



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES**

**"Desarrollo de un modelo hidrológico superficial acoplado a un modelo subterráneo  
para la Cuenca del Río Lluta, Región de Arica y Parinacota"**

Rodrigo Marinao Rivas

2021



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES**

**"Desarrollo de un modelo hidrológico superficial acoplado a un modelo subterráneo  
para la Cuenca del Río Lluta, Región de Arica y Parinacota"**

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía:** Mauricio Zambrano Bigiarini

Rodrigo Marinao Rivas

2021

**DESARROLLO DE UN MODELO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL ACOPLADO A  
UN MODELO SUBTERRÁNEO PARA LA CUENCA DEL RÍO LLUTA, REGIÓN DE  
ARICA Y PARINACOTA**

**RODRIGO MARINAO RIVAS**

**COMISIÓN EVALUADORA**

**MAURICIO ZAMBRANO BIGIARINI**

**Profesor guía**

**BERNARDO CAPINO DÍAZ**

Académico Evaluador

**PILAR BARRÍA SANDOVAL**

Académico Evaluador

**Calificación trabajo escrito:**

**Calificación examen:**

**Calificación final:**

## Resumen

La escasez hídrica que enfrenta el país, y los distintos conflictos que esta situación genera entre los actores de una misma cuenca, han llevado a los organismos públicos a impulsar el desarrollo de herramientas de modelación que faciliten la toma de decisiones mediante la evaluación de distintos escenarios de gestión del uso del recurso hídrico.

En ese contexto, el presente trabajo describe el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico superficial acoplado a un modelo subterráneo (modelo WEAP-MODFLOW) para la Cuenca del Río Lluta, Región de Arica y Parinacota, con el propósito de dar soporte a la elaboración de planes de gestión para dicha cuenca. Esta actividad corresponde al primer modelo acoplado superficial-subterráneo para la Cuenca del Río Lluta, y se enmarca en un proyecto que actualmente desarrolla la consultora ICASS.

En primer lugar, se implementó un modelo hidrológico superficial WEAP a escala mensual, para el periodo histórico 1985-2019. Se utilizó el método de *humedad del suelo* para la modelación de las subcuencas, y el método MABIA para la modelación de 19 zonas de riego repartidas en el Valle de Lluta, el Sector Costero, y las localidades de Putre y Sororoma. El modelo superficial fue calibrado, para luego ser acoplado a un modelo subterráneo MODFLOW-NWT desarrollado por ICASS. Este acople entre el sistema superficial y subterráneo consideró la conexión de río, drenes, zonas de riego y sitios de demanda. Posteriormente, el modelo acoplado fue calibrado en la estación fluviométrica de salida de la cuenca, considerando además la simulación en 4 pozos de observación ubicados en el Valle de Lluta. Luego, se implementó un escenario de cambio climático severo (RCP 8.5) con condiciones *Business As Usual* (Escenario BAU). Finalmente, se implementaron dos escenarios de gestión, donde se proyectaron áreas de riego de 2800 y 2000 hectáreas para el Valle de Lluta y el Sector Costero. Ambos escenarios consideraron la existencia del embalse Chironta, infraestructura pronta a estar operativa, con fines de riego.

Los resultados del modelo WEAP-MODFLOW, durante el periodo histórico, muestran

que la herramienta desarrollada en este trabajo es adecuada para la descripción de los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos de la Cuenca del Río Lluta. En primer lugar, los caudales simulados en las cuencas cabecera fueron bien reproducidos, con valores de KGE' superiores a 0.80 y 0.61 en los periodos de calibración y verificación, respectivamente, mientras que se obtuvo un KGE' de 0.79 en la estación de la desembocadura. Además, los niveles en los pozos de observación también fueron bien capturados.

Los resultados obtenidos para el periodo histórico 1985-2019 muestran una precipitación media anual de 207 mm ( $22.26 \text{ m}^3/\text{s}$ ), donde el 85 % de esta entrada se transforma en evapotranspiración real ( $18.98 \text{ m}^3/\text{s}$ ), dejando un caudal disponible de  $3.28 \text{ m}^3/\text{s}$  para abastecer las demandas de las zonas de riego. Las extracciones superficiales modeladas Putre y Socoroma fueron de  $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ , y las modeladas en el Valle de Lluta y el Sector Costero fueron de  $1.14 \text{ m}^3/\text{s}$ . En cuanto a la interacción superficial-subterránea, antes de la desembocadura se obtuvo una infiltración de  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$  como recarga hacia el acuífero, que se suman a las recargas por retornos de riego de  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Finalmente, el sistema superficial termina con un caudal de salida hacia el mar de  $1.01 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Los resultados obtenidos para el periodo futuro 2020-2050 muestran una disminución de la precipitación media anual de un 4 % respecto al periodo histórico, pasando a tener un valor de 199.5 mm ( $21.45 \text{ m}^3/\text{s}$ ), y un aumento de la temperatura media de  $1^\circ\text{C}$  (pasando de  $7.1$  a  $8.1^\circ\text{C}$ ). La demanda evapotranspirativa no asociada a riego disminuiría, con un valor promedio de  $18.56 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por otra parte, el funcionamiento del embalse Chironta permitiría aumentar las demandas agrícolas en un 104 % con respecto al Escenario BAU, logrando satisfacer una superficie regada de hasta 2800 ha. Sin embargo, esta demanda podría no llegar a satisfacerse en años donde la precipitación anual alcance valores por debajo del 50 % del promedio histórico, especialmente si se experimentan años previos con precipitaciones bajas. Por otro lado, el funcionamiento del embalse con las 2800 hectáreas regadas, traería consigo una disminución de un 42 % del caudal de salida en la desembocadura, con respecto al Escenario BAU.

# Índice de contenidos

	<b>Página</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción del problema . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.2.1 Objetivo General . . . . .	2
1.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>Capítulo 2. Antecedentes generales</b>	<b>3</b>
2.1 Zona de estudio: Cuenca del Río Lluta . . . . .	3
2.1.1 Caracterización de la cuenca . . . . .	4
2.1.2 Acuífero del Valle de Lluta . . . . .	5
2.1.3 Oferta hídrica de la cuenca . . . . .	8
2.1.4 Demanda hídrica . . . . .	10
2.1.5 Proyecciones de cambio climático . . . . .	12
2.1.6 Mejoras futuras en infraestructura . . . . .	13
2.2 Modelo de simulación WEAP . . . . .	15
2.2.1 Acople WEAP-MODFLOW . . . . .	15
<b>Capítulo 3. Metodología</b>	<b>17</b>
3.1 Esquema general . . . . .	17
3.2 Descripción de la modelación acoplada . . . . .	18
3.2.1 Modelo superficial . . . . .	18
3.2.2 Zonas de riego . . . . .	20
3.3 Datos hidrometeorológicos para el modelo superficial . . . . .	24
3.3.1 CR2MET v2: datos de precipitación y temperaturas . . . . .	24
3.3.2 Datos de entrada según método . . . . .	27
3.4 Calibración del modelo superficial . . . . .	27
3.4.1 Parámetros de calibración . . . . .	27
3.4.2 Estaciones y periodos de calibración . . . . .	28
3.4.3 Algoritmo de calibración y función objetivo . . . . .	30
3.5 Acople del modelo superficial-subterráneo . . . . .	31
3.6 Simulación de escenarios futuros con modelo acoplado . . . . .	33
3.6.1 Proyecciones de cambio climático . . . . .	34

3.6.2	Mejoras futuras en infraestructura . . . . .	36
3.6.3	Cambios en actividades antrópicas . . . . .	37
3.6.4	Escenarios implementados . . . . .	38
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>40</b>
4.1	Periodo histórico (1985-2019) . . . . .	40
4.1.1	Calibración modelo superficial . . . . .	40
4.1.2	Calibración modelo acoplado . . . . .	41
4.1.3	Balance hídrico en periodo histórico . . . . .	44
4.2	Periodo futuro (2020-2050) . . . . .	46
4.2.1	Proyección de caudales aguas arriba del embalse . . . . .	46
4.2.2	Balance hídrico de cada escenario . . . . .	47
4.2.3	Niveles subterráneos . . . . .	50
4.2.4	Satisfacción de la demanda de riego . . . . .	52
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>54</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>
<b>Anexo A.</b>	<b>Métodos de modelación empleados en WEAP</b>	<b>62</b>
<b>Anexo B.</b>	<b>Determinación de la cuenca y la red de drenaje</b>	<b>65</b>
<b>Anexo C.</b>	<b>Distritos censales y superficies agrícolas</b>	<b>68</b>
<b>Anexo D.</b>	<b>Comunidades de Aguas en el Río Lluta</b>	<b>77</b>
<b>Anexo E.</b>	<b>Clases de Suelos derivadas de HWSD</b>	<b>80</b>
<b>Anexo F.</b>	<b>Cálculo del producto de precipitación</b>	<b>82</b>
<b>Anexo G.</b>	<b>Revisión del producto de temperatura CR2MET v2</b>	<b>94</b>
<b>Anexo H.</b>	<b>Evaluación de los GCMs escalados en el estudio ABHN</b>	<b>96</b>
<b>Anexo I.</b>	<b>Embalse Chironta</b>	<b>100</b>
<b>Anexo J.</b>	<b>Parámetros calibrados del método de <i>humedad del suelo</i></b>	<b>101</b>
<b>Anexo K.</b>	<b>Balances subterráneos</b>	<b>106</b>
<b>Anexo L.</b>	<b>Variación de niveles subterráneos entre periodo histórico y proyecciones de periodo futuro</b>	<b>109</b>

# Índice de tablas

	<b>Página</b>
2.1 Usos de agua en la cuenca del Río Lluta. Fuente: Elaborado a partir de DGA (2016). . . . .	11
2.2 Detalles técnicos del embalse Chironta. Fuente: Datos tomados de DOH (2012). . . . .	14
3.1 Resumen de las comunidades agrupadas en 19 zonas de riego. Fuente: Elaborado a partir de DGA (2016). . . . .	21
3.2 Datos de entrada para el método MABIA. . . . .	23
3.3 Datos de entrada para el método de <i>humedad del suelo</i> . . . . .	27
3.4 Datos de entrada para el método MABIA. . . . .	27
3.5 Valoración de la eficiencia de Kling-Gupta. Fuente: Thiemig et al. (2013); Knoben et al. (2019). . . . .	31
3.6 Especificaciones para los escenarios propuestos en este trabajo. . . . .	39
4.1 Valores de $KGE'$ en los periodos de calibración, verificación y conjunto, para las subcuencas RCH, RCA y RLA. . . . .	41
4.2 Desempeños logrados para el periodo de calibración, verificación y conjunto, en la subcuenca RLP. . . . .	42
4.3 Comparación de las componentes del balance del Escenario 1 respecto al Escenario BAU. Valle de Lluta y Sector Costero. . . . .	49
4.4 Comparación de las componentes del balance del Escenario 2 respecto al Escenario BAU. . . . .	50

4.5	Descensos de los niveles subterráneos en los pozos de observación, obtenidos para los escenarios futuros respecto a los niveles históricos. . . . .	51
B.1	Identificación de los ríos y quebradas indexados en la Figura B.1 . . . . .	67
D.1	Comunidades de Aguas . . . . .	77
D.2	Comunidades de Aguas . . . . .	79
E.1	Series de suelos consideradas para la modelación de zonas de riego con método MABIA. Fuente: Elaborado a partir de HWSD (Fischer et al., 2008). . . . .	81
E.2	Series de uso de suelos, clases y tasa máxima de infiltración. Fuente: Elaborado a partir de Jabloun & Sahli (2012). . . . .	81
J.1	Rango de parámetros considerados para la calibración automática de WEAP con <i>hydroPSO</i> . . . . .	101
J.2	Parámetros calibrados con <i>hydroPSO</i> para el modelo mensual implementado con método de <i>humedad del suelo</i> , subcuenca Río Caracarani en Humapalca. . . . .	102
J.3	Parámetros calibrados con <i>hydroPSO</i> para el modelo mensual implementado con método de <i>humedad del suelo</i> , subcuenca Río Colpitas en Alcérreca. . . . .	103
J.4	Parámetros calibrados con <i>hydroPSO</i> para el modelo mensual implementado con método de <i>humedad del suelo</i> , subcuenca Río Lluta en Alcérreca (excluyendo las Unidades Hidrológicas de las subcuencas ya calibradas, Tablas J.2 y J.3. . . . .	104
J.5	Parámetros calibrados con <i>hydroPSO</i> para el modelo mensual implementado con método de <i>humedad del suelo</i> , subcuenca Río Lluta en Panamericana (excluyendo las Unidades Hidrológicas de las subcuencas ya calibradas, Tablas J.2, J.3 y J.4. . . . .	105

# Índice de figuras

	<b>Página</b>
2.1 Ubicación la Cuenca del Río Lluta. . . . .	3
2.2 Elevación según SRTM (Farr et al., 2007); cobertura de suelo (Zhao et al., 2016), y clasificación de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018) de la Cuenca del Río Lluta. . . . .	4
2.3 Zonas cultivadas en el Valle de Lluta. Fuente: Profesionales de ICASS en terreno. . . . .	5
2.4 Extensión del modelo numérico del acuífero de Lluta Bajo. Fuente: Elaboración propia, datos recopilados por ICASS. . . . .	6
2.5 Distribución de la precipitación media anual en la Cuenca del Río Lluta y alrededores. Fuente: Elaboración propia, en base a datos de CR2MET v2 1985-2019. . . . .	9
2.6 Climograma de la Cuenca del Río Lluta y curva estacional de caudales de la estación Río Lluta en Panamericana. . . . .	10
2.7 Ubicación del embalse Chironta en la Cuenca del Río Lluta. . . . .	14
2.8 Topología entre modelos WEAP-MOFLOW y flujos de intercambio para cada paso de tiempo. Fuente: Elaborado por DICTUC-SEI (DGA, 2019b). . . . .	16
3.1 Modelo conceptual del sistema superficial. . . . .	17
3.2 Niveles de discretización para la definición de Unidades de Respuesta hidrológica. . . . .	19

3.3	Evolución temporal de las superficies de riego en el Valle de Lluta y el Sector Costero. Fuente: Elaboración Propia en base a datos de INE (2007, 1997) y CNR (2018). . . . .	23
3.4	Distribución de valores medios anuales de precipitación y temperatura media del aire en la Cuenca del Río Lluta. Se ubican también las estaciones pluviométricas y de temperatura consideradas para la verificación de los productos. Fuente: Elaboración Propia en base a datos CR2MET v2. . . . .	25
3.5	Zona de estudio y subcuencas a calibrar en el modelo superficial. . . . .	29
3.6	Periodos considerados en la modelación. . . . .	30
3.7	Esquema de funcionamiento de <i>hydroPSO</i> para una sola ejecución. . . . .	31
3.8	Ubicación del acuífero en el Valle de Lluta, y las componentes tenidas en cuenta en el enlace del modelo acoplado WEAP-MODFLOW. . . . .	32
3.9	Flujo de trabajo seguido para la obtención de las proyecciones de cambio climático a considerar en el escenario futuro. . . . .	36
3.10	Proyecciones de superficies regadas en el Valle de Lluta y el Sector Costero de acuerdo a los casos considerados, ya sea aumento nulo, aumento hasta llegar a las 2800 hectáreas, y aumento hasta llegar hasta las 200 hectáreas. . . . .	37
3.11	Bombeos totales históricos y proyectados en el Valle de Lluta y el Sector Costero. . . . .	38
4.1	Caudales observados y simulados en las subcuencas RCH, RCA y RLA. . . . .	40
4.2	Caudales observados y simulados en la subcuenca RLP. . . . .	42
4.3	Niveles subterráneos simulados y observados, para los pozos J-1 y J-A. . . . .	43
4.4	Niveles subterráneos simulados y observados, para los pozos J-2 y J-B. . . . .	43
4.5	Balance hídrico histórico para la Cuenca del Río Lluta, calculado mediante la modelación acoplada. . . . .	45
4.6	Comparación de caudales medios mensuales históricos y proyectados, inmediatamente aguas arriba de la ubicación del embalse Chironta. . . . .	46
4.7	Balance hídrico medio anual proyectado para el Escenario BAU. . . . .	48

4.8	Balance hídrico medio anual proyectado para el Escenario 1. . . . .	49
4.9	Balance hídrico medio anual proyectado para el Escenario 2. . . . .	50
4.10	Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referencia- les de cada uno de los escenarios, para el pozo J-A. . . . .	51
4.11	Cobertura de riego anual (2020-2050) para el Valle de Lluta. En el eje se- cundario se cuantifica la precipitación anual representada por el gráfico de barras. . . . .	52
4.12	Cobertura de riego anual (2020-2050) para el Sector Costero. En el eje se- cundario se cuantifica la precipitación anual representada por el gráfico de barras. . . . .	53
A.1	Esquema de la odelación de cultivos en el método MABIA. Fuente: Jabloun & Sahli (2012) . . . . .	63
A.2	Esquema del método de <i>humedad del suelo</i> y los procesos representados en él. Fuente: Sieber & Purkey (2015) . . . . .	64
B.1	Red de drenaje de la Cuenca del Río Lluta. . . . .	66
C.1	Distritos Censales en la Cuenca del Río Lluta. . . . .	68
C.2	Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realiza- dos en 1997 y 2007, para el Valle de Lluta. Fuente: Elaboración Propia en base a datos de INE (2007, 1997). . . . .	69
C.3	Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el Valle de Lluta. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaboración Propia en base a datos de INE (2007, 1997). . . . .	71
C.4	Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realiza- dos en 1997 y 2007, para el Sector Costero. Fuente: Elaborado a partir de INE (2007, 1997). . . . .	72

C.5	Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el Sector Costero. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaborado a partir de datos de INE (2007, 1997). . . . .	72
C.6	Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realizados en 1997 y 2007, para el sector Putre. Fuente: Elaborado a partir de INE (2007, 1997). . . . .	73
C.7	Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el sector Putre. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaborado a partir de datos de INE (2007, 1997). . . . .	74
C.8	Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realizados en 1997 y 2007, para el sector Socoroma. Fuente: Elaborado a partir de INE (2007, 1997). . . . .	75
C.9	Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el sector Socoroma. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaborado a partir de datos de INE (2007, 1997). . . . .	76
E.1	Series de Suelos presentes en la Cuenca del Río Lluta. Fuente: Elaborado a partir de HWSO (Fischer et al., 2008). . . . .	80
E.2	Relación entre el contenido de arcilla ( <i>% clay</i> ) y contenido de limos ( <i>% silt</i> ), y la Clase de Suelo. Fuente: Jabloun & Sahli (2012). . . . .	81
F.1	Flujo de trabajo seguido para determinar los datos de precipitación implementados en la modelación hidrológica. . . . .	82
F.2	Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas (<30 km) a la Cuenca del Río Lluta, y valores de precipitación media anual (1979-2019). En la etiqueta del nombre de cada estación se indica entre paréntesis la altura en m s.n.m.	83
F.3	Distribución espacial de la Precipitación Media Anual (1979-2019) de CR2MET v2. . . . .	84

F.4	Relación entre Precipitación Media Anual y Altura, <b>dentro</b> de la Cuenca del Río Lluta. Tal como indica la leyenda, los puntos rojos corresponden a píxeles de CR2MET v2 (grillas de ~5 km), y los puntos azules, a las 5 estaciones ubicadas dentro de la cuenca. . . . .	85
F.5	Relación entre Precipitación Media Anual y Altura, en la Cuenca del Río Lluta y cercanías. Tal como indica la leyenda, los puntos rojos corresponden a píxeles de CR2MET v2 (grillas de ~5 km), y los puntos azules, a las estaciones ubicadas dentro de la cuenca y aquellas que están a menos de 30 km de los límites de la cuenca. . . . .	86
F.6	Comparación entre precipitación CR2MET v2 vs estaciones pluviométricas.	87
F.7	Comparación de las Precipitaciones Medias Mensuales CR2MET v2 y obtenidas con RFMEP, meses Marzo a Abril. . . . .	88
F.8	Comparación de las Precipitaciones Medias Mensuales CR2MET v2 y obtenidas con RFMEP, meses Mayo a Agosto. . . . .	89
F.9	Comparación de las Precipitaciones Medias Mensuales CR2MET v2 y obtenidas con RFMEP, meses Septiembre a Diciembre. . . . .	90
F.10	Factores de corrección mensuales determinados para RFMEP, considerando como referencia CR2MET v2 (1979-2019). . . . .	91
F.11	Precipitación media mensual RFMEP corregida (1979-2019). . . . .	92
F.12	Comparación entre precipitación RFMEP corregida vs estaciones pluviométricas. . . . .	93
G.1	Comparación de temperaturas máximas del producto CR2MET v2 y de las estaciones meteorológicas locales. . . . .	94
G.2	Comparación de temperaturas mínimas del producto CR2MET v2 y de las estaciones meteorológicas locales. . . . .	95
H.1	Comparación entre productos históricos de precipitación. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017) . . . . .	97

H.2	Diferencia porcentual entre productos históricos de precipitación. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017) . . . . .	97
H.3	Comparación entre productos históricos de temperatura. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017) . . . . .	98
H.4	Comparación porcentual de productos históricos de temperatura. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017) . . . . .	98
H.5	Comparación de GCMs para precipitación. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017) . . . . .	99
H.6	Comparación de GCMs para temperatura. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)	99
I.1	Curva Volumen-Elevación estimada para el embalse Chironta, los puntos marcados en rojo corresponden a los únicos datos considerados a partir de los antecedentes (DOH, 2012), el resto de puntos se estima al considerar una forma razonable para el embalse. . . . .	100
K.1	Balance hídrico medio anual subterráneo para periodo histórico. . . . .	106
K.2	Balance hídrico medio anual subterráneo proyectado para periodo futuro, Escenario BAU. . . . .	107
K.3	Balance hídrico medio anual subterráneo proyectado para periodo futuro, Escenario 1. . . . .	107
K.4	Balance hídrico medio anual subterráneo proyectado para periodo futuro, Escenario 2. . . . .	108
L.1	Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-1. . . . .	109
L.2	Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-A. . . . .	110
L.3	Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-2. . . . .	110

L.4	Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-B. . . . .	111
-----	---	-----

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Descripción del problema

En los últimos años los organismos estatales de Chile relacionados a la administración del recurso hídrico, en particular Dirección General de Aguas (DGA), han reconocido la compleja situación de escasez hídrica a nivel nacional y que el centro de esta problemática radica en una ineficiente gestión del agua, que hace su uso insostenible en el tiempo (DGA, 2019a). Esta situación indudablemente se ve empeorada en la zona central del país dada la particular y extensa megasequía experimentada durante la última década (Garreaud et al., 2017, 2020). En este contexto, la DGA ha lanzado una serie de licitaciones para elaborar Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) en varias cuencas de nuestro país, en los que se ha propuesto incorporar un nuevo enfoque de gestión estratégico por cuenca, que proporcione conocimiento y diagnóstico para formular planes de corto, mediano, y largo plazo (DGA, 2019a).

En particular, la consultora “Ingeniería y Consultoría en Aguas SpA (ICASS)” se encuentra actualmente ejecutando el PEGH de la Cuenca del Río Lluta, ubicada de la Región de Arica y Parinacota. Para este PEGH es necesario realizar una modelación hidrológica a nivel superficial y subterráneo (ICASS, 2019), integrando en una única herramienta (DGA, 2019b) un modelo superficial WEAP (Sieber & Purkey, 2015) con un modelo de aguas subterráneas MODFLOW (Harbaugh, 2005).

Esta propuesta de actividad de titulación comenzó con el desarrollo de la práctica profesional N° II del estudiante que suscribe el presente trabajo, a partir de la cual se le dio continuidad para poder participar de este proyecto. La actividad propuesta corresponde a la implementación y calibración de un modelo hidrológico superficial WEAP con todas las componentes de oferta y demanda hídrica que ello implica, el cual será luego acoplado a un modelo MODFLOW desarrollado en paralelo por ICASS. Con la situación histórica descrita, se pasará a forzar el modelo con variables meteorológicas proyectadas a 30 años, considerando un escenario de cambio climático severo (escenario RCP 8.5). Por lo tanto, la

presente actividad de titulación busca desarrollar un modelo hidrológico y acoplarlo a un modelo de aguas subterráneas, con el fin último de facilitar el análisis técnico de futuras decisiones en materia de recursos hídricos en la Cuenca del Río Lluta.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

- Desarrollar una herramienta de modelación integrada superficial-subterránea que sirva de soporte a la elaboración de un Plan Estratégico de Gestión Hídrica para la Cuenca del Río Lluta.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- **Objetivo específico 1:** Implementar un modelo hidrológico superficial en WEAP para la Cuenca del Río Lluta, que describa la situación histórica de oferta y demanda hídrica.
- **Objetivo específico 2:** Acoplar el modelo superficial en WEAP con un modelo subterráneo existente previamente calibrado (trabajo en conjunto con ICASS).
- **Objetivo específico 3:** Estimar la oferta y demanda hídrica futura de la Cuenca del Río Lluta, considerando un escenario de cambio climático severo (escenario RCP 8.5).

**CAPÍTULO 2**  
**ANTECEDENTES GENERALES**

## 2.1. Zona de estudio: Cuenca del Río Lluta

La Cuenca del Río Lluta está ubicada en la Región de Arica y Parinacota, tiene un área de  $3415 \text{ km}^2$  y se extiende entre las latitudes  $17.63^\circ$  y  $18.51^\circ\text{S}$ , y entre las longitudes  $70.34^\circ$  y  $69.35^\circ\text{O}$ . La cuenca cubre parte de las comunas de Arica, Putre y General Lagos.

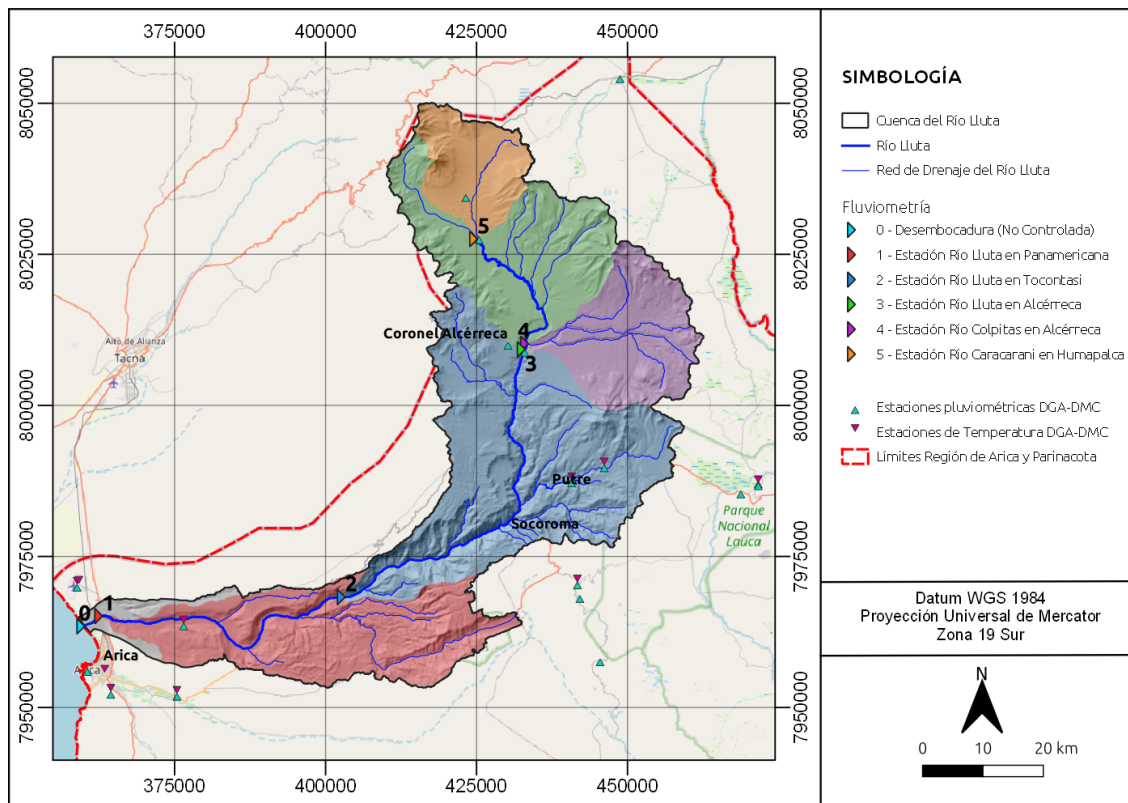
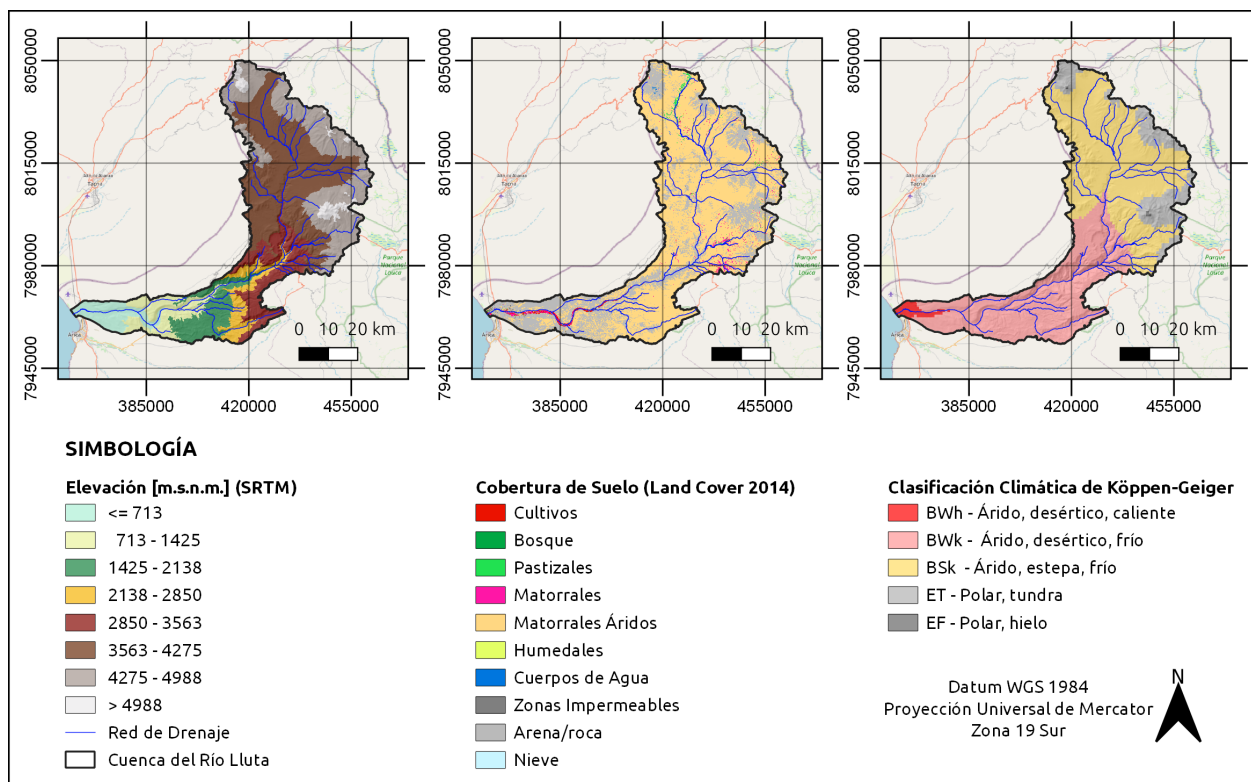


Figura 2.1: Ubicación la Cuenca del Río Lluta.

El Río Lluta tiene una longitud de 147 km, que van desde la unión de los ríos Caracarani y Azufre por el norte, hasta la desembocadura del Río al Océano Pacífico, cerca de la ciudad de Arica (ver Figura 2.1). El río presenta escurrimiento exorreico permanente y su cuenca se clasifica como preandina (DGA, 2004).

### 2.1.1. Caracterización de la cuenca

En la Figura 2.2 se presentan las elevaciones, la cobertura de suelo y la clasificación climática de la cuenca. Las elevaciones van desde el nivel del mar en la desembocadura, hasta poco más de 5000 m s.n.m en la cordillera. La DGA a través de los mapas vectoriales de “Subcuencas Banco Nacional de Aguas” diferencia la subcuenca Lluta Bajo y la subcuenca Lluta Alto por una división que es similar a la isolínea de los 3500 m s.n.m según el mapa de elevaciones de la Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Elevación según SRTM (Farr et al., 2007); cobertura de suelo (Zhao et al., 2016), y clasificación de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018) de la Cuenca del Río Lluta.

De acuerdo a la cobertura de suelo proporcionada por Zhao et al. (2016), en la cuenca predominan básicamente dos tipos: matorrales áridos y suelos rocosos. Estas dos coberturas de suelo corresponden a sectores desérticos, que en el caso del Lluta Bajo se caracterizan por un clima predominantemente árido, desértico y frío (BWk en la clasificación de

Köppen-Geiger). Por otro lado, para el caso del Lluta Alto, las coberturas de matorrales áridos y suelos rocosos se caracterizan por un clima predominantemente árido, estepárido y frío (Bsk en la clasificación de Köppen-Geiger). Las únicas excepciones a estos sectores desérticos corresponden a ciertas zonas donde se ubican las llanuras de inundación del Río Lluta o sus quebradas tributarias. En el caso del Lluta Alto estos sectores corresponden a praderas y bofedales, que se presentan principalmente en la Quebrada Caracarani (DGA, 2001) en la parte más alta de la zona de estudio. En el caso del Lluta Bajo se encuentran zonas con vegetación correspondientes al denominado Valle de Lluta, donde se presentan sectores asociados a matorrales y cultivos.

El Valle de Lluta será el punto focal de la modelación integrada, ya que es donde se localiza la mayor parte de la demanda antrópica de la cuenca, originada por extracciones superficiales para uso agrícola, a lo que se suman los bombeos desde el acuífero. En la Figura 2.3 se muestran las zonas del valle con desarrollo agrícola.



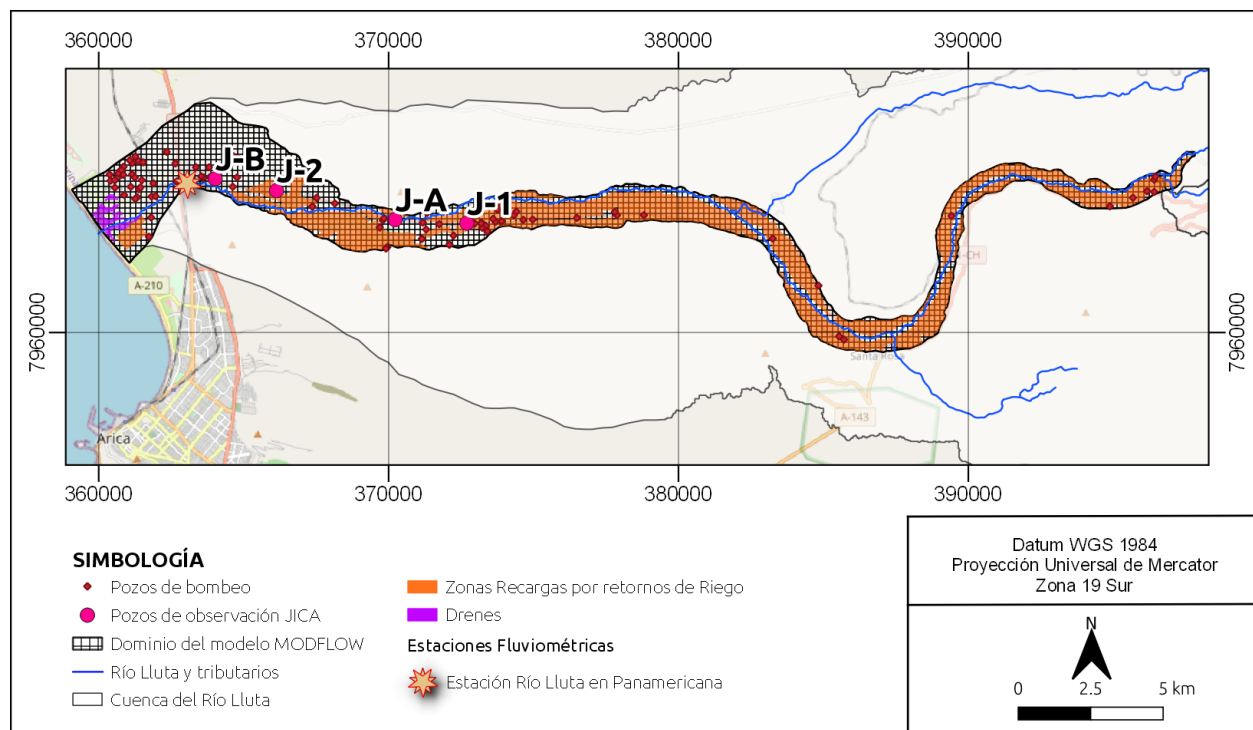
**Figura 2.3:** Zonas cultivadas en el Valle de Lluta. Fuente: Profesionales de ICASS en terreno.

### 2.1.2. Acuífero del Valle de Lluta

A continuación se describe brevemente el acuífero denominado *Lluta Bajo*, que es el sistema subterráneo que ICASS ha utilizado para simular los flujos de aguas subterráneas en la Cuenca del Río Lluta y, que en el contexto de este trabajo, ha sido integrado en la modelación acoplada WEAP-MODFLOW.

El dominio del acuífero del Lluta Bajo se extiende desde la localidad de Churiña (tramo final del Río Lluta) hasta la desembocadura en el mar. El modelo numérico que ha desarrollado ICASS corresponde a una actualización y mejora del modelo MODFLOW existente desarrollado por ESSAT (1998), el cual no ha sido actualizado desde 1998. Este modelo es de tipo monocapa, y ha sido calibrado tanto para régimen estacionario, situación pre-1998; como transiente, periodo 1998-2019.

En la Figura 3.8 se muestran el dominio del modelo subterráneo desarrollado por ICASS, incluyendo los elementos más importantes a tener en consideración para el acople del WEAP-MODFLOW.



**Figura 2.4:** Extensión del modelo numérico del acuífero de Lluta Bajo. Fuente: Elaboración propia, datos recopilados por ICASS.

A continuación se destacan los aspectos más importantes de los elementos mostrados en la Figura 2.4:

- **Extensión del acuífero y geometría:** Desde las primeras exploraciones de agua sub-

terránea en el Valle de Lluta (DGA, 1995) se ha registrado un nivel confinante de alrededor de 5 metros de espesor, a una profundidad entre 30 y 50 metros, el cual separaría un acuífero superior de uno inferior desde el sector de Chacabuco hacia aguas abajo. Durante el desarrollo de la modelación, ICASS no consideró necesario la incorporación de este nivel, discretizando el modelo en una única capa que abarca ambos acuíferos, en base al modelo existente (ESSAT, 1998), y a la habilitación de los pozos de observación y principales captaciones en la zona.

- **Pozos de bombeo:** En el Valle de Lluta se identifican varias obras para la captación de aguas subterráneas (pozos profundos o norias). El agua extraída de estas fuentes se destina principalmente a uso sanitario e industrial, y en menor medida a uso minero y riego. Para mayor precisión, ICASS ha definido la ubicación de los pozos a partir de expedientes digitalizados de derechos de aprovechamiento de aguas (coordenadas, referencia escrita, plano/bosquejo), por sobre las coordenadas registradas en el Catastro Público de Aguas (CPA).
- **Pozos de observación:** se cuenta con niveles observados en cuatro pozos, con profundidades que van de 145 a 200 metros. Estos pozos fueron construidos en el contexto del estudio de DGA (1995) ejecutado por JICA (*Japan International Cooperation Agency*), y corresponden a los pozos J-1, J-A, J-2 y J-B (Figura 2.4). La DGA se encarga de su monitoreo, con frecuencia mensual a trimestral, desde el año 1998. Sin embargo, su registro estadístico presenta discontinuidades importantes. Adicionalmente, el pozo J-1 cuenta con datos medidos entre 2018 y 2019, como parte del seguimiento ambiental del embalse Chironta que realiza la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).
- **Dren:** La evaporación desde la reserva natural municipal “Humedal del Río Lluta” ubicada en la desembocadura del río, se implementó en el modelo como una zona de dren. En particular, se asignó a 495 celdas la condición tipo dren, con una conductancia de  $500 \text{ m}^2/d$ , y elevación de 0 m s.n.m en la línea de costa, para luego seguir

la topografía hacia el este.

Por último, las zonas de recargas por retorno por riego y la interacción río-acuífero, se han considerado a partir de resultados preliminares de la modelación acoplada WEAP-MODFLOW tratada en este trabajo.

Para mayor detalle sobre el modelo subterráneo, se puede consultar al Anexo de Modelación Hidrológica del informe *Volumen I: "Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las Cuencas de Lluta y Pampa del Tamarugal"* a ser publicado por DGA durante el año 2021.

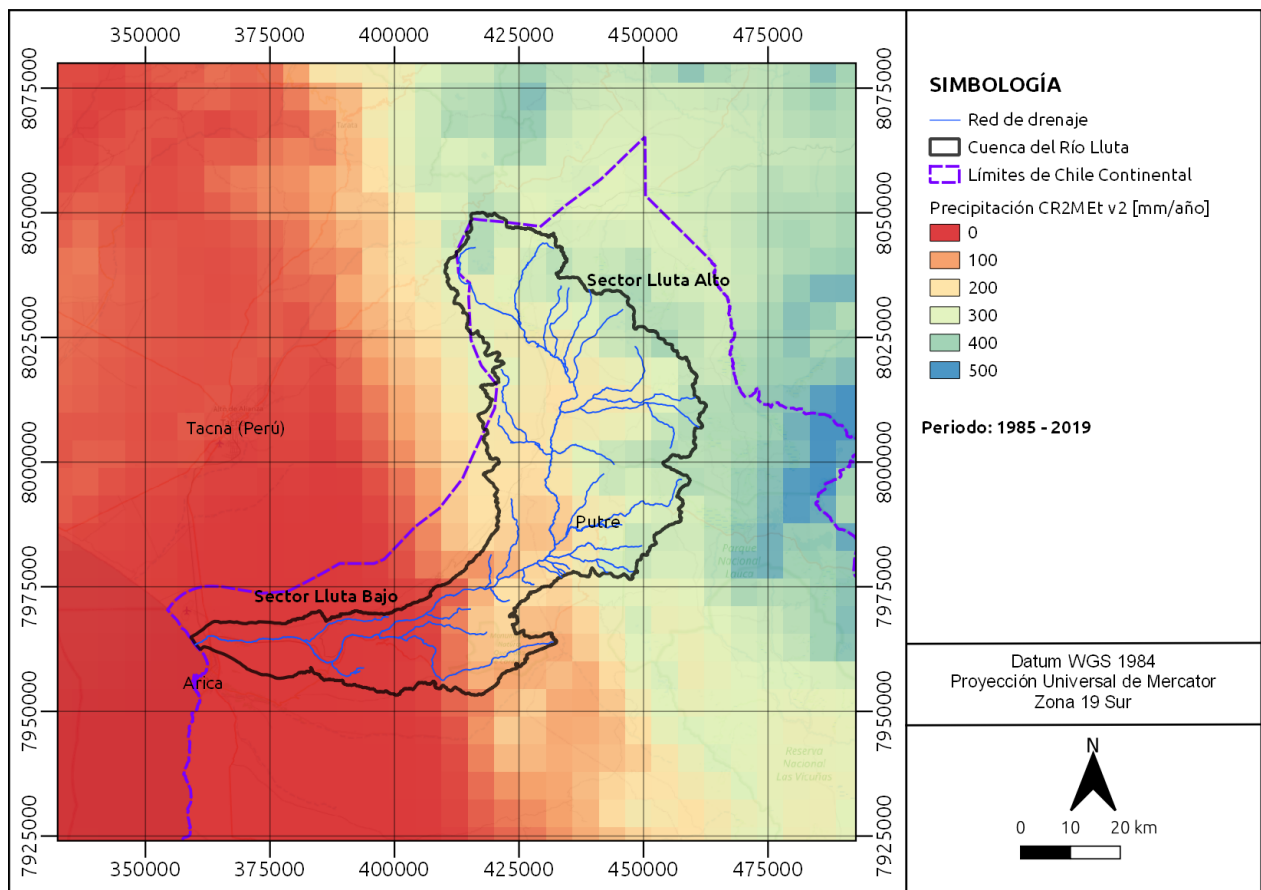
### **2.1.3. Oferta hídrica de la cuenca**

De acuerdo al estudio "Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro" (DGA, 2018), la Cuenca del Río Lluta posee una precipitación media anual de 174.2 mm para el periodo 1985-2015. En el Balance Hídrico Nacional precedente (DGA, 1987), este valor había sido estimado en 180 mm para el periodo 1950-1980. Adicionalmente el estudio de DGA (2016), desarrollado de manera más focalizada en la zona de estudio, indica que la precipitación media anual de la cuenca corresponde a 190 mm, considerando el periodo 1985-2014. Dado que los valores entregados en estos antecedentes presentan diferencias entre sí (específicamente los dos más recientes, por variantes metodológicas que pueden ser consultadas a través de las referencias correspondientes), y que ninguno de ellos se ajusta al periodo de estudio considerado en la modelación desarrollada en este trabajo, se hace necesario realizar una estimación que considere los últimos datos disponibles para esta zona.

De esta forma, el valor característico de la precipitación media anual se ha calculado en base a los datos del producto de precipitación CR2MET v2, el cual corresponde a un conjunto de datos grillados desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, Conicyt-FONDAP/15110009). Si bien esta versión del producto no se encuentra do-

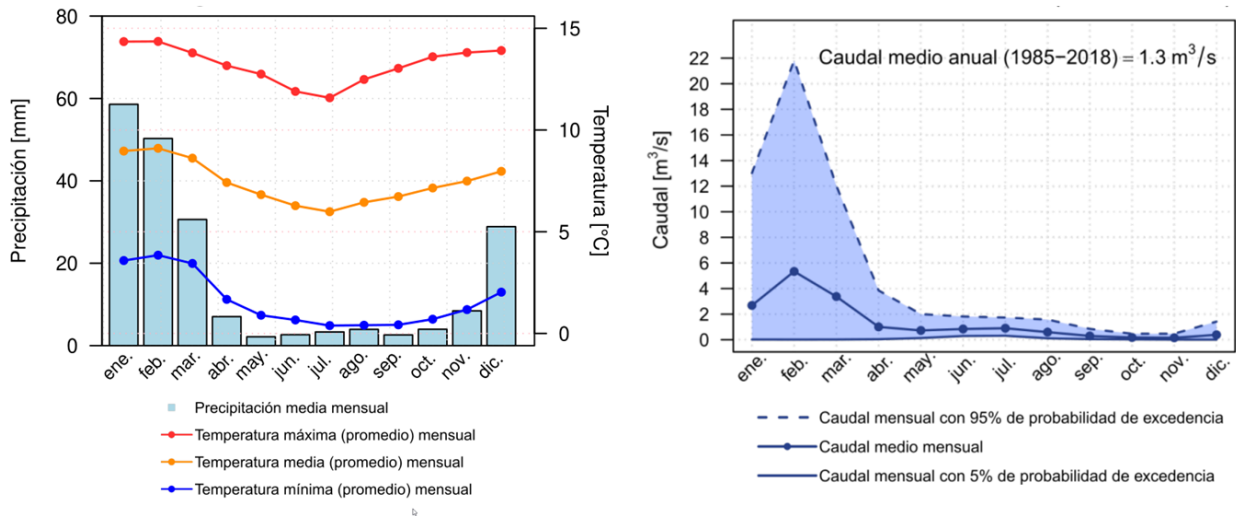
cumentada, resulta ser una versión renovada del producto CR2MET (DGA, 2018; Boisier et al., 2018; DGA, 2017), usado en los estudios de actualización del balance hídrico nacional, mencionados en el párrafo anterior.

De acuerdo a CR2MET v2 la **precipitación media anual de la Cuenca del Río Lluta se establece en 207 mm**, considerando el periodo 1985-2019. Sin embargo, este valor medio anual no se distribuye uniformemente dentro de la cuenca (ver Figura 2.5), ya que en el sector Lluta Bajo la precipitación media anual tiene valores incluso cercanos a 0 mm (Valle de Lluta), los cuales ascienden en dirección noreste hasta llegar a valores cercanos a 387 mm en la parte más alta de la cuenca. Estas características de la precipitación media anual dentro de la cuenca fue también mencionada en el estudio DGA (2010).



**Figura 2.5:** Distribución de la precipitación media anual en la Cuenca del Río Lluta y alrededores. Fuente: Elaboración propia, en base a datos de CR2MET v2 1985-2019.

En cuanto a la distribución temporal de la precipitación media anual, esta se concentra básicamente en el Invierno Altiplánico, que sucede entre los meses de Diciembre y Marzo (ver climograma de la Figura 2.6), lo cual se ve directamente reflejado en los caudales de la estación fluviométrica más cercana a la desembocadura, que es la estación Río Lluta en Panamericana (código BNA 01211001), cuya curva de variación de caudales se presenta en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Climograma de la Cuenca del Río Lluta y curva estacional de caudales de la estación Río Lluta en Panamericana.

#### 2.1.4. Demanda hídrica

La demanda hídrica de la zona de estudio se representa tanto por la demanda que la cuenca se exige por condiciones naturales, así como por las demandas de origen antrópico, principalmente agrícolas (DGA, 2016).

De acuerdo al Atlas Agroclimático (Centro AGRIMED, 2017) la evapotranspiración potencial para la zona de estudio alcanza valores cercanos a 1400 mm/año, la cual corresponde a un valor medio de 150 m³/s para la superficie de la Cuenca del Río Lluta considerada en este estudio.

En la reciente actualización del balance hídrico (DGA, 2018), para la Cuenca del Río Lluta se estimó la evapotranspiración real (natural más riego) en un valor de 163.3 mm (correspondiente a  $17.68 \text{ m}^3/\text{s}$ , para el área de la cuenca establecida en el presente estudio). El valor anterior es muy cercano al obtenido en el balance hídrico de 1987 (DGA, 1987), donde se determinó un valor de 165.6 mm/año ( $19.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Por otra parte, el estudio (DGA, 2016) realizó balances en las subcuencas del Río Lluta, estimando una evapotranspiración real de  $18.59 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Usos del agua

En cuanto a los usos del agua, de acuerdo al estudio de DGA (2016), se reconocen actividades de solo 4 sectores: agrícola, sanitario, minero y agropecuario, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1:** Usos de agua en la cuenca del Río Lluta. Fuente: Elaborado a partir de DGA (2016).

Actividad	Demanda ( $l/s$ )	Porcentaje del total
Agrícola	2136.2	91.06 %
Agua potable	189.1	8.06 %
Minería	15.1	0.64 %
Agropecuario	5.6	0.24 %

Entre estos usos del agua, básicamente la demanda se concentra en el sector agrícola, que se encuentra presente en toda la cuenca y de naturaleza principalmente superficial, aunque con una mayor concentración de actividad en el sector de Lluta Bajo. Por otra parte, el sector sanitario utiliza principalmente agua subterránea para abastecer de agua potable a la población mediante diversos sistemas de Agua Potable Rural localizados en algunos pueblos y mediante la Planta Desaladora de Lluta perteneciente a Aguas del Altiplano (DGA, 2016).

### 2.1.5. Proyecciones de cambio climático

En el estudio Actualización de Balance Hídrico Nacional (ABHN) (DGA, 2017) se utilizaron modelos de circulación global (*Global Circulation Model*, GCM) para generar proyecciones climáticas de largo plazo. Los GCMs contienen proyecciones de cambio climático asociados a distintos forzamientos radiativos, los cuales determinan cuánta será la magnitud del cambio para las variables de interés, que principalmente consisten en aumento en temperatura del aire y disminución de precipitaciones (DGA, 2017).

El quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC propuso en 2014 cuatro posibles trayectorias (*pathways*) para describir posibles futuros climáticos según el volumen de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos en los próximos años. Estas trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) corresponden a diferentes concentraciones (no de emisiones) de gases de efecto invernadero adoptadas por el IPCC. Dentro de la selección de escenarios de cambio climático realizada en la ABHN, se consideraron solo escenarios RCP 8.5 (más desfavorables), y que en virtud de los actuales niveles de emisiones en el planeta resultan ser lo más consistentes (DGA, 2017). Un escenario RCP 8.5 indica que cada año la radiación incidente aumenta hacia el 2100 de modo de incrementar  $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  respecto de la era preindustrial. De acuerdo al criterio de los especialistas del proyecto ABHN, los GCMs considerados para ser aplicados en las proyecciones de cambio climático se consideran a partir de la representatividad de la sensibilidad climática (nivel de respuesta frente a las forzantes extremas), eligiendo específicamente a los siguientes modelos (DGA, 2018): CSIRO-Mk3-6-0 (sensibilidad baja extrema), CCSM4 (sensibilidad baja moderada), MIROC-ESM (sensibilidad alta moderada) e IPSL-CM5A (sensibilidad alta extrema). Los GCMs indicados anteriormente han sido corregidos y escalados en el contexto del proyecto ABHN (DGA, 2018).

En el contexto de la consultoría desarrollada por ICASS, los datos de estos GCMs ya escalados en el estudio ABHN, fueron proporcionados por la DGA para la implementación

de los escenarios futuros. Los datos recepcionados corresponden a las siguientes variables/GCMs:

- Precipitación y temperatura media del aire para el modelo CSIRO-Mk3-6-0, escalado y con sesgo corregido. Periodo 1979-2060.
- Precipitación y temperatura media del aire para el modelo CCSM4, escalado y con sesgo corregido. Periodo 1979-2060.
- Precipitación y temperatura media del aire para el modelo MIROC-ESM, escalado y con sesgo corregido. Periodo 1979-2060.
- Precipitación y temperatura media del aire para el modelo IPSL-CM5A, escalado y con sesgo corregido. Periodo 1979-2060.
- Promedio de los GCMs anteriores. Periodo 1979-2060.

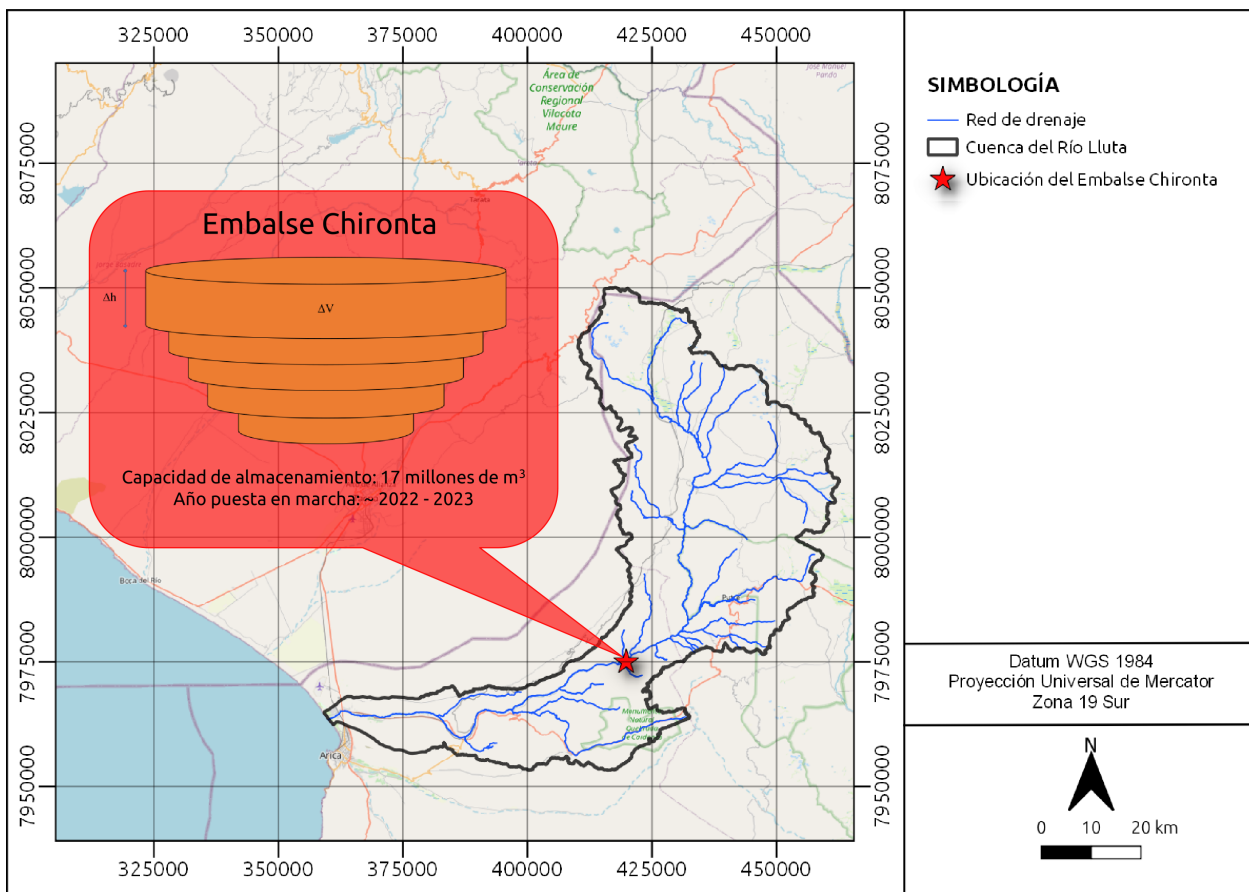
Se agrega también la recepción de las observaciones históricas usadas para la corrección del sesgo en los GCMs anteriores, que cubren el periodo 1979-2015. Este producto consiste en una versión antigua de CR2MET (en adelante indicado como CR2MET-ABHN, ya que se desconoce el número de la versión exacta). Toda la información, ya sea los GCMs escalados y las observaciones históricas, fueron recibidas en formato grillado con resolución espacial de  $0.5^\circ$ , y a escala temporal mensual.

#### **2.1.6. Mejoras futuras en infraestructura**

##### **Embalse Chironta**

La Cuenca del Río Lluta actualmente no cuenta con embalses en funcionamiento. Sin embargo, a la fecha en que se desarrolla el presente estudio, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) prepara la puesta en marcha del embalse Chironta, cuya construcción se ha estado

realizando desde el año 2017. Las obras proyectadas consisten en una presa, un túnel de desviación, un evacuador de crecidas, obras anexas, caminos de acceso y de borde (DOH, 2012). En la Figura 2.7 se indica la ubicación del embalse, en la angostura de Chironta en el Valle de Lluta, a 70 km al NE de la ciudad de Arica. En la Tabla 2.2 se indican los detalles técnicos del embalse a ser considerados en la modelación.



**Figura 2.7:** Ubicación del embalse Chironta en la Cuenca del Río Lluta.

**Tabla 2.2:** Detalles técnicos del embalse Chironta. Fuente: Datos tomados de DOH (2012).

Volumen de almacenamiento máximo	17 millones $m^3$
Volumen muerto	7.5 millones $m^3$
Superficie inundable	56 ha
Altura presa	80 m
Longitud de presa	274 m
Ancho de presa	10 m

## 2.2. Modelo de simulación WEAP

El modelo de simulación *Water Evaluation And Planning System* (WEAP) es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, desarrollada por el Stockholm Environment Institute's U.S. Center. Este software proporciona un marco integral, flexible y fácil de usar para el análisis de políticas de gestión del agua (SEI, 2016). El modelo hidrológico utilizado en WEAP es semi-distribuido, con un área configurada como un conjunto de subcuencas contiguas que representan toda la extensión de la zona de estudio modelada, discretizadas en elementos conocidos como Unidades Hidrológicas. Un conjunto homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, las que se encuentran divididas a partir de diferentes tipos de cobertura/uso de suelo (Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile - Stockholm Environment Institute, 2009).

En el desarrollo de este trabajo, se han considerado dos métodos para la modelación de las Unidades Hidrológicas:

- Método de *humedad del suelo* (Sieber & Purkey, 2015): Aplicado a las unidades hidrológicas que representan cuencas de cabecera, y cuencas naturales en general.
- Método MABIA (Sieber & Purkey, 2015; Jabloun & Sahli, 2012): Aplicado a las unidades hidrológicas que representan zonas de riego.

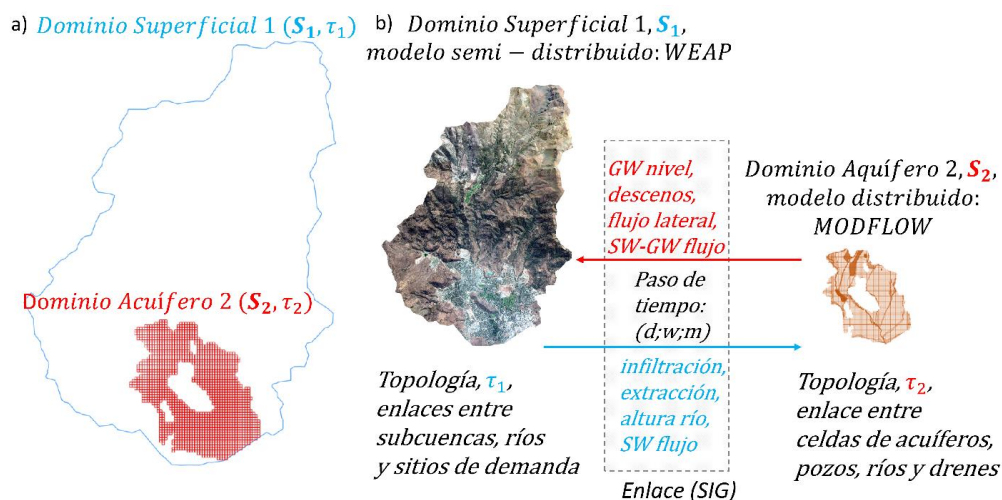
Ambos métodos pueden ser consultados en el Anexo A o en SEI (2016).

### 2.2.1. Acople WEAP-MODFLOW

En WEAP es posible hacer la vinculación entre la modelación superficial semi-distribuida con un modelo de aguas subterráneas completamente distribuido MODFLOW (Harbaugh,

2005). La vinculación de ambos modelos requiere de un proceso de enlace entre los elementos de WEAP y las celdas correspondientes en el modelo MODFLOW. La ventaja de acoplar MODFLOW a WEAP consiste en poder describir la interacción de los procesos superficiales y subterráneos de manera coherente e integrada, para cada paso de tiempo utilizado en la simulación (DGA, 2019b).

Los resultados de WEAP que se envían hacia MODFLOW son infiltración de agua subterránea (recarga), extracciones (bombeo), nivel del agua en tramos de un río y escorrentía de aguas superficiales, los cuales se utilizan como datos de entrada en MODFLOW. Por otra parte, los resultados MODFLOW que se envían hacia WEAP son el nivel de aguas subterráneas, variación de niveles subterráneos, flujos laterales entre acuíferos e interacciones agua superficial – agua subterránea, los cuales son utilizados como datos de entrada en WEAP (DGA, 2019b).



**Figura 2.8:** Topología entre modelos WEAP-MOFLOW y flujos de intercambio para cada paso de tiempo. Fuente: Elaborado por DICTUC-SEI (DGA, 2019b).

# **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA**

### 3.1. Esquema general

Desde el punto de vista conceptual, la cuenca del Río Lluta presenta dos sectores con distintas condiciones hidrometeorológicas, geomorfológicas y de intervención humana: el sector del Lluta Alto, zona donde se concentran las precipitaciones de la cuenca y que se encuentra con menos intervención antrópica; y el sector del Lluta Bajo, donde las precipitaciones son prácticamente nulas y donde se presentan las demandas agrícolas de la cuenca, además del acuífero de Lluta Bajo. En la Figura 3.1 se esquematizan las componentes del balance hídrico superficial de la cuenca, en el que está puesto el foco de este trabajo.

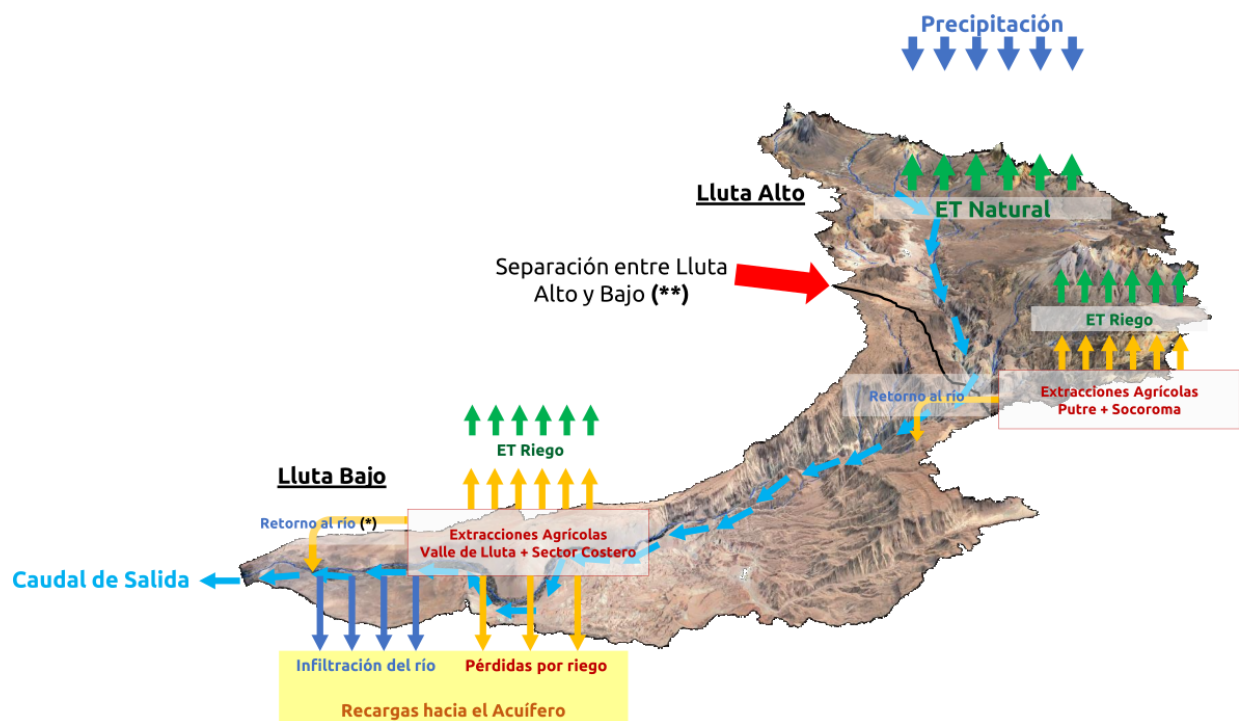


Figura 3.1: Modelo conceptual del sistema superficial.

Notas: (\*) Los retornos de riego devueltos al río se implementaron en las zonas que no se acoplaron al modelo subterráneo. (\*\*) Límite aproximado entre Lluta Alto y Lluta Bajo tomado a partir de las subcuencas del Banco Nacional de Aguas (BNA).

### 3.2. Descripción de la modelación acoplada

Las características generales del modelo superficial-subterráneo desarrollado, son las siguientes:

- **Nombre:** Modelo integrado WEAP-MODFLOW para la Cuenca del Río Lluta.
- **Área de modelación:** 3415 km<sup>2</sup>.
- **Ubicación representativa:** 18.11° S, 69.71° O. Región de Arica y Parinacota, Chile.
- **Área del modelo subterráneo:** 58,6 km<sup>2</sup>.
- **Escala temporal de modelación:** Mensual.
- **Motor de modelación superficial:** WEAP (Sieber & Purkey, 2015).
- **Motor de modelación subterránea:** MODFLOW-NWT (Niswonger et al., 2011).

En este punto es importante aclarar que la modelación se divide en dos componentes fundamentales, la parte superficial y la parte subterránea, las cuales finalmente se unen en lo que se conoce como **modelo acoplado WEAP-MODFLOW**. Tal como ya se ha indicado, la modelación superficial ha estado a cargo enteramente por quien suscribe el presente trabajo, mientras que la parte subterránea ha estado a cargo de los especialistas de ICASS.

#### 3.2.1. Modelo superficial

En esta sección se describen los datos y metodología utilizada para definir las subcuencas utilizadas en el modelo superficial. La delimitación de la cuenca se realizó en conjunto con la definición de la red de drenaje y las subcuencas interiores, lo cual se realizó a partir de modelos de elevación digital SRTM (de 30 m de resolución) y ALOS PALSAR (de 12.5 m de resolución) por separado, para una posterior comparación. El detalle sobre la delimitación, así como la identificación de los ríos y quebradas en la cuenca, puede ser consultado en el Anexo B.

De esta forma, en este estudio se obtuvo un total de 16 subcuencas (nivel 1), las cuales han sido subdivididas a partir de información de cobertura de suelos (nivel 2) y bandas de elevación (nivel 3), tal como se muestra en los paneles (a), (b) y (c) de la Figura 3.2, respectivamente.

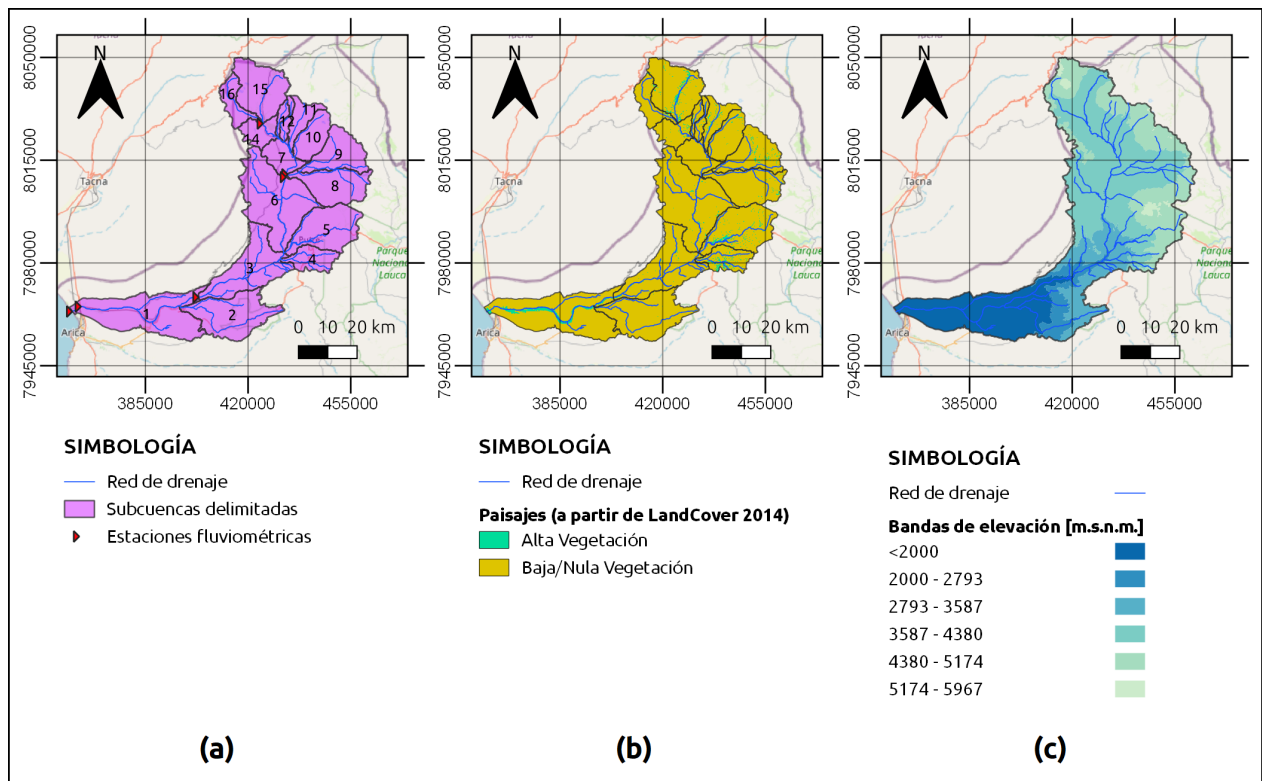


Figura 3.2: Niveles de discretización para la definición de Unidades de Respuesta hidrológica.

Las 16 subcuencas (Figura 3.2 (a)) se han definido dando prioridad a la consideración de puntos con control fluviométrico (i.e., todas las estaciones fluviométricas deben definir una subcuenca), además de la consideración de quebradas de importancia (e.g., Putre, Socoroma).

En cuanto al segundo nivel de discretización, se consideraron los datos de cobertura de suelo presentados en el Capítulo 2, donde se agruparon las clases en dos paisajes distintos (Figura 3.2 (b)), un paisaje de alta vegetación que incluye básicamente humedales, pastizales asociados a esos mismos humedales (se encuentran adyacentes), y cierto tipo de

matorrales en la misma situación. El segundo paisaje considerado corresponde a uno de baja/nula vegetación que incluye superficies impermeables, tierras desnudas y matorrales clasificados como “Otros Matorrales Áridos” en la cobertura de suelos Zhao et al. (2016). Esta visión simplificada de los usos de suelo se consideró suficiente para la modelación, teniendo en cuenta que una discretización más detallada de los usos de suelo no tiene mucho sentido considerando otras grandes incertezas en la calibración del modelo (falta de datos de caudales, poca confiabilidad en las forzantes de precipitación y temperatura, falta de datos adicionales de humedad relativa y velocidad del viento, entre otros).

En el tercer nivel de discretización se ha considerado apropiada la definición de bandas de elevación (Figura 3.2 (c)), dada la variabilidad de la precipitación en función de la altura. Se han definido 6 bandas en toda la cuenca, donde la primera va desde los 0 hasta los 2000 m s.n.m considerando el quiebre de la precipitación a los 2000 m s.n.m. expuesto en la Figura F.4 del Anexo F. Las siguientes bandas se definieron cada 800 m, hasta completar seis.

### **3.2.2. Zonas de riego**

Para definir las zonas de riego, se recopiló tanto información sobre derechos de aprovechamiento de aguas, así como también información sobre los tipos de cultivos desarrollados y su cobertura espacial.

Respecto a los derechos de aprovechamiento, en el estudio de DGA (2016) se realizó un catastro de las Comunidades de Aguas (CDA) presentes en la Cuenca del Río Lluta, recabando, entre muchos otros aspectos, información sobre los derechos de tipo eventual de los usuarios presentes en cada CDA, y que se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces (CBR). Además, en el estudio DGA (2016) se determinaron caudales de dotación de los derechos eventuales de estas CDA, los cuales consisten en caudales medios anuales, calculados de acuerdo al volumen total que pueden extraer en los días y horas

específicos en que hacen ejercicio de su derechos. En el Anexo D se muestra el detalle de las CDA ubicadas en el Valle de Lluta y el Sector Costero (Tabla D.1), y los sectores Putre y Socoroma (Tabla D.2).

**Tabla 3.1:** Resumen de las comunidades agrupadas en 19 zonas de riego. Fuente: Elaborado a partir de DGA (2016).

ZR	Grupo de CDA	Usuarios (un)	Acciones (un)	Total CBR (l/s)	Dotación (l/s)	Dot. Hid. (l/s)	Distrito Censal
<i>Sector Costero</i>							
0	Santa Rosa - Beneficencia	61	86.0	120	18.0	29.2	Chinchorro
	Subtotal	61	86.0	120	18.0	29.2	
<i>Valle de Lluta</i>							
1	Valle Hermoso	148	279.0	460	68.8	112.2	Chacalluta
2	Sascapa	67	435.8	215	74.2	52.5	Chacalluta
3	Chacabuco	31	345.2	100	34.5	24.4	Chacalluta
4	El Muro	61	357.1	330	113.8	80.5	Chacalluta
5	La Palma 1 y 2 - Visconti	38	326.7	435	73.5	106.1	Chacalluta
6	Poconchile	37	114.8	195	35.1	47.6	Molinos
7	Purochile	17	67.0	200	36.8	48.8	Molinos
8	Aguataya - La Isla	39	98.0	150	23.7	36.6	Molinos
9	Vilca Chang - Santa Raquel	20	157.6	200	26.5	48.7	Molinos
10	Almonte - Vilca Loredo	14	88.0	347	14.6	84.7	Molinos
11	Bocanegra - Santa Inés	22	147.3	160	25.8	39.0	Molinos
12	Molinos	49	193.1	600	113.8	146.4	Molinos
13	Chaquire - Tocontasi	39	54.2	270	55.8	66.0	Molinos
14	Zora	48	35.2	110	22.7	26.8	Molinos
15	Arancha - Challollapo	35	50.7	180	37.2	44.0	Molinos
16	Vilacollo - Buena Vista	43	42.8	235	48.5	57.4	Molinos
	Subtotal	708	2792.5	4187	805.3	1021.7	
<i>Putre</i>							
17	Putre	876	508541.3	738	348.7	1481.1	Putre
	Subtotal	876	508541.3	738	348.7	1481.1	
<i>Socoroma</i>							
18	Socoroma	463	24264.0	69	23.9	50.3	Socoroma
	Subtotal	463	24264.0	69	23.9	50.3	

Para definir las áreas agrícolas y los tipos de cultivos presentes en la zona de estudio, se utilizaron los datos del VI Censo Nacional Agropecuario (INE, 1997) y del VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal (INE, 2007), mediante los cuales se pudo obtener información discretizada a nivel comunal y de distritos censales. La ubicación de los distritos censales se ha incluido en el Anexo C.

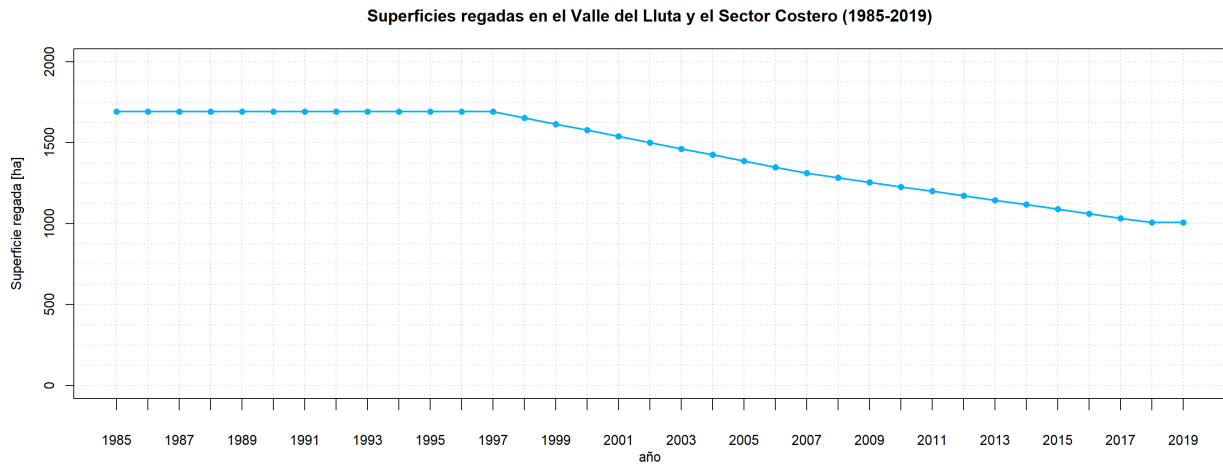
A partir de la información de los censos y los derechos de las CDA, la discretización resultante en la Cuenca del Río Lluta fue de 19 zonas de riego, las cuales se detallan en la Tabla 3.1, definidas a partir de los CDA expuestos en la Tabla D.1 del Anexo D.

El sector del Valle de Lluta abarca 16 zonas de riego, y se caracteriza a partir de los distritos censales Chacalluta y Molinos (Figura C.1), donde se concentra la mayor parte de la demanda agrícola de la cuenca. Este sector es el punto focal para la interpretación de los resultados de los escenarios de gestión, ya que, tal como se indicará más adelante, aquí es donde se proyecta un aumento de las zonas de riego, dado el futuro funcionamiento del embalse Chironta.

El Sector Costero abarca una (1) zona de riego, y se caracteriza a partir del distrito censal Chinchorro (Figura C.1). Es importante indicar que según el Censo Agropecuario de 2007, la superficie cultivada en este sector habría sido de 111 hectáreas, lo cual, según los resultados preliminares de la modelación, no es compatible con el derecho de aprovechamiento de las CDA Santa Rosa y Beneficencia (Anexo D) que se ubican en esa zona. Mediante la modelación se evidenció que para poder cultivar todo el potencial de área de riego en esta zona, las CDA Santa Rosa y Beneficencia requieren más agua de la que pueden extraer a partir del derecho que tienen actualmente ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ), con lo que finalmente se obtienen demandas no satisfechas por límite de extracción. Dado lo anterior, y a pesar de que esta zona se ubica aguas abajo del embalse, se decidió no considerar un aumento en las áreas cultivadas para las proyecciones, dejando como proyección simplemente a las 111 hectáreas.

En el caso de los sectores de Putre y Socoroma, se caracterizaron a partir de los distritos censales del mismo nombre, con una (1) zona de riego para cada uno. Para estas zonas no se proyectó un aumento en las superficies de riego, dado que no se verán favorecidas por la instalación del embalse. Por lo demás, en estas zonas de riego se evidenció la misma situación del Sector Costero, con lo que en ellas la modelación del riego igualmente queda como brecha de la modelación.

A partir de los datos recopilados para el Valle de Lluta y el Sector Costero, en la Figura 3.3 se muestra el resumen la evolución temporal de las superficies de riego, determinadas a partir de los distritos censales Chacalluta y Molinos, y Chinchorro, respectivamente.



**Figura 3.3:** Evolución temporal de las superficies de riego en el Valle de Lluta y el Sector Costero. Fuente: Elaboración Propia en base a datos de INE (2007, 1997) y CNR (2018).

En la Tabla 3.2 muestra la información recopilada adicionalmente para la implementación del método MABIA en las zonas de riego.

**Tabla 3.2:** Datos de entrada para el método MABIA.

Variable	¿Variación Temporal?	Fuente
Tipos de cultivo	No	Censos Agropecuarios (INE, 1997, 2007), y otros estudios (CNR, 2018)
Áreas según cultivo	Si	Censos Agropecuarios (INE, 1997, 2007), y otros estudios (CNR, 2018)
Parámetros de cultivos	No	Librería MABIA integrada en WEAP (Jabloun & Sahli, 2012) basada en FAO-56 (Allen et al., 1998)
Soil Water Capacity	No	HWSD (Fischer et al., 2008), Guía MABIA (Jabloun & Sahli, 2012)
Maximum Infiltration Rate	No	HWSD (Fischer et al., 2008), Guía MABIA (Jabloun & Sahli, 2012)
Eficiencia de Riego	Si	DGA (2017)

En la Tabla 3.2, los datos indicados como HWSD (*Harmonized World Soil Database*) corresponden a la Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2 (Fischer et al., 2008), donde se detallan las series de suelos consideradas para la modelación hidrológica, las clases y las tasas máximas de infiltración de cada una.

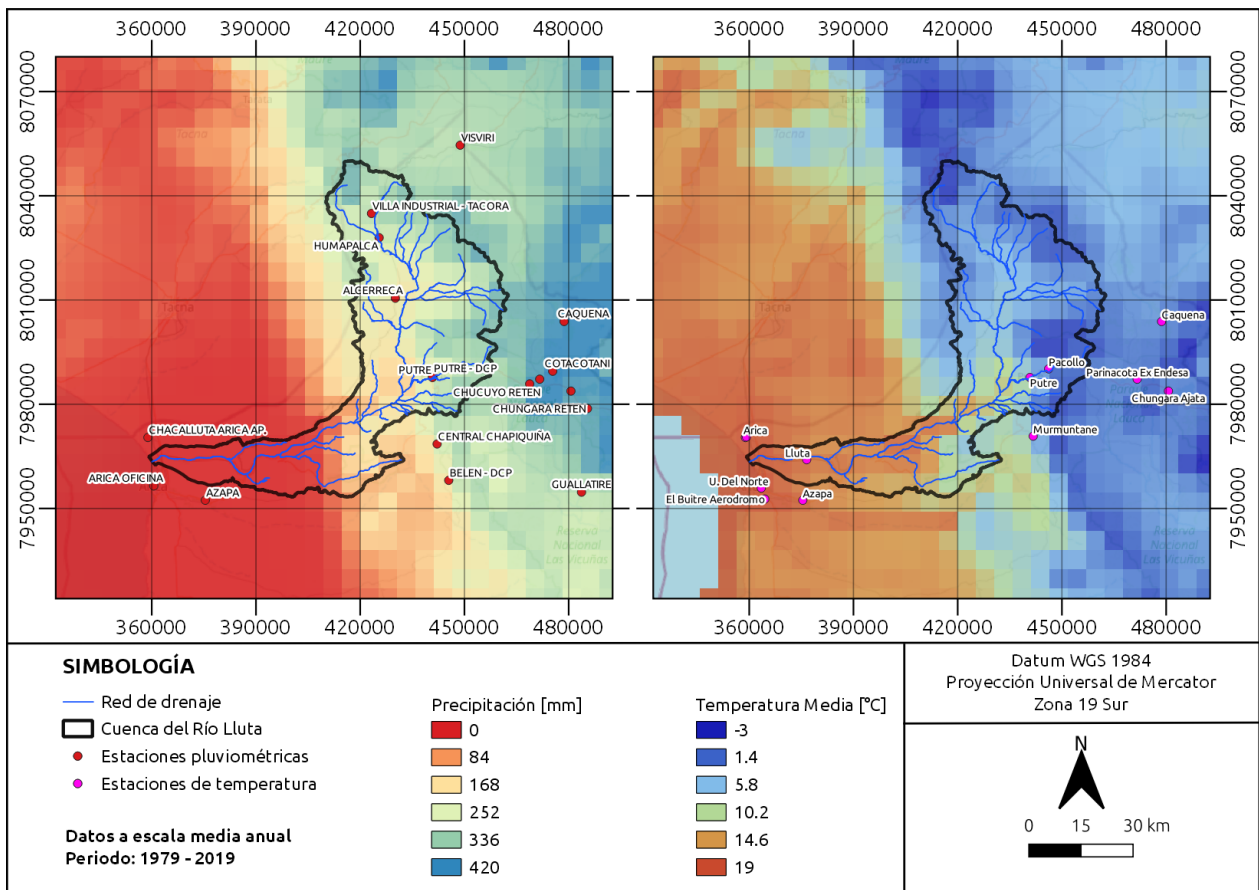
### 3.3. Datos hidrometeorológicos para el modelo superficial

#### 3.3.1. CR2MET v2: datos de precipitación y temperaturas

Para los datos de entrada de precipitación y temperatura (máxima, mínima y media) se ha considerado la implementación del conjunto de datos grillados CR2MET (DGA, 2018; Boisier et al., 2018), descrito en el Capítulo 2. A la fecha de implementación del modelo hidrológico utilizado en este trabajo, CR2MET se encuentra en su versión 2 (CR2MET v2), abarcando el periodo 1979-2019 a escala diaria y para todo el territorio nacional, con una resolución espacial de  $0.05^\circ$  ( 5 km). Los datos se encuentran disponibles en el sitio <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>. En la Figura 3.4 se muestra, para la Cuenca del Río Lluta y alrededores, la distribución de la precipitación media anual y la temperatura media anual obtenidas a partir de CR2MET v2, para el periodo 1979-2019. Esta figura además muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas y de temperatura que serán consideradas en la siguiente sección para la verificación de los datos grillados utilizados en la modelación.

#### Verificación del producto de precipitación CR2MET v2

Antes de utilizar los datos CR2MET v2 en la modelación hidrológica, se realizó una comparación de la precipitación grillada contra mediciones de estaciones pluviométricas ubicadas tanto dentro de la cuenca como en sus alrededores (Figura 3.4). Como resultado de esta comparación se encontraron diferencias importantes a **escala mensual**, lo cual luego



**Figura 3.4:** Distribución de valores medios anuales de precipitación y temperatura media del aire en la Cuenca del Río Lluta. Se ubican también las estaciones pluviométricas y de temperatura consideradas para la verificación de los productos. Fuente: Elaboración Propia en base a datos CR2MET v2.

se vio reflejado en las calibraciones preliminares realizadas al modelo hidrológico, donde no se lograron buenos desempeños en cuanto a la comparación de caudales observados y simulados.

Dado lo anterior, se evaluaron ciertas alternativas, determinando finalmente el uso de una metodología denominada RF-MEP, la cual mediante la combinación de información de uno o varios productos de precipitación, datos de topografía y series de tiempo de estaciones pluviómetros (Baez-Villanueva et al., 2020), permite obtener un producto grillado final mejorado en cuanto a la caracterización de la distribución espacio-temporal de la precipitación. Detalles del producto desarrollado específicamente para la Cuenca del Río

Lluta se encuentran en el Anexo F.

Es importante indicar que, dado que RF-MEP depende de estaciones pluviométricas, puede terminar subestimando la precipitación en altura si es que no se cuenta con datos pluviométricos medidos en esas zonas (Beck et al., 2020). Frente a lo anterior, fue necesario aplicar factores de corrección de precipitación, para el periodo en el que se desarrolló el producto (1979-2019). Para determinar estos factores, se consideró que la mejor alternativa era el uso de los valores medios mensuales del mismo producto CR2MET v2, en el mismo periodo (1979-2019). Esto significa que con el producto final obtenido se determinan los mismos valores medios mensuales y medios anuales de CR2MET v2 para el mismo periodo, pero que se encuentra mejorado ya que representa mejor los eventos mensuales de cada año (para mayor claridad comparar las Figuras F.6 y F.12 del Anexo F).

### **Verificación del producto de temperaturas de CR2MET v2**

En el caso de la temperaturas máximas y mínimas de CR2MET v2, igualmente se hizo una revisión del producto, comparando estos datos a escala mensual con los datos de las estaciones meteorológicas. En el Anexo G se incluye la comparación para temperaturas máximas (Figura G.1) y temperaturas mínimas (Figura G.2). Las estaciones cercanas al sector Lluta Bajo (Azapa, Chacalluta y Lluta, ubicables en la Figura 3.4) presentan una buena correlación para las temperaturas máximas, caso distinto a las estaciones más cercanas a Lluta Alto (Putre, Pacollo y Parinacota Ex-Endesa), donde los pocos datos muestran poca correspondencia entre CR2MET v2 y los datos de terreno. Para el caso de temperaturas mínimas se replica la misma situación anterior. Ante la imposibilidad de contar con datos alternativos sobre temperaturas se optó por usar de todas maneras los de CR2MET v2, pero es importante destacar que esto es una brecha en la modelación, ya sea por el cálculo de evapotranspiración y la representación de proceso de acumulación/derretimiento de nieve.

### 3.3.2. Datos de entrada según método

En la Tabla 3.3 se indican los datos de entrada implementados en la modelación hidrológica con método de *humedad del suelo*.

**Tabla 3.3:** Datos de entrada para el método de *humedad del suelo*.

Variable	Escala temporal	Fuente
Precipitación	Mensual	CR2MET v2 (Boisier et al., 2018)
Temperatura media del aire	Mensual	CR2MET v2 (Boisier et al., 2018)
Humedad Relativa	Mensual	Estaciones meteorológicas (DMC, 2020)
Velocidad del viento	Mensual	Estaciones meteorológicas (DMC, 2020)

Por otro lado, en la Tabla 3.4 se muestran los datos de entrada implementados en la modelación hidrológica con método MABIA.

**Tabla 3.4:** Datos de entrada para el método MABIA.

Variable	Escala temporal	Fuente
Precipitación	Diaria	CR2MET v2 (Boisier et al., 2018)
Temperatura máxima	Diaria	CR2MET v2 (Boisier et al., 2018)
Temperatura mínima	Diaria	CR2MET v2 (Boisier et al., 2018)
Humedad relativa promedio	Diaria	Estaciones meteorológicas (DMC, 2020)
Humedad relativa máxima	Diaria	Estaciones meteorológicas (DMC, 2020)
Humedad relativa mínima	Diaria	Estaciones meteorológicas (DMC, 2020)
Velocidad del viento	Diaria	Estaciones meteorológicas (DMC, 2020)

## 3.4. Calibración del modelo superficial

### 3.4.1. Parámetros de calibración

La calibración superficial ha estado dedicada exclusivamente a los parámetros del método de *humedad del suelo* del modelo WEAP, presentados en el esquema de la Figura A.2.

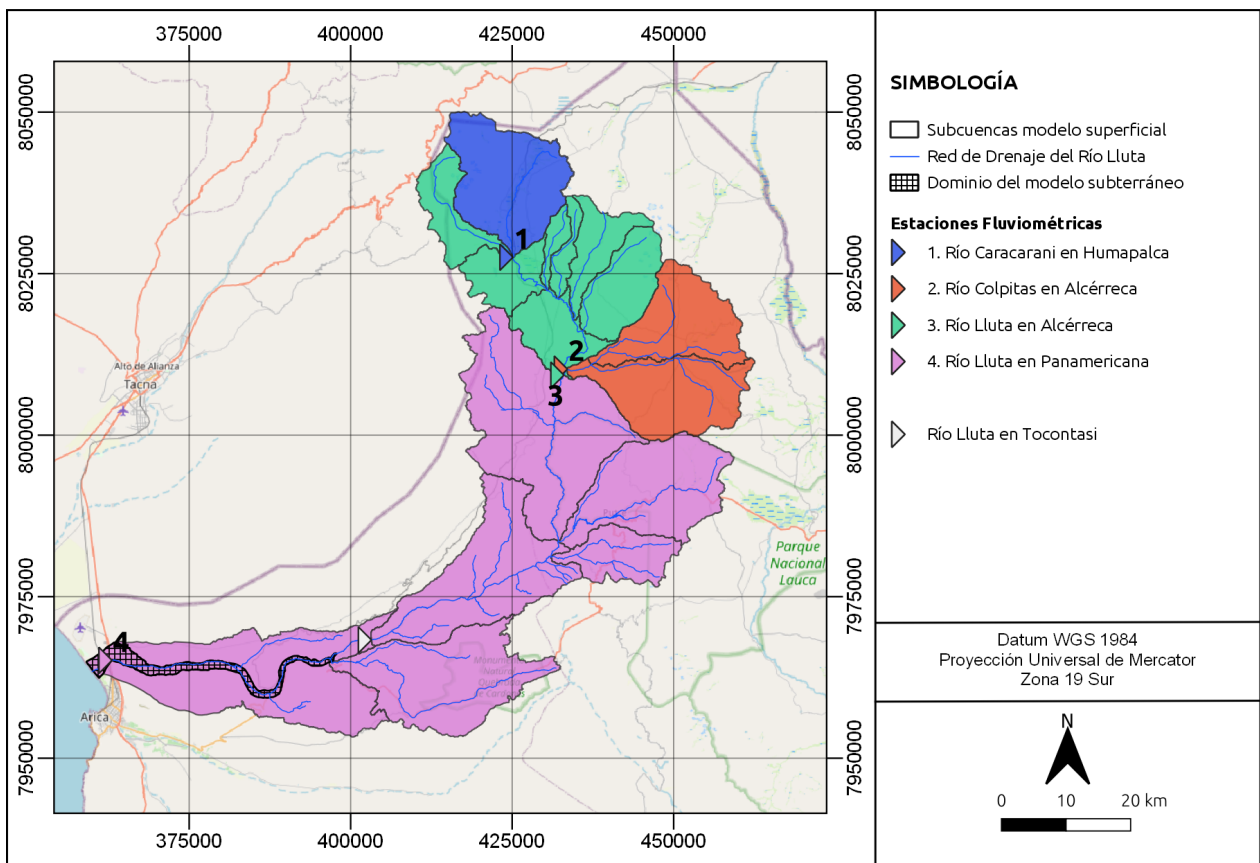
De ellos, particularmente se han elegido siete parámetros asociados a las condiciones del suelo (módulo *Land Use* en WEAP) para la calibración. También se consideraron dos parámetros adicionales que tienen directa relación con la acumulación/derretimiento de nieve (módulo *Climate* en WEAP).

- *Soil Water Capacity, SWC* (mm): Capacidad de almacenamiento del suelo.
- *Soil Water Capacity, DWC* (mm): Capacidad de almacenamiento de la zona profunda.
- *Root Zone Conductivity, RZC* (mm/mes): Conductividad hidráulica de la zona de raíces.
- *Deep Conductivity, DC* (mm/mes): Conductividad hidráulica de la zona profunda.
- *Runoff Resistance Factor, RRF* (): Factor de resistencia a la escorrentía.
- *Preferred Flow Direction (PFD)* (): Dirección preferencial de flujo.
- *Crop Coefficient, Kc* (): Coeficiente de cultivo.
- *Freezing Point, FP* (°C): Temperatura de acumulación de nieve.
- *Melting Point, MP* (°C): Temperatura de derretimiento de nieve.

### 3.4.2. Estaciones y periodos de calibración

La calibración del modelo superficial fue abordada secuencialmente en función de la calibración de las subcuencas interiores con información fluviométrica, partiendo desde las cabeceras hacia aguas abajo, este orden queda esquematizado en la Figura 3.5. De esta manera, se partió con las subcuencas de cabecera Río Caracarani en Humapalca (1, subcuenca RCH) y Río Colpitas en Alcérreca (2, subcuenca RCA), donde ambas hoyas hidrográficas son aportantes a la estación Río Lluta en Alcérreca (3, subcuenca RLA). Luego de este punto y siguiendo aguas abajo se puede encontrar a la estación Río Lluta en Tocontasi (subcuenca RLT), la cual no ha sido considerada como parte de la calibración dada la limitada cantidad y ciertamente poco confiable calidad de sus datos, lo cual es lamentable

ya que es un punto estratégico donde se puede controlar la totalidad del recurso hídrico que ingresa al sector del Valle de Lluta, que es donde se ubica casi la mayor parte de la demandas antrópicas. Como punto de salida final se encuentra a la estación Río Lluta en Panamericana (4, subcuenca RLP).



**Figura 3.5:** Zona de estudio y subcuencas a calibrar en el modelo superficial.

Se eligieron dos periodos de calibración, desde 1985 hasta 1994, y desde 2009 hasta 2019, abarcando 21 años. El periodo que va desde 1995 hasta 2008 se consideró como periodo de verificación. Adicionalmente, y quedando fuera del periodo en el que se analizaron los resultados, se definió un periodo de 6 años entre 1979 y 1984 para el calentamiento (*warm-up*) del modelo.



Figura 3.6: Periodos considerados en la modelación.

### 3.4.3. Algoritmo de calibración y función objetivo

#### Algoritmo de optimización global *hydroPSO*

La calibración de las subcuencas del sistema superficial, implementadas con método de *humedad del suelo* en WEAP, se realizó mediante la técnica de optimización global *Particle Swarm Optimization* (PSO), la cual ha sido utilizada con éxito en distintos modelos hidrológicos superficiales y subterráneos (Zambrano-Bigiarini & Rojas, 2013). En particular, se utilizó el paquete de *hydroPSO* (Zambrano-Bigiarini & Rojas, 2020) que implementa una versión estado del arte de PSO para el ambiente estadístico R (R Core Team, 2020).

La vinculación de *hydroPSO* con WEAP se ha desarrollado especialmente en el marco de este trabajo. Este vínculo ha sido logrado a través de la comunicación de R con un archivo ejecutable *Visual Basic Script* (.vbs), el cual sirve tanto para controlar los parámetros a modificar dentro de WEAP, como para ejecutar el modelo WEAP dentro del proceso de calibración. En la Figura 3.7 se esquematiza este procedimiento.

#### Función objetivo

Para el desarrollo de las distintas etapas de la calibración del modelo hidrológico superficial, se usó como función objetivo al indicador de bondad del ajuste conocido como Eficiencia de Kling-Gupta modificada o  $KGE'$  (Kling et al., 2012). Como referencia, para la discusión de resultados se tendrán en consideración a las valoraciones de la Tabla 3.5.

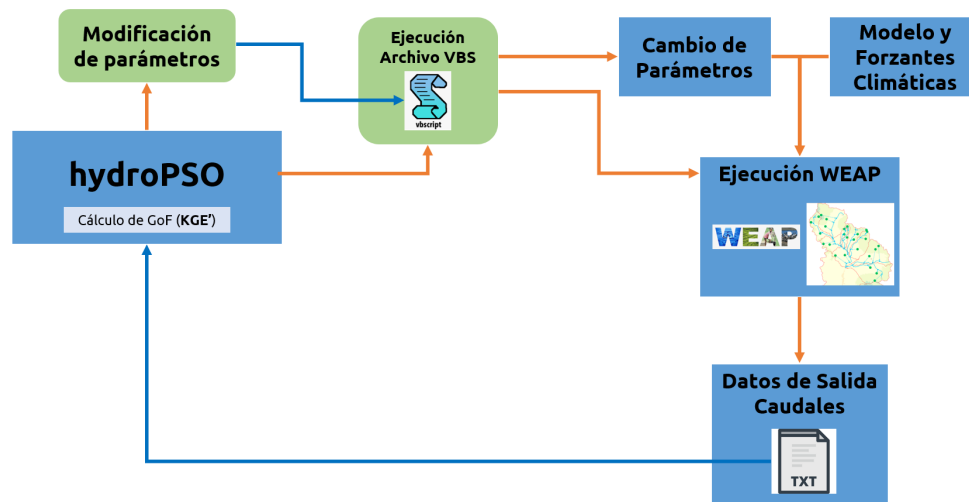


Figura 3.7: Esquema de funcionamiento de *hydroPSO* para una sola ejecución.

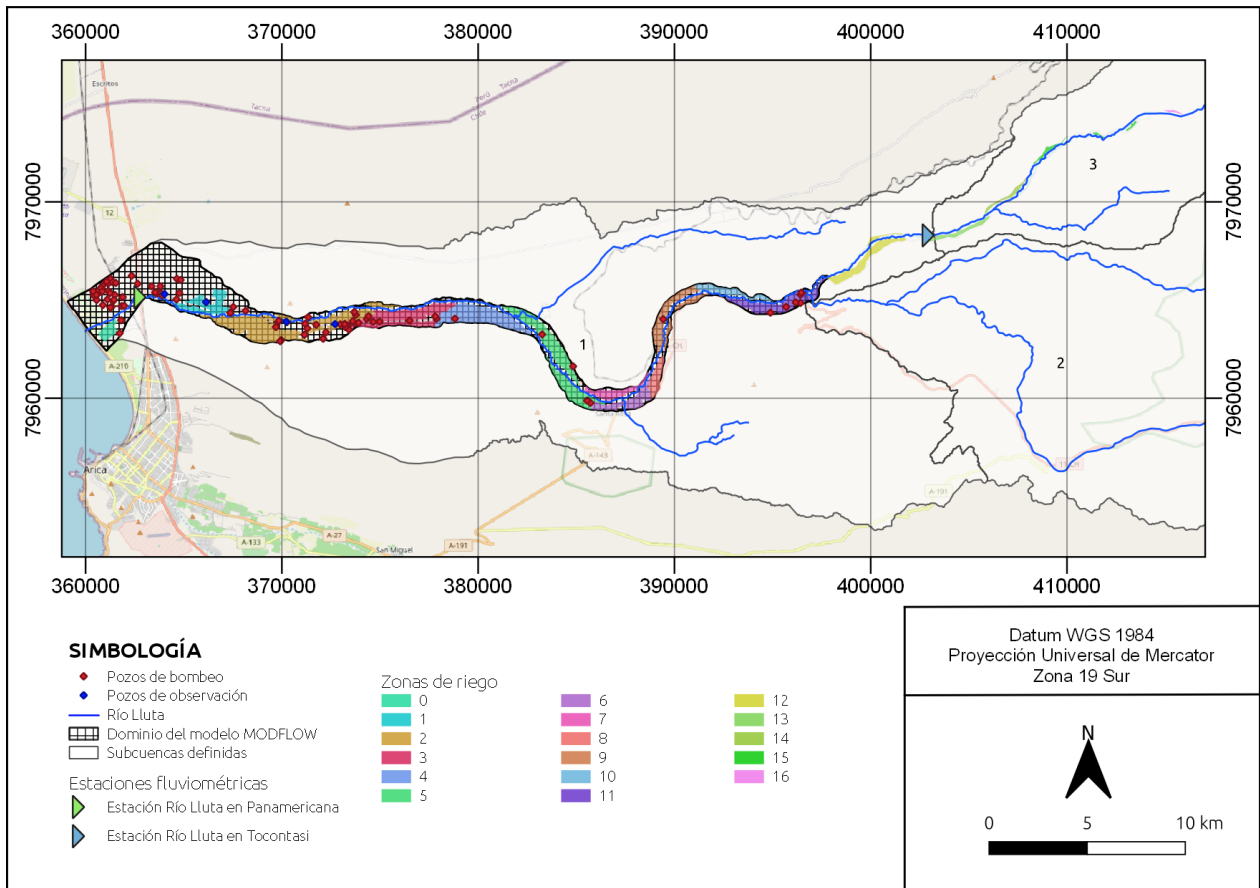
Tabla 3.5: Valoración de la eficiencia de Kling-Gupta. Fuente: Thiemig et al. (2013); Knoben et al. (2019).

Valor de KGE	Clasificación del desempeño
<-0.41	Insatisfactorio
-0.41 a 0.5	Pobre
0.5 a 0.75	Aceptable
≥0.75	Bueno

### 3.5. Acople del modelo superficial-subterráneo

La comunicación del modelo superficial desarrollado en WEAP con el modelo subterráneo presentado en el Capítulo 2 se ha realizado mediante el enlace de varias componentes que ambos modelos trabajan en común.

El enlace se realizó mediante la creación de un archivo vectorial (formato ESRI shapefile) que contiene la grilla del modelo MODFLOW en coordenadas UTM (*Universal Transversal Mercator*). En este archivo es necesario especificar, para cada celda del modelo MODFLOW que conceptualmente vaya a ser enlazada al modelo superficial, el elemento específico de WEAP al cual irá asociada.



**Figura 3.8:** Ubicación del acuífero en el Valle de Lluta, y las componentes tenidas en cuenta en el enlace del modelo acoplado WEAP-MODFLOW.

Siguiendo a las componentes presentes en el mapa de la Figura 3.8, a continuación se detallan los elementos enlazados en el modelo desarrollado en este trabajo:

- **Recargas de zonas de riego:** doce zonas de riego del Valle de Lluta y el Sector Costero (cuya identificación va desde 0 a 11 en la Figura 3.8), modeladas con método MABIA, fueron conectadas a las celdas que espacialmente se corresponden con su ubicación. Con el enlace hecho, la componente subterránea de cada zona de riego ahora dirigirá los retornos de riego como recargas del modelo subterráneo en MODFLOW.
- **Interacción del río y el acuífero:** Las celdas identificadas como río en la grilla de MODFLOW deben ser asociadas a los tramos del Río Lluta correspondientes en el

modelo WEAP. En este caso el enlace debe contemplar una relación entre el caudal del río calculado por WEAP y el equivalente en altura de la lámina de agua que considerará MODFLOW, mediante una curva de descarga (caudal vs altura). Con el enlace hecho, el modelo calcula numéricamente los tramos donde el río recarga al acuífero (infiltraciones) y otros donde el acuífero abastece al río (afloramientos).

- **Pozos de bombeo:** Los pozos, que suelen ir asociados directamente al modelo subterráneo, han sido integrados al modelo WEAP como sitios de demanda, así en el enlace cada sitio de demanda va asociado a la celda específica del modelo subterráneo que espacialmente le corresponde. Con el enlace hecho, los volúmenes de extracción se pueden controlar desde WEAP.
- **Humedal:** El “Humedal del Río Lluta”, implementado como celdas tipo dren en MODFLOW, debe ir asociado a un elemento de WEAP donde el agua drenada tenga una salida. En este caso se ha configurado un río ficticio en WEAP para estos propósitos.

### 3.6. Simulación de escenarios futuros con modelo acoplado

Tal como se ha indicado en los objetivos de este trabajo, la idea es que el modelo acoplado WEAP-MODFLOW sea utilizado para estimar la oferta y demanda futura en la Cuenca del Río Lluta. Para esto, se ha hecho necesario definir propuestas de escenarios futuros, las cuales han abordado tres aspectos: las condiciones climáticas futuras, mejoras en infraestructura y cambios en la actividades antrópicas (riego y bombeos).

En las siguientes subsecciones se presentan los antecedentes, relacionados a los tres puntos mencionados en el párrafo anterior, para luego dar paso a presentar los escenarios considerados para la modelación.

### 3.6.1. Proyecciones de cambio climático

Tal como se indicó en el Capítulo 2, la información de proyecciones de precipitación y temperatura media del aire derivada de los GCMs escalados en el proyecto ABHN (DGA, 2018) (datos proporcionadas por DGA), conforman la información base para la implementación de escenarios futuros en el presente estudio.

Se hizo una evaluación de los GCMs facilitados por DGA, para verificar que los datos empleados como observaciones históricas en el estudio ABHN (CR2MET-ABHN) sean consistentes con los datos empleados en la modelación actual (producto RF-MEP con las mismas precipitaciones medias mensuales que CR2MET v2), haciendo una comparación a **escala media mensual**. Se acota al periodo de comparación a 1985-2015, considerado como periodo histórico dentro del estudio ABHN (DGA, 2018).

En el Anexo H se muestran las comparaciones entre CR2MET v2 vs los datos históricos del estudio ABHN, tanto para precipitación como para temperatura del aire. En el caso de la precipitación, se nota cierta disparidad en todos los meses del año (Figura H.1). Las mayores diferencias porcentuales (sobre el 10 %) se observan desde abril a octubre, donde las precipitaciones son mínimas (Figura H.2). Para el caso de las temperaturas se encontraron diferencias de hasta 2°C en los meses de junio y julio (Figuras H.6 y H.4 del Anexo H).

Frente a las diferencias mencionadas en el párrafo anterior, se consideró implementar una solución pragmática para poder cumplir con los objetivos planteados en este trabajo. Para esto, se aplicó un método de corrección de sesgo donde, en lugar de usar GCMs provenientes íntegramente desde las fuentes que proveen estos datos, se usaron los mismos GCMs escalados en el estudio ABHN. Para esto se consideró el método descrito en la siguiente subsección.

## Método Delta

El *método delta* consiste en calcular las diferencias medias mensuales entre la variable modelada durante un periodo futuro y su correspondiente valor durante un período histórico, para luego agregar esta diferencia a los valores diarios correspondientes durante el periodo histórico (Beyer et al., 2020). En otras palabras, aplicar este método para generar una serie de valores diarios en un periodo futuro, consiste en utilizar la serie histórica y luego añadir las diferencias medias mensuales estimadas a partir de algún GCM.

Tal como ya se ha indicado, en el marco de este trabajo, en lugar de hacer uso de los modelos climáticos provenientes desde las fuentes globales originales, se utilizaron los productos escalados proporcionados por DGA. Para esto, se consideró la diferencia entre valores medios mensuales del periodo futuro considerado en este trabajo (2020-2050), y el periodo histórico (1985-2015) utilizado en el estudio ABHN (DGA, 1987, 2017).

Para el caso de la temperatura media del aire, las diferencias medias mensuales se calculan como la diferencia entre valores futuros e históricos, i.e.  $(Temp_{GCM}(x, t) - Temp_{GCM}(x, 0))$ , con lo que los valores quedan representados por la Ecuación 3.1.

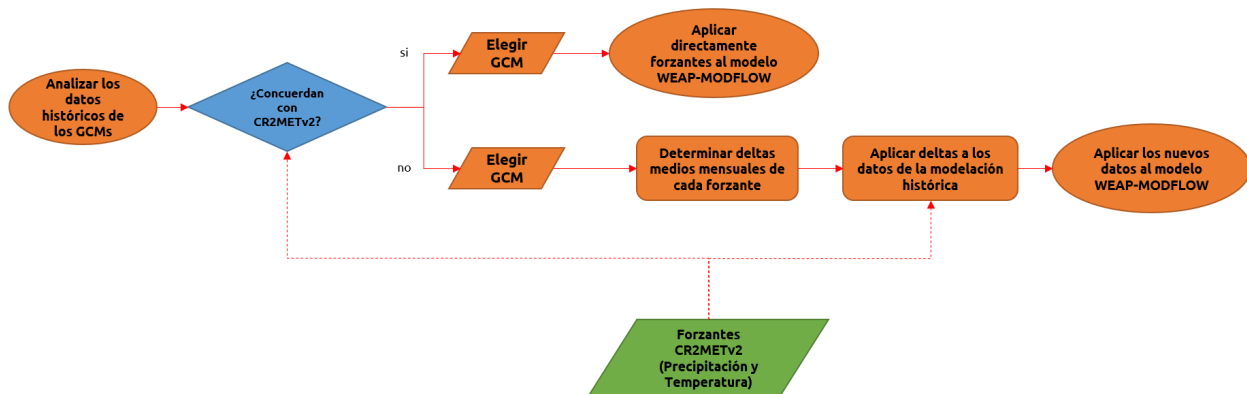
$$Temp_{GCM}^{corregido}(x, t) = Temp_{obs}(x, 0) + (Temp_{GCM}(x, t) - Temp_{GCM}(x, 0)) \quad (3.1)$$

Para el caso de la precipitación se considera una corrección de sesgo multiplicativa, con lo que las diferencias se calculan como  $Pp_{GCM}(x, t) / Pp_{GCM}(x, 0)$ , tal como se muestra en la Ecuación 3.2:

$$Pp_{GCM}^{corregido}(x, t) = Pp_{obs}(x, 0) \cdot \frac{Pp_{GCM}(x, t)}{Pp_{GCM}(x, 0)} \quad (3.2)$$

Para mayor claridad, la Figura 3.9 resume el flujo de trabajo desarrollado para la obtención

de las proyecciones futuras de precipitación y temperatura del aire.



**Figura 3.9:** Flujo de trabajo seguido para la obtención de las proyecciones de cambio climático a considerar en el escenario futuro.

### 3.6.2. Mejoras futuras en infraestructura

#### Embalse Chironta

Para efectos de la modelación del embalse Chironta, en la situación futura se considerará que la etapa de llenado de este comience en el año 2023. Resulta importante considerar en el modelo que esta etapa de llenado comience en la estación adecuada, pues de acuerdo a (DOH, 2012) esto se haría en la segunda quincena de marzo, para cuando ya deberían haber ocurridos las crecidas del Invierno Altiplánico y se pueda tener una inundación controlada y bien monitoreada. Dado que el modelo implementado en este trabajo es mensual, se considera que la etapa de llenado comience en el mes de abril.

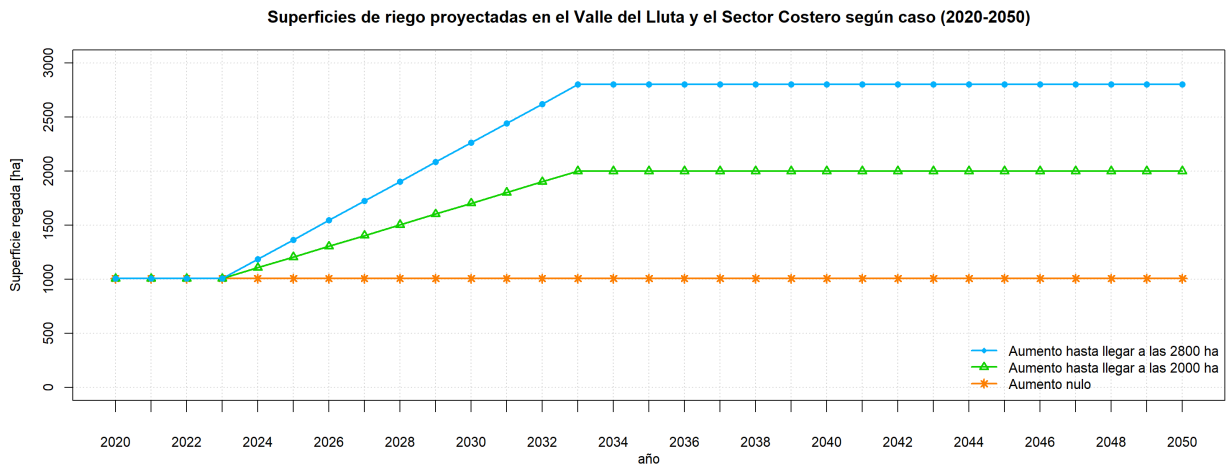
Por último, en la modelación se ha considerado que el llenado del embalse, ocurra de tal manera que no afecte a las demandas aguas abajo en condiciones normales, dejando un paso de agua que garantice las extracciones de los regantes en condiciones normales.

### 3.6.3. Cambios en actividades antrópicas

A continuación se describen los cambios en actividades antrópicas que tendrían mayor impacto en la situación hídrica futura y que, por lo tanto, son importantes de tener en cuenta en las simulación de escenarios futuros.

#### Riego

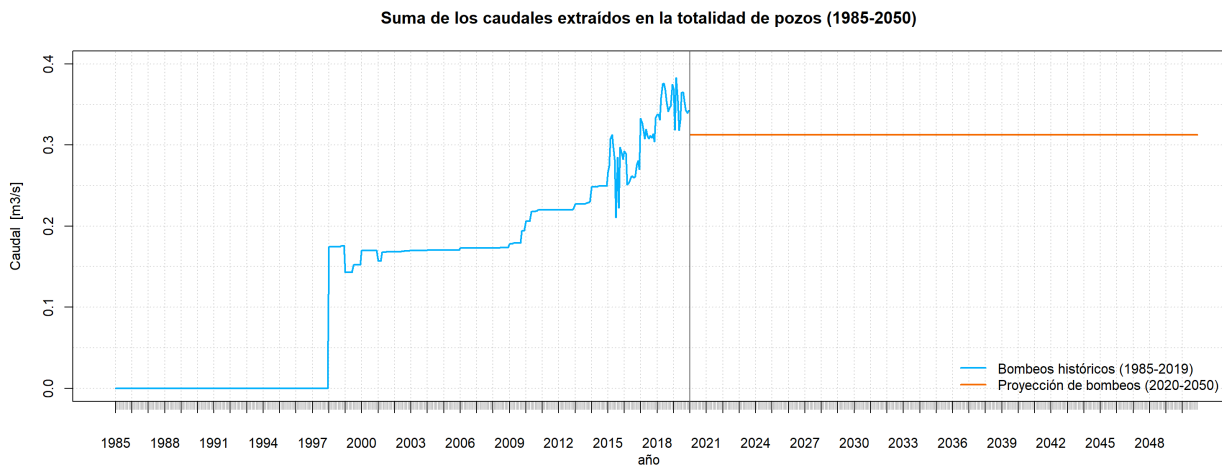
Para el Valle de Lluta y el Sector Costero, los cambios en el desarrollo del riego (ciertamente cambios de uso de suelo) están directamente relacionados con el futuro funcionamiento del embalse Chironta, a partir del cual se espera incrementar las superficies cultivadas por las comunidades presentes aguas abajo de esta construcción (ver Figura 2.7). De acuerdo al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del embalse Chironta (DOH, 2012) las mejoras en el riego implicarían un aumento de hasta alrededor de 2800 hectáreas.



**Figura 3.10:** Proyecciones de superficies regadas en el Valle de Lluta y el Sector Costero de acuerdo a los casos considerados, ya sea aumento nulo, aumento hasta llegar a las 2800 hectáreas, y aumento hasta llegar hasta las 200 hectáreas.

## Bombeos de pozos

En este trabajo, para cada uno de los pozos se ha considerado como proyección de bombeos al promedio del caudal extraído entre los años 2015 y 2019. En la Figura 3.11 se muestra los bombeos totales históricos y proyectados.



**Figura 3.11:** Bombeos totales históricos y proyectados en el Valle de Lluta y el Sector Costero.

### 3.6.4. Escenarios implementados

Con los antecedentes presentados, se ha propuesto trabajar tres escenarios: un escenario *Business As Usual* (BAU), el cual representa una condición severa de cambio climático RCP 8.5, y dos escenarios de gestión derivados del BAU. El primer escenario de gestión considera el funcionamiento del embalse Chironta con abastecimiento para 2800 ha de riego, mientras que el segundo considera también el embalse Chironta pero con abastecimiento solo para 2000 ha.

**Tabla 3.6:** Especificaciones para los escenarios propuestos en este trabajo.

Escenario	Cambio climático severo RCP 8.5	Embalse	Crecimiento de áreas de riego	Bombeos
BAU	✓		Nulo (constante en 1006 ha)	promedio 2015-2019
1	✓	✓	2800 ha	promedio 2015-2019
2	✓	✓	2000 ha	promedio 2015-2019

Los datos futuros (RCP 8.5) de precipitación y temperatura del aire (para los tres escenarios) se obtendrán mediante la aplicación del Método Delta al producto GCM obtenido como el promedio de las proyecciones CSIRO-Mk3-6-0, CCSM4, MIROC-ESM e IPSL-CM5A, todas obtenidas del estudio ABHN (DGA, 2018).

# **CAPÍTULO 4**

## **RESULTADOS**

#### 4.1. Periodo histórico (1985-2019)

##### 4.1.1. Calibración modelo superficial

La Figura 4.1 muestra la serie de caudales observados y simulados para las subcuencas Río Caracarani en Humapalca (RCH), Río Colpitas en Alcérreca (RCA) y Río Lluta en Alcérreca (RLA). Estas simulaciones se obtienen con los parámetros calibrados que se exponen en el Anexo J, específicamente en las Tablas J.2, J.3 y J.4, respectivamente para cada subcuenca. La Tabla 4.1 muestra los valores de  $KGE'$  para los periodos de calibración, verificación y el periodo conjunto (completo).

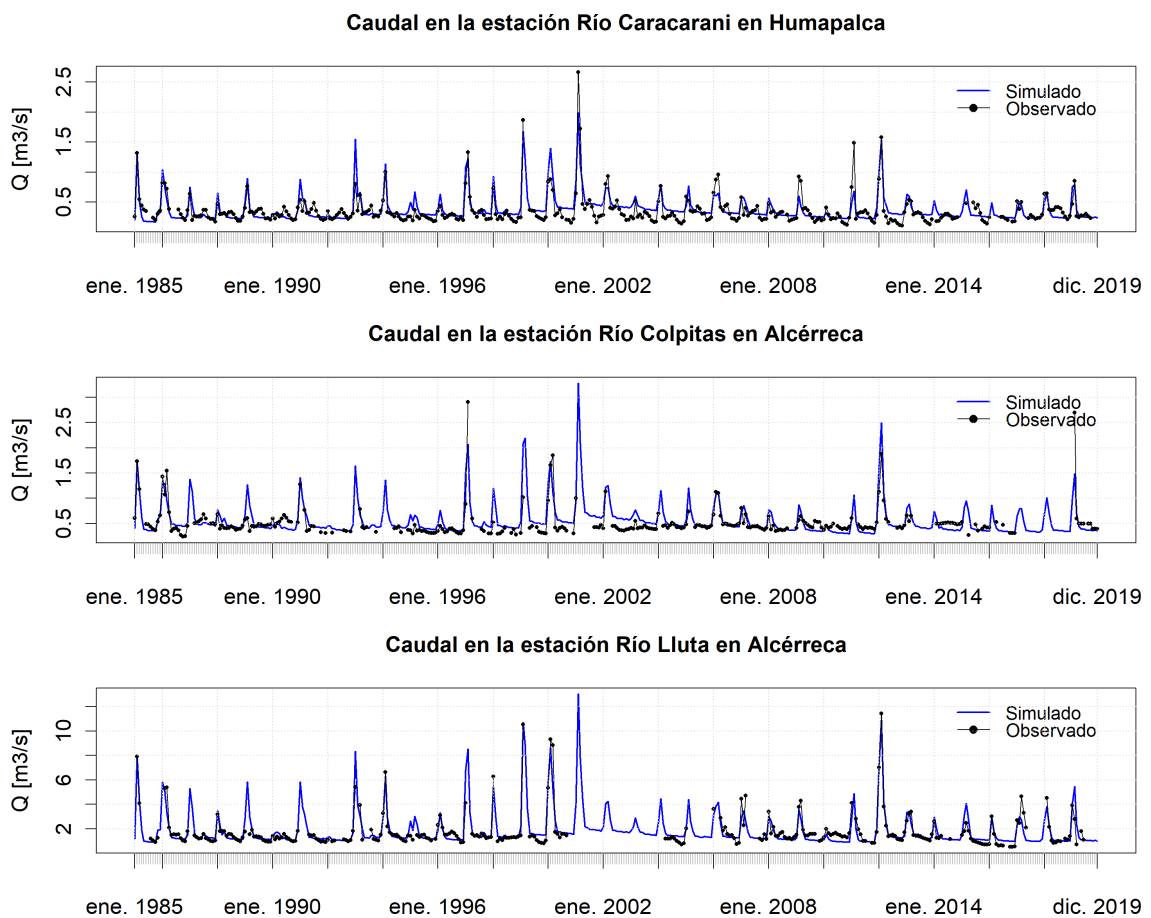


Figura 4.1: Caudales observados y simulados en las subcuencas RCH, RCA y RLA.

**Tabla 4.1:** Valores de KGE' en los periodos de calibración, verificación y conjunto, para las subcuencas RCH, RCA y RLA.

Subcuenca	Periodo	KGE'	$\bar{Q}_{obs}$ m <sup>3</sup> /s	$\bar{Q}_{sim}$ m <sup>3</sup> /s
RCH	Calibración	0.80	0.337	0.334
	Verificación	0.61	0.370	0.443
	Conjunto	0.76	0.350	0.378
RCA	Calibración	0.81	0.528	0.524
	Verificación	0.64	0.487	0.634
	Conjunto	0.76	0.509	0.568
RLA	Calibración	0.91	1.718	1.738
	Verificación	0.86	1.852	2.165
	Conjunto	0.90	1.763	1.909

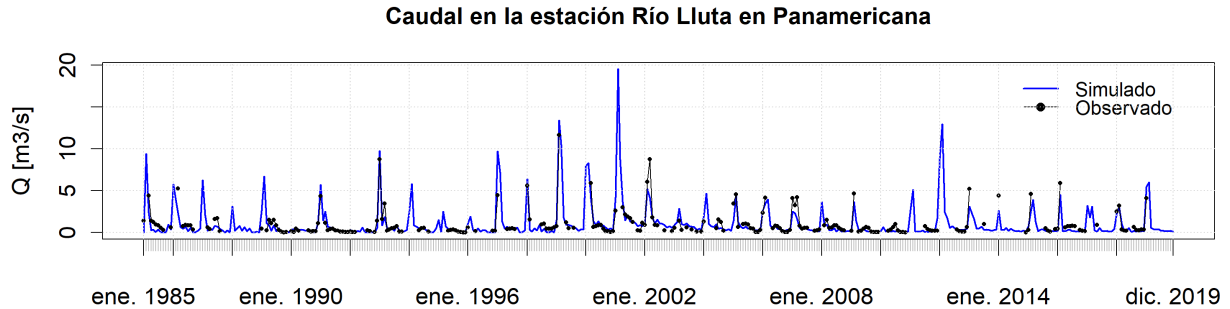
De acuerdo a los valores de KGE' y caudales medios observados y simulados mostrados en la Tabla 4.1, todos los resultados tienen ya sea un desempeño bueno o aceptable (considerando las valoraciones de KGE' de la Tabla 3.5). Para las subcuencas RCH y RCA se observaron descensos importantes en los desempeños obtenidos durante el periodo de verificación, respecto a los obtenidos en calibración. Los resultados más satisfactorios corresponden a la subcuenca RLA, lo cual es positivo ya que abarca a las otras subcuencas, y de esta manera garantiza una representación realista de los caudales simulados hasta ese punto.

#### 4.1.2. Calibración modelo acoplado

##### Estación Río Lluta en Panamericana

La Figura 4.2 muestra la serie de caudales observados y simulados para la estación Río Lluta en Panamericana, mientras que la Tabla 4.2 resume los índices de bondad de ajuste obtenidos. Un resultado inesperado es que el periodo de verificación tiene mejor desempeño que el de calibración, lo cual se explica porque la calibración se realizó con el modelo superficial (i.e., no acoplado), y al correr el modelo acoplado la representación de ciertos

caudales se ve afectada. De todas maneras la simulación del punto de salida más cercano a la desembocadura resultó ser muy satisfactoria ( $KGE'$  de 0.86 en el periodo de verificación, y 0.79 evaluando el periodo conjunto).



**Figura 4.2:** Caudales observados y simulados en la subcuenca RLP.

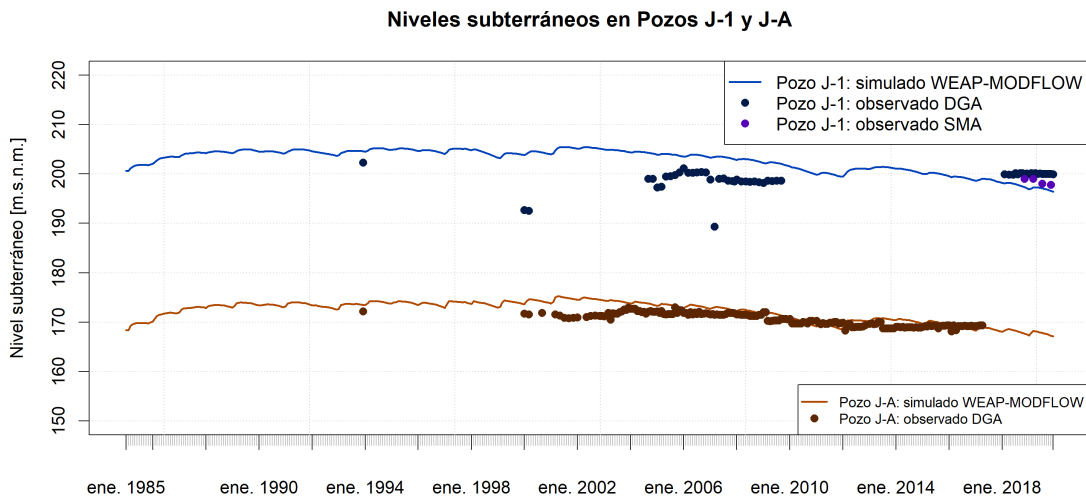
**Tabla 4.2:** Desempeños logrados para el periodo de calibración, verificación y conjunto, en la subcuenca RLP.

Periodo	$KGE'$	$\bar{Q}_{obs}$ $m^3/s$	$\bar{Q}_{sim}$ $m^3/s$
Calibración	0.69	0.884	0.897
Verificación	0.86	1.216	1.403
Conjunto	0.79	1.034	1.099

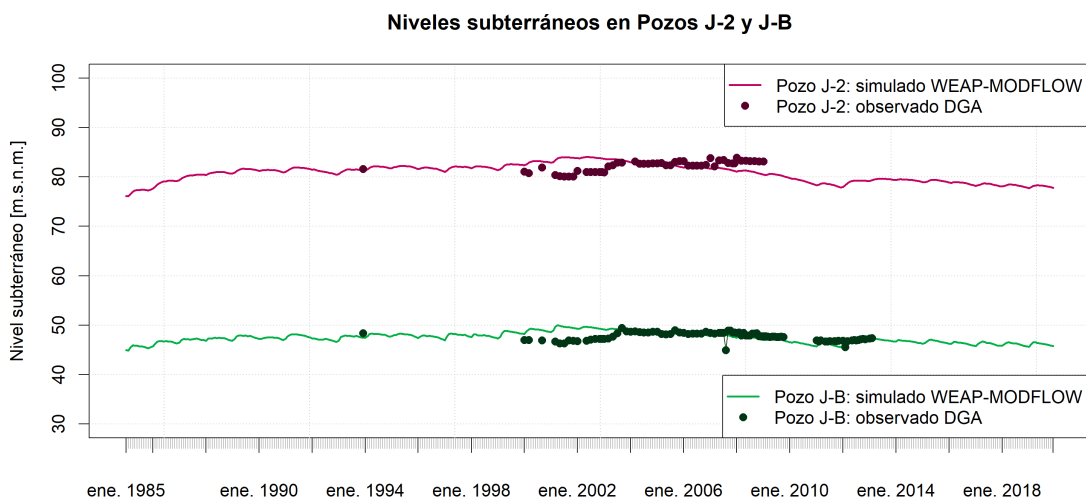
### Niveles subterráneos en pozos JICA

La Figura 4.3 muestra la comparación gráfica de los niveles observados y simulados para los pozos J-1 y J-A. En el caso del pozo J-1 no se logró un buen desempeño, principalmente porque las mediciones DGA indican niveles donde no habría variaciones importantes para las mediciones tomadas entre 2006 y 2009, y las mediciones tomadas a partir del 2018. Lo anterior difiere de los niveles simulados, donde se observa una tendencia a la baja en los últimos años. Sin embargo, los datos adicionales medidos en este pozo, que son parte

del seguimiento ambiental del embalse Chironta (datos SMA), concuerdan mejor con la simulación realizada con el modelo acoplado. Por otro lado, las observaciones del pozo J-A concuerdan bastante con la simulación del modelo, siguiendo la tendencia a la baja hasta el año 2017, la cual no puede ser del todo confirmada posteriormente ya que las mediciones cesan antes del 2018.



**Figura 4.3:** Niveles subterráneos simulados y observados, para los pozos J-1 y J-A.



**Figura 4.4:** Niveles subterráneos simulados y observados, para los pozos J-2 y J-B.

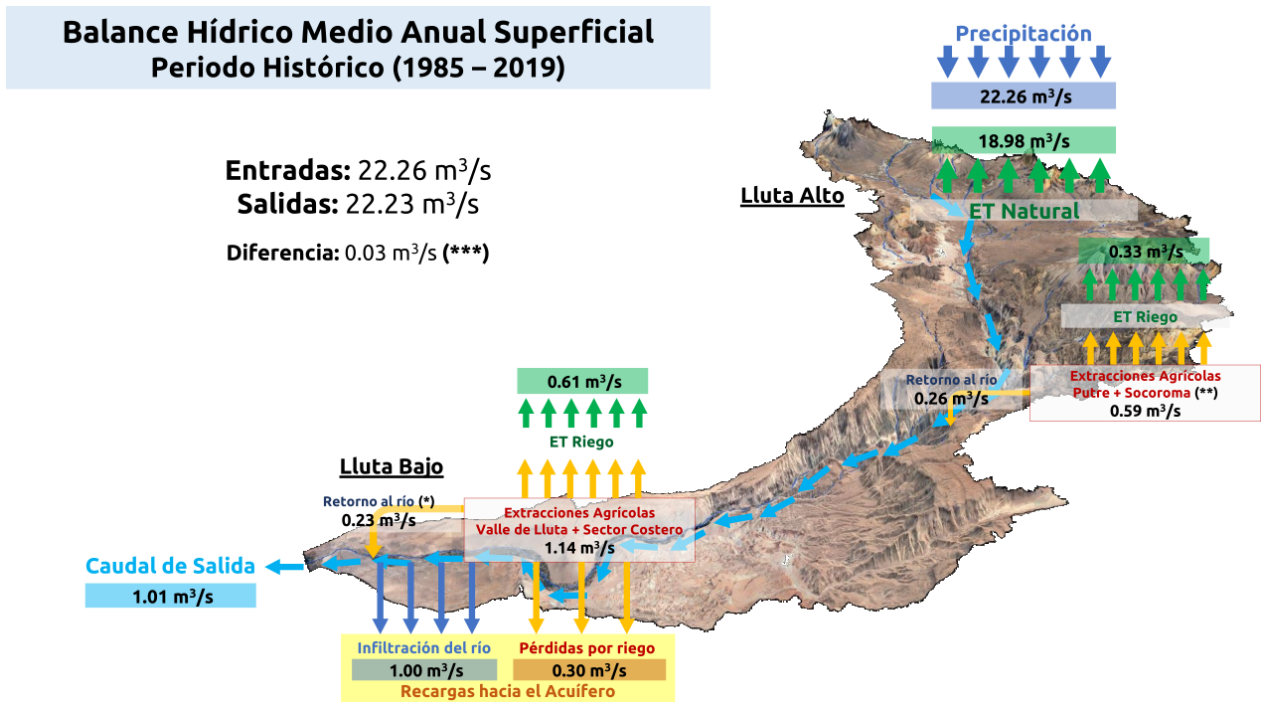
Con respecto a los dos pozos restantes J-2 y J-B, la Figura 4.4 muestra los niveles observados y simulados con el modelo acoplado. Para las mediciones del pozo J-2 existe una tendencia al alza que es opuesta a la simulada con el modelo acoplado, pero las mediciones están discontinuadas desde antes del 2010. El pozo J-B tiene observaciones que las simulaciones logran reproducir bastante bien, pero las mediciones también se encuentran discontinuadas. De todas maneras, considerando la poca cantidad de datos y al tratarse de un modelo acoplado, en general la simulación de los niveles se considera satisfactoria.

#### 4.1.3. Balance hídrico en periodo histórico

La Figura 4.5 resume el balance hídrico medio anual para la situación histórica (1985-2019), específicamente para el volumen de control superficial correspondiente a la Cuenca del Río Lluta. Todas las variables fueron obtenidas directamente como salidas del modelo acoplado WEAP-MODFLOW y expresadas como volumen por unidad de tiempo.

Uno de los aspectos a destacar es la gran salida de evapotranspiración del modelo superficial, representando el 85 % de la precipitación que cae sobre la cuenca, lo que deja solo un 15 % de la entrada de agua habilitada para transformarse en escorrentía que pueda abastecer las necesidades de los sectores aguas abajo. Para los sectores de Putre y Socoroma las extracciones agrícolas modeladas corresponden a  $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ ; y para las zonas de riego del Valle de Lluta y el Sector Costero toman un valor de  $1.14 \text{ m}^3/\text{s}$ , de los cuales más de la mitad ( $0.61 \text{ m}^3/\text{s}$ ) viene a satisfacer a la demanda evapotranspirativa de los cultivos, y el resto se divide en pérdidas como recarga hacia aguas subterráneas ( $0.30 \text{ m}^3/\text{s}$ ), y pérdidas que retornan al río ( $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Esta última componente no estaba concebida desde un principio, pero resultó ser la manera más sensata de tratar los retornos de riego de las zonas que no estaban acopladas al modelo subterráneo.

Por último, la infiltración desde el río estimada con el modelo corresponde a  $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ , la cual estaba concebida en valores menores en las primeras etapas de calibración del mo-



**Figura 4.5:** Balance hídrico histórico para la Cuenca del Río Lluta, calculado mediante la modelación acoplada.

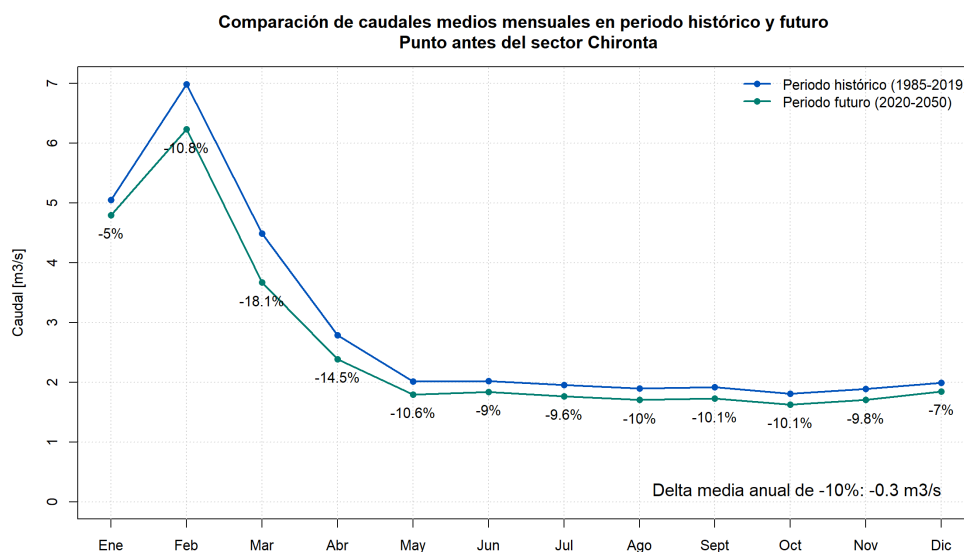
Notas: (\*) Retornos devueltos al río, considerados en las zonas de riego no acopladas al modelo subterráneo. (\*\*) Para simplificar la figura, se muestra la demanda de los sectores Putre y Socoroma en conjunto. (\*\*\*) La diferencia se explica por los remanentes de humedad del suelo y acumulación de nieve, entre la condición inicial y final de la modelación, además de las imprecisiones derivadas del redondeo de datos.

delo acoplado, pero que fue incrementándose y estableciéndose como la principal recarga del modelo subterráneo, esto mediante sucesivas pruebas para ajustar los niveles subterráneos (prueba-y-error). Tanto la infiltración desde el río como las pérdidas por retornos de riego al acuífero se asocian al balance hídrico medio anual del sistema subterráneo para el periodo histórico (ver Figura K.1 del Anexo K).

## 4.2. Periodo futuro (2020-2050)

### 4.2.1. Proyección de caudales aguas arriba del embalse

Como se ha indicado, los escenarios implementados han estado enfocados principalmente en aspectos de gestión en la cuenca, dejando las proyecciones climáticas establecidas en un escenario base (BAU), donde tanto para precipitación como para temperatura del aire se utilizó el promedio de los GCMs derivados del estudio ABHN. De esta manera los caudales simulados en el Río Lluta antes del embalse (ver Figura 2.7) son los mismos en los tres escenarios. En la Figura 4.6 se muestra una comparación entre los caudales históricos (1985-2019) y proyectados (2020-2050).



**Figura 4.6:** Comparación de caudales medios mensuales históricos y proyectados, inmediatamente aguas arriba de la ubicación del embalse Chironta.

Los resultados obtenidos en los escenarios futuros muestran que los caudales, aguas arriba del embalse Chironta, tendrían un descenso promedio anual de  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , que significa una baja de un 10% del caudal de entrada al Valle de Lluta respecto al periodo histórico.

Lo anterior en gran parte es consecuencia de un descenso de 7.5 mm en la precipitación media anual (que para el periodo futuro se proyecta en 199.5 mm/año).

#### 4.2.2. Balance hídrico de cada escenario

Para los escenarios que se muestran en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, la disminución de precipitación media anual de 7.5 mm entre el periodo futuro y el periodo histórico, trae como consecuencia una disminución de la oferta hídrica de  $0.81 \text{ m}^3/\text{s}$  (4 %) como valor medio anual. La evapotranspiración natural (no asociada a riego) simulada en WEAP proyecta un descenso de solo  $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que representa una baja de solo un 2 % respecto al periodo histórico. Lo anterior se explica porque la temperatura media anual de la cuenca proyectada tendrá un aumento de  $1^\circ\text{C}$  (pasando de  $7.1^\circ\text{C}$  en el periodo histórico a  $8.1^\circ\text{C}$  en el periodo futuro considerado).

El escenario BAU, cuyo balance se muestra en la Figura 4.7, representa un futuro donde las áreas cultivadas se mantienen en las mismas cantidades estimadas para los años 2018 y 2019, en los cuales el desarrollo agrícola ha venido en descenso. Este aspecto del escenario se refleja en los resultados de demanda agrícola simulados, donde las extracciones superficiales para agricultura descenderían un 31 % en comparación al periodo histórico. Lo anterior se traduce en una disminución tanto de la evapotranspiración real de los cultivos así como de las pérdidas de riego, especialmente aquellas que luego se transforman en recargas hacia el acuífero, las cuales bajarían un 43 % respecto al periodo histórico. Por otra parte, la infiltración del río aumentaría un 17 % en este escenario, lo cual compensaría en parte la baja de las recargas por retornos de riego. El caudal de salida de la cuenca descendería un 18 %, en parte debido a la baja en la escorrentía aguas arriba determinadas por cambio climático, y en parte por la mayor infiltración del río al acuífero. Las pérdidas por retornos de riego y la infiltración del río indicadas anteriormente, se asocian al balance hídrico medio anual del sistema subterráneo para el Escenario BAU, presentadas en la Figura K.2 en el Anexo K.

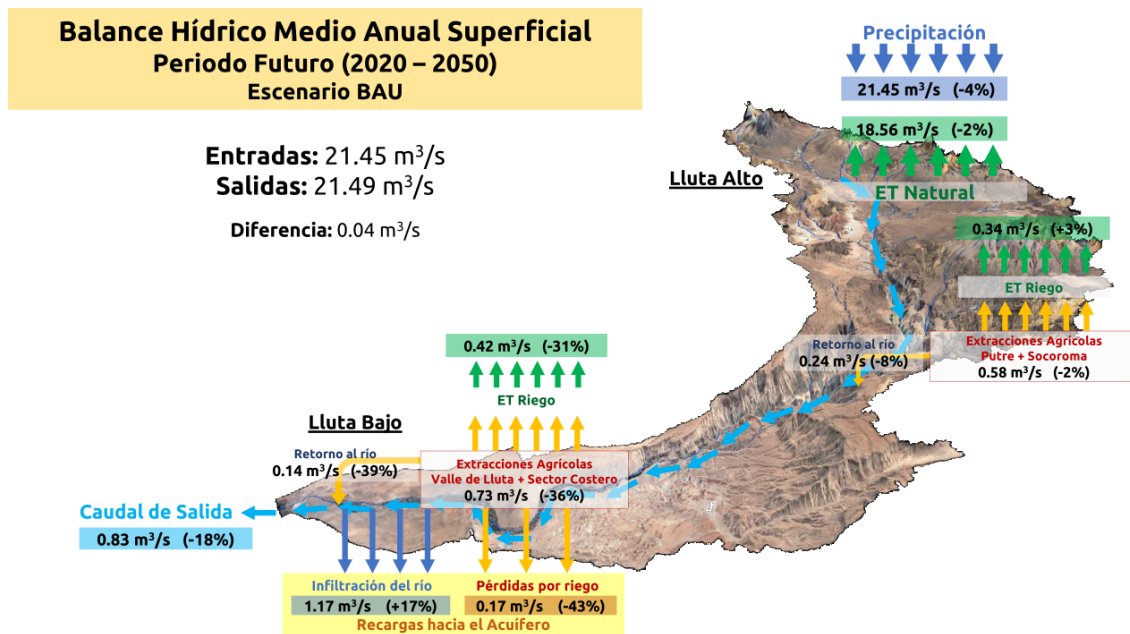


Figura 4.7: Balance hídrico medio anual proyectado para el Escenario BAU.

El Escenario 1 de gestión, cuyo balance se muestra en la Figura 4.8, representa un futuro potencialmente favorable para el desarrollo agrícola del Valle de Lluta y el Sector Costero, por la presencia del embalse. En función de lo anterior, se ha impuesto en el modelo un aumento hasta las 2800 hectáreas regadas en un periodo de 10 años (ver Figura 3.10). El impacto de este escenario se refleja en el aumento de las demandas agrícolas en un 104 % respecto al Escenario BAU, lo cual se traduce a su vez en un aumento de la evapotranspiración real de los cultivos de un 107 %, y un aumento de 100 % en los retornos de riego. En este escenario la infiltración del río y el caudal de salida al mar experimentan reducciones del 24 % y 42 % respecto al Escenario BAU, respectivamente. Este último caso está más influenciado por la disminución de flujo natural en el río dada la captación del embalse. Las pérdidas por retornos de riego y la infiltración del río indicadas en la Figura 4.8 se asocian al balance hídrico medio anual del sistema subterráneo para el Escenario 1, que puede ser consultado en el Anexo K (Figura K.3).

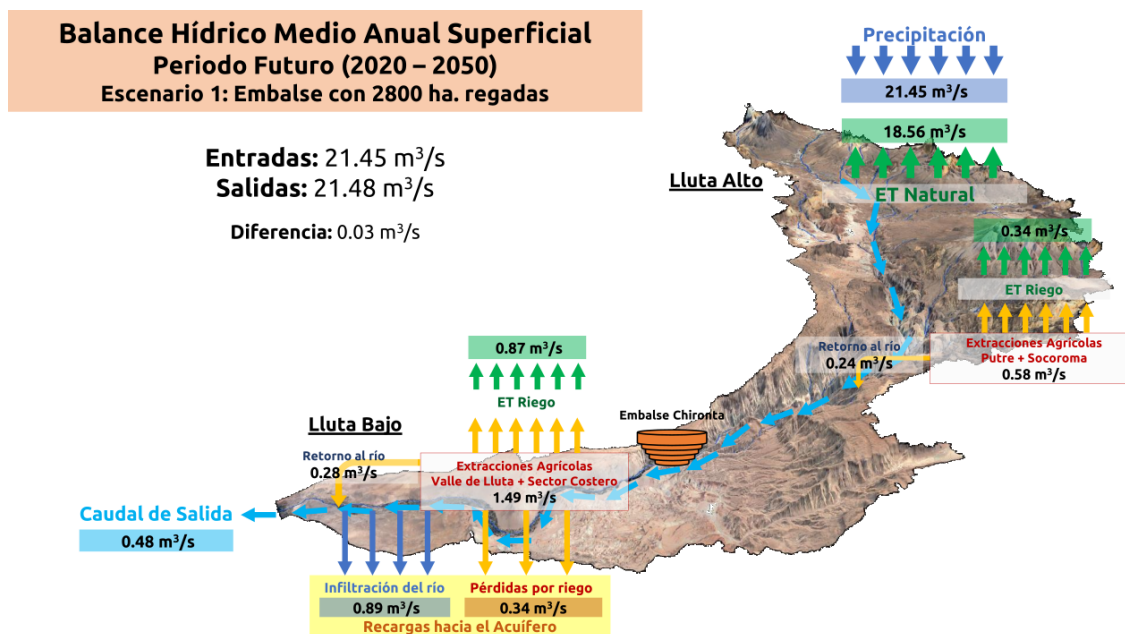


Figura 4.8: Balance hídrico medio anual proyectado para el Escenario 1.

Tabla 4.3: Comparación de las componentes del balance del Escenario 1 respecto al Escenario BAU. Valle de Lluta y Sector Costero.

Componente	Valor m <sup>3</sup> /s	Variación respecto a BAU
Extracciones agrícolas	1.49	104 %
Evapotranspiración cultivos	0.87	107 %
Retornos de riego al acuífero	0.34	100 %
Retornos de riego al río	0.28	100 %
Infiltración del río al acuífero	0.89	-24 %
Caudal desembocadura	0.48	-42 %

Para el Escenario 2 de gestión, que es similar al Escenario 1 pero con un aumento de la superficie regada limitado a 2000 hectáreas, se obtuvo el balance que se muestra en la Figura 4.9. En este caso, las extracciones agrícolas resultan tener un aumento del 64 % respecto al Escenario BAU. Por otro lado, la infiltración del río disminuiría en un 17%. El caudal de salida en este caso se ve menos afectado que en el Escenario 1, disminuyendo solo un 27 % respecto al Escenario BAU. Las pérdidas por retornos de riego y la infiltración del río indicadas en la Figura 4.9, se asocian al balance hídrico medio anual del sistema

subterráneo para el Escenario 2, que puede ser consultado en el Anexo K (Figura K.4).

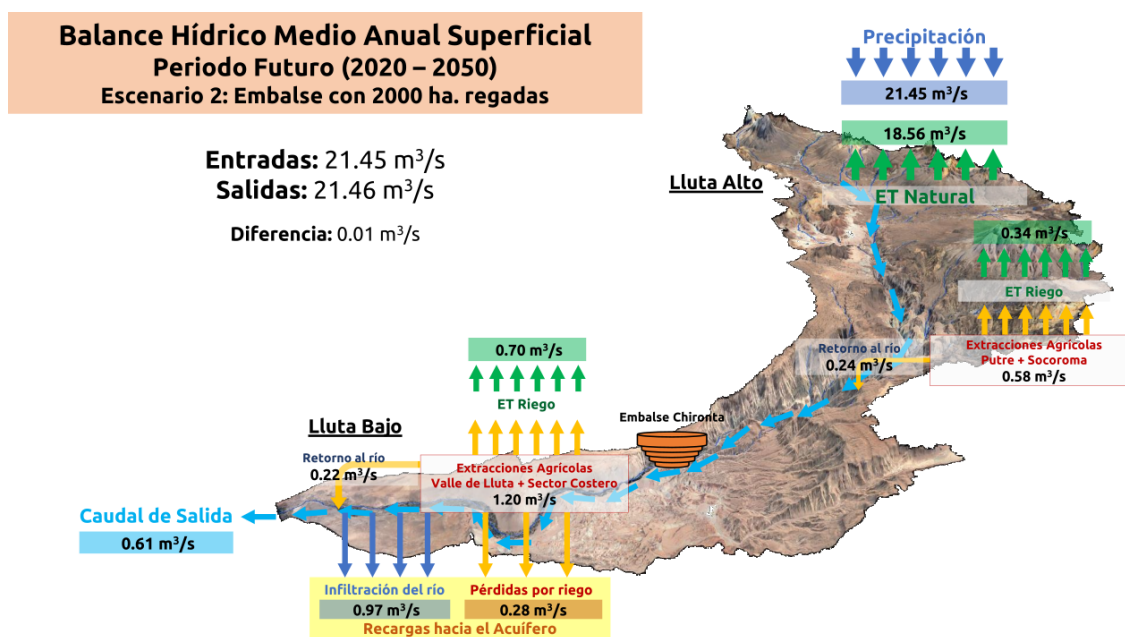


Figura 4.9: Balance hídrico medio anual proyectado para el Escenario 2.

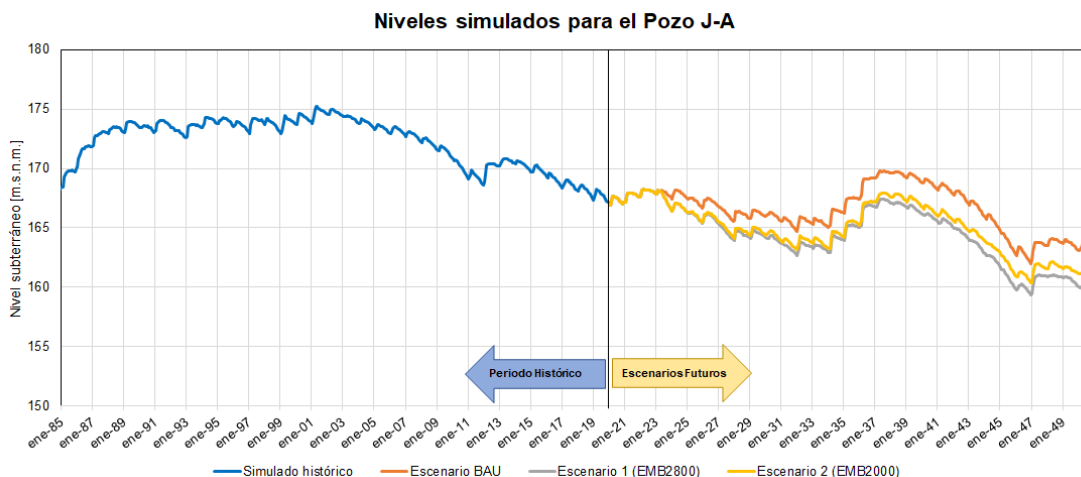
Tabla 4.4: Comparación de las componentes del balance del Escenario 2 respecto al Escenario BAU.

Componente	Valor (m <sup>3</sup> /s)	Variación respecto a BAU
Extracciones agrícolas	1.20	64 %
Evapotranspiración cultivos	0.70	67 %
Retornos de riego al acuífero	0.28	65 %
Retornos de riego al río	0.22	57 %
Infiltración del río al acuífero	0.97	-17 %
Caudal desembocadura	0.61	-27 %

#### 4.2.3. Niveles subterráneos

Respecto a la variación de los niveles subterráneos, en la Figura 4.10 se muestra los niveles simulados históricos junto a los niveles simulados futuros según los distintos escenarios propuestos, para el pozo J-A. En general, todos los escenarios proyectan un descenso de

los niveles, siendo el menos severo el Escenario BAU, el cual mantiene la superficie regada y no considera la existencia del embalse, con 5.6 metros de descenso entre el periodo futuro y el periodo histórico. Para los Escenarios 1 y 2 de gestión, que tienen implementado un aumento en la superficie regada asociado a la construcción del embalse, se obtienen descensos mayores de 7.7 y 7.2 metros, respectivamente.



**Figura 4.10:** Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-A.

**Tabla 4.5:** Descensos de los niveles subterráneos en los pozos de observación, obtenidos para los escenarios futuros respecto a los niveles históricos.

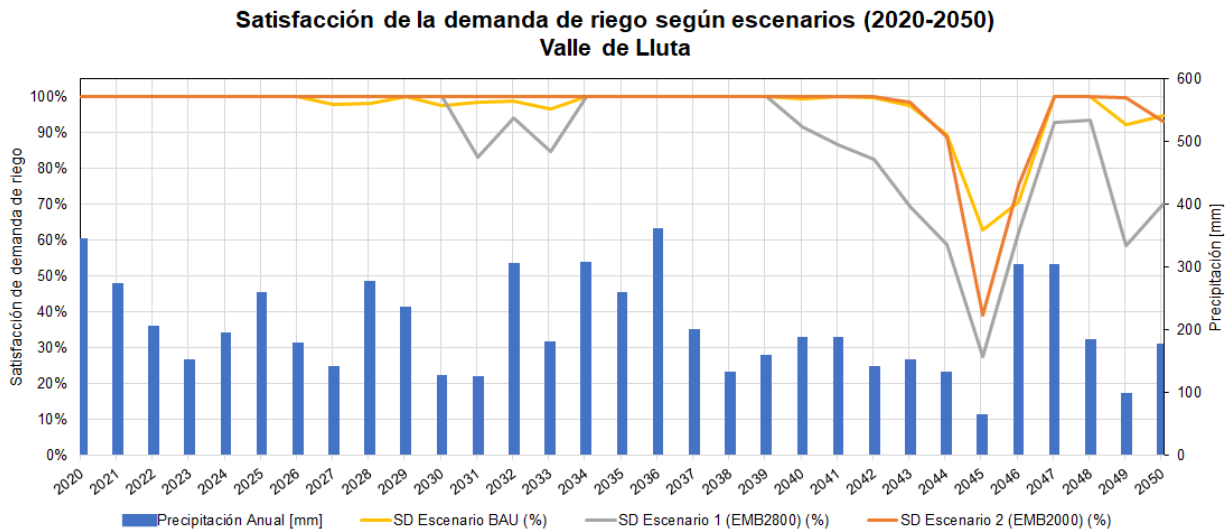
Pozo	Escenario BAU descenso (m)	Escenario 1 descenso (m)	Escenario 2 descenso (m)
J-1	6.6	8.2	7.8
J-A	5.6	7.7	7.2
J-2	3.3	5.1	4.6
J-B	1.5	2.7	2.4
<b>Promedio</b>	4.2	5.9	5.5

En el Anexo L se muestra las comparaciones entre los niveles simulados históricos junto a los niveles simulados futuros para los tres pozos de observación restantes (J-1, J-2 y J-

B), mientras que en la Tabla 4.5 se resumen las respectivas variaciones. En general, todos los pozos de observación muestran el mismo comportamiento para todos los escenarios, variando solo la magnitud de los descensos.

#### 4.2.4. Satisfacción de la demanda de riego

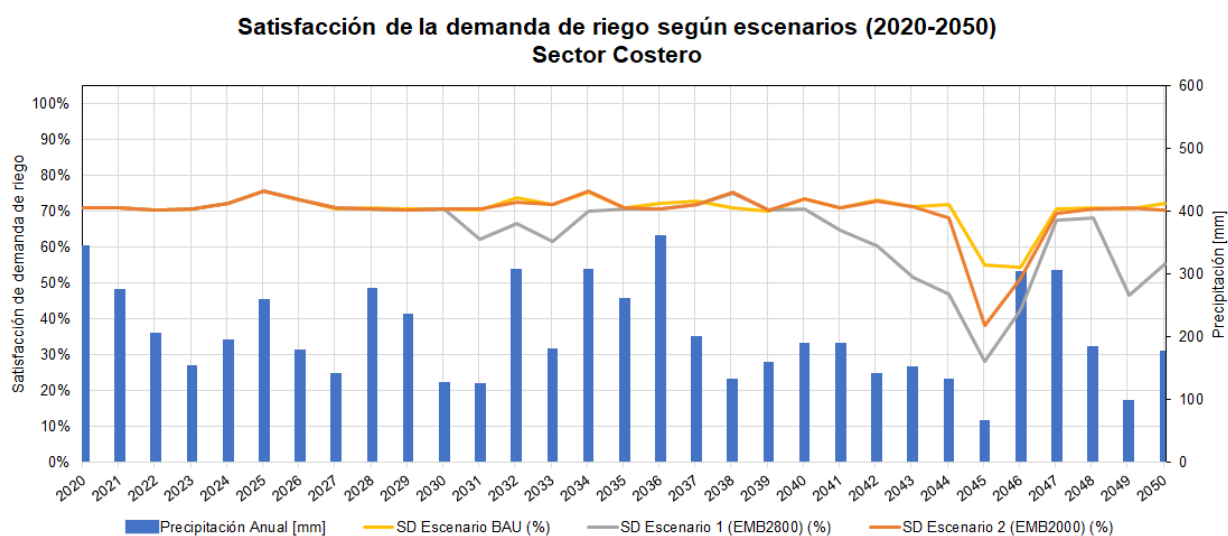
Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran los niveles de satisfacción de la demanda de riego para los distintos escenarios, es decir, el porcentaje de demanda de riego satisfecha en base a la disponibilidad hídrica, para el Valle de Lluta y el Sector Costero, respectivamente.



**Figura 4.11:** Cobertura de riego anual (2020-2050) para el Valle de Lluta. En el eje secundario se cuantifica la precipitación anual representada por el gráfico de barras.

Respecto al sector Valle de Lluta (Figura 4.11), los resultados de los escenarios de gestión muestran que la cobertura de riego puede ser satisfecha en gran parte del periodo futuro considerado, sin embargo, esta cobertura podría verse seriamente afectada en periodos donde la precipitación anual persiste por debajo del promedio histórico de 207 mm/año. Esto queda representado, solo de manera referencial (en ningún caso una predicción puntual), en lo proyectado para el periodo 2037-2045 en el Escenario 1 de gestión, donde

la precipitación ronda los 146 mm/año, y los niveles de satisfacción caen hasta el 30% en el año más crítico (2045). En resumen, el Escenario 1, si bien resulta favorable para el desarrollo agrícola (con 2800 hectáreas regadas aguas abajo del embalse), es altamente sensible a que las áreas regadas experimenten un estrés hídrico en años donde la precipitación anual es baja. Finalmente, en el Escenario 2 se observa algo similar al Escenario 1, con bajas importantes, pero con niveles de satisfacción más cercanos al 100% durante la mayor parte del periodo futuro.



**Figura 4.12:** Cobertura de riego anual (2020-2050) para el Sector Costero. En el eje secundario se cuantifica la precipitación anual representada por el gráfico de barras.

En el Sector Costero los niveles de satisfacción del riego responden a los mismos patrones evidenciados en el sector Valle de Lluta. Sin embargo, aquí existe un umbral superior cercano al 70% de satisfacción de la demanda de riego, lo cual se debe a una incompatibilidad entre el área total regada (111 hectáreas según el Censo Agropecuario de INE (2007)) y los insuficientes derechos de aprovechamiento de las Comunidades de Aguas Santa Rosa y Beneficencia, donde el caudal máximo de extracción es de solo 120 l/s para los derechos eventuales (ver Anexo D).

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES**

El modelo acoplado WEAP-MODFLOW desarrollado en este trabajo corresponde al primer esfuerzo por integrar los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos de la Cuenca del Río Lluta. Esta herramienta demostró ser adecuada para reproducir las componentes del balance hídrico de la zona de estudio, posibilitando su uso para la elaboración de escenarios futuros. Sin embargo, en la aplicación del modelo, es importante tener en cuenta que los resultados de escenarios no constituyen *predicciones exactas* de la situación futura, sino más bien *proyecciones* que indican ciertas tendencias y variaciones entre periodos, orientadas a saber como impactará el cambio climático, los cambios de uso de suelo, y las decisiones propias de la gestión del recurso hídrico de la cuenca, entregando un sólido apoyo técnico en este sentido.

En cuanto a la componente superficial del modelo acoplado, se calibraron con éxito las subcuencas de cabecera Río Caracarani en Humapalca, Río Colpitas en Alcérreca y Río Lluta en Alcérreca ( $KGE' \geq 0.80$  en calibración y  $KGE' \geq 0.61$  en verificación). Con la integración del modelo subterráneo se logró una satisfactoria representación de los caudales superficiales en la estación Río Lluta en Panamericana, cercana a la desembocadura, lo cual entrega confianza sobre una correcta representación del balance superficial de la cuenca completa. Por el lado de la componente subterránea, se logró una aceptable representación de los niveles de cuatro pozos de observación ubicados en el Valle de Lluta.

Para el periodo histórico (1985-2019), la oferta hídrica de la cuenca (precipitación de 207 mm/año) es concordante con los estudios previos. Mediante el modelo acoplado WEAP-MODFLOW calibrado, se estableció que la mayor parte de esta oferta se transforma en evapotranspiración no asociada a riego (85 %), dejando el resto disponible para abastecer las demandas de riego de Putre, Socoroma, Valle de Lluta y el Sector Costero, siendo estos últimos dos donde se concentra la mayor parte de la demanda agrícola.

En estos últimos sectores se identificó una importante interacción superficial-subterránea, donde casi la mitad (45 %) del caudal entrante al valle se transforma en recarga para el acuífero, predominantemente por la infiltración directa del río, y en menor medida por

los retornos de riego que se presentan a través de las extracciones agrícolas.

La aplicación del modelo WEAP-MODFLOW en un escenario climático futuro RCP 8.5 (2020-2050) y una condición *Business As Usual* (BAU), con una disminución ligera de las precipitaciones (4 %) y un aumento de 1°C en la temperatura media del aire respecto al periodo histórico, trae como resultado una importante baja en el caudal de salida hacia la desembocadura ( $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$ , un 18 % menor que el histórico). Esta disminución de caudales se obtuvo a pesar de la disminución en las demandas agrícolas modeladas con respecto al periodo histórico, lo cual se atribuye a la disminución de las precipitaciones en la cuenca, el aumento de las temperaturas que favorece la evapotranspiración de la cuenca, y también a un aumento en la infiltración del río (la cual sube un 17 % respecto al periodo histórico).

Se evaluaron dos escenarios de gestión, orientados a cuantificar el impacto de la construcción del embalse Chironta en la seguridad de riego del Valle de Lluta y el Sector Costero. Ambos escenarios (E1 y E2 con 2800 y 2000 hectáreas regadas, respectivamente) mostraron, como consecuencia directa del aumento de las áreas de riego, un gran incremento en la demanda agrícola, con respecto al período histórico. Sin embargo, el escenario con 2800 hectáreas sería muy sensible a experimentar periodos donde la demanda no sería completamente satisfecha, específicamente en años donde la precipitación anual persista por debajo del 75 % del promedio histórico y/o alcance puntualmente niveles críticos, por debajo del 50 %. Por otra parte, el escenario con 2000 hectáreas regadas se vería menos afectado, debido a la menor demanda agrícola, aunque igualmente podría experimentar bajas importantes. Con esto se concluye que si bien el embalse permite satisfacer en gran parte las expectativas de riego a durante el período futuro considerado, no garantiza una satisfacción de la demanda de riego durante periodos donde la precipitación del invierno altiplánico sea baja o muy baja. Por lo anterior, se recomienda que los regantes cuenten con un plan de contingencia en años relativamente secos (e.g., disminuyendo la superficie regada) para evitar pérdidas asociadas a la imposibilidad de regar todas las superficies

sembradas.

Por otro lado, el funcionamiento del embalse Chironta tendrá un gran impacto en el caudal de salida de la cuenca, con descensos del 42 y 27 % para los escenarios 1 (E1) y 2 (E2), respectivamente. En vista de lo anterior, resulta necesario recalcar la importancia de que futuros trabajos aborden las consecuencias que puede traer esta baja en el caudal de salida de la cuenca, sobre todo en los ecosistemas ubicados aguas abajo del embalse. Si bien en el estudio de DOH (2012) se estableció un caudal ecológico de  $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$  para el funcionamiento del embalse, este solo se especificó a los pies de la presa. Este caudal ecológico podría ser perfectamente consumido por los regantes ubicados aguas abajo, anulando los efectos esperados del establecimiento de dicho caudal ecológico. Por esta razón se recomienda estudiar la definición de un caudal ecológico en el sector de la desembocadura de la cuenca.

# Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56. *FAO, Rome, Italy*, 300(9):D05109.
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., Giraldo-Osorio, J. D., and Thinh, N. X. (2020). RF-MEP: A novel random forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239:111606.
- Beck, H. E., Wood, E. F., McVicar, T. R., Zambrano-Bigiarini, M., Alvarez-Garreton, C., Baez-Villanueva, O. M., Sheffield, J., and Karger, D. N. (2020). Bias correction of global high-resolution precipitation climatologies using streamflow observations from 9372 catchments. *Journal of Climate*, 33(4):1299–1315.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., and Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5:180214.
- Beyer, R., Krapp, M., and Manica, A. (2020). An empirical evaluation of bias correction methods for palaeoclimate simulations. *Climate of the Past*, 16(4):1493–1508.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., and Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *EGUGA*, page 19739.
- Centro AGRIMED (2017). Atlas Agroclimático de Chile.
- Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile - Stockholm Environment Insti-

- tute (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
- CNR (2018). Transferencia tecnológica para mejorar eficiencia de riego en Río Lluta - Informe Final. Informe técnico, Ejecutado por: Universidad Arturo Prat.
- DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. Informe técnico, DGA.
- DGA (1995). Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua de la parte norte de Chile. Informe técnico, Realizado por: Japan International Cooperation Agency (JICA) & Pacific Consultants Internarional. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- DGA (2001). Actualización recursos hídricos para reestablecimiento de derechos ancestrales indígenas I y II regiones - realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Ingenieros Consultores. Informe técnico, DGA.
- DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del Río Lluta, SIT N°104. Realizado por Cade-Idepe. Informe técnico, DGA.
- DGA (2010). Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota, SDT N°306. Informe técnico, Realizado por: División de Estudios y Planificación. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- DGA (2016). Análisis Integral de Soluciones a la Escasez Hídrica, Región De Arica y Parinacota, parte 1, SIT N° 410 - Realizado por ICASS Ltda. Informe técnico, Arica.
- DGA (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional - Informe Final - Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. Informe técnico, DGA.
- DGA (2017). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, SIT N°419. Informe técnico, Realizado por: Unión Temporal de Proveedores Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros Ltda.
- DGA (2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT N°435. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. Informe

- técnico, DGA.
- DGA (2019a). Aprueba bases administrativas y técnicas; y designa comisión de evaluación para la prestación de servicios personales denominada “Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las cuencas de Lluta y Pampa del Tamarugal. Informe técnico, DGA.
- DGA (2019b). Desarrollo de herramientas para el análisis de gestión en el marco del plan nacional de recursos hídricos, elaborado por DICTUC-SEI. Informe técnico, DGA.
- DMC (2020). Productos Históricos - Datos para Descarga. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/productos/RE3008>. Accedido: 2020-09-01.
- DOH (2012). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto "Embalse Chironta" XV Región de Arica y Parinacota, comuna de Arica - Desarrollado por: R&Q Ingeniería. Informe técnico.
- ESSAT (1998). Estudio hidrogeológico y modelo de simulación del Valle del Río Lluta: Arica, I Región - Realizado por Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores. Informe técnico.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., et al. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2).
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., Van Velthuizen, H., Verelst, L., and Wiberg, D. (2008). Global agro-ecological zones assessment for agriculture (gaez 2008). *IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy*, 10.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12):6307–6327.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., and Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1):421–439.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water*

- model: the ground-water flow process*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA.
- ICASS (2019). Plan estratégico de gestión hídrica en las cuencas de lluta y pampa del tamarugal: Propuesta técnica rev. a. Informe técnico.
- INE (1997). VI Censo Nacional Agropecuario.
- INE (2007). VII Censo Nacional Agropecuario y forestal - Informe Metodológico.
- Jabloun, M. d. and Sahli, A. (2012). Weap-mabia tutorial: A collection of stand-alone chapters to aid in learning the weap-mabia module.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424:264–277.
- Knoben, W. J., Freer, J. E., and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? comparing nash–sutcliffe and kling–gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10):4323–4331.
- Niswonger, R. G., Panday, S., and Ibaraki, M. (2011). Modflow-nwt, a newton formulation for modflow-2005. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 6(A37):44.
- R Core Team (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- SEI (2016). *WEAP Tutorial - A collection of stand-alone modules to aid in learning the WEAP software*. Stockholm Environment Institute.
- Sieber, J. and Purkey, D. (2015). *WEAP-User Guide*, Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm Environment Institute.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., and De Roo, A. (2013). Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the volta and baro-akobo basin. *Journal of Hydrology*, 499:324–338.
- Zambrano-Bigiarini, M. and Rojas, R. (2013). A model-independent particle swarm optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling & Software*, 43:5–25.
- Zambrano-Bigiarini, M. and Rojas, R. (2020). hydroPSO: Particle Swarm Optimisation, with Focus on Environmental Models.

Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., et al. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183:170–185.

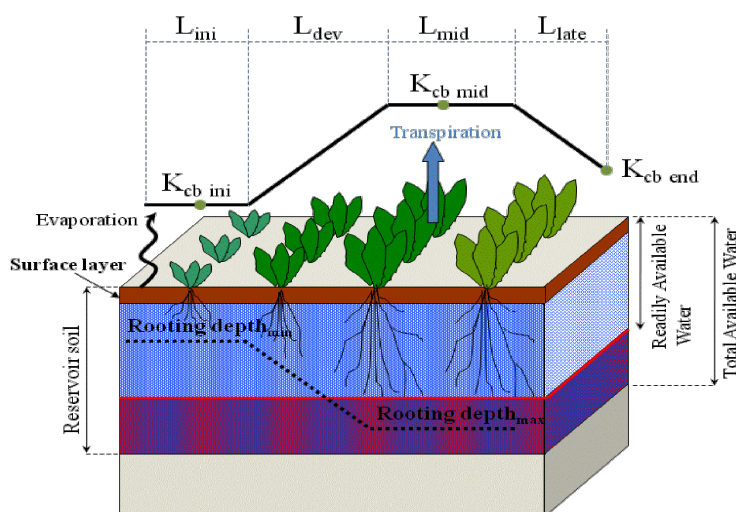
# Anexo A

## Métodos de modelación empleados en WEAP

### A.1. Método MABIA

Método aplicado exclusivamente a las **zonas de riego**, en este trabajo. Consiste en una simulación diaria de transpiración, evaporación, demandas por riego, y planificación, crecimiento y rendimiento de cultivos (Sieber & Purkey, 2015). MABIA incluye módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua del suelo. Fue derivado del conjunto de herramientas del software MABIA, desarrollado en el Institut National Agronomique de Tunisie por el Dr. Ali Sahli y Mohamed Jabloun. Dada la poca disponibilidad de antecedentes agrícolas en la zona de estudio, a través de este método se pueden definir adecuadamente, y con poco requerimiento de información adicional, las demandas de los cultivos de las zonas de riego del Valle de Lluta.

Con MABIA se pueden modelar los requisitos de agua de los cultivos y los diferentes componentes del balance hídrico, simulando los procesos de escorrentía, infiltración y percolación que resultan de la lluvia natural, la programación del riego, la reducción del rendimiento de los cultivos y el rendimiento de los sistemas que controlan el riego.



**Figura A.1:** Esquema de la modelación de cultivos en el método MABIA. Fuente: Jabloun & Sahli (2012)

## A.2. Método de *humedad del suelo*

Método modelación hidrológica aplicado, en este trabajo, a las subcuencas en general. El método consiste en una simulación de la humedad del suelo en dos compartimentos (o “estanques”, ver Figura A.2), y se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial, el interflujo y la percolación profunda para una unidad de cuenca (Sieber & Purkey, 2015). Este método también permite simular la acumulación y derretimiento de nieve. Este método permite la caracterización del uso del suelo y/o los impactos del tipo de suelo en estos procesos. La ruta del flujo base al río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior del suelo. En consecuencia, el método de *humedad del suelo* requiere la representación de varios parámetros del suelo y el clima para simular estos procesos. Estos procesos se representan en la Figura A.2.

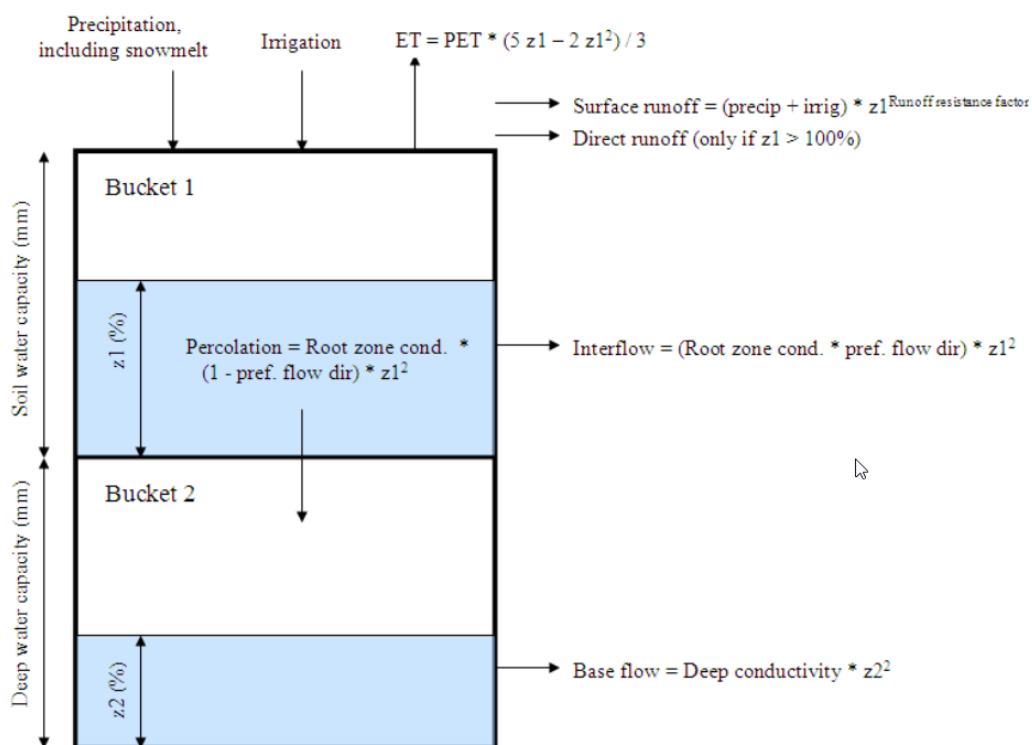


Figura A.2: Esquema del método de *humedad del suelo* y los procesos representados en él.  
Fuente: Sieber & Purkey (2015)

## Anexo B

# Determinación de la cuenca y la red de drenaje

La definición de la red de drenaje del río Lluta se realizó en conjunto con la delimitación de la cuenca y las subcuencas de la zona de estudio, lo cual se determinó a partir de modelos de elevación digital SRTM (30 m) y ALOS PALSAR (12.5 m) por separado, para una posterior comparación. En la Figura B.1 se muestra la cuenca trabajada en este estudio, en conjunto a la red de drenaje y las elevaciones a partir del DEM SRTM. Si bien con SRTM y ALOS PALSAR se obtuvo la misma cuenca, no se puede decir lo mismo sobre la red de drenaje, y más allá de eso en cualquier caso la definición de ciertas quebradas resultó ser bastante imprecisa si se compara ese resultado con imágenes satelitales de Google Earth, por ejemplo.

Ante el insatisfactorio resultado de la red de drenaje obtenida con cada uno de los DEM, se realizó una corrección manual de los ríos y quebradas obtenidos con ALOS PALSAR, donde se usaron como referencia imágenes satelitales de Google Earth y MapBox. Cada una de las quebradas corregidas fueron además reconocidas (por nombre) de acuerdo a los antecedentes de la zona de estudio (DGA, 2016).

En la Tabla B.1 se indican los nombres de los ríos y quebradas numerados en la Figura B.1. De las quebradas en la tabla, no todas generan un aporte de escorrentía que pueda considerarse influyente en los caudales de salida del Río Lluta, esta situación se ve particularmente en la zona baja de la cuenca donde las quebradas Mollepampa, Poconchile, Cardones (Cuanune incluida) y Chaquire se han visto inactivas a lo largo de los años. De

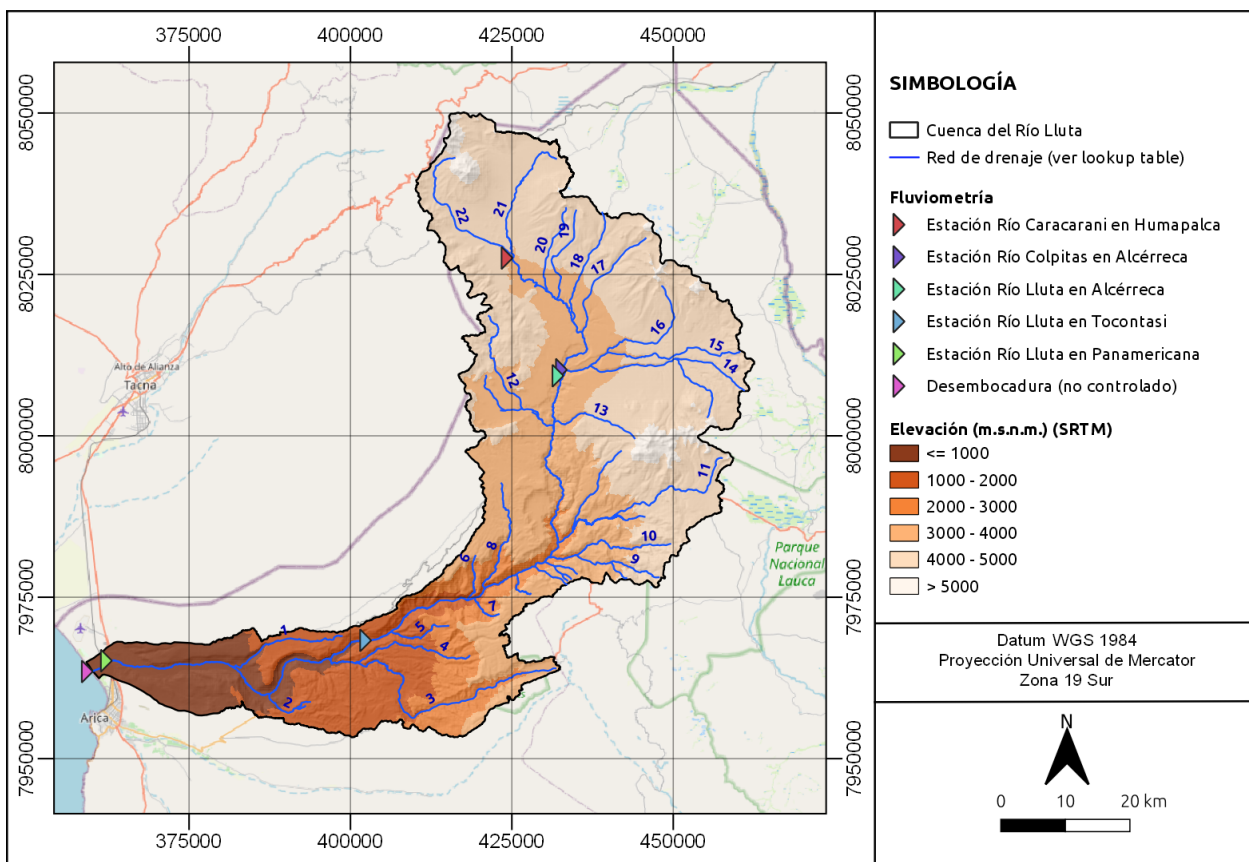


Figura B.1: Red de drenaje de la Cuenca del Río Lluta.

esta manera en el sector Lluta Bajo, el Río Lluta es el único cauce que naturalmente escurre agua regularmente durante todo el año.

Por otro lado, entre los aportantes más influyentes en los caudales de la cuenca del Río Lluta, se consideran en menor medida a las quebradas Socoroma (9) y Jurase (Putre; 11), y en mayor medida a los ríos Colpitas (15), Caracarani (21), Azufre (22) y al conjunto de quebradas Chuquiananta (17), Guancarani (18), Teleschuño (19) y Cascavillane (20) ubicadas en la parte alta de la cuenca.

**Tabla B.1:** Identificación de los ríos y quebradas indexados en la Figura B.1

<b>ID</b>	<b>Nombre Quebrada o Río</b>
1	Quebrada Mollepampa
2	Quebrada Poconchile
3	Quebrada Cardones
4	Quebrada Cuanune
5	Quebrada Chaquire
6	Quebrada Chironta
7	Quebrada Campanani
8	Quebrada Palmani
9	Quebrada Socoroma
10	Quebrada Aroma
11	Quebrada Jurase
12	Quebrada Huaylas
13	Quebrada Puxuma
14	Quebrada Allane
15	Rio Colpitas
16	Quebrada Iquilla
17	Quebrada Chuquiananta
18	Quebrada Guancarani
19	Quebrada Teleschuño
20	Quebrada Cascavillane
21	Rio Caracarani
22	Rio Azufre

## Anexo C

# Distritos censales y superficies agrícolas

En la Figura C.1 se muestran los distritos censales considerados en el VI Censo Nacional Agropecuario (INE, 1997) y el VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal (INE, 2007).

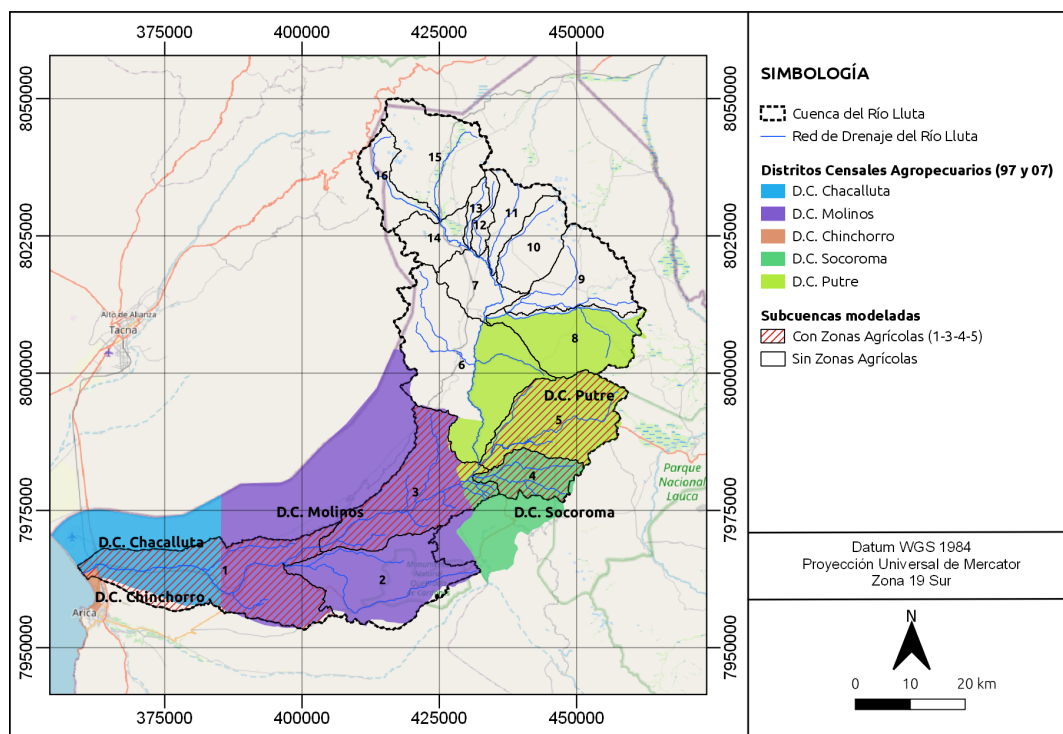


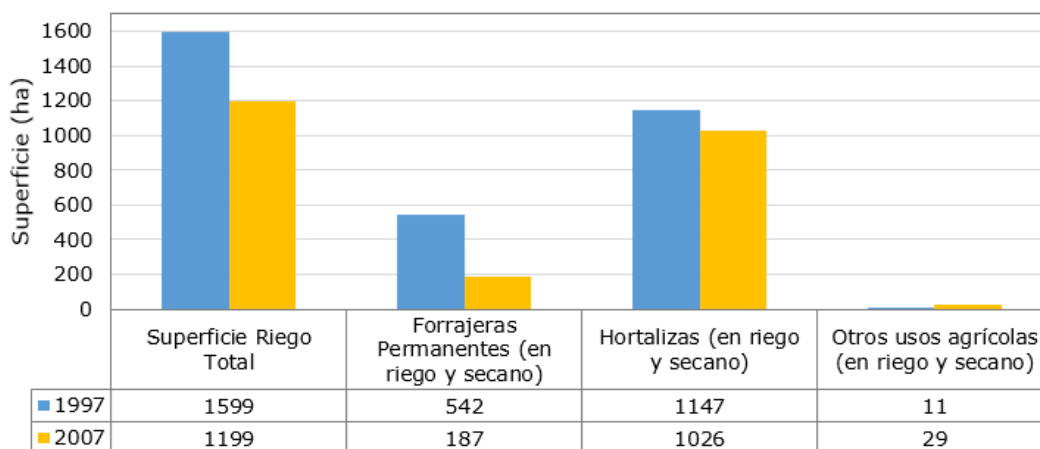
Figura C.1: Distritos Censales en la Cuenca del Río Lluta.

En cuanto a los distritos censales y su relación con las zonas de riego preparadas en la modelación, se han separado cuatro sectores: el sector del Valle de Lluta, que abarca 16

zonas de riego, y se caracteriza a partir de los distritos censales Chacalluta y Molinos (Figura C.1); el Sector Costero que abarca 1 zona de riego, y que se caracteriza por a partir del distrito censal Chinchorro (Figura C.1). Un punto de referencia para diferenciar estos sectores corresponde a la Ruta 5 que cruza transversalmente al Río Lluta. Los otros sectores considerados son las localidades de Putre y Socoroma, que consisten en una zona de riego cada uno, y se caracterizan a partir de los distritos censales del mismo nombre (ver Figura C.1).

### C.1. Sector Valle de Lluta

El sector del Valle de Lluta, se puede abordar a partir de los distritos censales Chachalluta y Molinos, de acuerdo a la Figura C.1. En la Figura C.2, se muestra un resumen de la evolución de las zonas regadas, identificadas en los censos de 1997 y 2007, donde se hace además un desglose entre los principales usos agrícolas, que corresponden específicamente a las forrajeras permanentes y las hortalizas.



**Figura C.2:** Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realizados en 1997 y 2007, para el Valle de Lluta. Fuente: Elaboración Propia en base a datos de INE (2007, 1997).

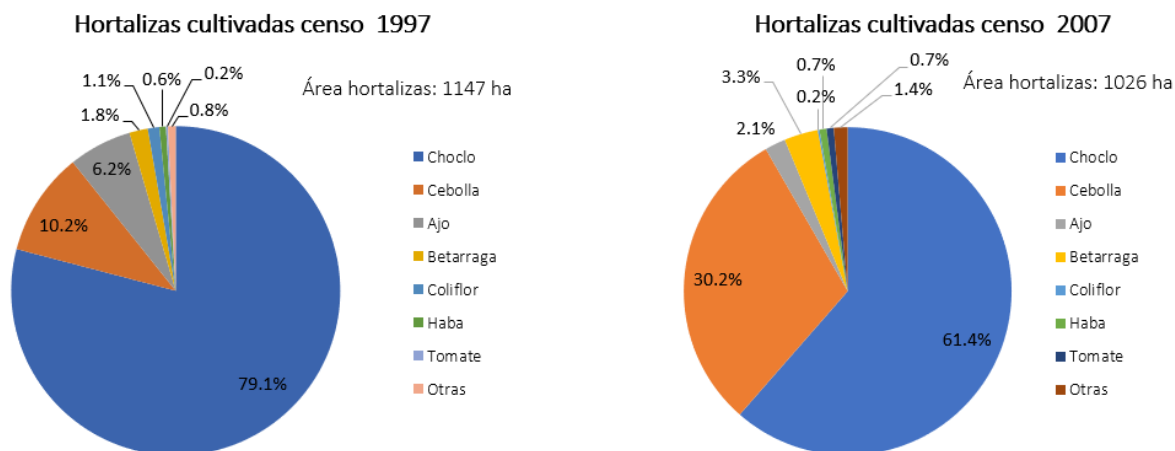
De acuerdo a los datos presentados en la Figura C.2, habría existido un descenso entre las

áreas agrícolas desarrolladas en el Valle de Lluta entre los años 1997 y 2007, tanto para forrajeras permanentes (pastizales) como para hortalizas, con lo que la superficie total de riego en el sector habría descendido desde aproximadamente 1600 hectáreas a casi 1200 hectáreas en un periodo de 10 años.

En cuanto a la superficie cubierta por forrajeras permanentes se tiene que el 100% de ellas corresponde a alfalfa, variedad que ha sido desarrollada durante décadas en la zona (CNR, 2018). En el censo agropecuario de 1997 estas superficies habrían cubierto 542 hectáreas, lo que según el censo del año 2007 habría descendido a 187 hectáreas. A esta tendencia hay que sumar que los datos aportados por el programa “Transferencia tecnológica para mejorar eficiencia de riego en Río Lluta” realizado por CNR (CNR, 2018) donde se realizó un catastro en terreno, determinando una superficie de 100.41 hectáreas, que viene a confirmar la tendencia a la baja de este cultivo.

En cuanto a la superficie cubierta por hortalizas, se tiene una variedad acotada de cultivos desarrollados, que en gran parte se debe las restricciones dadas por la alta salinidad del Río Lluta. Respecto a los datos de los censos, en el año 1997 se tenía un total 1147 hectáreas con hortalizas, valor que hasta 2007 se mantuvo ciertamente estable, aunque descendiendo a 1026 hectáreas. En la Figura C.3 se muestra la proporción cultivos desarrollados para el año 1997 y 2007, donde un aspecto importante a destacar es que en los diez años los agricultores disminuyeron el cultivo de choclo (maíz lluteño) y ajos para dar mayor desarrollo al cultivo de cebollas en el valle. En el 2007 la superficie cubierta por choclo aún se mantuvo con la hortaliza mayoritariamente cultivada, con aproximadamente 630 hectáreas, seguida por la cebolla venida en ascenso con aproximadamente 310 hectáreas, y la betarraga que ascendió a aproximadamente 34 hectáreas. Los datos del catastro más reciente de CNR (2018), parecen confirmar la tendencia evidenciada en los censos, ya que entre 2016 y 2017 la superficie de cebolla habría ascendido a 333 hectáreas, y los cultivos de maíz habrían continuado descendiendo hasta las 363 hectáreas. Cabe destacar que el cultivo de otras hortalizas, como coliflor, habas y tomates, parecen haberse mantenido

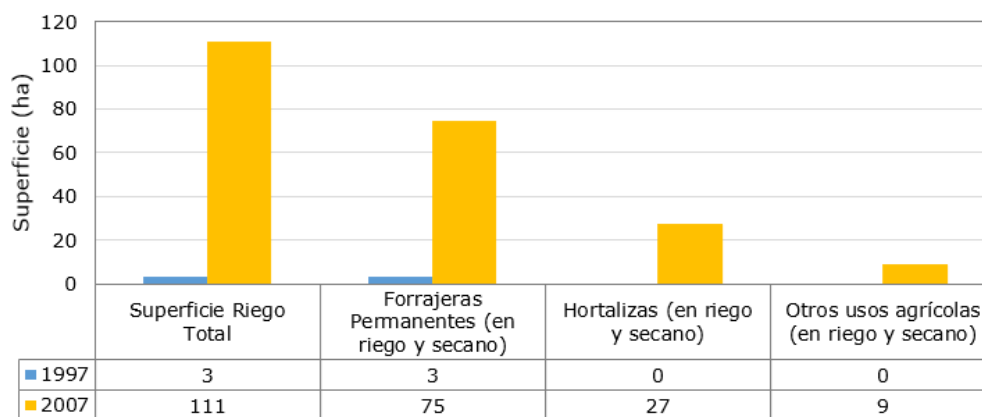
estancados entre los censos de 1997 y 2007.



**Figura C.3:** Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el Valle de Lluta. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaboración Propia en base a datos de INE (2007, 1997).

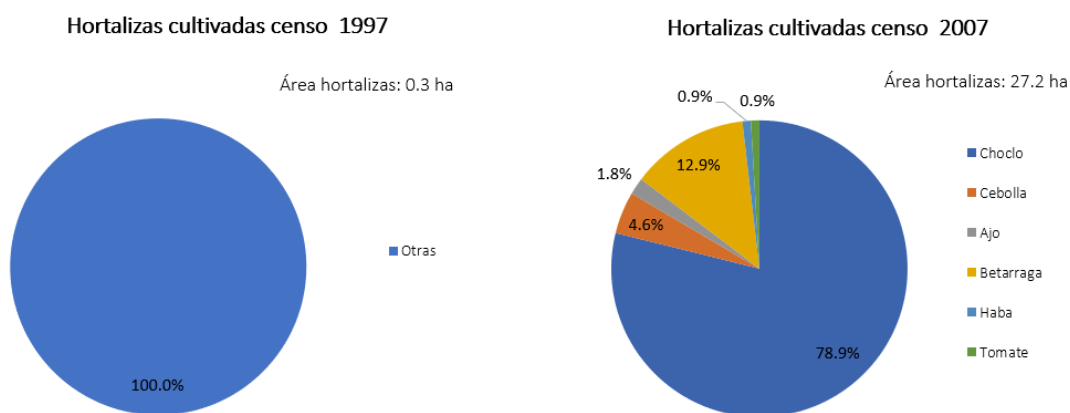
## C.2. Sector Costero

El Sector Costero, se puede abordar a partir del distrito censal Chinchorro, de acuerdo a la Figura C.1. En la Figura C.4, se muestra un resumen de la evolución de las zonas regadas, identificadas en los censos de 1997 y 2007, donde se hace además un desglose entre los principales usos agrícolas, que corresponden específicamente a las forrajeras permanentes y las hortalizas.



**Figura C.4:** Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realizados en 1997 y 2007, para el Sector Costero. Fuente: Elaborado a partir de INE (2007, 1997).

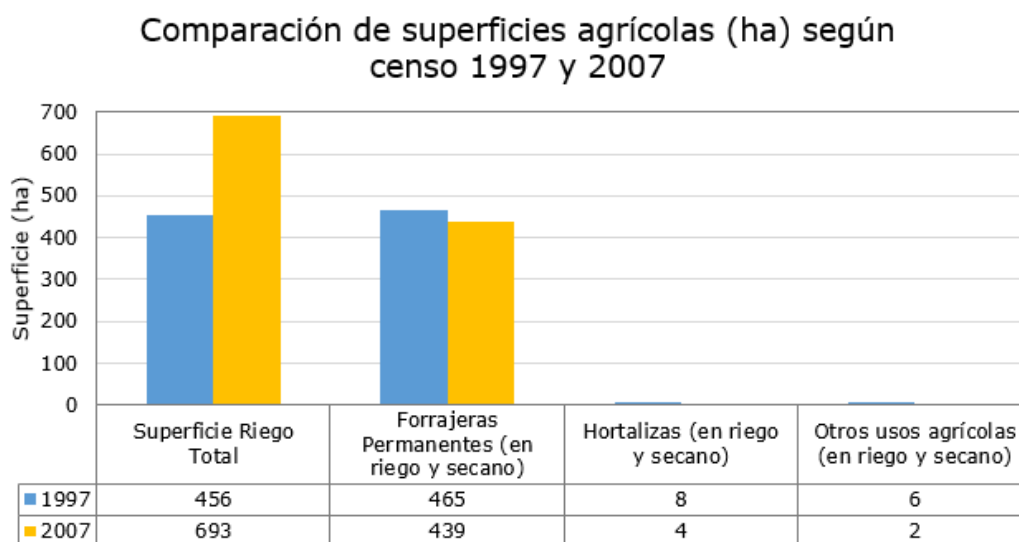
Existe una gran disparidad entre los dos censos con los que se cuenta, pues la superficie total catastrada en 1997 corresponde a solo 3 hectáreas de prácticamente solo forrajeras permanentes, en cambio en el año 2007 la superficie total catastrado pasó a ser 111 hectáreas, con 75 hectáreas de forrajeras permanentes y 27 hectáreas repartidas en una variedad de hortalizas (ver Figura C.5).



**Figura C.5:** Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el Sector Costero. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaborado a partir de datos de INE (2007, 1997).

### C.3. Sector Putre

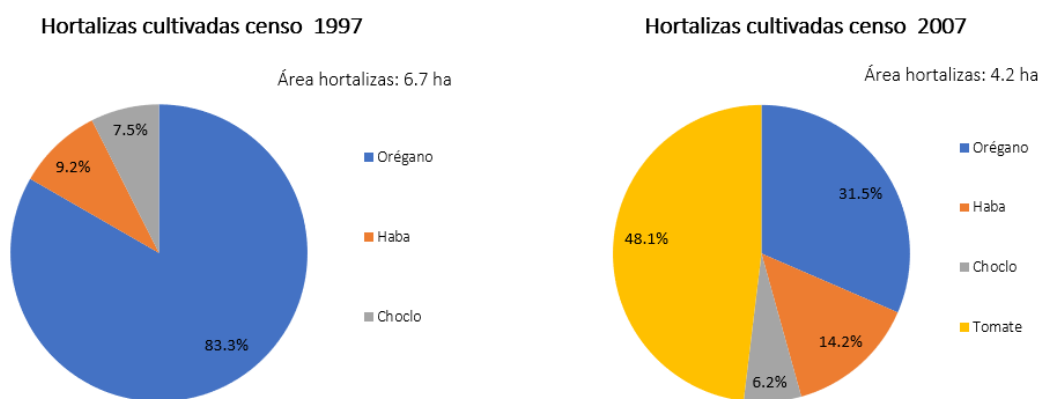
El Sector Putre, se puede abordar a partir del distrito censal Putre, de acuerdo a la Figura C.1. En la Figura C.6, se muestra un resumen de la evolución de las zonas regadas, identificadas en los censos de 1997 y 2007, donde se hace además un desglose entre los principales usos agrícolas, que corresponden específicamente a las forrajeras permanentes y las hortalizas.



**Figura C.6:** Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realizados en 1997 y 2007, para el sector Putre. Fuente: Elaborado a partir de INE (2007, 1997).

Antes de discutir los datos, es importante destacar que, para este distrito, en el censo del 2007 no es posible concordar la superficie de riego total de 694 ha, con la suma de todas las áreas agrícolas regadas, pues esta suma solamente alcanza las 445 ha. En vista de lo anterior, se determina que la superficie de riego total solamente alcanza las 445 ha. En cuanto a la superficie cubierta por forrajeras permanentes se tiene que el 100 % de ellas corresponde a alfalfa. En el censo agropecuario de 1997 estas superficies habrían cubierto 465 ha, área que según el censo del año 2007 se habría sostenido, con 439 ha. En cuanto a la

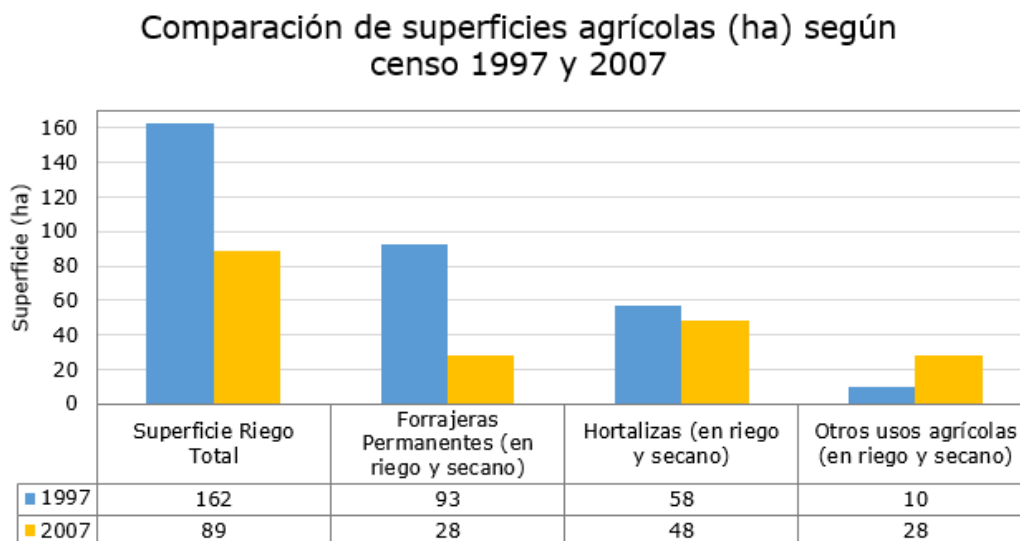
superficie cubierta por hortalizas, según los datos de los censos (ver Figura C.7), no existe un desarrollo a gran escala, pues las superficies catastradas en 1997 y 2007 no superan las 10 ha. En el censo del año 1997 la hortaliza predominante era el orégano, para luego dar paso a una predominancia de cultivos de tomates en el año 2007.



**Figura C.7:** Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el sector Putre. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaborado a partir de datos de INE (2007, 1997).

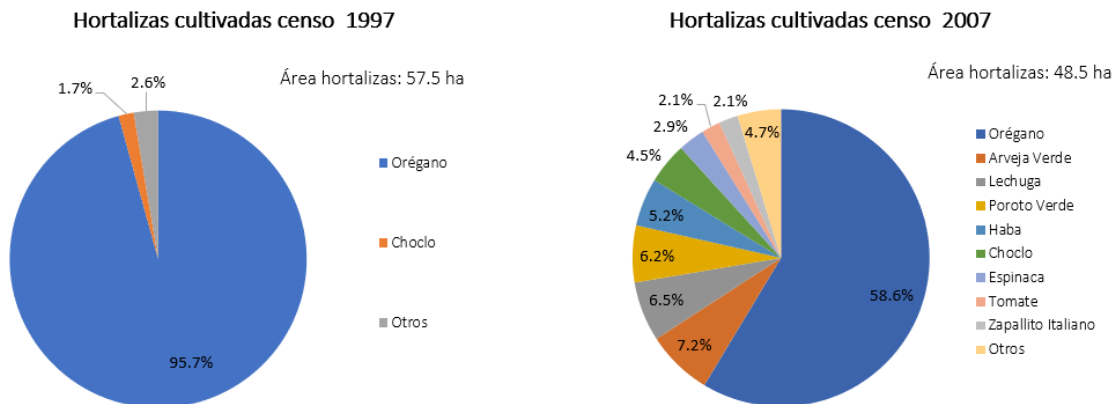
#### C.4. Sector Socoroma

El Sector Socoroma, se puede abordar a partir del distrito censal Socoroma, de acuerdo a la Figura C.1. En la Figura C.8, se muestra un resumen de la evolución de las zonas regadas, identificadas en los censos de 1997 y 2007, donde se hace además un desglose entre los principales usos agrícolas, que corresponden específicamente a las forrajeras permanentes y las hortalizas.



**Figura C.8:** Comparación de superficies agrícolas según censos agropecuarios realizados en 1997 y 2007, para el sector Socoroma. Fuente: Elaborado a partir de INE (2007, 1997).

De acuerdo a los resultados de la figura anterior, habría existido un descenso entre las áreas agrícolas desarrolladas en Socoroma entre los años 1997 y 2007, tanto para forrajeras permanentes (pastizales) como para hortalizas, con lo que la superficie total de riego en el sector habría descendido de 162 ha a 89 ha en un periodo de 10 años. En cuanto a la superficie cubierta por forrajeras permanentes se tiene que el 100 % de ellas corresponde a alfalfa. En el censo agropecuario de 1997 estas superficies habrían cubierto 93 ha, área que según el censo del año 2007 habría descendido a 28 ha. En cuanto a la superficie cubierta por hortalizas, se tiene una variedad acotada de cultivos desarrollados. Por lo demás, las superficies cultivadas han descendido desde 58 ha a 48 ha entre 1997 y 2007. En la Figura C.9 se muestra la proporción cultivos desarrollados para el año 1997 y 2007. Un aspecto importante a destacar es que en los diez años los agricultores pasaron de cultivar prácticamente un solo tipo de hortaliza, el orégano; a considerar nuevas variedades como la arveja verde, la lechuga, el poroto verde, las habas, el choclo y varias otras hortalizas.



**Figura C.9:** Proporción según tipos de hortalizas cultivadas en el sector Socoroma. Censos agropecuarios 1997 y 2007. Fuente: Elaborado a partir de datos de INE (2007, 1997).

## Anexo D

# Comunidades de Aguas en el Río Lluta

### D.1. Valle de Lluta y Sector Costero

**Tabla D.1:** Comunidades de Aguas en el Valle de Lluta y el Sector Costero. Fuente: DGA (2016).

ZR	Grupo de CDA	Usuarios (un)	Acciones (un)	Horas (hr)	Total CBR (l/s)	Unitaria CBR (l/s/accion)	Dotación (l/s)	Dot. Hid. (l/s)
0	Beneficencia	54	39.2	26	60	1.531	9.0	14.6
0	Santa Rosa	7	46.8	26	60	1.281	9.0	14.6
1	Valles Hermosos	146	249.0	26	400	1.606	59.8	97.6
1	Aica-González	2	30.0	26	60	2.000	9.0	14.6
2	Domínguez	2	7.5	60	15	2.000	5.2	3.7
2	Sascapa	65	428.3	60	200	0.467	69.0	48.8
3	Chacabuco	31	345.2	60	100	0.290	34.5	24.4
4	Arellano Beyzan	3	20.0	60	60	3.000	20.7	14.6
4	Cora-Beyzan o Beyzan-Cora	22	99.4	60	100	1.006	34.5	24.4
4	El Muro	34	211.1	60	150	0.711	51.7	36.6
4	Alanoca	2	26.6	60	20	0.752	6.9	4.9
5	Barranco Santa Rosa	3	19.0	(*)	15	0.789	(*)	3.7
5	Mayorga	4	20.3	(*)	20	0.985	(*)	4.9
5	Huancarane	7	48.9	32	80	1.637	14.7	19.5
5	La Palma Uno	5	23.0	32	80	3.478	14.7	19.5
5	La Palma Dos	4	36.0	32	80	2.222	14.7	19.5
5	Visconti	10	119.5	32	80	0.669	14.7	19.5
5	Kesler-Gil	5	60.0	32	80	1.333	14.7	19.5
6	Puro Chile	17	67.0	32	200	2.986	36.8	48.8
7	Huanca	2	7.1	23	15	2.119	2.0	3.7

*Continúa en la página siguiente*

Tabla D.1 – Continúa de la página anterior

ZR	Grupo de CDA	Usuarios (un)	Acciones (un)	Horas (hr)	Total CBR (l/s)	Unitaria CBR (l/s/accion)	Dotación (l/s)	Dot. Hid. (l/s)
7	Linderos	8	23.9	32	30	1.255	5.5	7.3
7	Poconchile	27	83.8	32	150	1.790	27.6	36.6
8	Agua-Taya	24	65.7	23	60	0.914	7.9	14.6
8	La Isla	9	22.4	32	60	2.679	11.0	14.6
8	Punta de Rieles	3	5.2	23	15	2.863	2.0	3.7
8	Kesler	3	4.7	32	15	3.191	2.8	3.7
9	Vilca Chang	2	37.0	23	30	0.811	4.0	7.3
9	Ponce	2	7.0	23	30	4.286	4.0	7.3
9	Bolaños Villanueva	4	8.0	23	30	3.750	4.0	7.3
9	Ramos	7	28.1	23	60	2.139	7.9	14.6
9	Santa Raquel	5	77.5	23	50	0.645	6.6	12.2
10	Comunidad Almonte	2	13.0	(*)	237	18.231	(*)	57.8
10	Rojas Maraboli	3	18.5	23	40	2.162	5.3	9.8
10	Vilca Loredo	7	35.5	23	40	1.127	5.3	9.8
10	Loredo	2	21.0	23	30	1.429	4.0	7.3
11	Humire	5	3.8	33	10	2.660	1.9	2.4
11	Bocanegra	6	81.0	33	30	0.370	5.7	7.3
11	El Tambo	5	41.5	33	40	0.964	7.6	9.8
11	Santa Inés	6	21.0	23	80	3.810	10.6	19.5
12	Molinos	49	193.1	33	600	3.108	113.8	146.4
13	Chaquiri	5	13.2	36	40	3.040	8.3	9.8
13	Chapisca Norte	5	3.7	36	40	10.811	8.3	9.8
13	Chapisca Sur	12	10.1	36	50	4.941	10.3	12.2
13	Chapisca Oriente	7	4.7	36	40	8.457	8.3	9.8
13	Vila Vila num 2	3	4.0	36	50	12.594	10.3	12.2
13	Tocontasi	7	18.5	36	50	2.704	10.3	12.2
14	Zora	17	15.4	36	50	3.249	10.3	12.2
14	Cala Cala	19	11.0	36	30	2.722	6.2	7.3
14	Tauquia	12	8.8	36	30	3.401	6.2	7.3
15	Arancha	14	17.4	36	60	3.452	12.4	14.6
15	Huacharaquie	5	1.9	36	20	10.811	4.1	4.9
15	Tiñare	2	5.5	36	20	3.636	4.1	4.9
15	Challallapo	11	16.6	36	40	2.408	8.3	9.8
15	La Palma	3	9.3	36	40	4.306	8.3	9.8
16	Vila-Collo num 1	2	5.3	36	30	5.682	6.2	7.3
16	Vila-Collo num 2	6	5.0	36	20	3.992	4.1	4.9
16	Cata	3	2.9	36	20	6.849	4.1	4.9
16	Iqueta Norte	5	3.8	36	25	6.667	5.2	6.1

Continúa en la página siguiente

Tabla D.1 – Continúa de la página anterior

ZR	Grupo de CDA	Usuarios (un)	Acciones (un)	Horas (hr)	Total CBR (l/s)	Unitaria CBR (l/s/accion)	Dotación (l/s)	Dot. Hid. (l/s)
16	Vinto Sur	4	2.8	36	20	7.092	4.1	4.9
16	Vinto Norte	18	17.7	36	80	4.517	16.6	19.5
16	Buena Vista	3	4.0	36	20	5.025	4.1	4.9
16	Anca-Collo	2	1.3	36	20	16.000	4.1	4.9

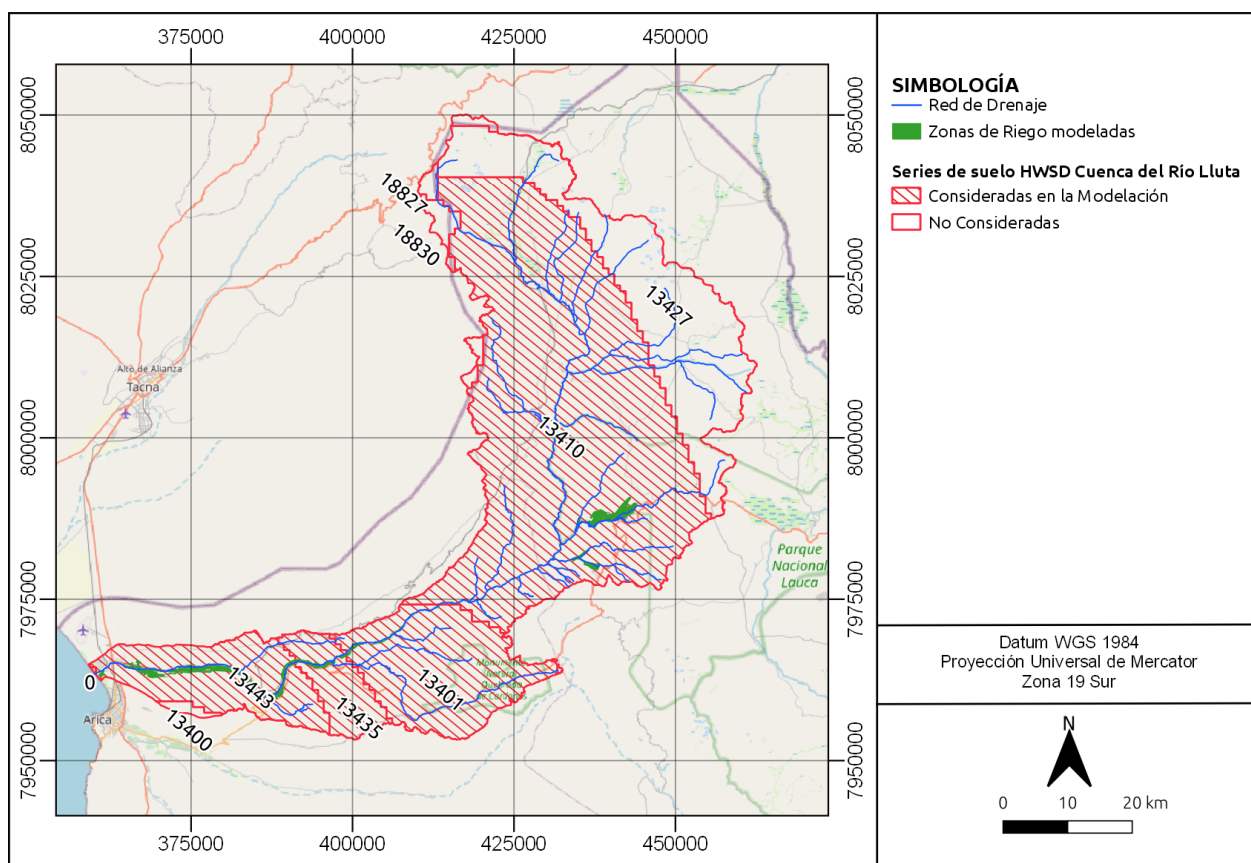
## D.2. Putre y Socoroma

Tabla D.2: Comunidades de Aguas en Putre y Socoroma. Fuente: DGA (2016).

ZR	Grupo de CDA	Usuarios (un)	Acciones (un)	Horas (hr)	Total CBR (l/s)	Unitaria CBR (l/s/accion)	Dotación (l/s)	Dot. Hid. (l/s)
17	Sajata	104	51426	(*)	30	0.001	(*)	60.2
17	Llipi Llipi	57	30240	5040	60	0.002	70	120.4
17	Ancache	18	17424	2904	15	0.001	15.1	30.1
17	Llancoma	143	79494	13249	100	0.001	(*)	200.7
17	Taipicahua	12	17280	2880	50	0.003	50	100.3
17	Perquelleque	13	24012	4002	9	0.0004	12.5	18.1
17	Vilacabrani	45	21168	3528	9	0.0004	11	18.1
17	Tojotojoni	58	24600	4100	9	0.0004	6.4	18.1
17	Surunche	90	42912	7152	40	0.001	39.7	80.3
17	Ancolacaya	2	8640	1440	2	0.0002	1.3	4
17	Cubrimani	241	132072	22012	314	0.002	(*)	630.1
17	Lluscuma	80	59256	9865	70	0.001	137	140.5
17	Chatiaipo	13	17.3	33	30	1.73	5.7	60.2
18	Mancaruma-Chulpane	107	5544	924	15	0.003	14.4	30.1
18	Cerro Socoroma	2	288	48	4	0.014	0.2	8
18	Chacacagua	70	3360	560	10	0.003	6.7	2.4
18	del Pueblo de Socoroma	246	11808	1968	15	0.001	0	3.7
18	CDA Bajos Pollerane	8	768	128	3	0.004	0.5	0.7
18	Apilla-Apilla n°1	4	192	32	4	0.021	0.2	1
18	Vila Vila	9	288	48	2	0.007	0.1	0.5
18	Apilla-Apilla n°2	5	720	120	4	0.006	0.6	1
18	Chipaca	7	432	72	10	0.023	0.9	2.4
18	Guañavira Abajo	5	864	144	2	0.002	0.3	0.5

# Anexo E

## Clases de Suelos derivadas de HWSD



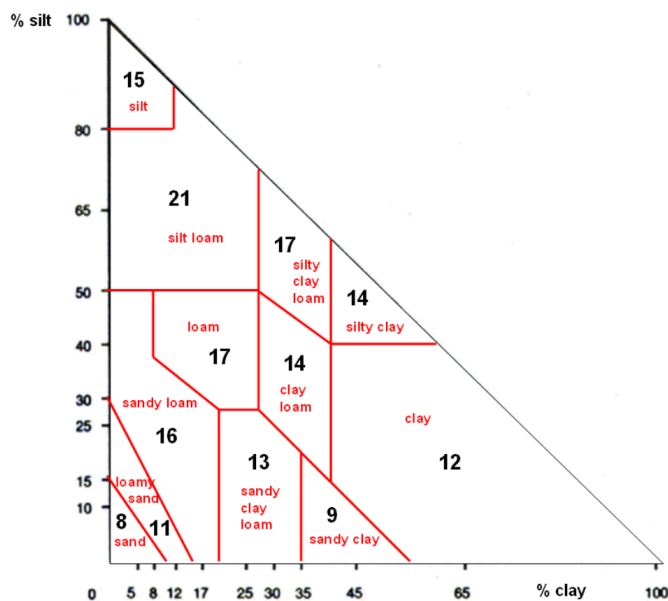
**Figura E.1:** Series de Suelos presentes en la Cuenca del Río Lluta. Fuente: Elaborado a partir de HWSD (Fischer et al., 2008).

**Tabla E.1:** Series de suelos consideradas para la modelación de zonas de riego con método MABIA. Fuente: Elaborado a partir de HWSD (Fischer et al., 2008).

Global Mapping Unit Identifier	Sequence	Share in Soil Mapping Unit	Topsoil Sand Fraction (%)	Topsoil Silt Fraction (%)	Topsoil Clay Fraction (%)
13443	1	55	34	55	11
	2	45	69	19	12
13435	1	60	57	25	18
	2	40	50	28	22
13401	1	60	43	29	28
	2	40	65	16	19
13401	1	70	50	30	20
	2	30	61	32	7

**Tabla E.2:** Series de uso de suelos, clases y tasa máxima de infiltración. Fuente: Elaborado a partir de Jabloun & Sahli (2012).

Global Mapping Unit Identifier	Soil Class	Maximum Infiltration Rate
13443	Silt Loam	121.9
13435	Sandy Loam	487.7
13401	Clay Loam	152.4
13401	Loam	243.8

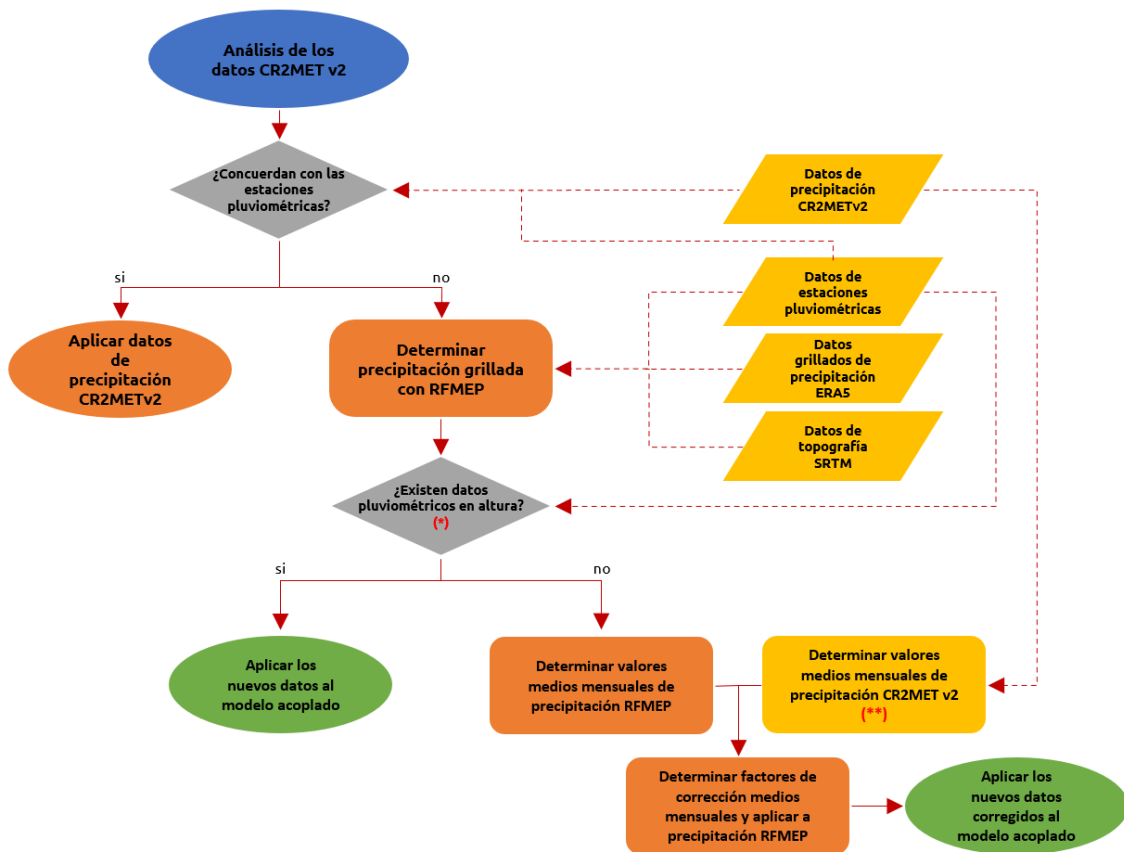


**Figura E.2:** Relación entre el contenido de arcilla (% clay) y contenido de limos (% silt), y la Clase de Suelo. Fuente: Jabloun & Sahli (2012).

## Anexo F

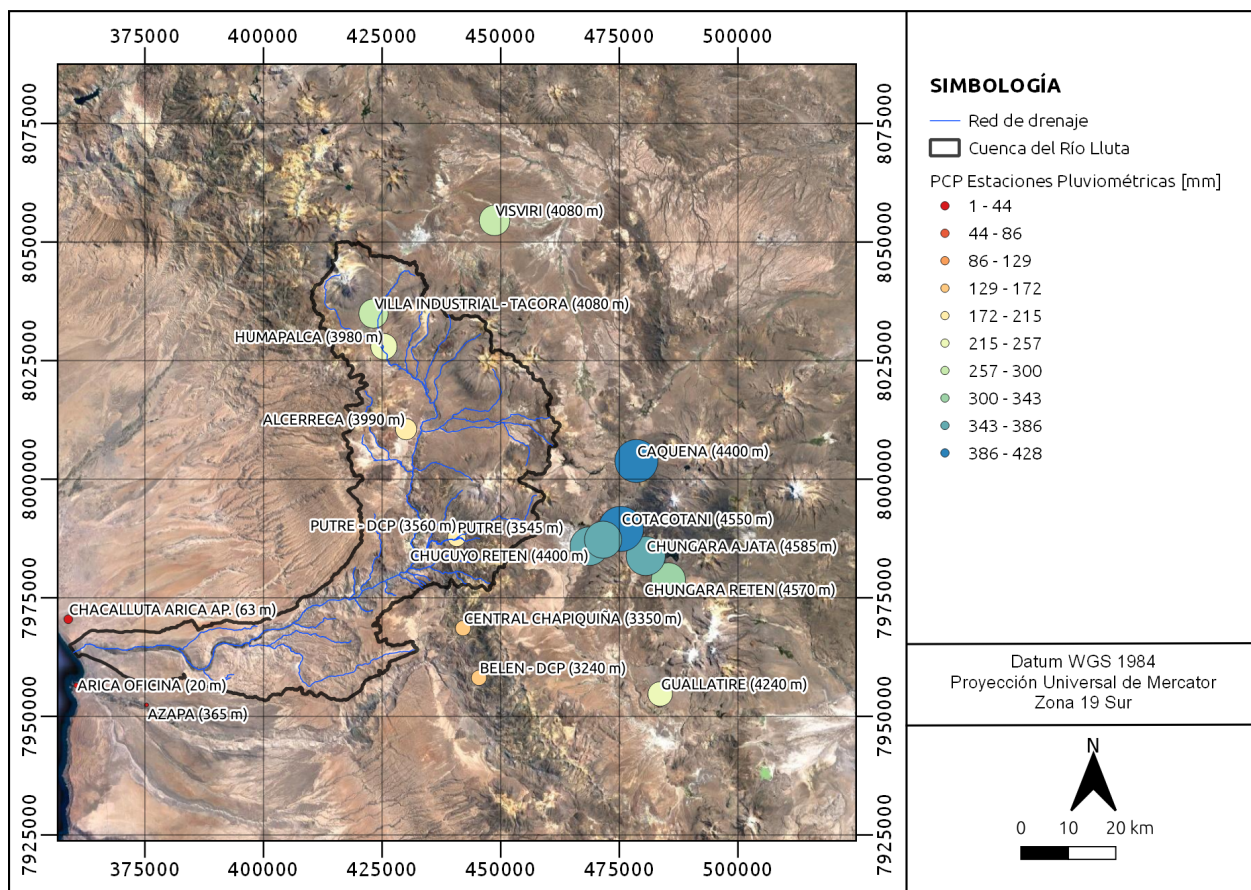
# Cálculo del producto de precipitación

En la Figura F.1 se presenta el flujo de trabajo seguido para obtener el producto de precipitación grillado usado en la modelación hidrológica.



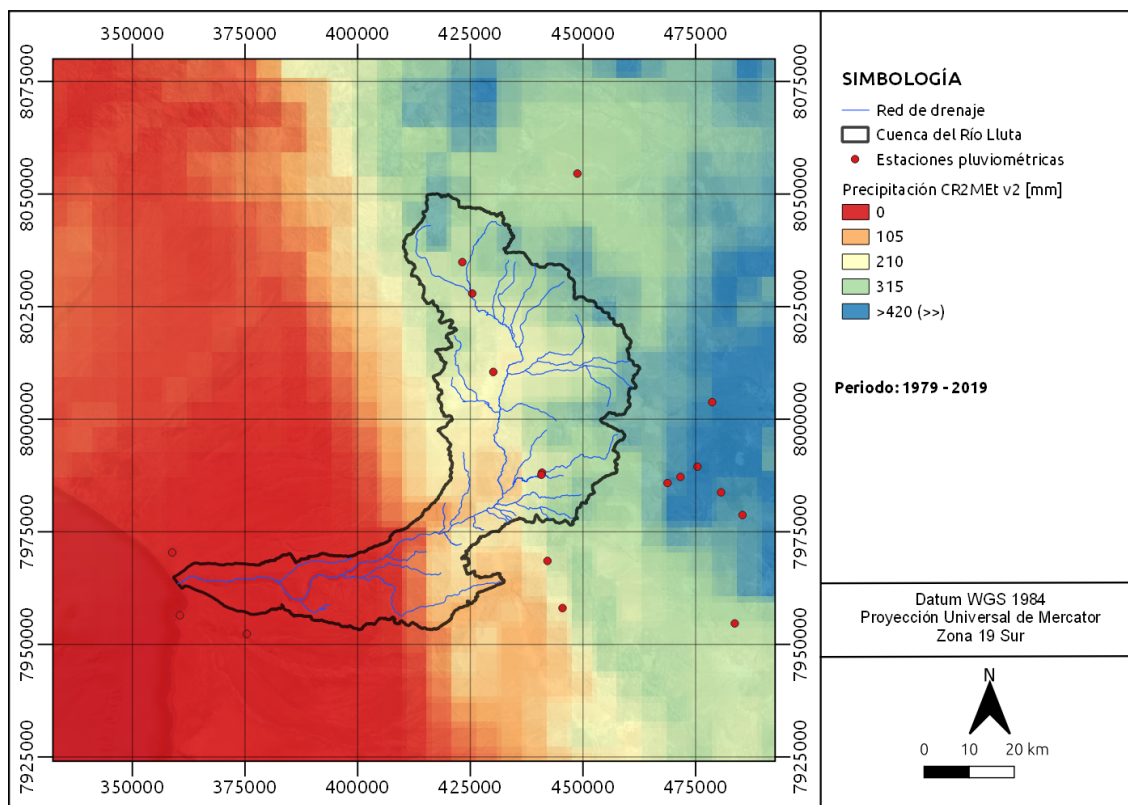
**Figura F.1:** Flujo de trabajo seguido para determinar los datos de precipitación implementados en la modelación hidrológica.

### F.1. Estaciones pluviométricas en la cuenca



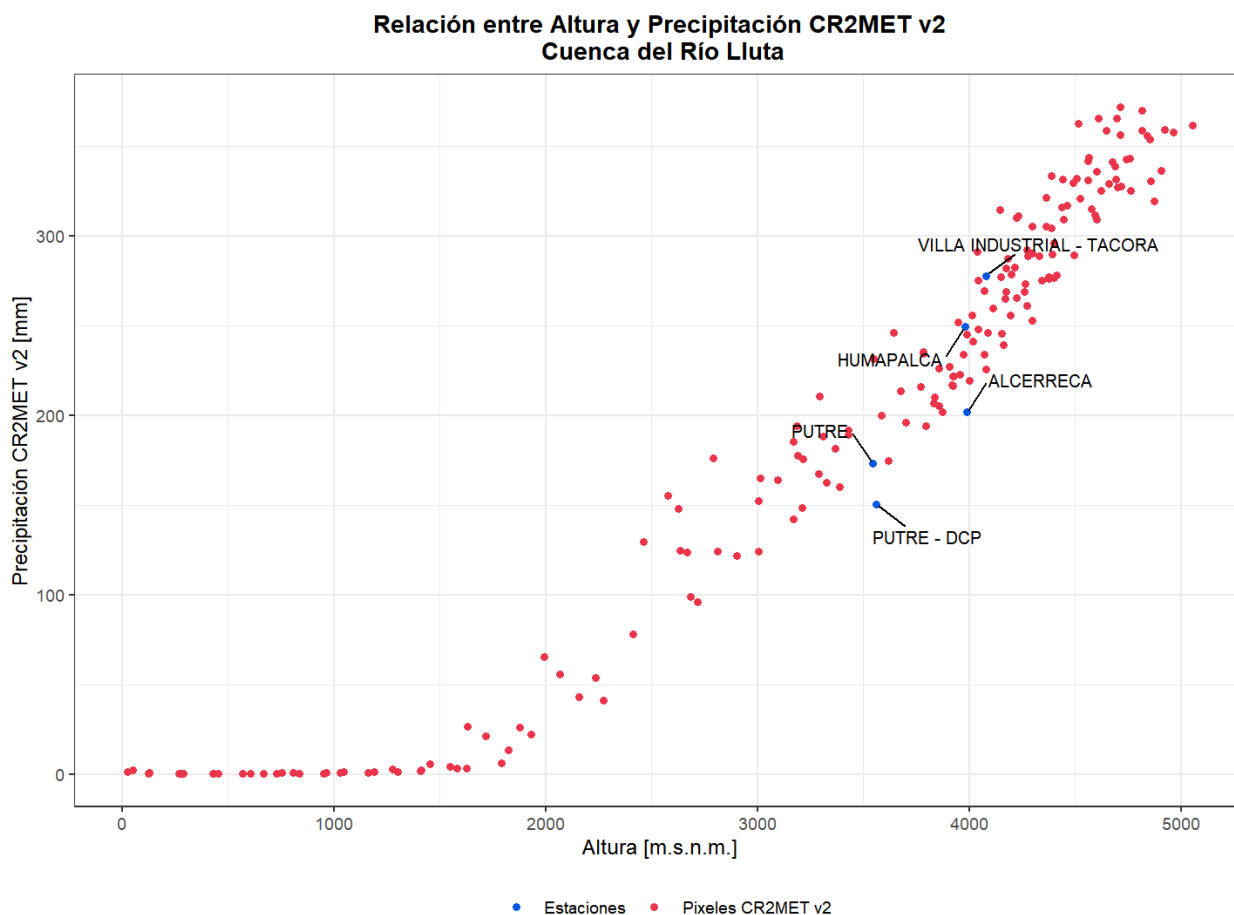
**Figura F.2:** Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas (<30 km) a la Cuenca del Río Lluta, y valores de precipitación media anual (1979-2019). En la etiqueta del nombre de cada estación se indica entre paréntesis la altura en m s.n.m.

## F.2. Datos de Precipitación CR2MET v2

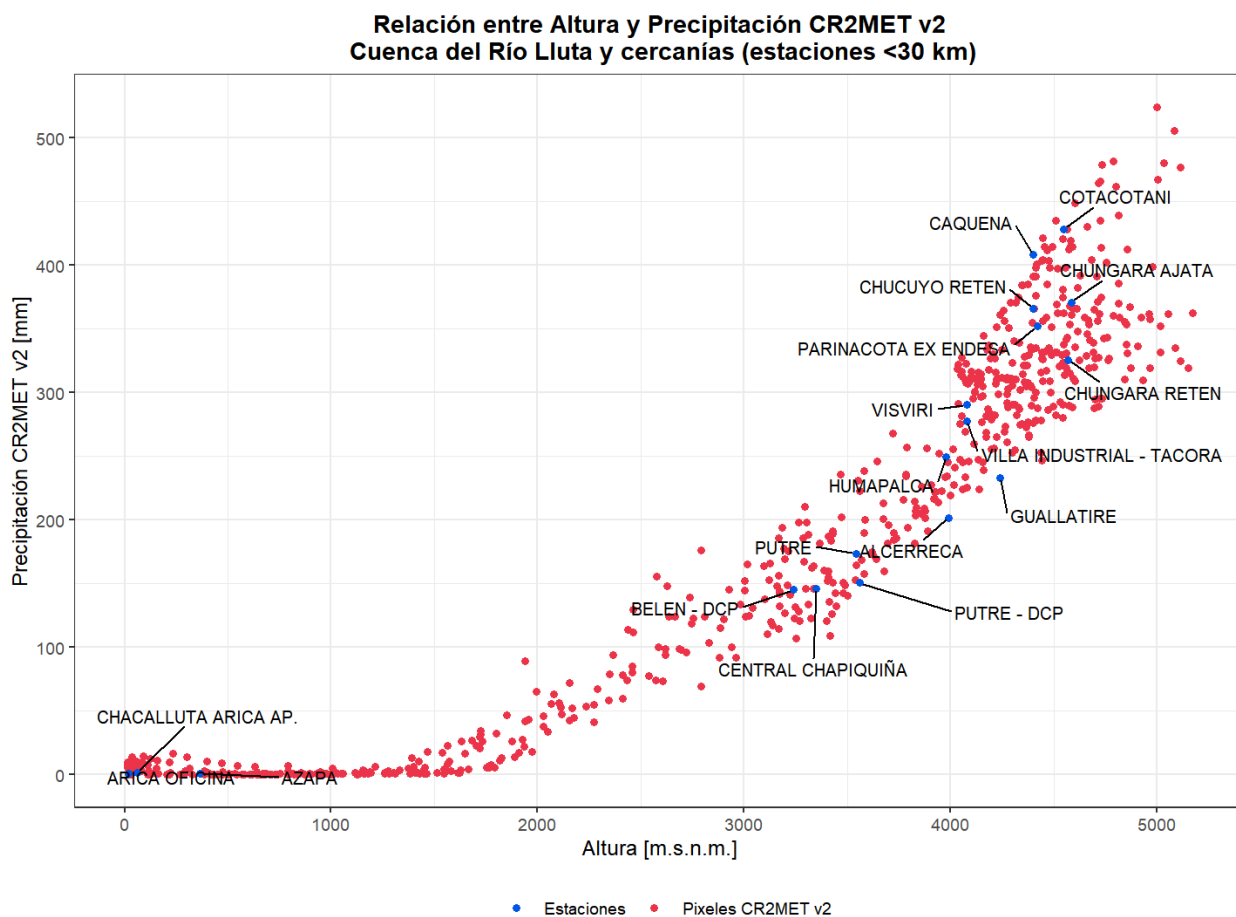


**Figura F.3:** Distribución espacial de la Precipitación Media Anual (1979-2019) de CR2MET v2.

### E3. Comparación CR2MET v2 y estaciones pluviométricas



**Figura F.4:** Relación entre Precipitación Media Anual y Altura, **dentro** de la Cuenca del Río Lluta. Tal como indica la leyenda, los puntos rojos corresponden a píxeles de CR2MET v2 (grillas de ~5 km), y los puntos azules, a las 5 estaciones ubicadas dentro de la cuenca.



**Figura F.5:** Relación entre Precipitación Media Anual y Altura, en la Cuenca del Río Lluta y cercanías. Tal como indica la leyenda, los puntos rojos corresponden a píxeles de CR2MET v2 (grillas de  $\sim 5$  km), y los puntos azules, a las estaciones ubicadas dentro de la cuenca y aquellas que están a menos de 30 km de los límites de la cuenca.

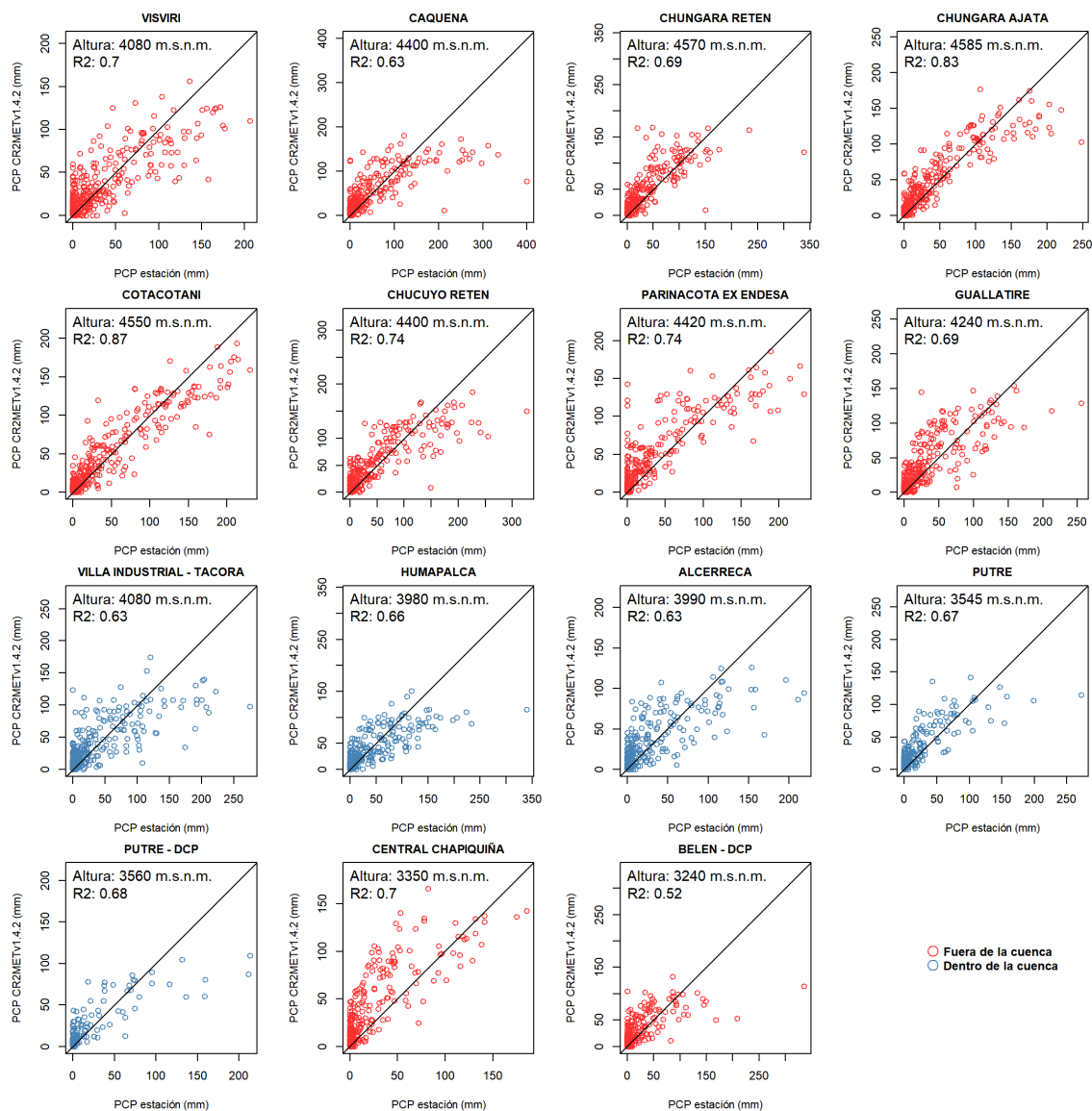


Figura F.6: Comparación entre precipitación CR2MET v2 vs estaciones pluviométricas.

F.4. Comparación entre precipitación CR2MET v2 y producto RFMEP

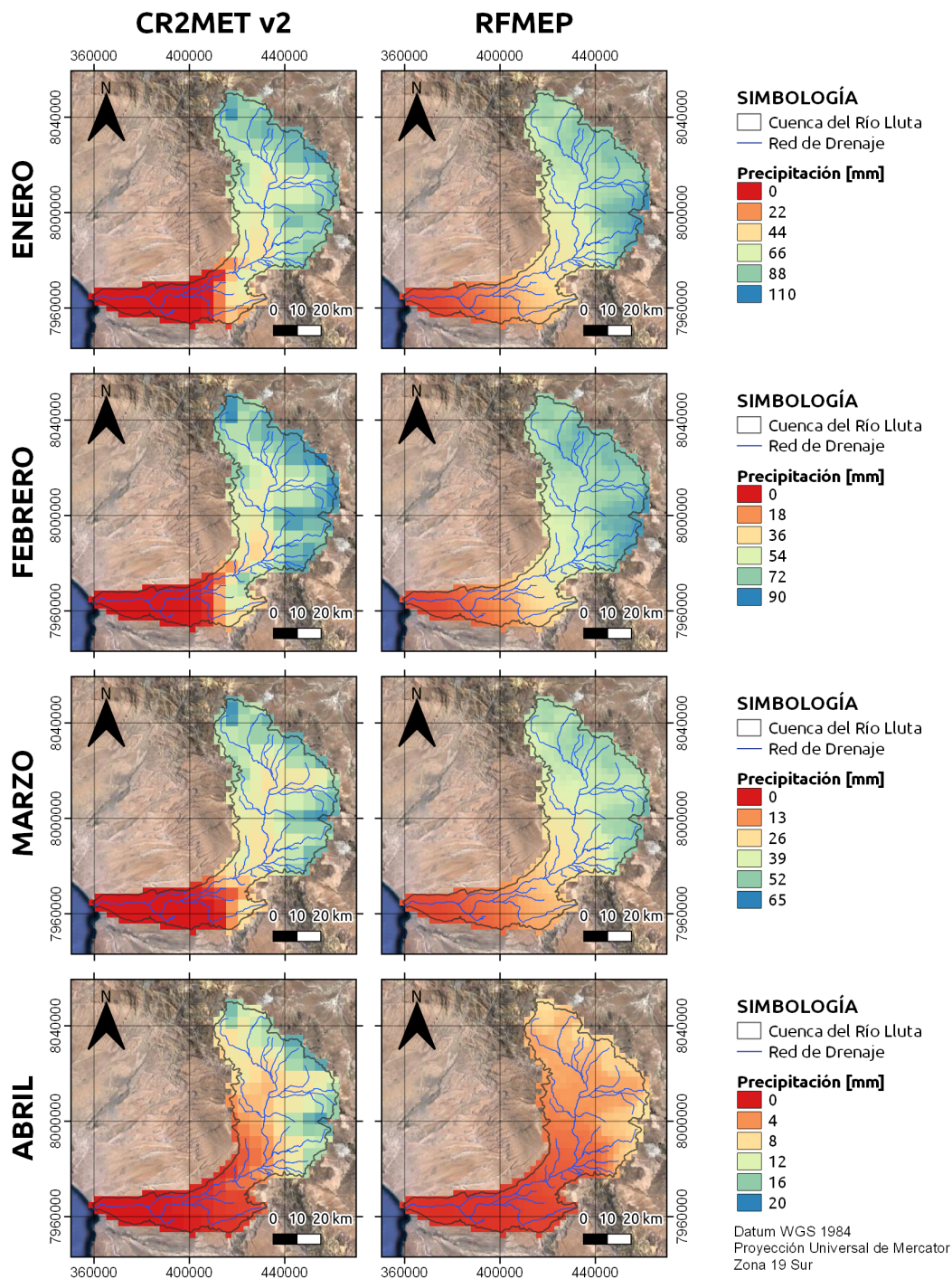


Figura F.7: Comparación de las Precipitaciones Medias Mensuales CR2MET v2 y obtenidas con RFMEP, meses Marzo a Abril.

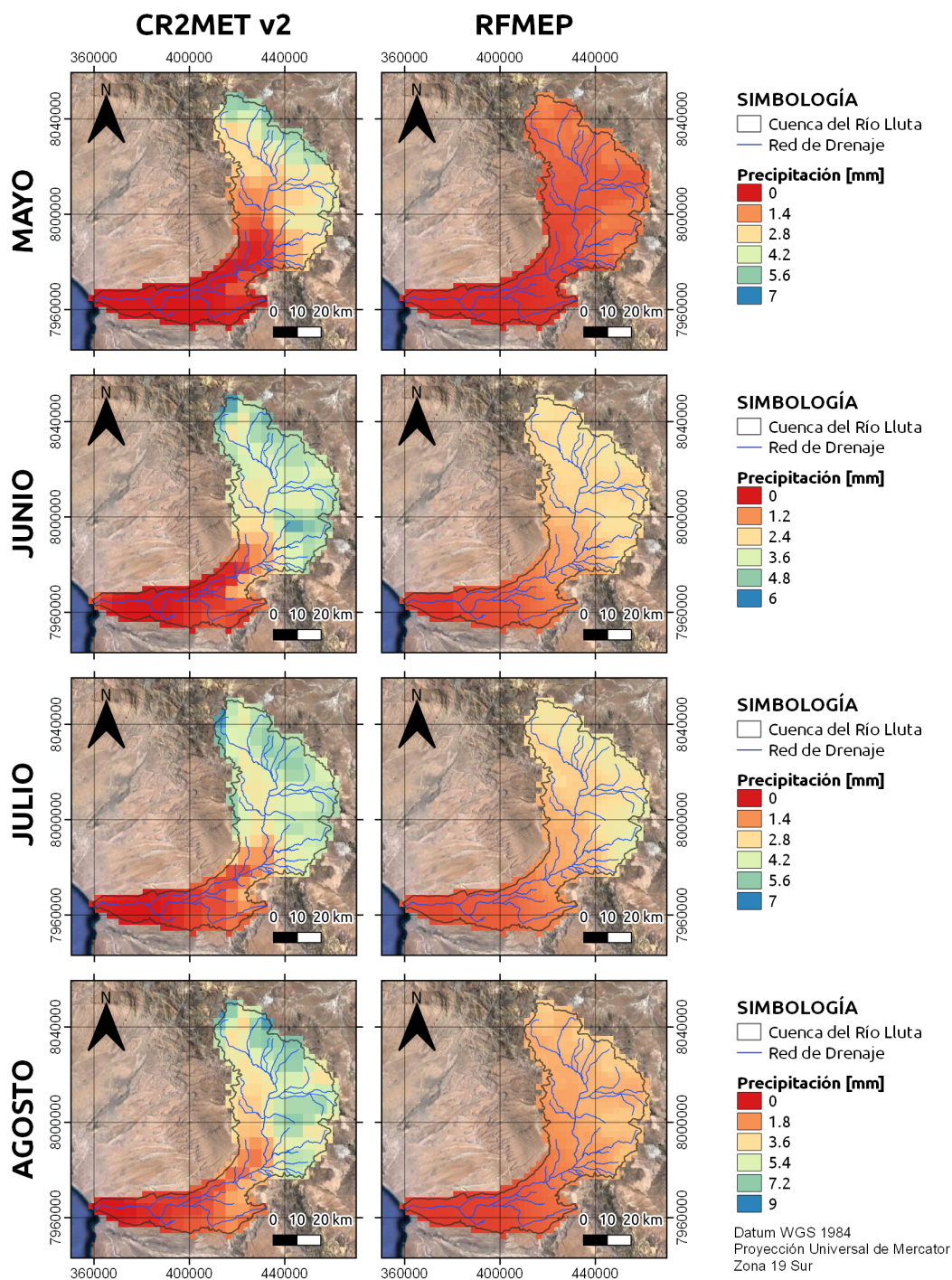


Figura F.8: Comparación de las Precipitaciones Medias Mensuales CR2MET v2 y obtenidas con RFMEP, meses Mayo a Agosto.

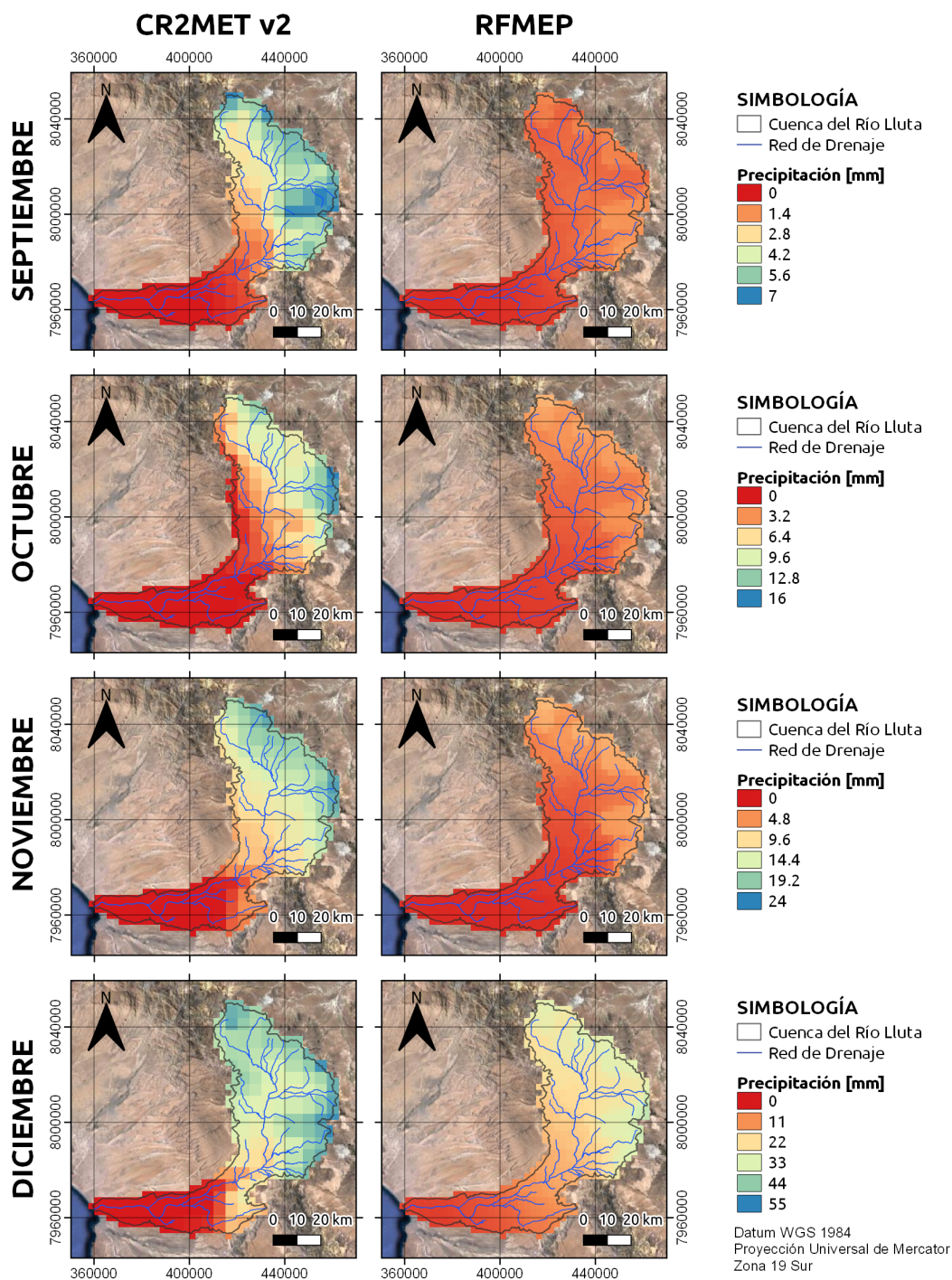


Figura F.9: Comparación de las Precipitaciones Medias Mensuales CR2MET v2 y obtenidas con RFMEP, meses Septiembre a Diciembre.

F.5. Factores de corrección medios mensuales

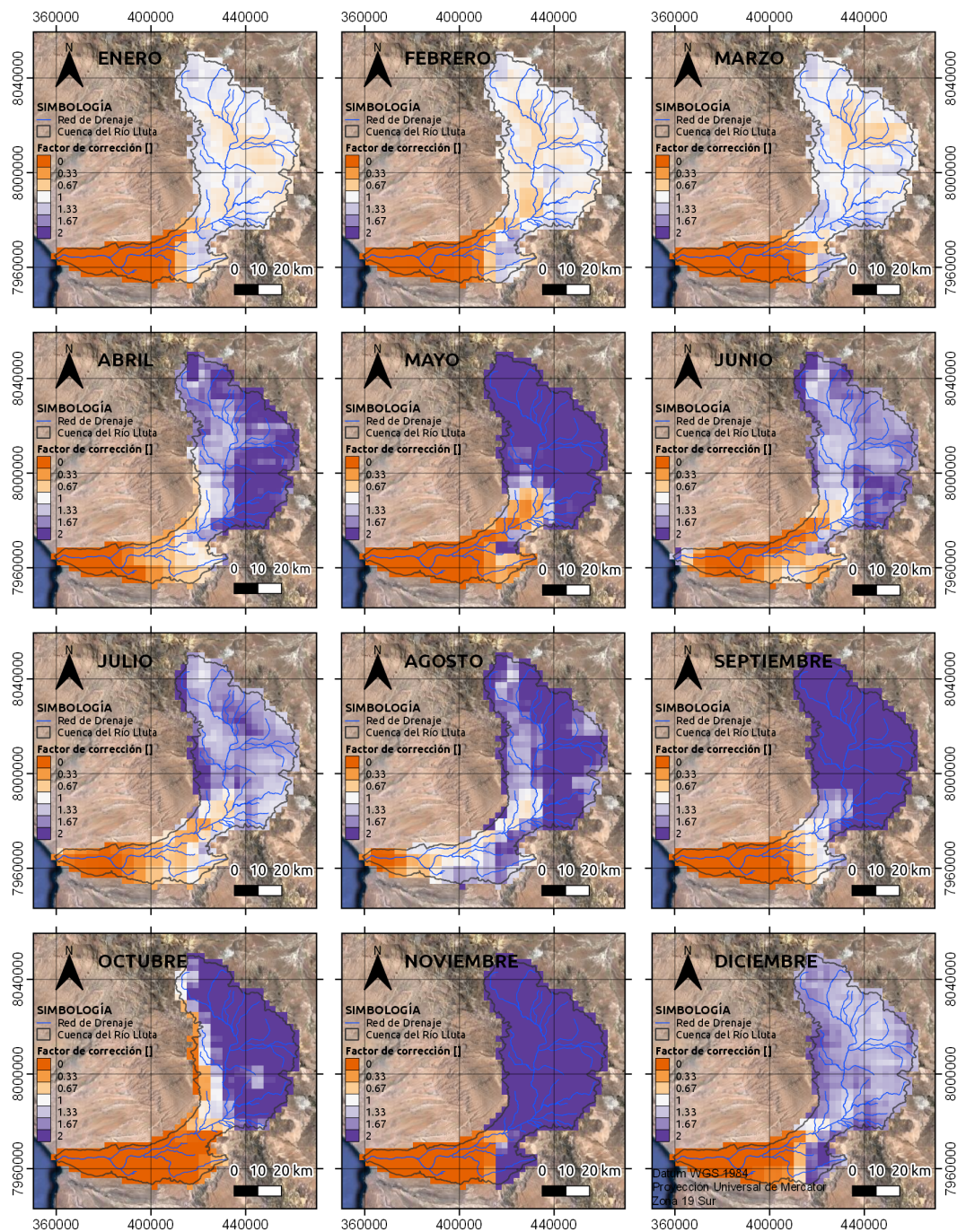


Figura F.10: Factores de corrección mensuales determinados para RFMEP, considerando como referencia CR2MET v2 (1979-2019).

E.6. Resumen del producto final RFMEP obtenido

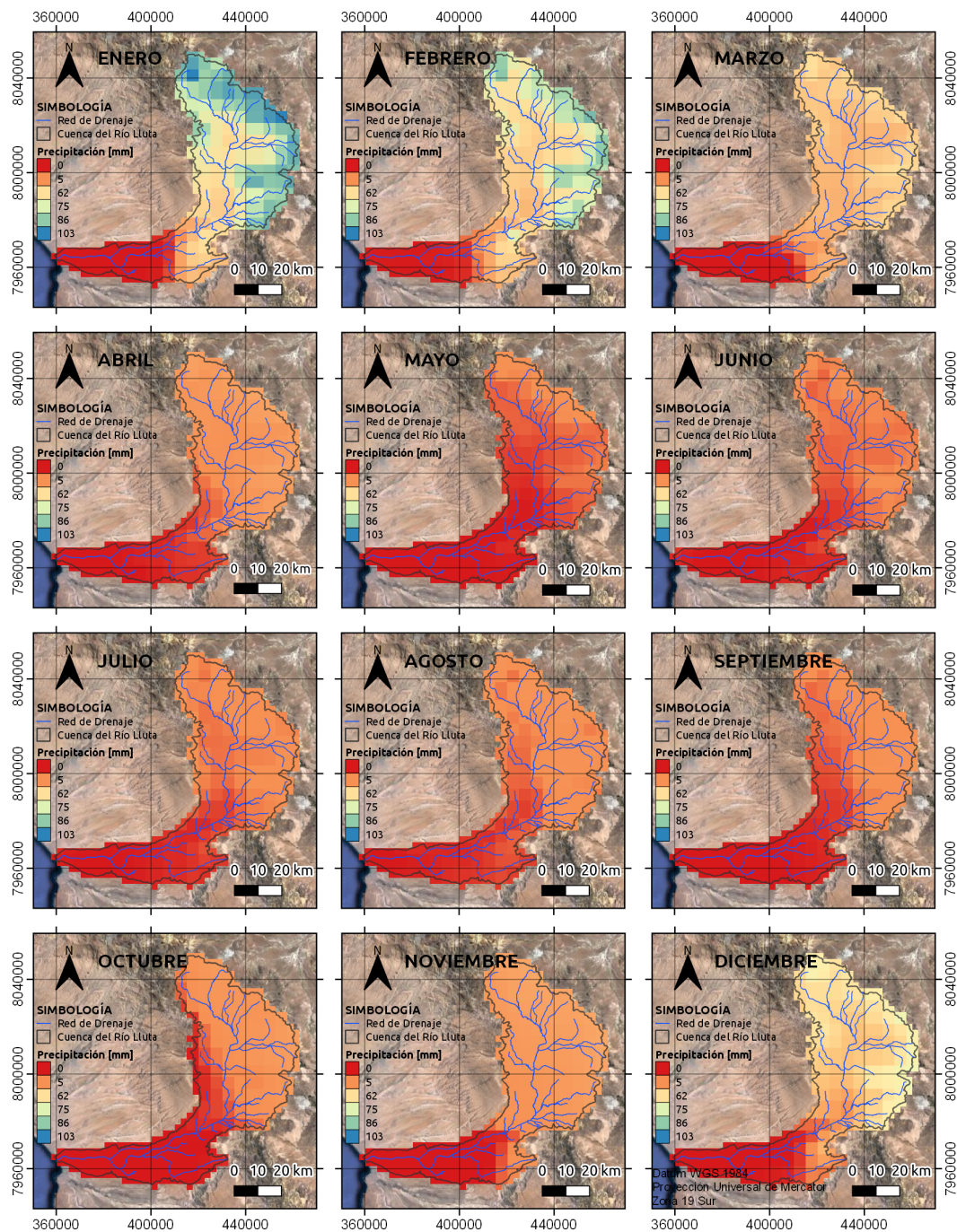


Figura F.11: Precipitación media mensual RFMEP corregida (1979-2019).

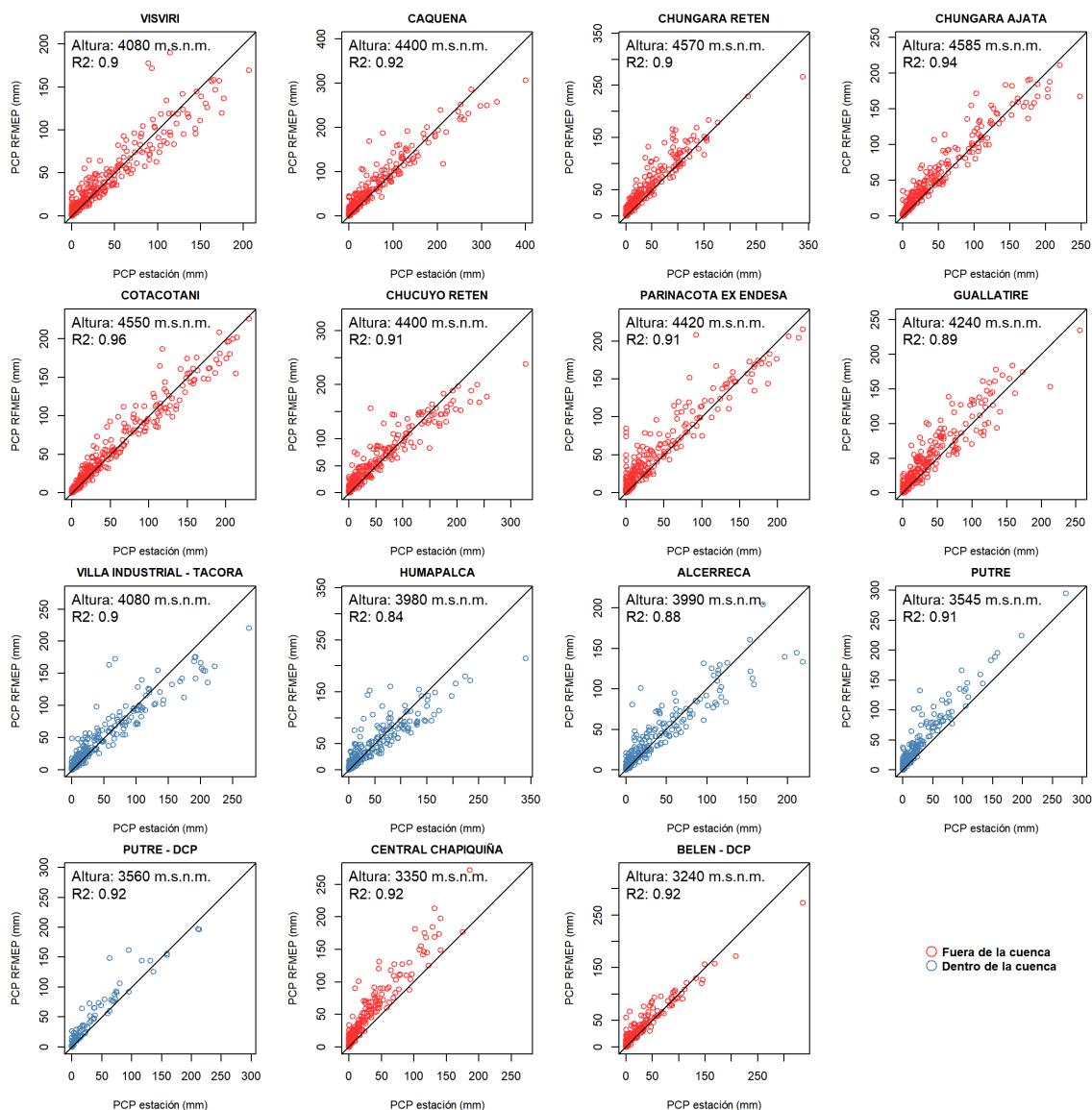


Figura F.12: Comparación entre precipitación RFMEP corregida vs estaciones pluviométricas.

# Anexo G

## Revisión del producto de temperatura CR2MET v2

### G.1. Temperatura Máxima

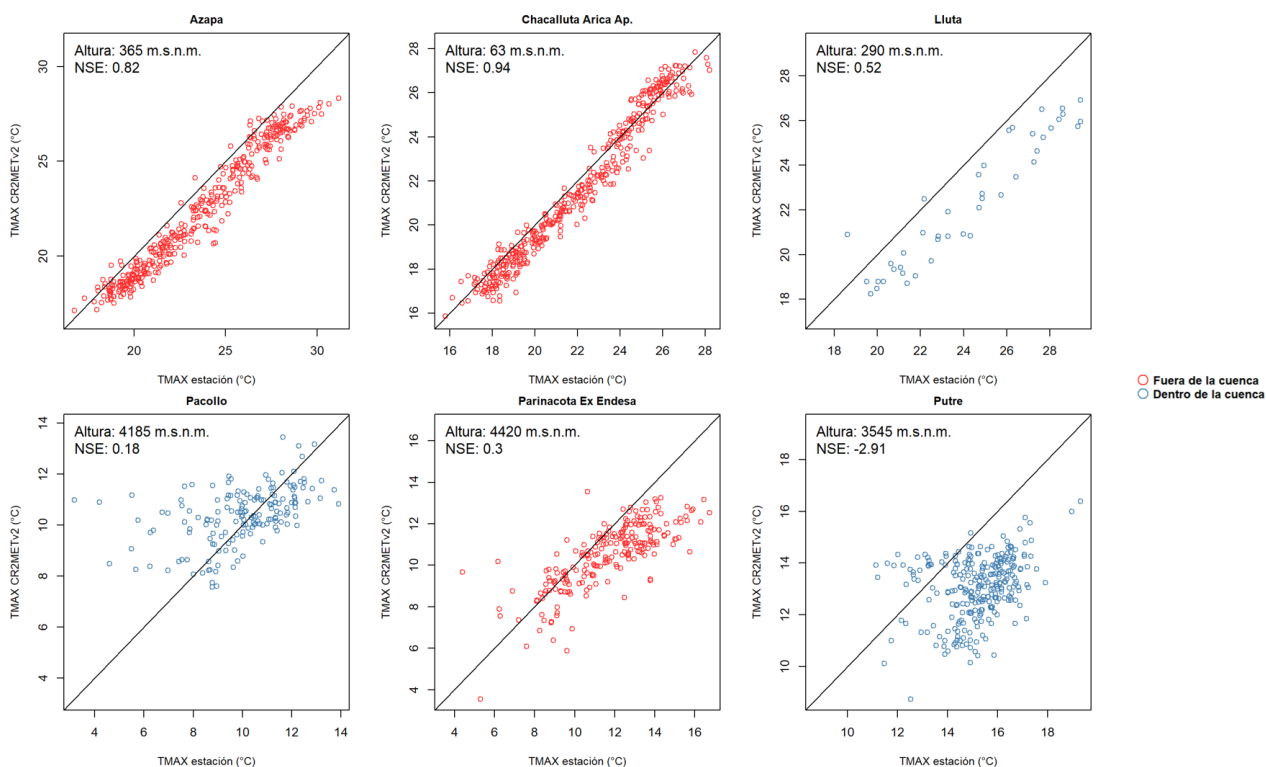
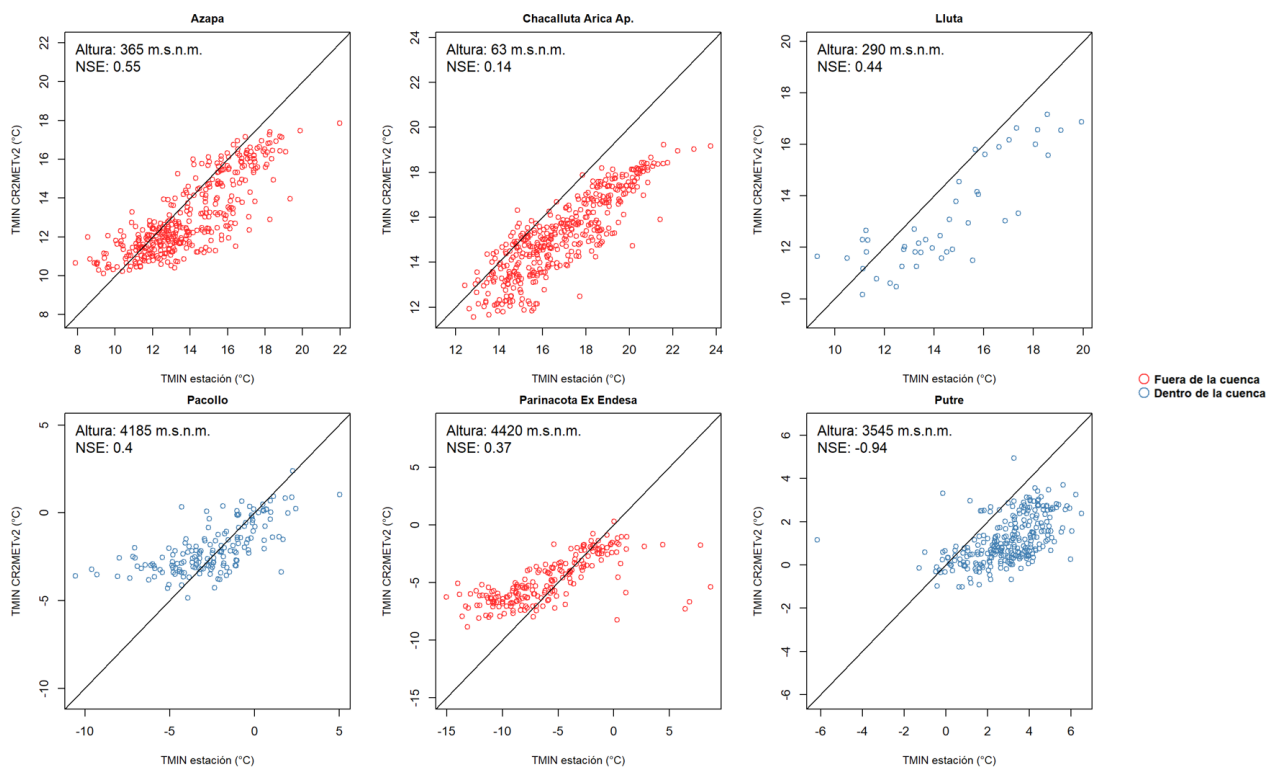


Figura G.1: Comparación de temperaturas máximas del producto CR2MET v2 y de las estaciones meteorológicas locales.

## G.2. Temperatura Mínima



**Figura G.2:** Comparación de temperaturas mínimas del producto CR2MET v2 y de las estaciones meteorológicas locales.

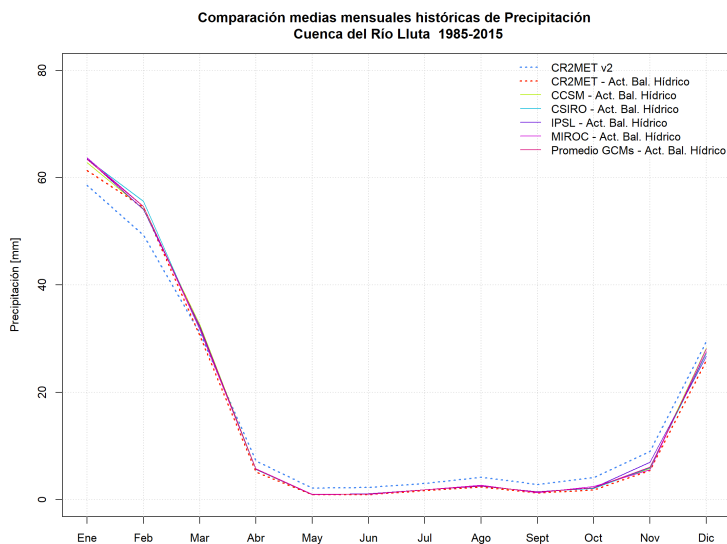
## **Anexo H**

# **Evaluación de los GCMs escalados en el estudio ABHN**

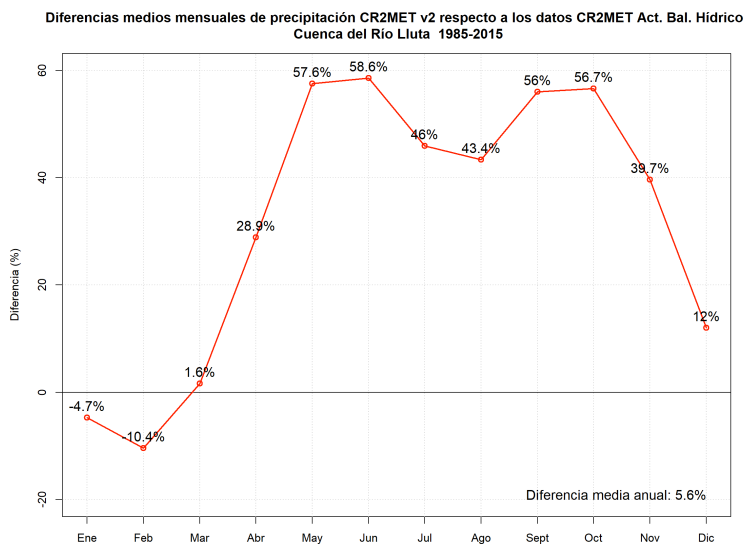
### **H.1. Comparación datos históricos ABHN y CR2MET v2**

Los datos históricos de precipitación y temperatura media, desarrollados en el contexto de la Actualización del Balance Hídrico Nacional DGA (2018, 2017) consisten por una parte en el producto CR2MET implementado en dicho estudio (en el contexto de esta memoria denominado como CR2MET-ABHN), y los productos grillados históricos de los GCMs que han sido corregidos y escalados en el mismo estudio.

### H.1.1. Precipitación



**Figura H.1:** Comparación entre productos históricos de precipitación. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)



**Figura H.2:** Diferencia porcentual entre productos históricos de precipitación. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)

### H.1.2. Temperatura

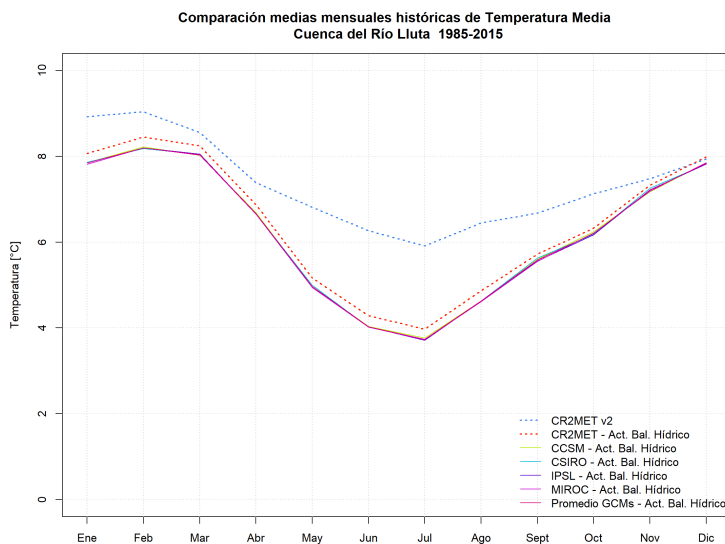


Figura H.3: Comparación entre productos históricos de temperatura. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)

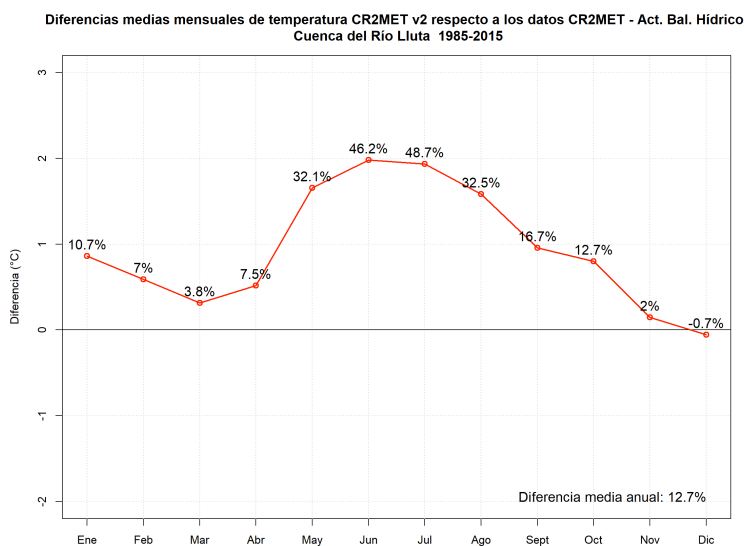


Figura H.4: Comparación porcentual de productos históricos de temperatura. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)

## H.2. Comparación de las proyecciones

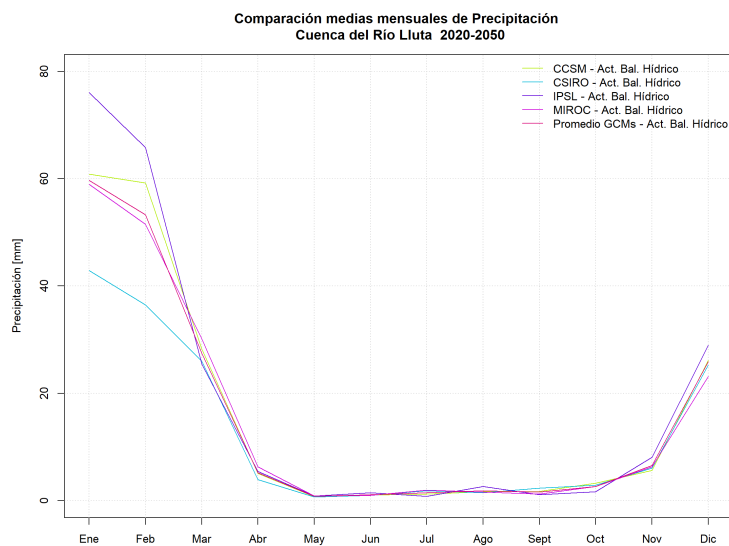


Figura H.5: Comparación de GCMs para precipitación. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)

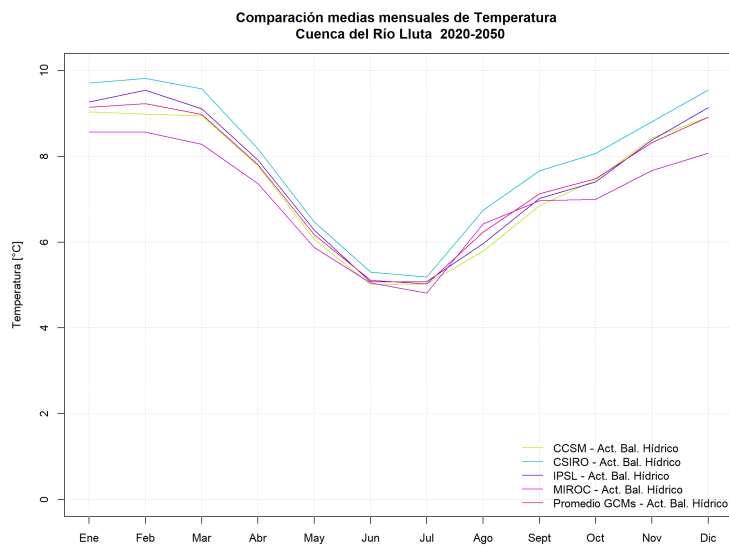
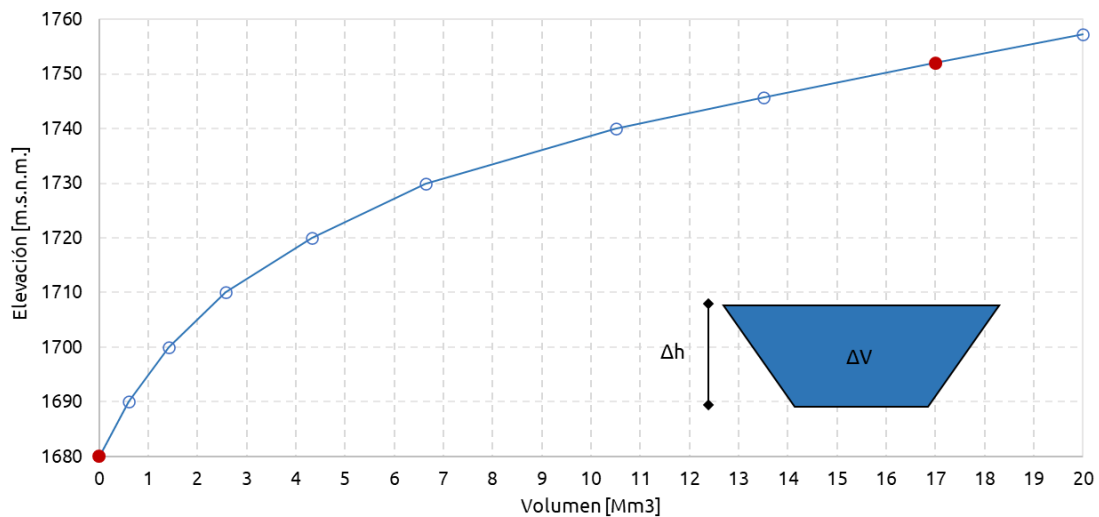


Figura H.6: Comparación de GCMs para temperatura. Fuente: Datos de DGA (2018, 2017)

# Anexo I

## Embalse Chironta

En la Figura I.1 se indica la curva Volumen-Elevación considerada para la implementación del embalse Chironta, de esta solo los puntos marcados en rojo son datos verificados que se ha tomado del estudio de DOH (2012), el resto de puntos se han estimado al asumir una forma de semi-cono invertido, que es la forma más razonable para esta estructura. Es importante indicar que el uso de la Volumen-Elevación es únicamente necesario para la estimación de la evaporación desde el embalse.



**Figura I.1:** Curva Volumen-Elevación estimada para el embalse Chironta, los puntos marcados en rojo corresponden a los únicos datos considerados a partir de los antecedentes (DOH, 2012), el resto de puntos se estima al considerar una forma razonable para el embalse.

## Anexo J

# Parámetros calibrados del método de *humedad del suelo*

**Tabla J.1:** Rango de parámetros considerados para la calibración automática de WEAP con *hydroPSO*.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad	Notas
Soil Water Capacity (SWC)	50.0	1500.0	mm	- Capacidad de almacenamiento del suelo.
Deep Water Capacity (DWC)	1800.0	3500.0	mm	- Capacidad de almacenamiento de la capa profunda.
Root Zone Conductivity (RZC)	200.0	1200.0	mm/mes	- Conductividad de la zona de raíces.
Deep Conductivity (DC)	40.0	850.0	mm/mes	- Conductividad de la zona profunda.
Runoff Resistance Factor (RRF)	1.0	10.0	–	- Factor de resistencia a la escorrentía.
Preferred Flow Direction (PFD)	0.0	1.0	–	- Dirección preferencial del flujo.
Crop Coefficient (Kc)	0.5	5.5	–	- Coeficiente de cultivo para el método de <i>humedad del suelo</i> . - Este parámetro no está explícitamente documentado con relación al $K_c$ detallado por Allen et al. (1998) (FAO-56). - En el desarrollo de esta tesis, varias pruebas en las subcuencas implementadas con método de <i>humedad del suelo</i> mostraron que ningún set de parámetros que considerara valores de $K_c$ menores a 1.2, permitía representar correctamente la evapotranspiración (siendo muy subestimada), y por ende las demás componentes del balance. - Dado los puntos anteriores, se aumentó el valor máximo de $K_c$ por sobre 1.2.
Melting Point (MP)	-7.5	6.0	°C	- Temperatura de derretimiento de nieve. - En todo set de parámetros se impuso la condición de que $MP > FP$ .
Freezing Point (FP)	-7.5	6.0	°C	- Temperatura de acumulación de nieve. - En todo set de parámetros se impuso la condición de que $MP > FP$ .

**Tabla J.2:** Parámetros calibrados con *hydroPSO* para el modelo mensual implementado con método de *humedad del suelo*, subcuenca Río Caracarani en Humapalca.

Parámetro	Valor calibrado	Nota
Soil Water Capacity (SWC)	77.705 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Water Capacity (DWC)	2509.085 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Root Zone Conductivity (RZC)	422.043 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Conductivity (DC)	83.562 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Runoff Resistance Factor (RRF)	9.463	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Prefered Flow Direction a (PFD_a)	0.230	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de enero a abril.
Prefered Flow Direction b (PFD_b)	0.109	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Crop Coefficient 1a (Kc_1a)	4.158	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de alta demanda (humedales, pastizales, cuerpos de agua, matorrales) interiores al punto de salida.
Crop Coefficient 2a (Kc_2a)	2.334	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de enero a abril.
Crop Coefficient 2b (Kc_2b)	3.000	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Melting Point (MP)	-0.847 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.
Freezing Point (FP)	-4.256 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.

**Tabla J.3:** Parámetros calibrados con *hydroPSO* para el modelo mensual implementado con método de *humedad del suelo*, subcuenca Río Colpitas en Alcérreca.

Parámetro	Valor calibrado	Nota
Soil Water Capacity (SWC)	251.509 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Water Capacity (DWC)	3473.633 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Root Zone Conductivity (RZC)	687.590 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Conductivity (DC)	305.949 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Runoff Resistance Factor (RRF)	3.283	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Prefered Flow Direction a (PFD_a)	0.253	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de enero a abril.
Prefered Flow Direction b (PFD_b)	0.082	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Crop Coefficient 1a (Kc_1a)	3.432	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de alta demanda (humedales, pastizales, cuerpos de agua, matorrales) interiores al punto de salida.
Crop Coefficient 2a (Kc_2a)	3.008	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de enero a abril.
Crop Coefficient 2b (Kc_2b)	2.879	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Melting Point (MP)	1.305 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.
Freezing Point (FP)	-4.674 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.

**Tabla J.4:** Parámetros calibrados con *hydroPSO* para el modelo mensual implementado con método de *humedad del suelo*, subcuenca Río Lluta en Alcérreca (excluyendo las Unidades Hidrológicas de las subcuencas ya calibradas, Tablas J.2 y J.3.

Parámetro	Valor calibrado	Nota
Soil Water Capacity (SWC)	203.063 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Water Capacity (DWC)	3096.113 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Root Zone Conductivity (RZC)	770.859 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Conductivity (DC)	220.959 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Runoff Resistance Factor (RRF)	3.687	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Prefered Flow Direction a (PFD_a)	0.478	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de enero a abril.
Prefered Flow Direction b (PFD_b)	0.145	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Crop Coefficient 1a (Kc_1a)	3.566	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de alta demanda (humedales, pastizales, cuerpos de agua, matorrales) interiores al punto de salida.
Crop Coefficient 2a (Kc_2a)	2.379	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de enero a abril.
Crop Coefficient 2b (Kc_2b)	2.871	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Melting Point (MP)	-1.999 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.
Freezing Point (FP)	-4.154 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.

**Tabla J.5:** Parámetros calibrados con *hydroPSO* para el modelo mensual implementado con método de *humedad del suelo*, subcuenca Río Lluta en Panamericana (excluyendo las Unidades Hidrológicas de las subcuencas ya calibradas, Tablas J.2, J.3 y J.4.

Parámetro	Valor calibrado	Nota
Soil Water Capacity (SWC)	106.588 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Water Capacity (DWC)	3504.292 mm	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Root Zone Conductivity (RZC)	681.371 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Deep Conductivity (DC)	237.686 mm/mes	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Runoff Resistance Factor (RRF)	4.777	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida.
Prefered Flow Direction a (PFD_a)	0.277	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de enero a abril.
Prefered Flow Direction b (PFD_b)	0.064	Valor agregado para todas las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Crop Coefficient 1a (Kc_1a)	3.685	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de alta demanda (humedales, pastizales, cuerpos de agua, matorrales) interiores al punto de salida.
Crop Coefficient 2a (Kc_2a)	2.573	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de enero a abril.
Crop Coefficient 2b (Kc_2b)	2.708	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas con coberturas de suelo de baja demanda (matorrales áridos, suelos desnudos, suelos impermeables), específicamente para los meses de mayo a diciembre.
Melting Point (MP)	-1.481 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.
Freezing Point (FP)	-2.761 °C	Valor agregado para las Unidades Hidrológicas interiores al punto de salida, ubicadas en zonas alta donde sea evidente la influencia de nieve.

# Anexo K

## Balances subterráneos

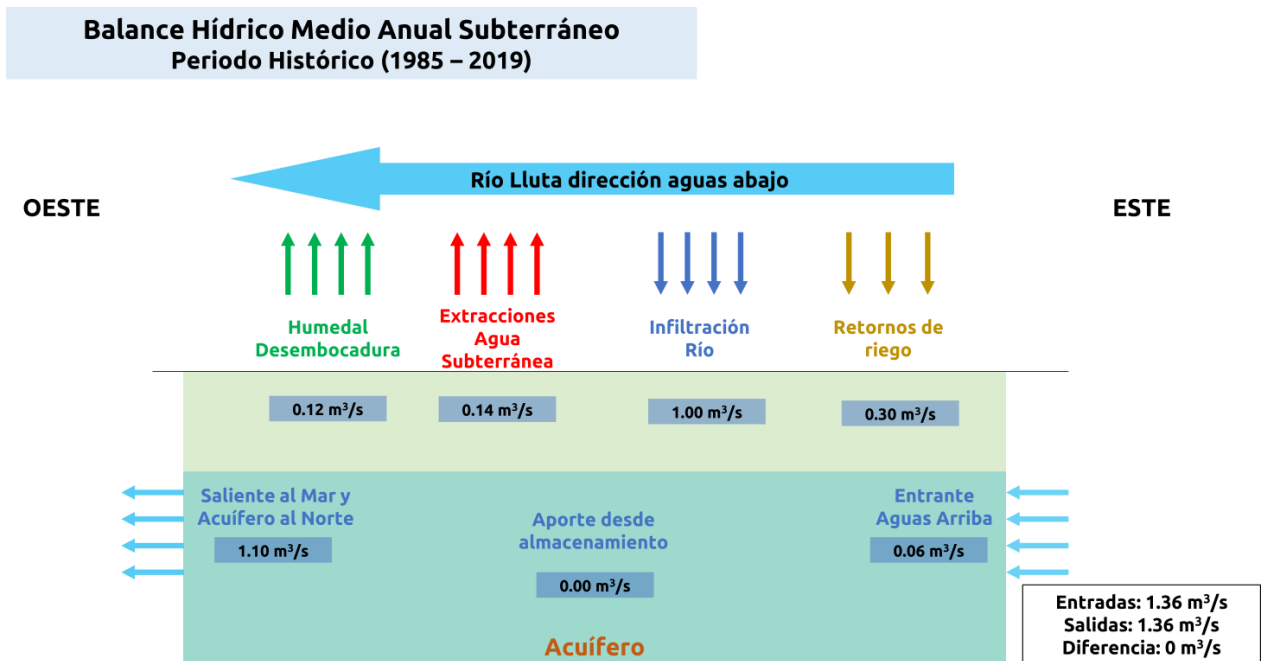


Figura K.1: Balance hídrico medio anual subterráneo para periodo histórico.

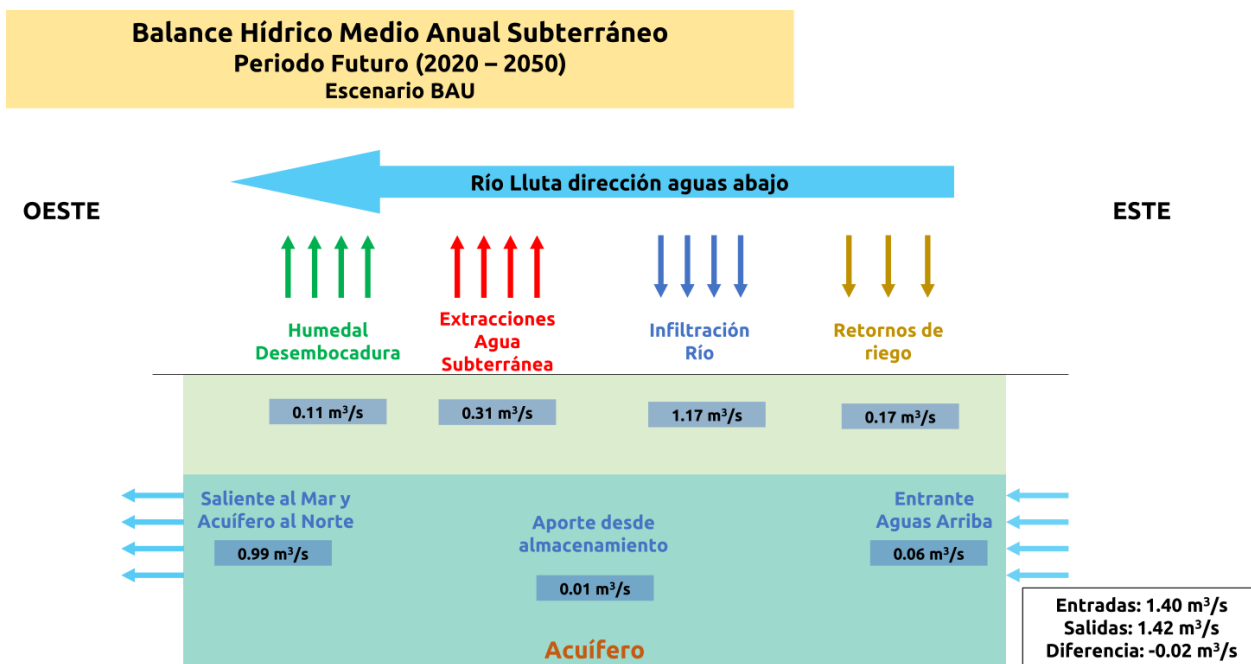


Figura K.2: Balance hídrico medio anual subterráneo proyectado para periodo futuro, Escenario BAU.

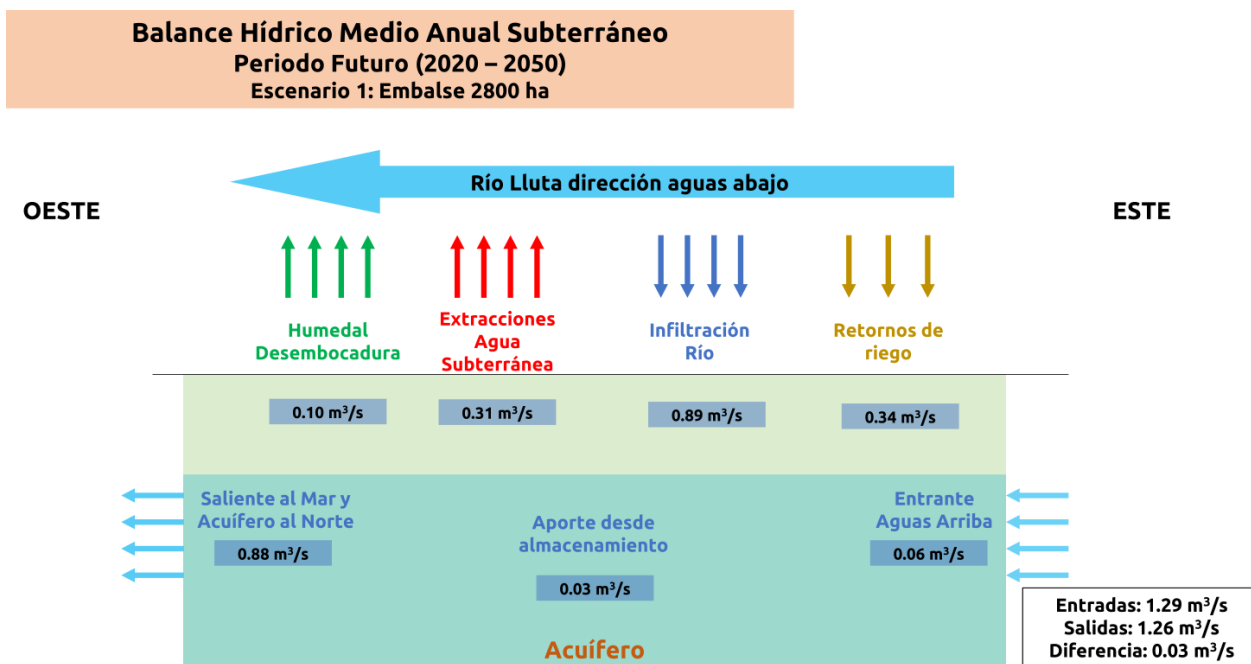


Figura K.3: Balance hídrico medio anual subterráneo proyectado para periodo futuro, Escenario 1.

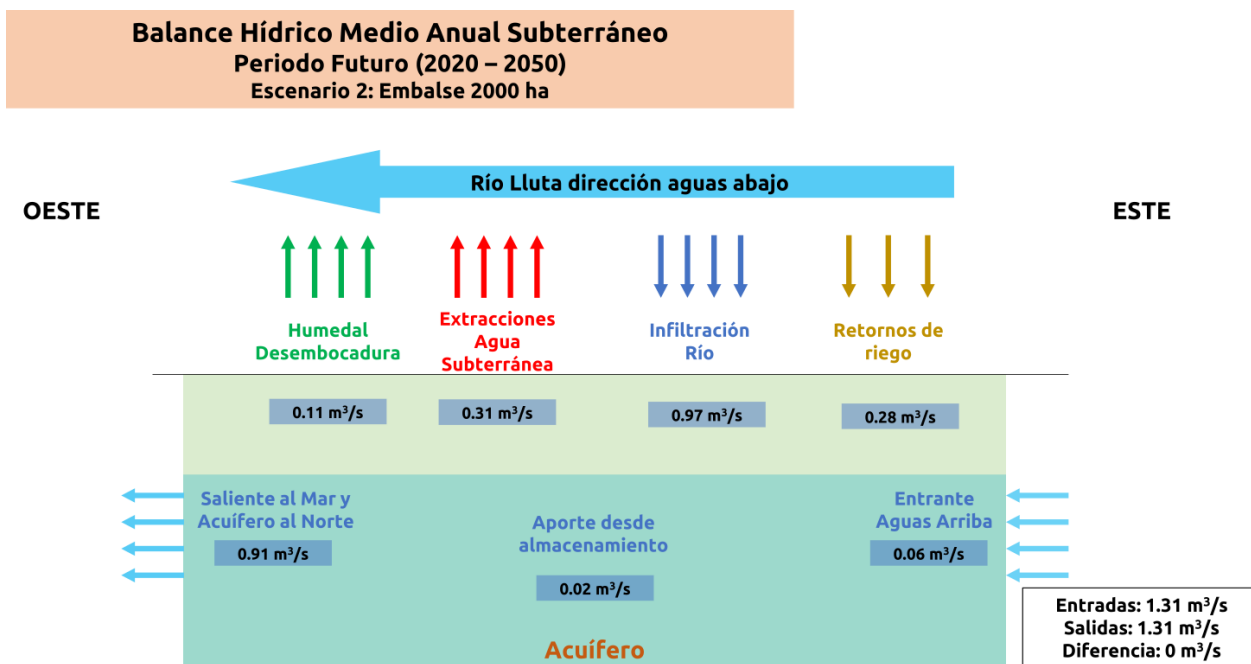
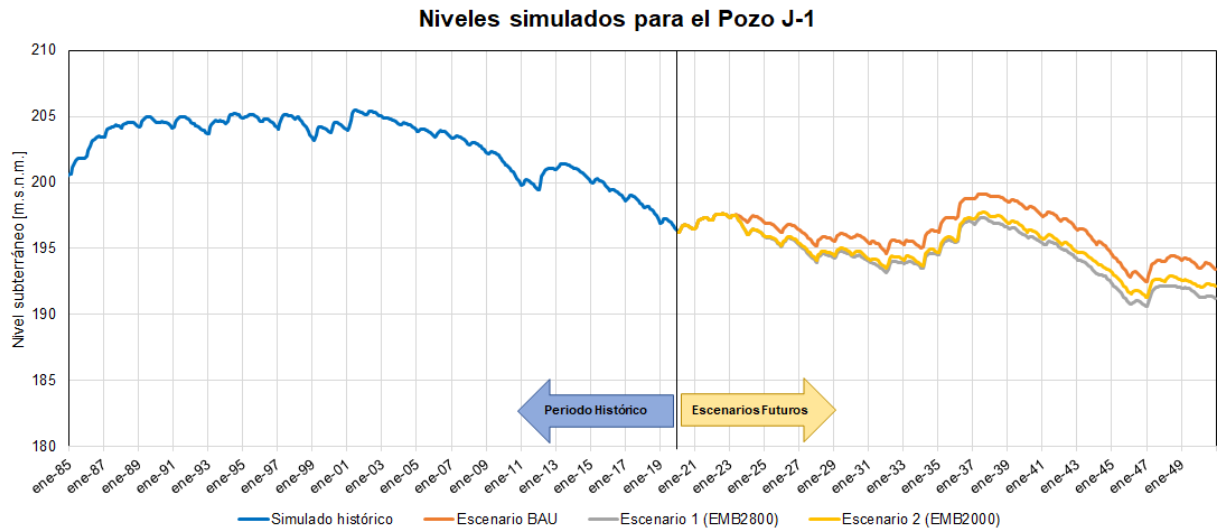


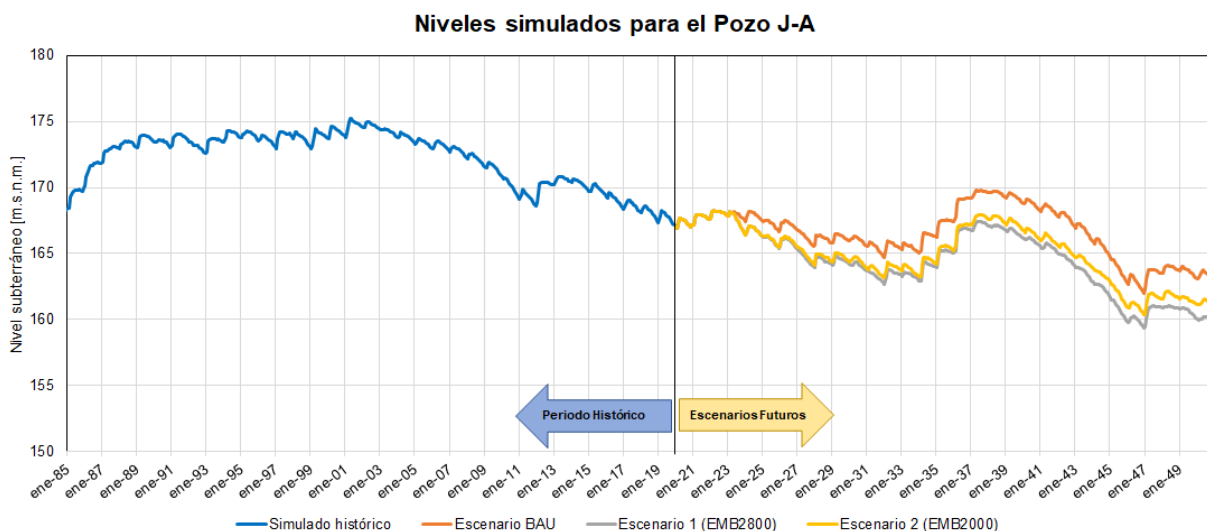
Figura K.4: Balance hídrico medio anual subterráneo proyectado para periodo futuro, Escenario 2.

## Anexo L

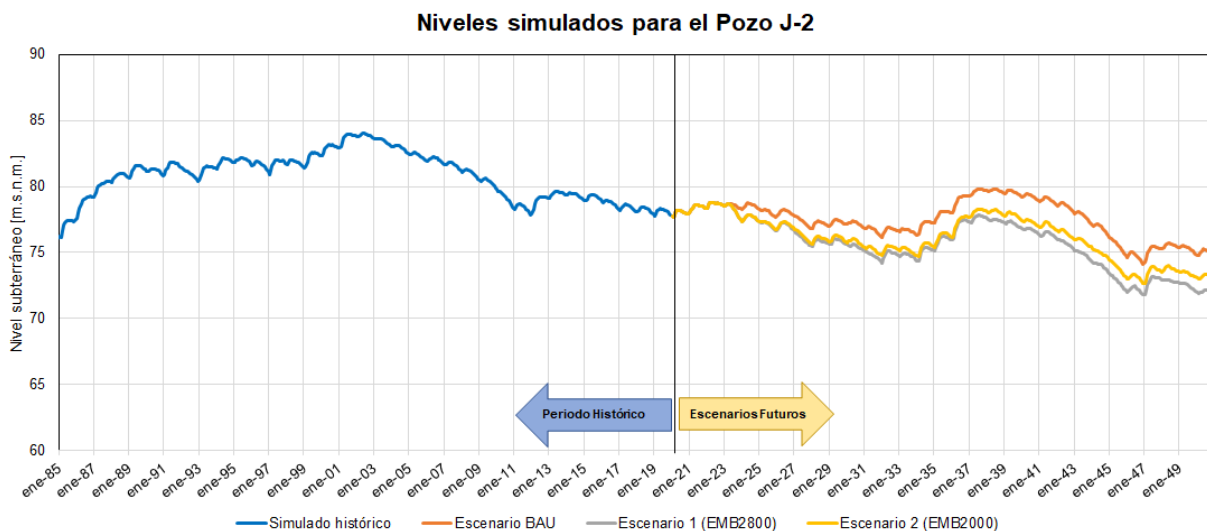
# Variación de niveles subterráneos entre periodo histórico y proyecciones de periodo futuro



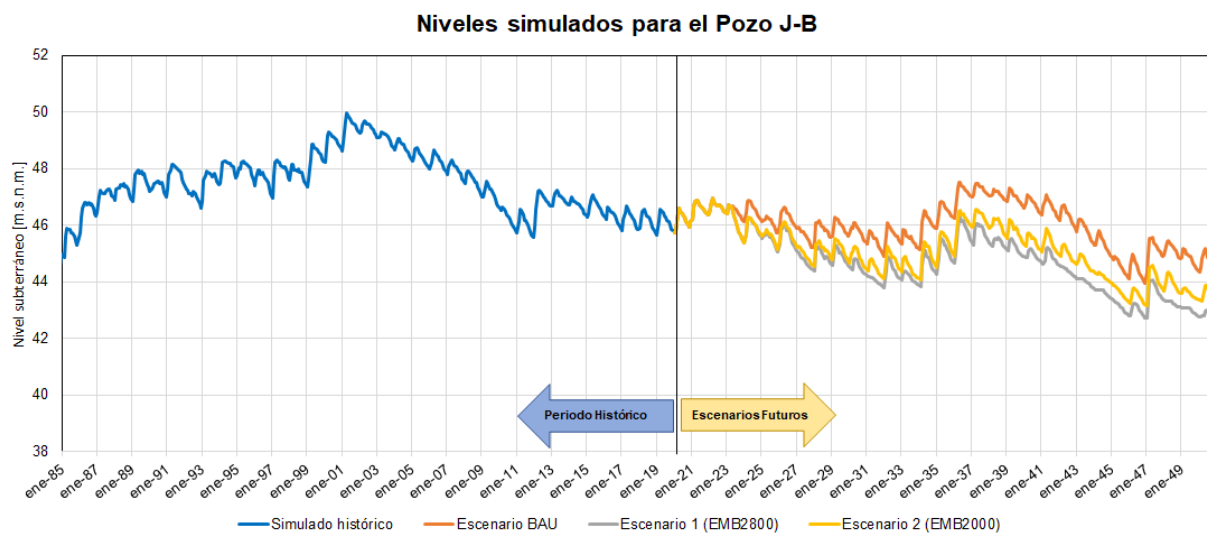
**Figura L.1:** Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-1.



**Figura L.2:** Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-A.



**Figura L.3:** Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-2.



**Figura L.4:** Comparación del nivel subterráneo simulado histórico y niveles referenciales de cada uno de los escenarios, para el pozo J-B.