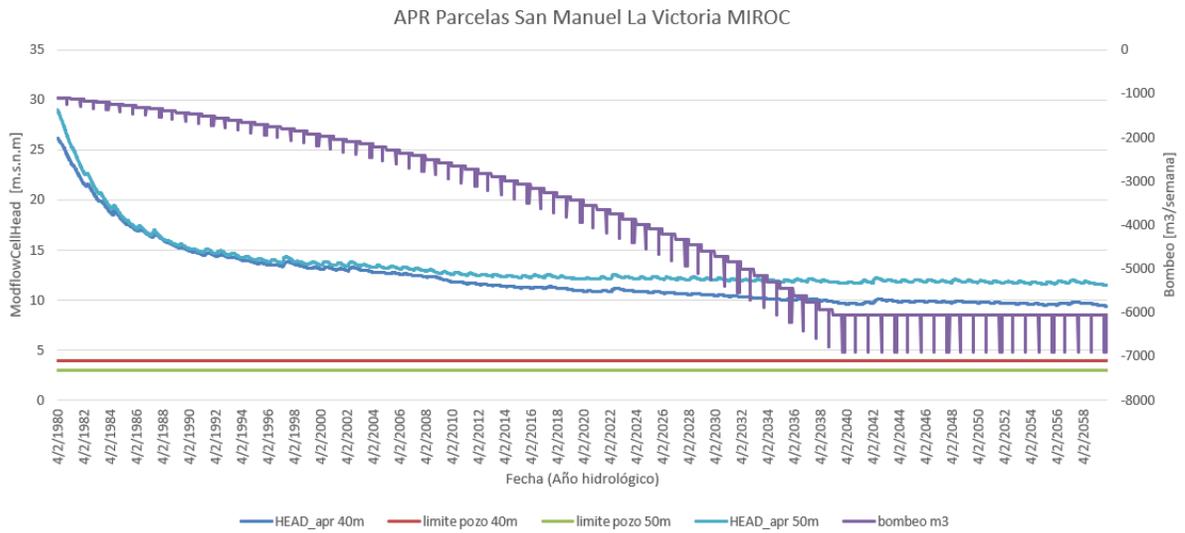


Figura F.42: Parcelas San Manuel La Victoria (Fuente: Elaboración propia)

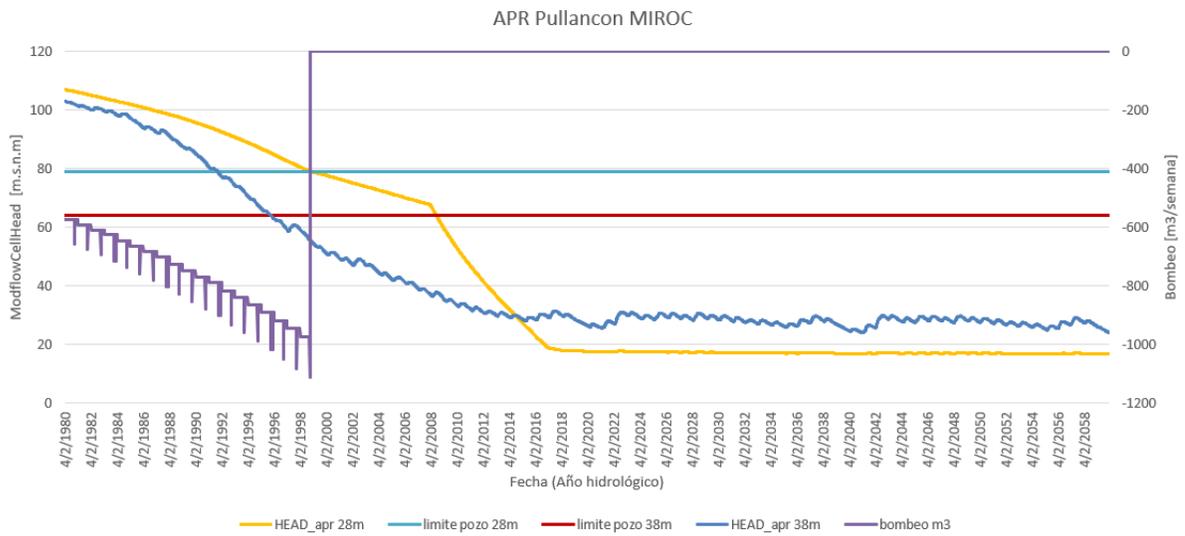


Figura F.43: Pullancon (Fuente: Elaboración propia)

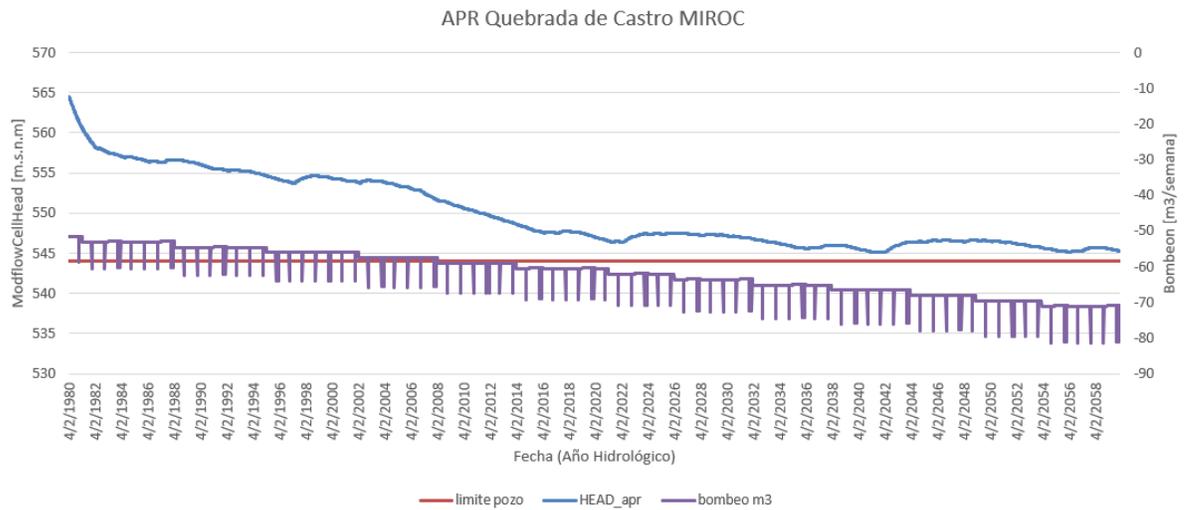


Figura F.44: Quebrada de Castro (Fuente: Elaboración propia)

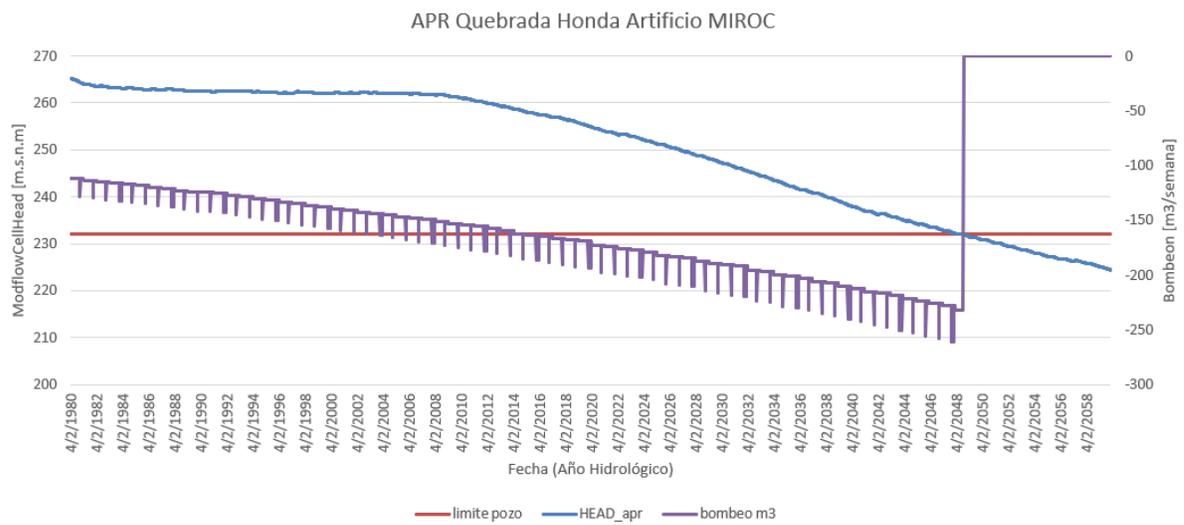


Figura F.45: Quebrada Honda Artificio (Fuente: Elaboración propia)

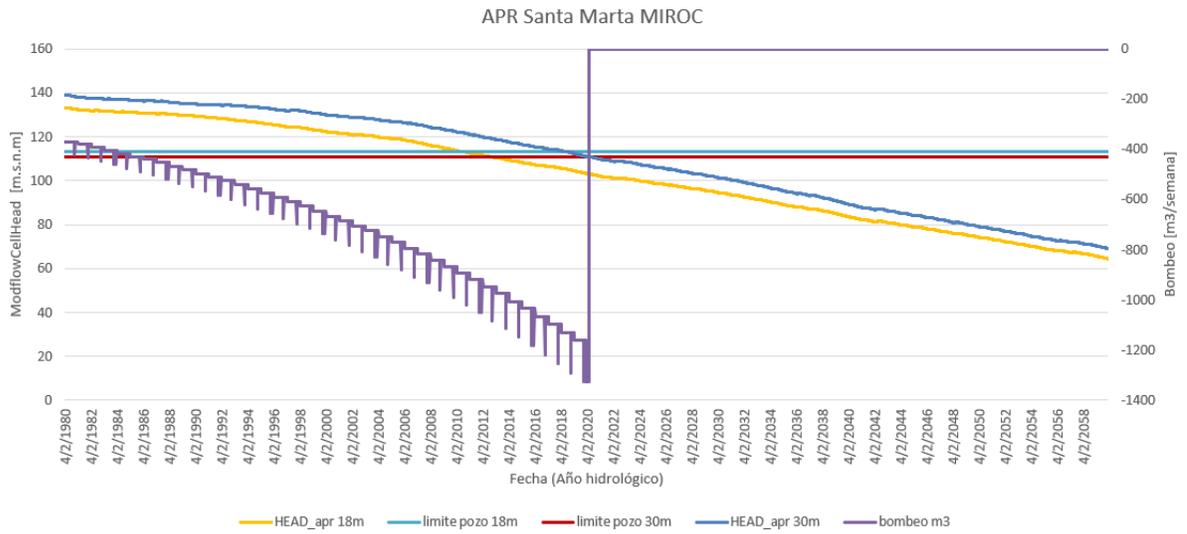


Figura F.46: Santa Marta (*Fuente: Elaboración propia*)

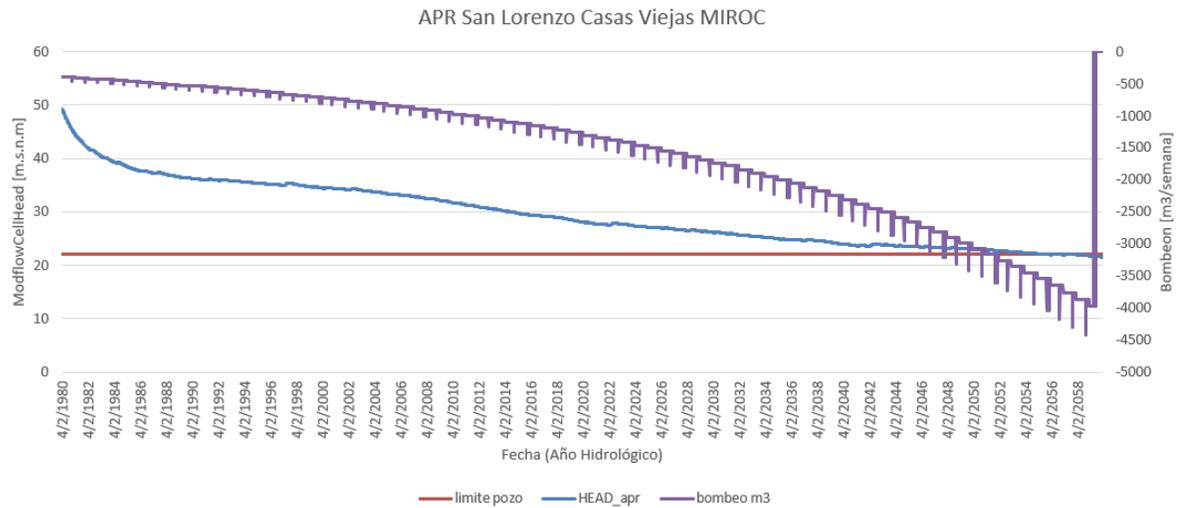


Figura F.47: San Lorenzo Casas Viejas (*Fuente: Elaboración propia*)

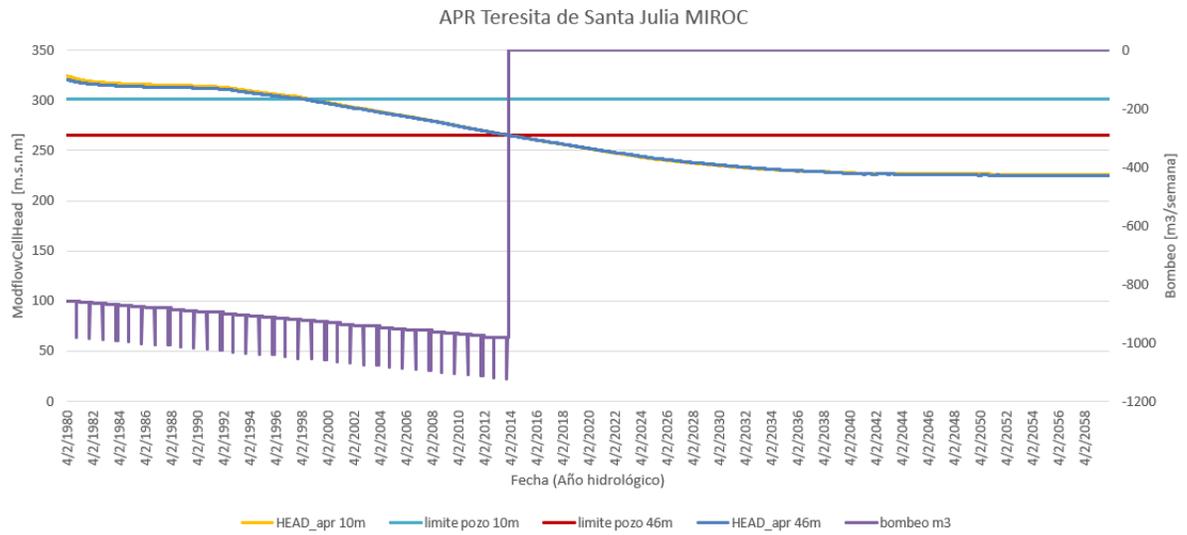


Figura F.48: Teresita de Santa Julia (Fuente: Elaboración propia)

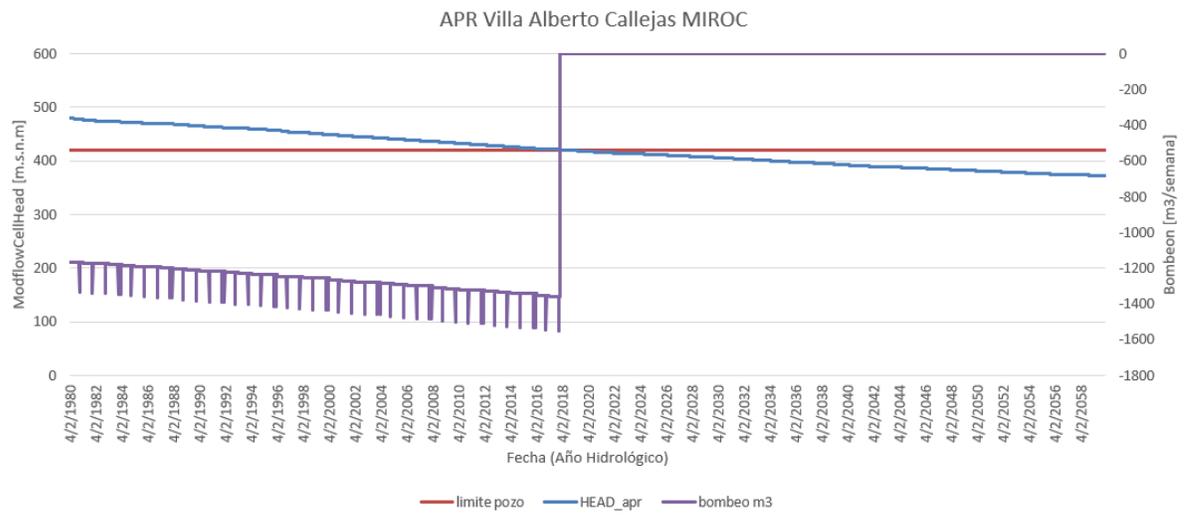


Figura F.49: Villa Alberto Callejas (Fuente: Elaboración propia)

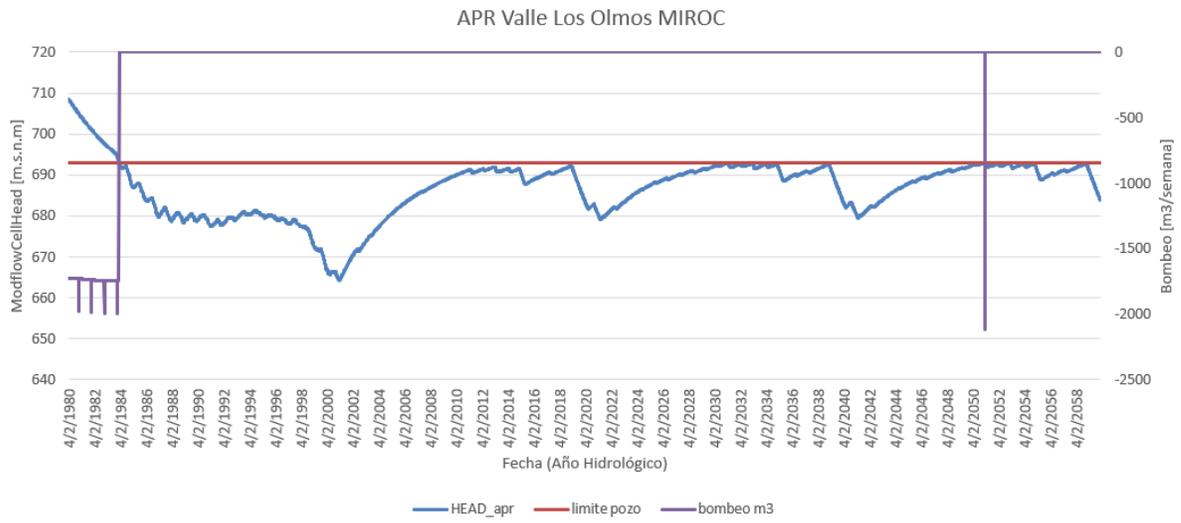


Figura F.50: Valle Los Olmos (*Fuente: Elaboración propia*)