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

INFORME TÉCNICO:

Metodología para la Actualización del Balance Hídrico Nacional

REALIZADO POR:

División de Estudios y Planificación

SDT Nº 404

Santiago, Diciembre de 2017

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1
2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES 2
3 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO 8
3.1 Enfoque Metodológico 8
3.2 Forzantes Meteorológicas 10
3.3 Escalamiento de Forzantes Meteorológicas 11
3.3.1 Precipitación 12
3.3.2 Temperaturas Extremas Diarias 16
3.3.3 Velocidad del Viento Diaria 22
3.3.4 Humedad Relativa 23
3.3.5 Radiación 24
3.4 Modelación Hidrológica 24
4 RESULTADOS 28
4.1 Resultados Obtenidos Para Forzantes Meteorológicas 28
4.2 Resultados Obtenidos al Aplicar las Metodología en Cuencas Piloto 32
4.2.1 Cuenca del Río Loa 32
4.2.2 Cuenca del Río Choapa 36
4.2.3 Cuenca del Río Maipo 40
4.2.4 Cuenca del Río Imperial 44
4.2.5 Cuenca del Río Aysén 48
5 COMENTARIOS FINALES 53
6 REFERENCIAS 56
ANEXO 1. FICHAS DE ANTECEDENTES 58

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Resumen de los productos satelitales disponibles para Chile continental, incluyendo la resolución espacial y temporal, y cobertura temporal. 11

Tabla 3.2: Parámetros considerados en la calibración del modelo VIC. 26

Tabla 4.1: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Loa. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015. 35

Tabla 4.2: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Choapa. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015. 39

Tabla 4.3: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Maipo. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015. 43

Tabla 4.4: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Imperial. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015. 47

Tabla 4.5: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenca del río Aysén. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015. 51

INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Esquema de la metodología para estimar el balance hídrico por cuenca. 10

Figura 3-2: Comparación de distintas técnicas de escalamiento de forzantes meteorológica. En verde se muestran las ventajas y en rojo las desventajas. 12

Figura 3-3: Diagrama de flujo de generación del producto grillado de precipitación (P) 13

Figura 3-4: Precipitación anual promedio entre 1979 y 2016, obtenido de estaciones pluviométricas (panel la izquierda) y del producto desarrollado (derecha). 14

Figura 3-5: (a) Distribución latitudinal de la precipitación anual media para el período 1979 – 2016, (b) número anual de días con precipitación, (c) variación estacional de la precipitación, calculado como la fracción de la acumulación invernal (abril-septiembre) sobre el total anual. Las curvas negras y zonas sombreadas indican los promedios, mínimos y envolventes sobre el territorio nacional obtenido del producto a la latitud correspondiente, respectivamente. Puntos rojos muestran la métrica correspondiente obtenida a partir de observaciones locales. Notar escala logarítmica en el panel (a). 15

Figura 3-6: Series de tiempo de la temperatura máxima diaria (Tx) observada en la estación Quinta Normal (curva en rojo) durante los meses de Julio entre 2002 y 2006, comparada con series de temperatura de distintas fuentes e interpoladas a la ubicación de la estación (en negro). Los paneles superiores corresponden a los datos Tx del Reanalysis ERA-Interim y de temperatura a las 18Z del Análisis ERA-Interim. Las series en paneles inferiores corresponde a la temperatura superficial de día derivada del producto satelital MODIS, en sus componentes Terra y Aqua. Diagramas de dispersión comparan los valores observados con los derivados de distintos productos. El último diagrama de dispersión (derecha) compara las observaciones con la predicción de un modelo lineal bi-variado con ambas observaciones MODIS como predictores. 18

Figura 3-7: Diagrama de flujo de generación del producto de temperaturas extremas Tx (temperatura máxima diaria) y Tn (temperatura mínima diaria). 06Z, 12Z, 18Z se refieren a horas en tiempo Universal Coordinado (Z o UTC por sus siglas en inglés). T_{2m} corresponde a la temperatura a 2 m del suelo a partir de los datos de reanálisis ERA-Interim 19

Figura 3-8: Resultados obtenidos para Tx medio en el mes de enero para el período 1979-2016. El panel (a) corresponde a la temperatura máxima diaria estimada con los productos satelitales, y (b) a la observada. Los paneles (c), (d) y (e) muestran, el sesgo climatológico (E_M), el error medio calculado a partir de anomalías de P (E_A) y el coeficiente de determinación (R^2), respectivamente. 20

Figura 3-9: (a) Distribución latitudinal del promedio anual de las temperaturas extremas diurnas entre 1979 y 2016. (b) Variación estacional de estas variables calculado como la diferencia entre el promedio del semestre de verano (octubre a marzo) e invierno (abril a septiembre). Curvas rojas y azules corresponden a la temperatura máxima y mínima diaria, respectivamente. Puntos rojos a azules indican, respectivamente, el valor promedio de Tx y Tn obtenido de observaciones locales. 21

Figura 3-10: Representación esquemática del modelo VIC para una celda con 2 capas de suelo. 25

Figura 4.1: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Loa..... 32

Figura 4.2: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Loa. 32

Figura 4.3: a) Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, b) escorrentía, y c) evapotranspiración en la cuenca del río Loa. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC. 34

Figura 4.4: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Loa. 36

Figura 4.5: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Choapa. 36

Figura 4.6: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Choapa. 37

Figura 4.7: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Choapa. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC. 38

Figura 4.8: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Choapa. 40

Figura 4.9: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Maipo. 40

Figura 4.10: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Maipo. 41

Figura 4.11: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Maipo. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC. 42

Figura 4.12: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Maipo. 44

Figura 4.13: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Imperial. 44

Figura 4.14: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Imperial. 45

Figura 4.15: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Imperial. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC. 46

Figura 4.16: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Imperial. 48

Figura 4.17: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Aysén. 48

Figura 4.18: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Aysén. 49

Figura 4.19: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Aysén. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC. 50

Figura 4.20: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Aysén. 52

1 INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas se encuentra realizando la actualización del balance hídrico nacional. Este balance es una de las herramientas a nivel país que sirve de apoyo en la toma decisiones de largo plazo en materia de recursos hídricos para definir políticas de planificación del territorio y el desarrollo de distintos tipos de actividad que requieren del agua como principal insumo.

A cargo de la elaboración del estudio están la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en unión temporal con la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, quienes se adjudicaron el contrato.

En una primera fase se desarrolló la metodología que permite la estimación del balance hídrico a escala de cuenca, en función del nivel, calidad y extensión de datos hidrometerológicos y climáticos disponibles. Esta metodología fue aplicada en cinco cuencas piloto, correspondientes a los ríos Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. Posteriormente se extenderá al resto de cuencas, hasta cubrir las 101 existentes en el país.

El presente informe técnico presenta en forma resumida la metodología propuesta para la estimación del balance hídrico a nivel de cuenca y su aplicación en las 5 cuencas piloto, mencionadas anteriormente. La metodología está basada en la ecuación general de balance, donde la diferencia entre las entradas y salidas al sistema se igualan a la variación temporal en el volumen almacenado. Este último término ocurre en distintos compartimientos de la cuenca, tales como los acuíferos, glaciares, cuerpos de agua, entre otros.

La información hidrometorológica que se utilizará, corresponde a observaciones realizadas insitu de distintas variables, tales como precipitación, temperatura, caudales, entre otras. En forma complementaria, se utilizarán técnicas de percepción remota y reanálisis climáticos. La primera técnica permite la obtención de información de un lugar geográfico sin hacer contacto físico, para lo cual se utiliza información levantada por medio de sensores instalados en satélites. En cambio, los reanálisis climáticos se basan en modelos numéricos del clima, que permiten estimar variables, como precipitación y temperatura nivel del suelo, los cuales son validados con observaciones reales.

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para el planteamiento de la metodología para la estimación del balance hídrico por cuenca, se revisaron una serie de antecedentes, cuyo contenido de interés se resume a continuación. En el ANEXO 1 se presentan fichas con un resumen más extenso de estos antecedentes.

1. *Unesco (1982) Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur. Montevideo. Uruguay*

   El objetivo del estudio fue presentar una metodología para estimar el balance hídrico, y que sea aplicable a la realidad hídrica de los países de América del Sur. Este balance considera el movimiento del agua en la Tierra considerando los distintos componentes del ciclo hidrológico, tales como precipitación, escorrentía, evaporación, evapotranspiración, infiltración, flujo subterráneo, etc.

   $$P + Q_{si} + Q_{ui} - E - ET - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta S - \eta = 0$$

   Siendo:

   P : Precipitación.
   Q_{si} : Caudal afluente superficial a la cuenca o cuerpo de agua.
   Q_{ui} : Caudal afluente subterráneo a la cuenca o cuerpo de agua .
   E : Evaporación.
   ET : Evapotranspiración.
   Q_{so} : Caudal efluente superficial.
   Q_{uo} : Caudal efluente subterráneo.
   ΔS : Variación del almacenamiento de agua en la cuenca o cuerpo de agua.
   η : Término residual de discrepancia, error de medición o estimación.

   Las unidades en las cuales se expresa cada uno de los términos de la ecuación anterior, tienen dimensiones de [L^3/T].

   Para estimaciones en áreas extensas y largos períodos de tiempo se recomienda utilizar la siguiente ecuación simplificada:

   $$(\overline{P}) + (\overline{Q}) = (\overline{ET}) - \eta$$

   Donde () representa el promedio espacial, y la barra horizontal el promedio temporal.

2. *DGA (1983a) Balance hidrológico nacional regiones V, VI, VII y Metropolitana. Elaborado por: IPLA Ingenieros Consultores. Santiago. Chile.*

   El objetivo del estudio fue calcular los distintos componentes del Balance Hídrico para las cuencas de las regiones V, VI, VII y metropolitana, para el periodo 1951/52 – 1980/1981.

   La metodología utilizada considera valores medios de anuales de las distintas variables de entrada y salida al sistema hídrico, y está basado en la siguiente ecuación.

$$(P)^* + (Q_{si})^* - (ET)^* - (Q_{so})^* - \eta = 0$$

Siendo:

P : Precipitación.
Q_{si} : Caudal afluente superficial a la cuenca.
ET : Evaporación + Evapotranspiración.
Q_{so} : Caudal efluente superficial.
η : Término residual de discrepancia, error de medición o estimación.
()*: Nomenclatura correspondiente al promedio espacio-temporal que utilizado, en este caso anual y por cuenca.

El cálculo del balance contempla aproximaciones sucesivas para cada variable de la ecuación de modo de minimizar el término de discrepancia.

Los principales resultados obtenidos son los siguientes:

- Mapa de isoyetas anuales promedio para la probabilidad isoporcentual de 50% respecto del patrón de precipitaciones.
- Mapa de isotermas medias anuales.
- Mapas de isolíneas de evaporación y evapotranspiración madias anuales.
- Mapas de isolíneas de escorrentía y caudales específicos para probabilidades de excedencia de 20, 50, 80 y 95%.

3. *DGA (1983b) Balance Hídrico Nacional. Regiones VIII, IX y X. Elaborado por: IPLA Ingenieros Consultores. Santiago. Chile.*

El objetivo del estudio fue estimar la precipitación, evapotranspiración y escorrentía en cuencas ubicadas entre las regiones de Biobío y Los Lagos según las recomendaciones de Unesco. Esto se plantea para cuencas con y sin información.

La ecuación simplificada utilizada para estimar el balance es la siguiente:

$$P + Q_{si} - Q_{so} - ET - \eta = 0$$

Donde P es la precipitación, Q_{si} el caudal superficial de entrada, Q_{so} el caudal de salida, ET la evapotranspiración y η el término de discrepancia. Las componentes subterráneas del balance y el almacenamiento se asumen cero para grandes áreas geográficas y tiempos de estudio largos. Debido a que existe incerteza en varias de las variables respecto de su medición o distribución espacial, el cálculo se realiza de manera iterativa de tal manera que η sea lo más cercano a cero. Cabe destacar que el balance que se realiza es exclusivamente superficial.

En este caso se considera cuencas de las regiones del Biobío, Araucanía y Ríos con registros que abarcan desde 1951/52 a 1980/82. Las cuencas se dividen en tres grandes zonas: cuencas cordilleranas, centrales y costeras. El orden para realizar el balance es desde agua arriba hacia aguas abajo, de manera de mejorar la distribución espacial de las variables.

Como no todas las estaciones de la zona tienen un registro que abarque el período de estudio, se extiende la precipitación usando dos métodos: (1) mediante relaciones lineales entre estaciones y (2) manteniendo la pendiente de la curva doble acumuladas, que se usaron

para analizar la consistencia de la información. Los registros de temperatura no se extienden pues se considera que éstos son estacionarios, por lo que los promedios se calculan simplemente con la información registrada y los estadísticos se asumen representativos de todo el período. Los registros de caudales se extienden usando relaciones entre estaciones o relaciones entre precipitación y caudal. Se considera además los evaporímetros, donde la evaporación se estima usando un valor de coeficiente de embalse de 0,7. La evaporación tampoco se rellena, sino que se asume estacionaria.

4. *DGA (1984a) Balance Hidrológico Nacional XI Región. Elaborado por: Ricardo Edwards. Ingenieros Consultores Asociados Ltda. Santiago. Chile.*

   El objetivo del estudio fue establecer el balance hídrico a nivel de cuenca, junto con los principales parámetros hidrometeorológicos de entrada y salida al sistema hídrico. Se consideró como información de entrada la precipitación, temperatura y caudal entre los años 1951 y 1980.

   Para realizar el balance se utilizó la metodología planteada en el texto "Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur" (Unesco, 1982). En términos generales, se utiliza la ecuación de la conservación de masa de manera simplificada, considerando que no existen almacenamientos en la cuenca, de modo que la escorrentía está dada por la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración calculada mediante la fórmula de Turc más una discrepancia, la cual como máximo puede ser un 10% de la escorrentía. Dado que se analizan 30 años de información, se considera correcto el supuesto de que la regulación de embalses y acuíferos son despreciables.

   Se obtiene como resultados planos con las isoyetas asociadas a la precipitación anual de probabilidad de 50%, además de los histogramas de las precipitaciones mensuales tanto de las estaciones del patrón como las representativas de la región.

5. *DGA (1984b) Balance hidrológico nacional regiones III y IV. Elaborado por: IPLA Ingenieros Consultores. Santiago. Chile.*

   El objetivo del estudio fue desarrollar el Balance Hídrico en las regiones III y IV para el periodo comprendido entre 1951/52 y 1980/81. El estudio hace una presentación metodológica y de resultados respecto al Balance Hídrico de la zona comprendida entre la Región de Atacama y la Región de Coquimbo. La zona de estudio está caracterizada por la complejidad topográfica impuesta por las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, y un conjunto de otros cordones montañosos de importancia. En el sector norte del área de estudio se generan mesetas de altura, las cuales, por no tener desagüe hacia el mar, se convierten en cuencas endorreicas o cerradas con algunas subcuencas arreicas. La depresión intermedia en la Región de Atacama está caracterizada por extensos llanos o "pampas", las cuales son interrumpidas por la aparición de los Valles Transversales desde la cuenca del Río Copiapó al sur.

   En la zona Norte el clima es desértico, condición que varía hacia el Sur donde el ingreso de escasas precipitaciones de frentes polares entre mayo y septiembre crea un clima semi-desértico. Otras condiciones en la zona, tales como la Camanchaca, y el Invierno Boliviano generan condiciones particulares en la pluviometría de algunas áreas dentro de esta zona del país. La temperatura aumenta desde la costa, pese al aumento en altitud, fenómeno

característico donde domina el Anticiclón Sub-tropical. En relación a la evaporación, esta es consistentemente alta en base a observaciones de embalses en la zona.

En base a la geomorfología y climatología, el estudio distingue tres grupos de cuencas características en la zona:

i) Cuencas cerradas o endorreicas, con precipitaciones estivales relativamente altas en la Cordillera de Los Andes con un gradiente de disminución hacia el Pacífico.
ii) Cuencas que nacen en la Cordillera Central con escaso desagüe hacia el mar debido a la escasez de precipitaciones.
iii) Cuencas exorreicas o abiertas, cuyos ríos nacen en la Cordillera de Los Andes, con un régimen pluviométrico suficiente para permitir la llegada de aguas al Océano.

6. *DGA (1985a) Balance hidrológico nacional Cuenca del Rio Itata. Elaborado por: Ricardo Edwards G., Ingenieros Consultores Asociados Ltda. Santiago. Chile.*

El objetivo del estudio fue desarrollar el Balance Hídrico en la cuenca del río Itata para el periodo comprendido entre 1951/52 y 1980/81.

La zona de estudio corresponde a la cuenca del Río Itata, el cual nace en la junta de los ríos Huepil y Cholguán, y tiene por afluente principal el Río Ñuble. El clima es de tipo templado con una estación lluviosa prolongada y una estación seca corta. La pluviometría es uniforme producto de su origen ciclónico, y varía como consecuencia de los componentes orográficos. En la zona de la Cordillera de Los Andes y Nevados de Chillán la disminución de temperaturas en altura resulta en un incremento de las precipitaciones en forma nival, la cual durante su derretimiento abastece de agua a la cuenca durante el periodo de primavera – verano.

La media anual de precipitaciones en la zona alta de la cuenca está por sobre 2.500 mm mientras que en las zonas de valle y la costa estas disminuyen entorno en una magnitud entorno a los 1.031 mm. Además, los resultados indican que en la parte alta de la cuenca la razón de caudal a evapotranspiración anual es en torno a 4,68, en las zonas de valle la relación es más dispersa en torno a 1, y finalmente en la zona de la costa en torno a 0,7.

7. *DGA (1985b) Balance hidrológico nacional II región. Elaborado por: Ricardo Edwards G., Ingenieros Consultores Asociados Ltda. Santiago. Chile.*

El objetivo del estudio fue desarrollar el Balance Hídrico en la II Región para el periodo comprendido entre 1961/62 y 1980/81.

Escasos montos de precipitación al año, hace caracterizar un clima desértico de abundante nubosidad en la zona costera hasta un clima estepario en la zona altiplánica. Presenta lluvias débiles en invierno en la costa. En la pampa del tamarugal y el desierto de Atacama las precipitaciones son prácticamente nulas. En las zonas altas cordilleranas se presentan lluvias convectivas durante los meses de verano.

Para hacer estimación de valores, se asoció el patrón de precipitaciones con el perfil de altura obteniendo buenas aproximaciones, definiendo para cada estación el perfil de elevación más adecuado para representatividad de los datos.

Por otra parte, se asume que los ríos de la zona poseen baja variabilidad y tomando como base las estaciones fluviométricas se realizó la estimación de escorrentía anual.

Para la estimación de las extracciones por riego de superficies agrícolas se consideraron áreas puntuales asociadas solamente a las cuencas del rio Loa y a las del Salar de Atacama. También se consideran aquellas extracciones para uso no agrícola, las que están concentradas en el rio Loa. Se tiene en cuenca también el uso domiciliario e industrial que se le da al agua en la zona, diferenciando cada una de las extracciones procedentes de los ríos que conforman las cuencas del sector.

Para la estimación de evaporación de cuerpos de agua, se utilizó la información obtenida de los tanques evaporímetros clase A, ajustando los valores para representatividad de un lago a partir de un coeficiente de embalse.

Dependiendo de los niveles freáticos y del movimiento de los niveles de humedad en suelos no saturados y condiciones de temperatura puede deducirse la evaporación. Todo esto no considera los flujos de calor en el suelo.

8. *DGA* (1987) Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

   El objetivo del estudio fue evaluar en todo el país los diversos componentes del balance hídrico medio anual para un periodo homogéneo de 30 años a nivel de cuencas y subcuencas principales desarrollando mapas temáticos correspondientes. Entre 1983 y 1986 se elaboraron informes parciales, compilándose en 1987 esta versión final.

   Se plantea la ecuación del balance hídrico, donde se incorpora un término residual de discrepancia (η). Se establece que para periodos de tiempo largo y en áreas extensas el balance se reduce a:

$$P - E = Q + \eta$$

   Donde P es la precipitación, E son las perdidas, y Q es el caudal efluente. Se establece que el término de Q se refiere al flujo superficial como subterráneo, aunque este último desprecia en gran parte del análisis. Del mismo modo, en el término E se incorpora la evaporación, evapotranspiración y pérdidas por consumos, se establece que en gran parte de las cuencas se utiliza la evapotranspiración de superficies naturales.

   En cuencas endorreicas la ecuación anterior se reduce a:

$$P - E = \eta$$

   Es decir, el escurrimiento es prácticamente nulo. La estimación de la evapotranspiración (ETR_n), considerada en las pérdidas (E) se realiza mediante la fórmula de Turc:

$$ETR_n = \frac{P}{(0.9 + P^2/L^2)^{0.5}}$$

   Dónde:

   ETR_n: Evapotranspiración real anual [mm/año].

P: Precipitación anual [mm/año].
L: Parámetro heliotérmico, que se determina con la relación: $L = 300 + 25T + 0.05T^3$.
T: Temperatura media anual en °C.

Además, se utilizó el método modificado de Blaney y Criddle para zonas con cubierta vegetal. Por otra parte, para determinar la evaporación de superficie libre se ocupan mediciones de tanques evaporimétricos corregidos. En el caso de la evaporación de suelo desnudo importante en la zona norte del país por la presencia de salares, se realizaron investigaciones especiales utilizando física del movimiento del agua en la zona no saturada, trazadores isotópicos naturales y mediciones de lisímetros que se incorporaron al estudio.

Se estiman valores de P y ETR en todo el territorio de Chile continental, evaluando otras pérdidas de estudios específicos. Para el análisis de subcuencas se calcula el balance desde aguas arriba a aguas abajo.

En cuencas con control fluviométrico se obtiene el término de discrepancia, el cual si es demasiado grande implica el re-trazado de las isolíneas, minimizando el error de estas estimaciones. En cambio, en cuencas sin control fluviométrico, se asume que el término de discrepancia es nulo, determinando directamente la componente de la escorrentía.

Se establecen dos casos especiales: i) cuencas endorreicas y ii) cuencas de montaña. Para el primer caso, se evalúan de forma independiente P y ETR, corrigiendo dichas estimaciones buscando minimizar el residual en caso de que sea importante. En el caso de cuencas de montaña, se estudia el gradiente de las forzantes con la elevación extrapolándola para mayores elevaciones. En caso de tener registro fluviométrico se ajustan estos gradientes para obtener un término de discrepancia aceptable.

En función de la revisión de antecedentes se puede concluir que, la base para el cálculo del balance hídrico, es la ecuación de conservación de la masa, donde las entradas de agua al sistema hídrico son iguales a las salidas más un término de discrepancia, sobre una determinada superficie y período de tiempo.

3 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Como se indicó en la sección anterior, la estimación del balance hídrico tiene como base la ecuación de conservación de la masa, donde los principales procesos hidrológicos de entrada y salida al sistema son la precipitación (*P*), los escurrimientos (*Q*), y la evapotranspiración (*ET*). Además se considera un término de discrepancia (η). En forma simplificada esta ecuación se puede expresar de la siguiente manera.

$$(\overline{P}) + (\overline{Q}) = (\overline{ET}) - \eta$$

La ecuación anterior se aplica sobre una determinada superficie y período de tiempo, por lo que la simbología () representa el promedio espacial, y la barra horizontal el promedio temporal. Las unidades en las cuales se expresa la ecuación de conservación de la masa, tienen dimensiones de [L^3/T].

A continuación se presentan detalles de la metodología para estimar los distintos términos del balance hídrico por cuenca, junto con las escalas espaciales y temporales consideradas.

3.1 Enfoque Metodológico

La metodología de estimación del balance hídrico consiste en 5 pasos principales, los cuales se presentan en forma esquemática en la Figura 3-1. Además, cada uno de estos pasos considera distintas variables de entrada y procesos, según se observa en la misma figura.

Una breve descripción de los pasos principales de la metodología se presenta a continuación:

1. La **caracterización de la cuenca** consiste en la recopilación y análisis de antecedentes relacionados con la geomorfología, geología, cobertura vegetal e hidrología de la cuenca, lo que permite identificar los procesos hidrológicos más relevantes dentro de la misma.

   Para esta caracterización, la cuenca se divide en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), las que corresponden a pixeles de 0,05° de latitud y longitud, lo que equivale a pixeles de $5{,}6 \times 5{,}6$ km aproximadamente. Esta longitud de pixel corresponde a la discretización en la que se trabajan los distintos productos satelitales utilizados en el cálculo del balance, como se indicará más adelante en este documento.

   Como criterio que establece que cada pixel es a su vez dividido en 3 capa de suelo, y de ser necesario en 10 bandas de elevación, el cual está asociado a la cota del pixel.

2. Las **forzantes meteorológicas** son las variables de entrada que se utilizarán en el modelo hidrológico, y corresponden a series de tiempo de precipitación, temperatura y velocidad de viento, las cuales se encuentran espacialmente distribuidas sobre los pixel en los que se divide la cuenca. En este caso, las forzantes tendrán una resolución temporal sub-diaria de 3 horas.
3. Para la **modelación hidrológica**, se utilizará el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity) (Liang et al., 1994). Este modelo caracteriza una columna de suelo, y utiliza una

representación aerodinámica del flujo de calor latente y sensible en la superficie. Además, simula procesos hidrológicos como infiltración y evapotranspiración. Por otra parte, el flujo de calor permite determinar el balance de energía, con lo cual se estima la temperatura en la superficie de la columna de suelo en cada paso de tiempo.

Al utilizar una idealización de los distintos procesos hidrológicos ocurriendo en una columna de suelo, es posible dividir a la cuenca en un conjunto de columnas, cuyas superficies constituyen distintas celdas que permiten considerar la variación espacial de los parámetros que condicionan tales procesos.

4. La **calibración y validación** del modelo VIC se realiza para cuencas que se encuentran tanto en régimen natural como intervenidas, ambas con control fluviométrico. Para el primer caso se debe considerar la representación de caudales a nivel mensual en las curvas de variación estacional y curvas de duración. Además, se considera realizar una validación de los procesos físicos asociados a la acumulación y derretimiento de nieve, así como de los flujos verticales de salida, para lo cual se utilizan estimaciones de series de tiempo diarias de cobertura de nieve y de evapotranspiración, respectivamente. Para el segundo caso, es necesario estimar las principales extracciones consuntivas superficiales, para lo cual, se considera una metodología de incorporación de riego, con lo que se satisface la demanda evapotranspirativa potencial de las plantas

   El período de modelación para cada cuenca está comprendido entre los años 1985-2015, para lo cual se estiman parámetros en cada URH en función de sus características. El orden de modelación se realiza desde aguas arriba hacia aguas abajo.

5. Como **resultados** se extraen del modelo hidrológico VIC las principales variables de flujo y almacenamiento en series temporales diarias. Para analizar la congruencia de estos resultados, estos se contrastan distintas variables observadas a escala diaria y mensual.

   A escala diaria se consideran estimaciones del equivalente en agua de nieve, la cobertura nival fraccional y la evapotranspiración, mientras que a escala mensual se utilizan registros fluviométricos.

   Con los resultados obtenidos se elaboran coberturas y mapas de escorrentía, evapotranspiración, precipitación y temperatura media anual promedio en el período 1985-2015. Estos resultados se comparan con los presentados en el Balance Hídrico existente (DGA, 1987).

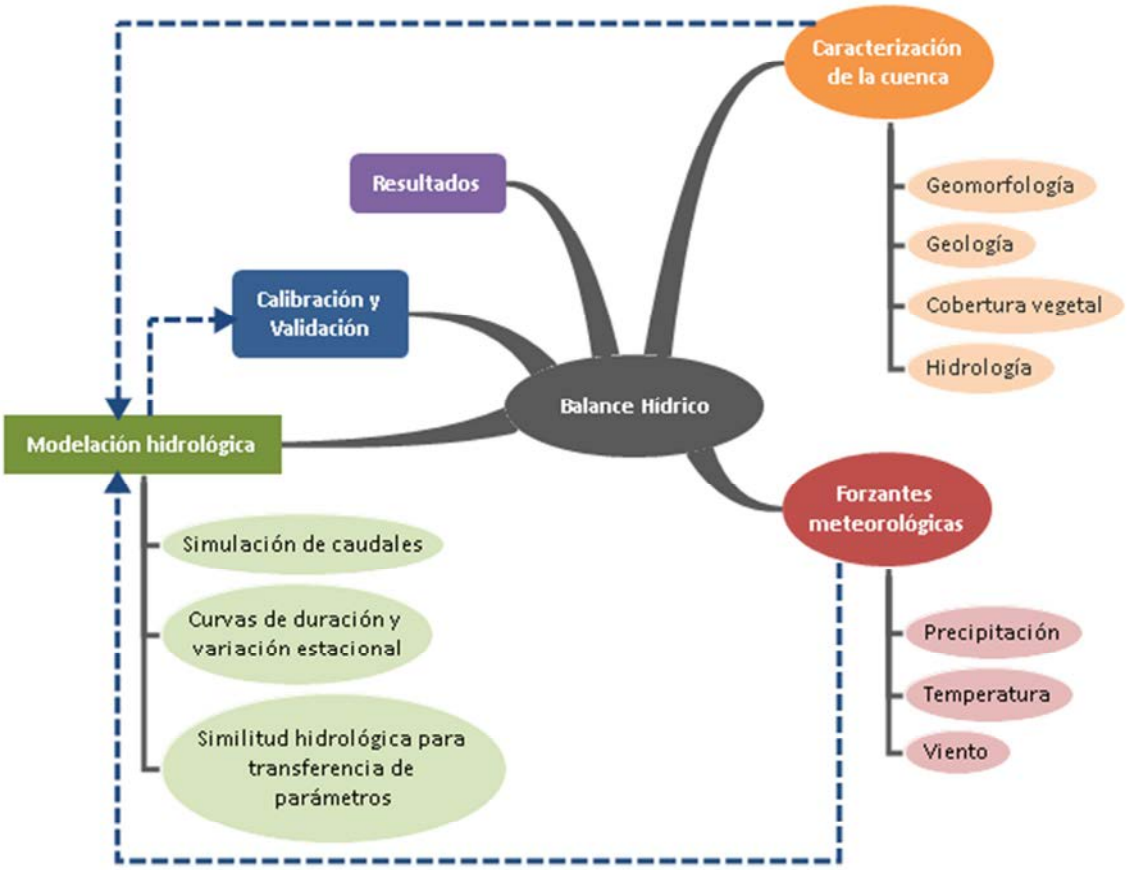


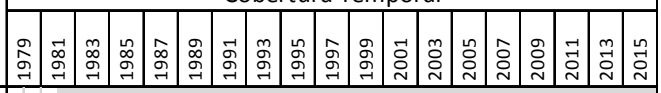
Figura 3-1: Esquema de la metodología para estimar el balance hídrico por cuenca.

3.2 Forzantes Meteorológicas

La distribución espacial y temporal de las distintas forzantes meteorológicas será estimada teniendo como base distintos productos satelitales, tales como Landsat, MOD16, ERA-interim, etc. Estos productos incluyen distintas variables meteorológicas tales como precipitación, temperatura, velocidad del viento, etc. distribuida en grillas sobre el territorio continental de Chile. La Tabla 3-1 presenta los distintos productos satelitales que se encuentran disponibles para el territorio de Chile continental, incluyendo la resolución espacial y temporal, y cobertura temporal.

Tabla 3-1: Resumen de los productos satelitales disponibles para Chile continental, incluyendo la resolución espacial y temporal, y cobertura temporal.

Producto, índice ó reanálisis	Resolución espacial	Resolución temporal	Cobertura Temporal
Landsat (4, 5, 7 & 8)	30x30 m	16 dias	
MOD11	1x1 km	diaria	
MOD16	1x1 km	8 dias	
SWE AMSR-E	25x25 km	diaria	
SWE-Reconstruido	500x500 m	diaria	
ERA-Interim	0,703°x 0,702°	3 horas	
MERRA-2	0,625°x 0,5°	1 hora	
GPM	0,1° x 0,1°	30 min	
NCEP CFSR	0,25° a 0,5°	6 horas	



3.3 Escalamiento de Forzantes Meteorológicas

Los productos satelitales con distintas forzantes meteorológicas disponibles para Chile continental consideran grillas de hasta 0,703° (78,1 km aproximadamente) (Ver Tabla 3-1), lo cual para efectos de estimación del balance es una escala espacial demasiado grande. Para este último, una escala espacial adecuada es una grilla de 0,05° (5,6 km aproximadamente).

Por consiguiente, se requiere aplicar técnicas que permitan escalar las forzantes meteorológicas desde grillas de tamaño grande a grillas de 0,05°. La Figura 3-2 presenta una comparación de distintas técnicas para este escalamiento, con sus ventajas y desventajas.

La primera técnica es la interpolación espacial de observaciones, existiendo distintas metodologías, desde simple interpolación por regresión lineal hasta herramientas geoestadísticas más sofisticadas como Kriging (ej. Hofstra *et al*., 2008). Esta última considera la covarianza de los datos espaciales y pueden incluir otros predictores, tal como la topografía del terreno. Los métodos de mapeo por interpolación tienen la ventaja de ser simples y rápidos en su aplicación. Además, la información resultante tiene alta coherencia espacial y temporal con las observaciones en zonas cercanas a éstas. Sin embargo, es posible que se introduzca errores importante y alta incertidumbre, especialmente en zonas de extrapolación donde exista una baja densidad de observaciones.

La regionalización o *downscaling* es un enfoque distinto con múltiples técnicas divididas en dos familias: escalamiento estadístico y escalamiento dinámico (Kidson *et al*. 1998). En ambos casos se requiere de un modelo alimentado con variables "forzantes" de entrada locales (ej. topografía) y de gran escala (campos geofísicos). El primer caso utiliza un modelo de precipitación, que puede ser empírico o semi-empírico, mientras que el segundo utiliza modelos complejos que integran la dinámica atmosférica y procesos físicos y químicos de ésta y la superficie. La desventaja de esta técnica es que puede generar sesgos importantes producto de limitaciones en su diseño y parametrización o calibración deficiente, tanto para los modelos estadísticos como dinámicos.

Existen variadas técnicas de *downscaling* estadístico con diferentes grados de complejidad. Pueden basarse en modelos de regresión simple o en funciones de transferencia (ej. Wilby *et al*.,

2002), o utilizar métodos sofisticados de minado de datos como redes neuronales (ej. Carreau and Vrac, 2011).

Por otra parte, el reanálisis regional está estrechamente ligado al *downscaling* dinámico, y se refiere a realizar una simulación regional corregida o reinicializada periódicamente con observaciones sinópticas locales (ej. Mesinger *et al*. 2006). Una herramienta de este tipo tiene múltiples ventajas y aplicaciones, pero supone un alto costo computacional.

Figura 3-2: Comparación de distintas técnicas de escalamiento de forzantes meteorológica. En verde se muestran las ventajas y en rojo las desventajas.

3.3.1 Precipitación

La construcción de la grilla de precipitación (P) con resolución de 0,05° se basa en una regionalización estadística de información de gran escala entregada por el reanálisis atmosférico ERA-Interim (Dee et al. 2011). La metodología aplicada se presenta en forma de diagrama de flujo en la Figura 3-3, el cual fue desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile. El resultado final se compone de dos productos intermedios: a) Producto R, el cual es generado mediante regionalización estadística b) Producto I, que se obtiene mediante interpolación.

En términos generales, el método de regionalización utiliza modelos estadísticos que actúan como funciones de transferencia para llevar información de P y de otras variables de gran escala de ERA-

Interim a P regional según la topografía local. Los parámetros de los modelos se calibran con las observaciones locales de P disponibles. La interpolación reutiliza la información local disponible para ajustar la climatología y variabilidad de P en aquellas regiones cercanas a estaciones de observación.

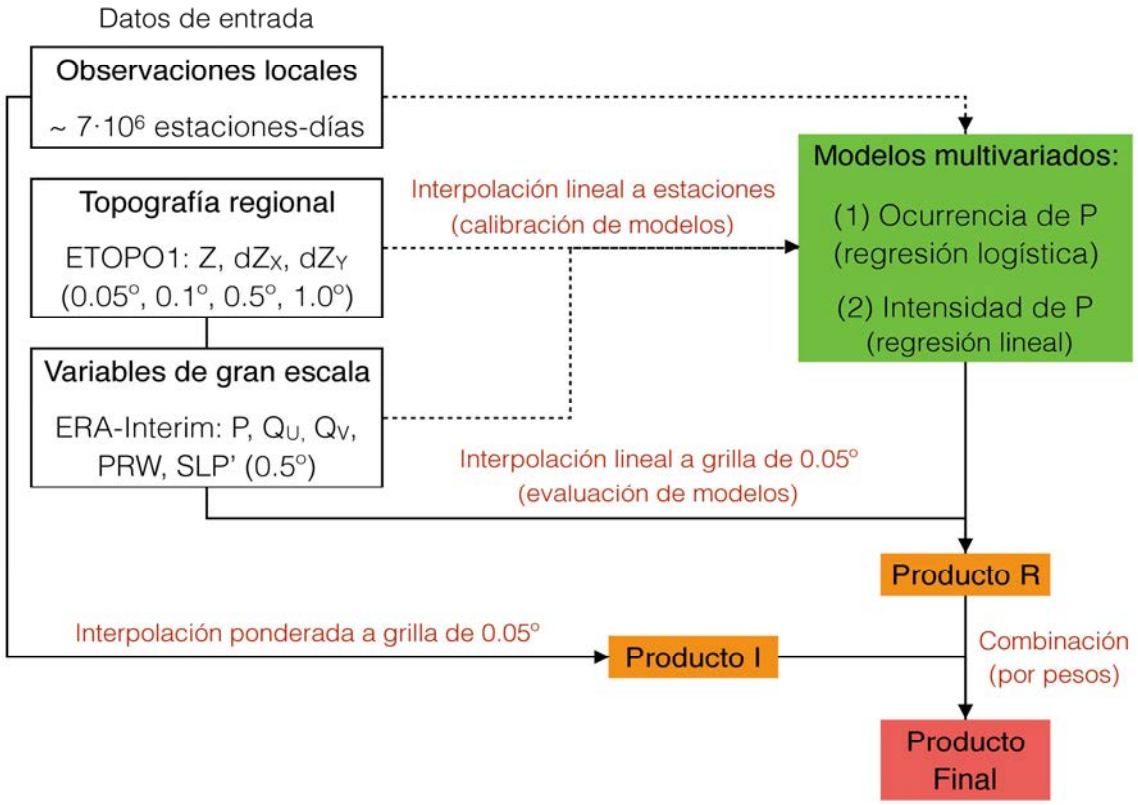


Figura 3-3: Diagrama de flujo de generación del producto grillado de precipitación (P)

La Figura 3-4 los resultados obtenidos con esta metodología, expresados como precipitación media anual para el período 1979-2016 para el territorio de Chile continental , espacialmente distribuida sobre una grilla de 0,05° (5,6 km aproximadamente). Se presenta además los mismos resultados observados en distintas estaciones meteorológicas. En términos generales, se aprecia una buena concordancia del producto con las observaciones en zonas con alta densidad de estaciones como en el centro y sur del país. Cabe destacar la resolución espacial del producto y el efecto orográfico del territorio, evidente sobre Los Andes y zonas montañosas menores, como la cordillera de Nahuelbuta. De particular interés resultan los valores obtenidos en zonas con escasa observación. Este es el caso de Patagonia, donde el producto muestra una vasta zona con un régimen muy húmedo, con medias que van desde 3.000 mm a 6.000 mm.

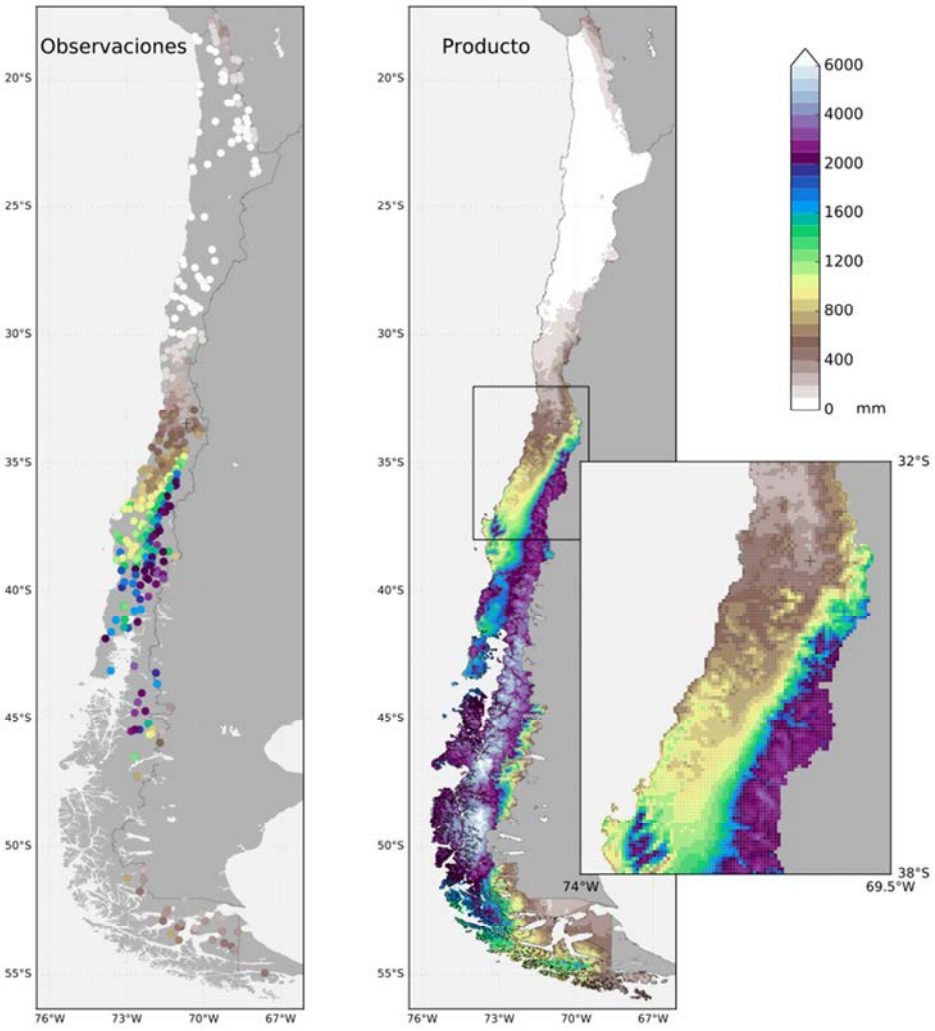


Figura 3-4: Precipitación anual promedio entre 1979 y 2016, obtenido de estaciones pluviométricas (panel la izquierda) y del producto desarrollado (derecha).

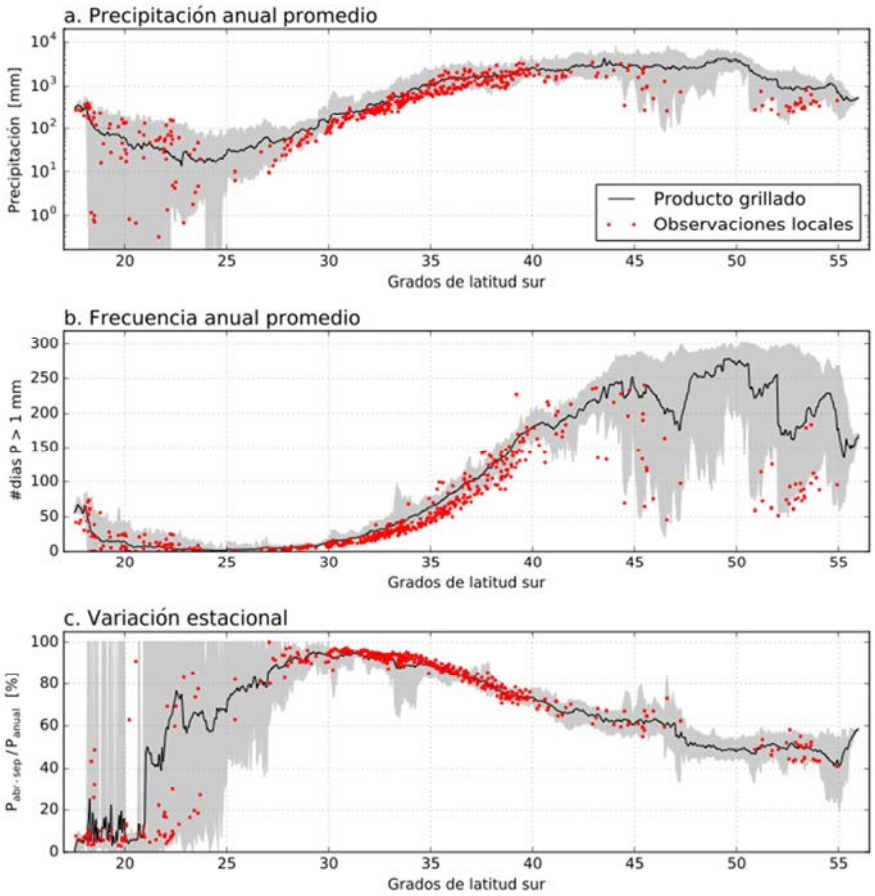


Figura 3-5: (a) Distribución latitudinal de la precipitación anual media para el período 1979 – 2016, (b) número anual de días con precipitación, (c) variación estacional de la precipitación, calculado como la fracción de la acumulación invernal (abril-septiembre) sobre el total anual. Las curvas negras y zonas sombreadas indican los promedios, mínimos y envolventes sobre el territorio nacional obtenido del producto a la latitud correspondiente, respectivamente. Puntos rojos muestran la métrica correspondiente obtenida a partir de observaciones locales. Notar escala logarítmica en el panel (a).

La Figura 3-5 muestra la distribución norte-sur de la precipitación anual media, la frecuencia de días con precipitación y la fracción de acumulación invernal. Notar que un análisis similar fue incluido en el informe del balance hídrico nacional de 1987. En esta figura se aprecia claramente el contraste entre los regímenes de P del extremo norte y del centro-sur del país. En el primer caso, además del clima árido predominante, cabe destacar las diferencias al interior de la región, con acumulaciones que varían de 0 mm a más de 100 mm. Esta heterogeneidad se observa también en lo las mediciones disponibles. Como se distingue en la Figura 3-4 y la Figura 3-5c, las zonas de mayor precipitación en el extremo norte forman parte del régimen altiplánico andino. Es decir, la precipitación en esta zona se concentra en montaña y tiene un máximo estival.

Hacia el sur de 25°S, la acumulación anual se constituye principalmente de la precipitación invernal. Esta condición se maximiza en torno a 30°S y declina en la zona más austral. En latitudes medias y altas, correspondientes a la región Patagónica de Chile, la acumulación y frecuencia de precipitación anual promedio supera los 2.000 mm y 180 días, respectivamente. Cabe destacar

que este clima extremadamente húmedo no está representado por la red de estaciones pluviométricas disponible en la región, ubicadas principalmente en zonas continentales y de menor acumulación respecto de su contraparte insular.

Finalmente, para efectos de la modelación matemática el producto de precipitación grillado que se utiliza tiene una resolución temporal de 3 horas, la cual se calcula con la siguiente expresión:

$$P_{3h}^{prod}(d,h) = P_{3h}^{ERAI}(d,h) \times \frac{P_d^{prod}(d)}{P_d^{ERAI}(d)}$$

Siendo:

$P_{3h}^{prod}(d,h)$ Precipitación media de 3 horas y grilla 0,05°, para el día d y la hora h, a utilizarse en el modelo hidrológico para estimación del balance hídrico.

$P_{3h}^{ERAI}(d,h)$ Precipitación media de 3 horas para el día d y la hora h, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

$P_d^{prod}(d)$ Precipitación media diaria con grilla 0,05°, para el día d.

$P_d^{ERAI}(d)$ Precipitación media diaria para el día d, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

3.3.2 Temperaturas Extremas Diarias

Para la construcción de la grilla de temperaturas, Tx (máxima diaria) y Tn (mínima diaria), se debe considerar que la calidad de los datos de temperatura extremas de reanálisis son más deficientes de lo esperado. Además, la variabilidad espacial de las temperaturas no solo depende de las condiciones atmosféricas en altura y de la elevación del terreno, sino también del tipo de cobertura del terreno.

Aunque con un enfoque base sustentada en modelos estadísticos, la metodología utilizada para generar los productos de temperatura difiere de la utilizada en el caso de la precipitación. Hay dos motivos principales por los cuales se escogió un enfoque relativamente distinto. El primero tiene relación con la calidad de los datos de temperatura extremas de reanálisis, que se muestran más deficientes de lo esperado. El segundo motivo concierne la variabilidad espacial de las temperaturas, a la cual contribuye de manera importante el acople entre superficie y la atmósfera. Las temperaturas cerca de la superficie varían no solo en función de las condiciones atmosféricas en altura y de la elevación del terreno (lo cual es considerado en la regionalización utilizada en el producto P), sino también en función del tipo de cubierta terrestre. Por ejemplo, un bosque, cultivo o zona urbana adyacentes tienen asociadas temperaturas desiguales sin importar su cercanía, puesto que la temperatura depende en importante medida de las propiedades biofísicas de la superficie.

La Figura 3-6 muestra una comparación entre la serie de tiempo de la temperatura máxima diaria (Tx) observada en la estación Quinta Normal y las series de temperaturas derivadas de otras fuentes: la variable Tx de ERA-Interim, la temperatura a las 18Z (14:00 hora local) del análisis asociado a ERA-Interim (basado en observaciones), y las temperaturas superficiales (Ts) de día del producto satelital MODIS LST. Este último incluye estimaciones de Ts de los satélites Terra y Aqua,

cuyas órbitas están desfasadas en el tiempo. Los datos estimados de Ts en la ubicación correspondiente a la estación Quinta Normal, obtenidos mediante interpolación espacial, ocurre aproximadamente a las 14:45 y 18:00 hora local en el caso de Terra y Aqua, respectivamente. En esta ubicación y estación del año (a modo de ejemplo se muestran solo los días de Julio) todos los productos analizados muestran un grado de concordancia con los valores observados. Cuantitativamente, la temperatura a las 18Z del análisis ERA-Interim tiene un mejor desempeño (R^2 = 0,74), aunque comparable al mostrado por la variable Ts de MODIS obtenida del satélite Aqua (R^2 = 0,71). Sin embargo, al combinar las variables de MODIS de ambos satélites mediante una regresión lineal bi-variada, se logra explicar aún mejor varianza de la Tx observada (R^2 = 0,82). Es decir, la variabilidad temporal que se pueda extraer de este producto satelital es significativamente más fidedigna a la variabilidad observada, en comparación a la información extraída del análisis ERA-Interim.

Por consiguiente, para la construcción de los productos de Tx y Tn se incorporan los datos provenientes de MODIS. El mayor inconveniente en el uso de esta información satelital es el periodo relativamente corto de operación de los satélites Aqua y Terra (2001-presente) y el gran número de datos faltantes, puesto que la variable Ts se extrae solo en condiciones de cielo despejado.

La metodología aplicada para las estimaciones de Tx (temperatura máxima diaria) y Tn (temperatura mínima diaria) se presenta en forma de diagrama de flujo en la Figura 3-7.

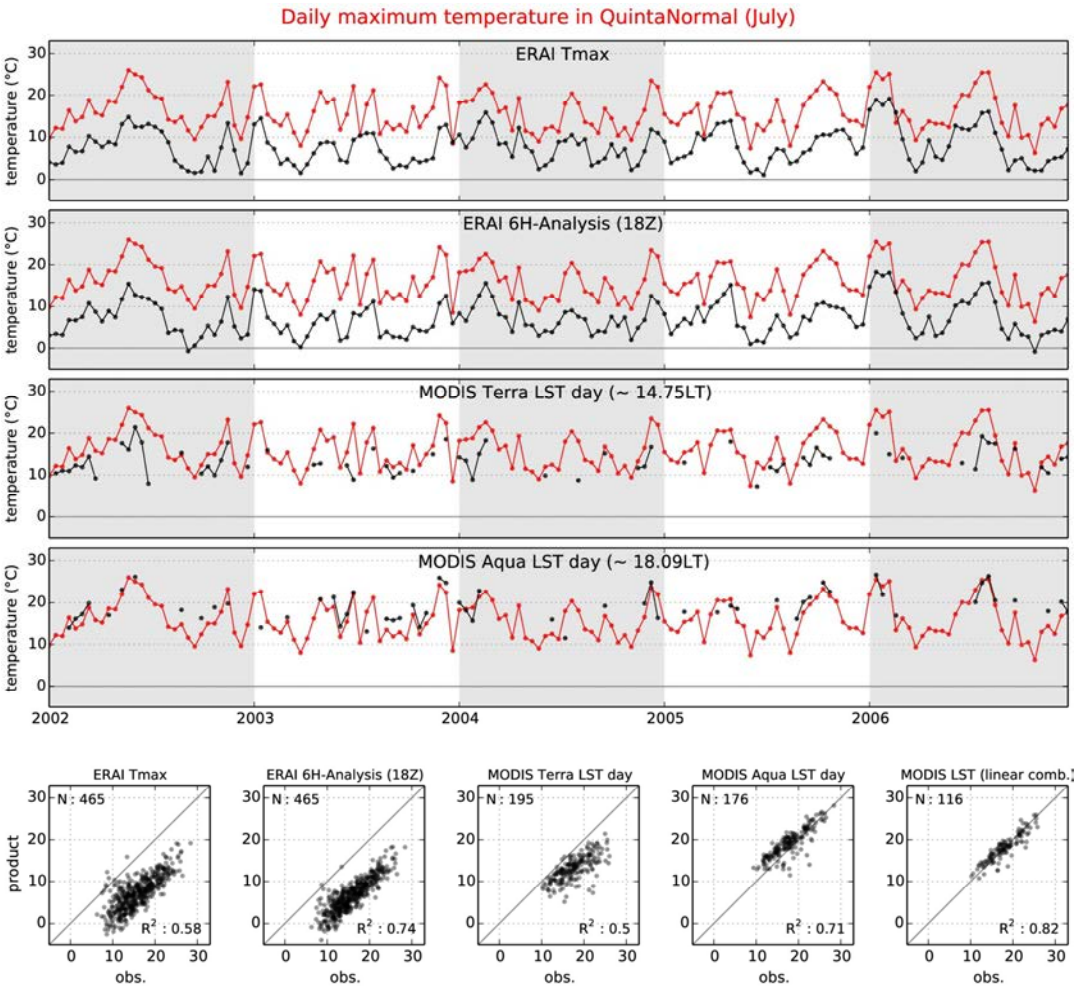


Figura 3-6: Series de tiempo de la temperatura máxima diaria (Tx) observada en la estación Quinta Normal (curva en rojo) durante los meses de Julio entre 2002 y 2006, comparada con series de temperatura de distintas fuentes e interpoladas a la ubicación de la estación (en negro). Los paneles superiores corresponden a los datos Tx del Reanalysis ERA-Interim y de temperatura a las 18Z del Análisis ERA-Interim. Las series en paneles inferiores corresponde a la temperatura superficial de día derivada del producto satelital MODIS, en sus componentes Terra y Aqua. Diagramas de dispersión comparan los valores observados con los derivados de distintos productos. El último diagrama de dispersión (derecha) compara las observaciones con la predicción de un modelo lineal bi-variado con ambas observaciones MODIS como predictores.

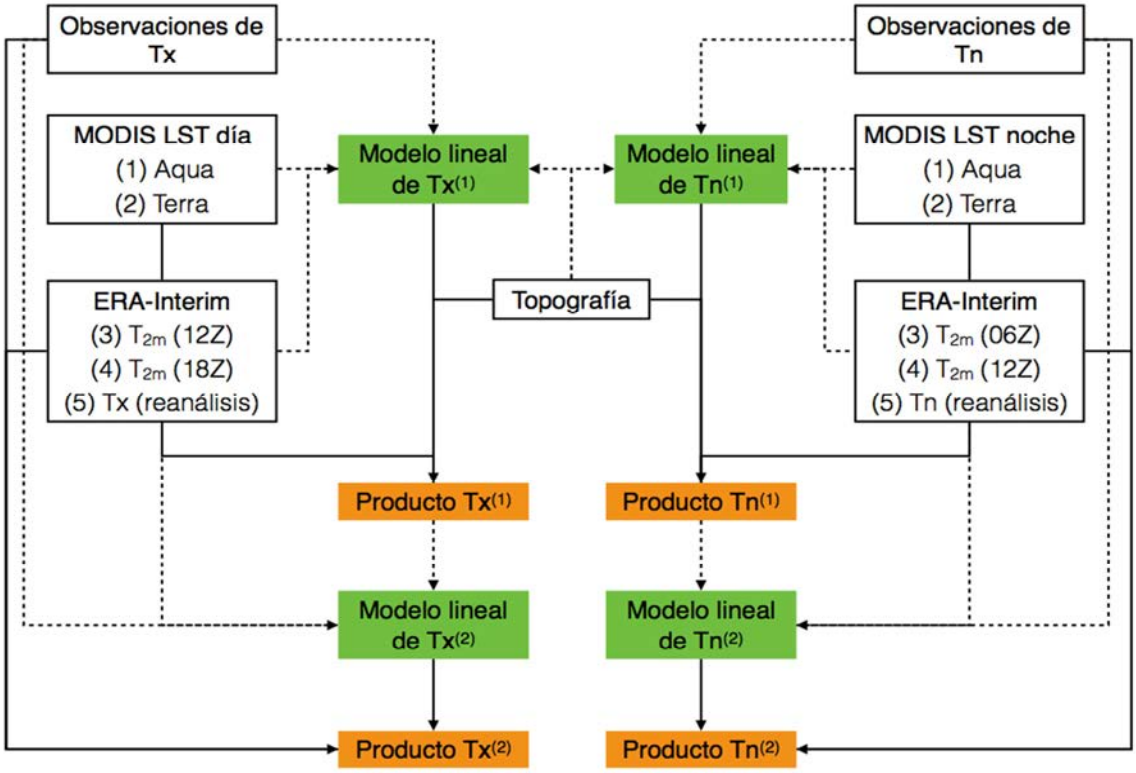


Figura 3-7: Diagrama de flujo de generación del producto de temperaturas extremas Tx (temperatura máxima diaria) y Tn (temperatura mínima diaria). 06Z, 12Z, 18Z se refieren a horas en tiempo Universal Coordinado (Z o UTC por sus siglas en inglés). T_{2m} corresponde a la temperatura a 2 m del suelo a partir de los datos de reanálisis ERA-Interim.

La Figura 3-8 muestra como ejemplo los resultados de Tx medio para el mes de enero y su contraste con los valores observados en estaciones meteorológicas. Se observa claramente una zona de altas temperaturas (~30°C) en la depresión intermedia. Se aprecian también los gradientes de temperatura esperados según la elevación del terreno y la latitud, con zonas de baja temperatura en alta cordillera y en la zona austral del país. El producto muestra una alta variabilidad espacial como se busca en un producto de esta resolución. En términos de covariabilidad temporal, el producto muestra un desempeño bastante bueno, con coeficientes de determinación en torno a 0,7 y superiores en varias regiones del centro y sur, y decae en algunas zonas del norte del país y en la costa.

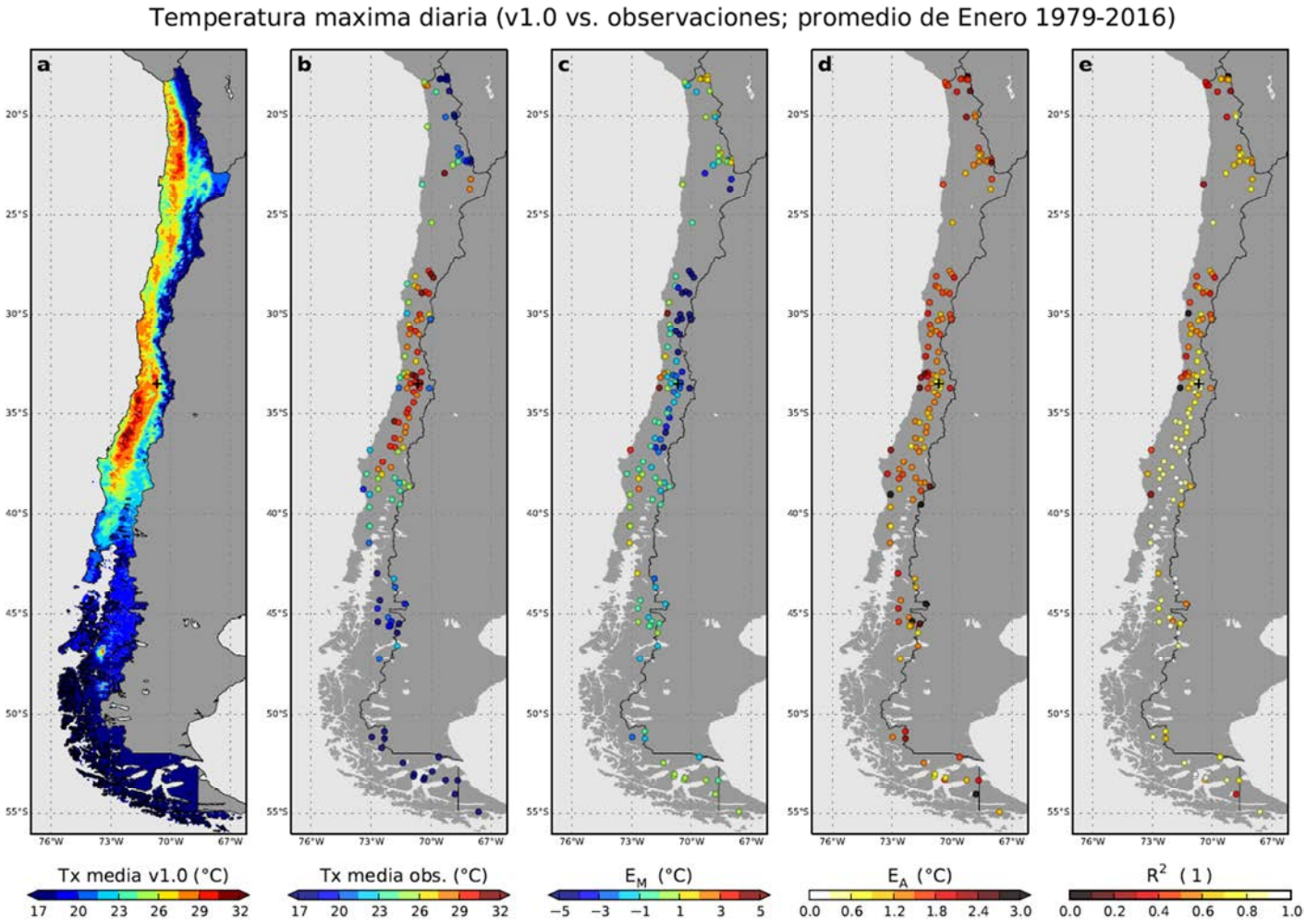


Figura 3-8: Resultados obtenidos para Tx medio en el mes de enero para el período 1979-2016. El panel (a) corresponde a la temperatura máxima diaria estimada con los productos satelitales, y (b) a la observada. Los paneles (c), (d) y (e) muestran, el sesgo climatológico (E_M), el error medio calculado a partir de anomalías de P (E_A) y el coeficiente de determinación (R^2), respectivamente.

La Figura 3-9 muestra la variación por latitud de los valores medios anuales de Tx y Tn obtenidos para todo el territorio de chile Continental. Se aprecia en ésta, la disminución de ambas variables hacia latitudes mayores. La amplitud de temperatura diurna también disminuye con la latitud, carácter consistente con la variación de climas áridos en el norte a húmedos en el sur. Los valores promedios de Tx y Tn, obtenidos en el producto, muestran un sesgo respecto de las observaciones, el cual corresponde en gran medida a la diferencia entre las elevaciones de las estaciones de observación y la elevación promedio sobre los puntos de grilla del producto. Por su parte, la variación estacional de las temperaturas del producto muestra una mayor coherencia con las observaciones (Figura 3-9b).

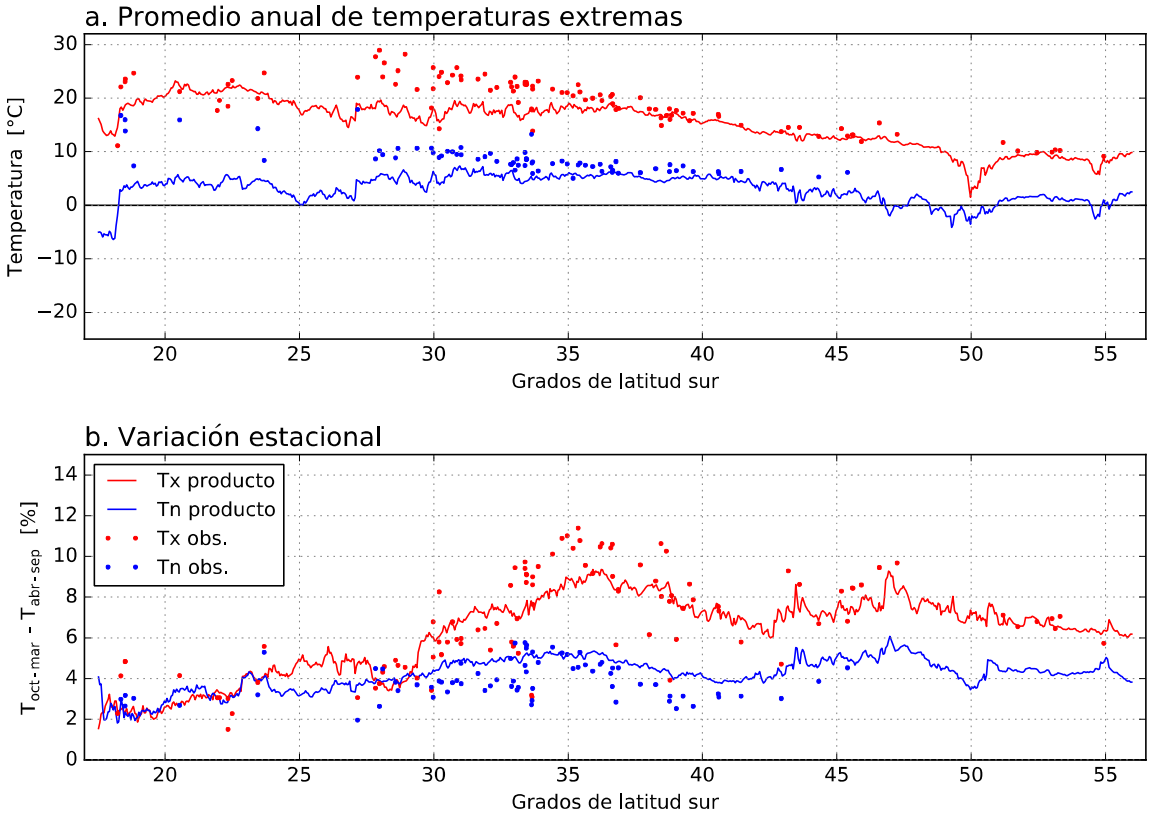


Figura 3-9: (a) Distribución latitudinal del promedio anual de las temperaturas extremas diurnas entre 1979 y 2016. (b) Variación estacional de estas variables calculado como la diferencia entre el promedio del semestre de verano (octubre a marzo) e invierno (abril a septiembre). Curvas rojas y azules corresponden a la temperatura máxima y mínima diaria, respectivamente. Puntos rojos a azules indican, respectivamente, el valor promedio de Tx y Tn obtenido de observaciones locales.

Finalmente, para efectos de la modelación matemática el producto de temperaturas grillado que se utiliza tiene una resolución temporal de 3 horas, la cual se calcula con la siguiente expresión:

$$T_{3h}^{prod}(d,h) = \alpha(d) + \beta(d) * T_{3h}^{ERAI}(d,h)$$

Siendo:

$T_{3h}^{prod}(d,h)$ Temperatura media de 3 horas y grilla 0,05°, para el día d y la hora h, a utilizarse en el modelo hidrológico para estimación del balance hídrico.

$T_{3h}^{ERAI}(d,h)$ Precipitación media de 3 horas para el día d y la hora h, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

α y β Coeficientes que se calculan con el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\max\left[T_{3h}^{prod}(d)\right] = \alpha(d) + \beta(d) \times \max[T_{d}^{ERAI}(d)]$$

$$\min\left[T_{3h}^{prod}(d)\right] = \alpha(d) + \beta(d) \times \min[T_{d}^{ERAI}(d)]$$

Donde:

$\max\left[T_{3h}^{prod}(d)\right]$ Temperara máxima diaria y grilla 0,05° para el día d, lo cual es igual a Tx.

$\min\left[T_{3h}^{prod}(d)\right]$ Temperara mínima diaria y grilla 0,05° para el día d, lo cual es igual a Tn.

$\max[T_{d}^{ERAI}(d)]$ Temperara máxima diaria para el día d, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

$\max[T_{d}^{ERAI}(d)]$ Temperara mínima diaria para el día d, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

3.3.3 Velocidad del Viento Diaria

La velocidad del viento diaria es una variable que tiene poco registro en el territorio continental de Chile. Por consiguiente para efecto de estimación del balance hídrico se utilizaron los resultados que se presentan en el Explorador Eólico (http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/) junto con técnicas estadísticas similares a las utilizadas en la estimación de los datos grillados de precipitación y temperaturas extremas. Las simulaciones del Explorador Eólico fueron desarrolladas en el contexto del proyecto "*Ámbitos de investigación necesarios para el desarrollo eólico en Chile relacionados con el recurso viento*", el cual fue llevado a cabo por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile gracias al Convenio de Cooperación y Transferencia entre el Ministerio de Energía y la Universidad de Chile y con apoyo adicional de la Corporación Alemana para la Cooperación Internacional.

La información del Explorador Eólico proviene de un conjunto de simulaciones atmosféricas de alta resolución (1 km), realizadas con el modelo de circulación regional WRF (*Weather Research and Forecasting*). Estas simulaciones fueron realizadas para el año 2010, con condiciones de borde prescritas de los análisis operacionales del Global Forecasting System (GFS).

El método utilizado para construir una forzante de viento a 10 metros (V_{10}) para el periodo más largo (1980-2016) es una forma de regionalización estadística simplificada. En este caso, se considera la información del Explorador Eólico de 2010 como datos observados y se calibraron modelos lineales de viento para cada punto de la grilla. Se busca, con estos modelos, reproducir gran parte de la variabilidad día a día del viento del Explorador Eólico en función de predictores que den cuenta de las condiciones de circulación de gran escala. Estos predictores comprenden un conjunto de variables en la columna atmosférica del reanálisis ERA-Interim. El producto de viento

final se deriva forzando los modelos lineales obtenidos sobre cada pixel con las variables predictoras de ERA-Interim, las cuales están disponibles para el periodo.

En forma preliminar, se estableció un sesgo positivo de V_{10}, principalmente en zonas montañosas. Este sesgo fue corregido con datos de V_{10} de ERA-Interim, disponibles en una grilla de 0,5°. Finalmente la variabilidad espacial a la escala 0,05° se determinó escalando la información entregada por Explorador Eólico a los valores de ERA-Interim.

Finalmente, para efectos de la modelación matemática el producto de velocidad de viento grillado que se utiliza tiene una resolución temporal de 3 horas, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{3h}^{prod}(d,h) = V_{3h}^{ERAI}(d,h) \times \frac{V_d^{prod}(d)}{V_d^{ERAI}(d)}$$

Siendo:

$V_{3h}^{prod}(d,h)$ Velocidad media del viento de 3 horas y grilla 0,05°, para el día d y la hora h, a utilizarse en el modelo hidrológico para estimación del balance hídrico.

$V_{3h}^{ERAI}(d,h)$ Velocidad media del viento de 3 horas, para el día d y la hora h, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

$V_d^{prod}(d)$ Velocidad media diaria del viento con grilla 0,05°, para el día d.

$V_d^{ERAI}(d)$ Velocidad media diaria del viento para el día d, proveniente del reanálisis ERA-Interim.

3.3.4 Humedad Relativa

La humedad relativa se calcula como la razón entre la presión real de vapor a cierta temperatura, $\mathrm{e_a}(T)$, y la presión de saturación de vapor, $e^0(T)$. Dado que la temperatura del punto de rocío es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarlo, la presión real de vapor corresponde a la presión de saturación de vapor a la temperatura de punto de rocío, $e^0(T_r)$.

Este cálculo se realiza en función de la temperatura, espacial y temporalmente distribuida, obtenida en la sección 3.3.2, para lo cual se usa la siguiente expresión.

$$\mathrm{HR} = \frac{\mathrm{e_a}}{e^0(T_r)} \rightarrow HR = \frac{\exp\left(\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right)}{\exp\left(\frac{17{,}27 * T_r}{T_r + 237{,}3}\right)}$$

Siendo *HR* la humedad relativa media cada 3 horas y con grilla 0,5, *T* es la temperatura media cada 3 horas y con grilla 0,5°, T_r es la temperatura de punto de roció. Se asume que la temperatura T_r es igual a la temperatura mínima del día.

3.3.5 Radiación

Al igual que la humedad relativa, la radiación de onda larga y la de onda corta, se calculan en función de la temperatura, espacial y temporalmente distribuida. Para estimar la radiación de onda larga (E) se usa la ecuación de Stefan-Boltzmann, la cual es la siguiente.

$$\mathrm{E} = \epsilon\sigma\mathrm{T}^4$$

Siendo ϵ la emisividad de la superficie, la cual se considera igual a 1 ya que internamente el modelo hidrológico VIC pondera dicho valor según la estimación que realiza de la nubosidad; σ es la constante de Stefan-Boltzman, la cual tiene un valor de $5{,}67\times10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$; y T es la temperatura absoluta de la superficie.

Para la radiación de onda corta (I_s) se usa la siguiente expresión (DeWalle and Rango, 2008), la cual se basa en el día juliano y la latitud, puesto que se considera que la superficie es horizontal.

$$\mathrm{I_s} = (I_0/e^2)\cos(Z)$$

Siendo I_o la constante solar, la cual varía entre 1.360 y 1.400 Wm^{-2} (Como criterio en el presente caso se usa un valor de 1.360 Wm^{-2}); e representa el vector radio; y z el ángulo zenit en radianes.

Para el cálculo del vector radio (e) se utiliza la siguiente ecuación.

$$\mathrm{e} = 0{,}03297\ \mathrm{sen}\left(\frac{\mathrm{día_{juliano}} - 79{,}649}{59{,}49}\right) + 1$$

El ángulo zenit (z) se calcula en función de la latitud (θ), la declinación solar (δ) y el ángulo horario (wt), según las siguientes ecuaciones.

$$cos\ z = \sin\theta\,\sin\delta + \cos\theta\,\cos wt$$

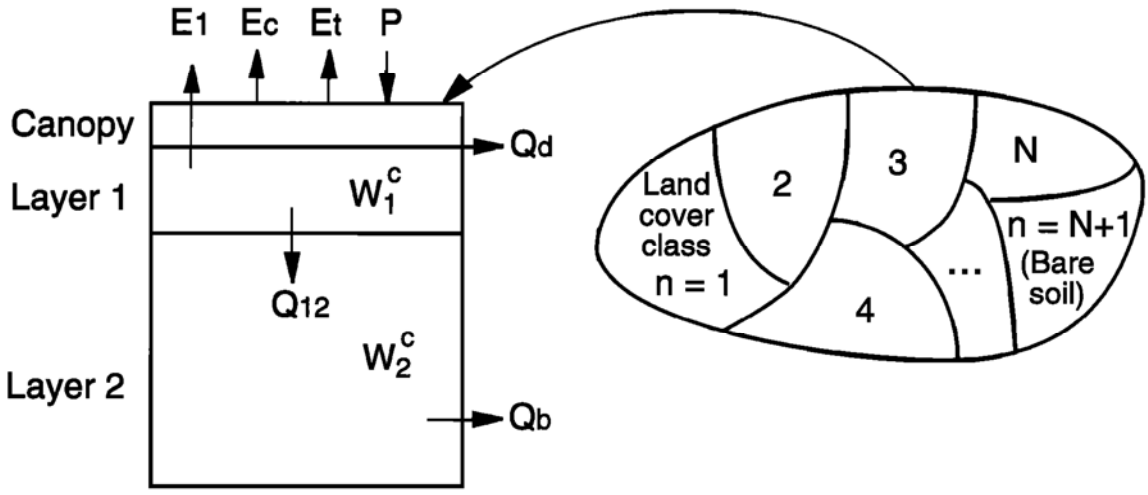
$$\mathrm{wt} = 23{,}5\ \mathrm{sen}\left(\frac{\mathrm{día_{juliano}} - 79{,}649}{59{,}49}\right) + 1$$

3.4 Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica para obtener los distintos componentes del balance se realiza mediante el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity) (Liang et al., 1994). Este modelo se caracteriza por ser semi-distribuido, de base física y está diseñado para simular procesos hidrológicos en zonas representadas por celdas pixeles de tamaño mayor a 1 km. Además, permite incluir varios tipos de vegetación o usos de suelo en cada pixel, crear bandas de elevación para considerar el efecto topográfico sobre las forzantes como precipitación y temperatura.

El tipo de uso de suelo se representa en VIC mediante el índice ce área foliar (LAI), la resistencia del follaje y el porcentaje de raíces en cada capa de suelo. Los procesos hidrológicos que permite simular VIC son evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, infiltración y generación de flujo base y escorrentía superficial. Adicionalmente, se estima un balance de energía donde la incógnita es la temperatura del suelo.

La Figura 3-10 muestra en forma esquemática el modelo VIC de una celda con 2 capas de suelo. Se observan distintos procesos hidrológicos, tales como evaporación desde suelo desnudo ($E1$), evaporación de agua interceptada en el follaje (Ec), transpiración (Et), precipitación (P), escorrentía producto de la precipitación en exceso (Qd), flujo base (Qb) y el traspaso de agua entre las distintas capas del suelo ($Q12$). Además, se muestra la representación de distintos usos de suelo en cada pixel.



Fuente: Liang et al. (1994)

Figura 3-10: Representación esquemática del modelo VIC para una celda con 2 capas de suelo.

La modelación hidrológica para estimar el balance hídrico por cuenca, considera una resolución espacial de 0,05° $\times$ 0,05° (5,6 $\times$ 5,6 km aproximadamente), la cual corresponde con la escalamiento obtenido de las forzantes meteorológicas. Estas forzantes corresponden a la precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación de onda larga y corta.

Por otra parte, se considera en el modelo un paso de tiempo de 3 horas, obteniéndose posteriormente mediante agregación los caudales medios mensuales modelados. Esto caudales permiten realizar la calibración del modelo mediante comparación con caudales medios mensuales observados. Además, se obtienen curvas de variación estacional y de duración.

Para realizar el proceso de calibración se considera un total de 11 parámetros por celda, los cuales se presentan en la Tabla 3.2. Para el ajuste de estos parámetros se considera maximizar en forma conjunta los coeficientes de eficiencia de Nash-Suttcliffe (NSE) y Kling-Gupta (KGE).

Tabla 3.2: Parámetros considerados en la calibración del modelo VIC.

Variable	Unidades	Rango	Descripción
b	N/A	]0,1]	Parámetro asociado a la curva de infiltración
Ds	fracción	[0,1]	Fracción del Dsmax donde comienza el flujo base no lineal
Dsmax	mm/día	[0,∞]	Velocidad máxima de flujo base
Ws	fracción	[0,1]	Fracción de humedad el suelo donde ocurre el flujo base no lineal
expt	N/A	[3, ∞]	Exponente en la ecuación de Cambell para conductividad hidráulica
h_1	m	]0,01,h_2]	Espesor de la primera capa de suelo
h_2	m	]h_1, ∞*]	Espesor de la segunda capa de suelo
h_3	m	]h_1, ∞*]	Espesor de la tercera capa de suelo
T_0	°C		Temperatura a la que la precipitación cae en forma sólida
snow_rough	m		Rugosidad de la superficie de la nieve
k_{sat}	Mm/día	]0, , ∞]	Conductividad hidráulica saturada

* Se recomienda que el espesor total del suelo, es decir, la suma de las tres capas, sea inferior a aproximadamente 15 metros.

En las cuencas que poseen áreas de cultivos se estima el consumo de agua para satisfacer la evapotranspiración potencial. Así mismo, en cuencas con presencia de glaciares se considera su interacción con el sistema hídrico.

La evapotranspiración, tanto la potencial (ETP) como la real (ET), se calculan dentro del modelo VIC, mediante el método de Penman-Monteith. La diferencia entre estas dos variables representa el agua que debe ser suministrada al cultivo para que crezca sin estrés hídrico. Por otra parte, en cada pixel se considera la presencia de 4 tipos de cultivos: viñedos, hortalizas, frutales y cultivos anuales; lo cuales se representan por el índice $k = 1,2,3,4$. Además, se conoce la fracción del área de la celda que contiene cultivos ($A[k]$), la fracción de $A[k]$ que es ocupada por el cultivo k ($f_v[k]$), y una estimación de la eficiencia de riego por cultivo ($\eta[k]$). Finalmente, asumiendo que los cultivos siempre evapotranspiran a su potencial, se tiene la siguiente expresión.

$$Riego_{ij}[m] = \sum_{n}\sum_{ij}\sum_{k} \frac{\{f^m{}_v[k] \cdot ETP_{ij}[k] + (1 - f_v{}^m[k]) \cdot EP_{ij}\} \cdot A_{ij}[k] - \{f^m{}_v[k] \cdot ET_{ij}[k] + (1 - f^m{}_v[k]) \cdot E_{ij}\} \cdot A_{ij}[k]}{\eta_k}$$

Siendo $Riego_{ij}[m]$ el volumen de agua extraída para riego para el mes m y la celda *ij*, n es el número de días del mes m, E y EP son la evaporación y evaporación potencial desde suelo desnudo, respectivamente. Es importante destacar que los dos últimos términos son 0 para los cultivos frutales y viñas, debido a que el tipo de riego incrementa la humedad sólo en los sectores aledaños a las raíces de las plantas. Finalmente, el volumen mensual de agua disponible (${Q_{ij}}^*[m]$), es decir, que no es extraída desde el río, se calcula con la siguiente expresión.

$$ {Q_{ij}}^*[m] = \sum_n \sum_{ij} Q_{ij}[m] - Riego_{ij}[m] $$

Siendo Q_{ij}es la escorrentía total generada por VIC para una cuenca en estado natural. Es necesario resaltar que se puede definir los meses m donde la variable $Riego_{ij}[m]$ =0. En el caso del presente estudio se considera que el riego se da solo en los meses de septiembre a marzo.

Por otra parte, para cuantificar el aporte glaciar a la escorrentía en aquellas cuencas con importante presencia de glaciares, tanto cubiertos como descubiertos, se considera una tasa de rendimiento mensual por unidad de área, la que varía según el tipo de glaciar y la orientación principal de la zona de ablación.

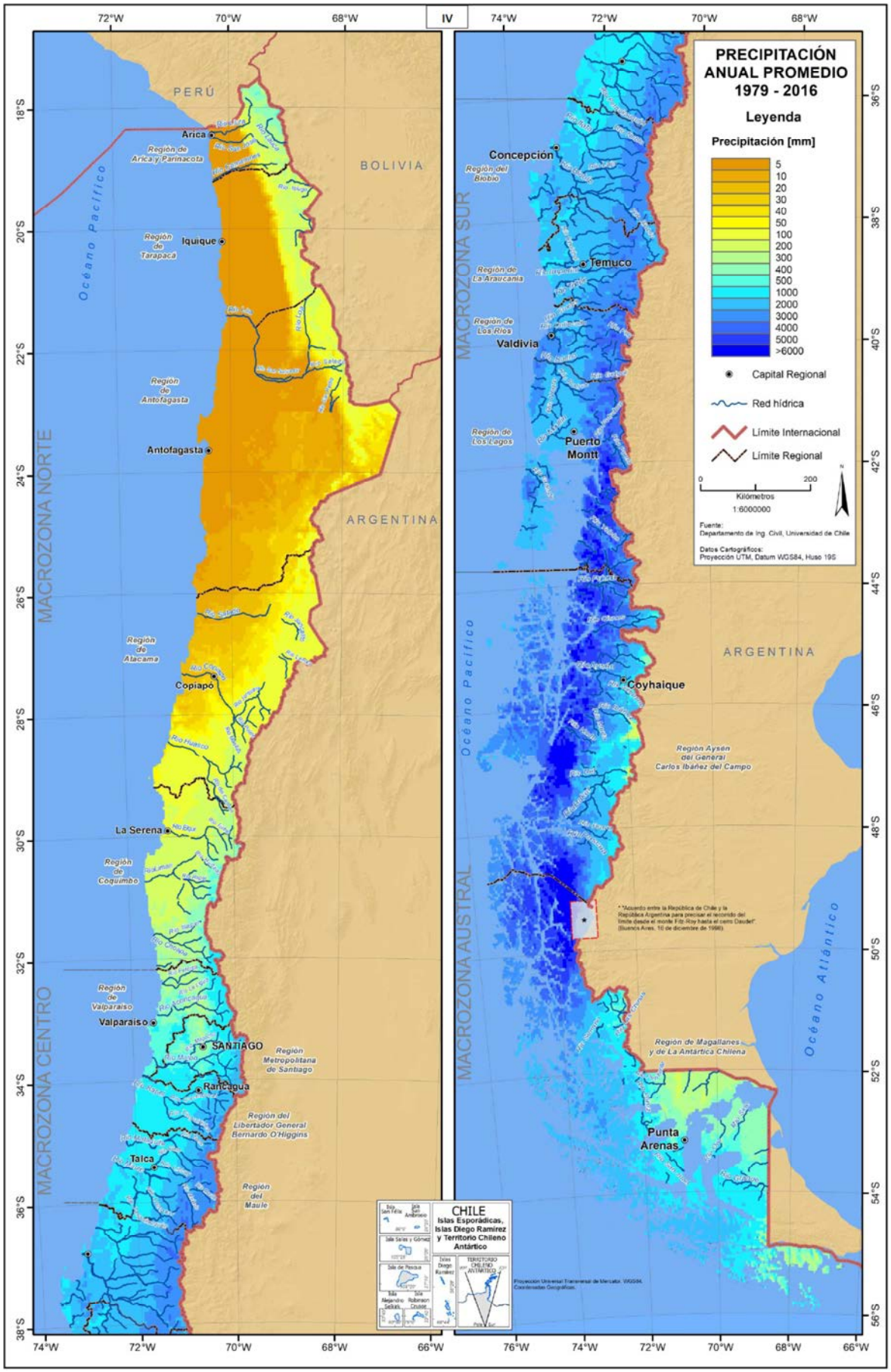
4 RESULTADOS

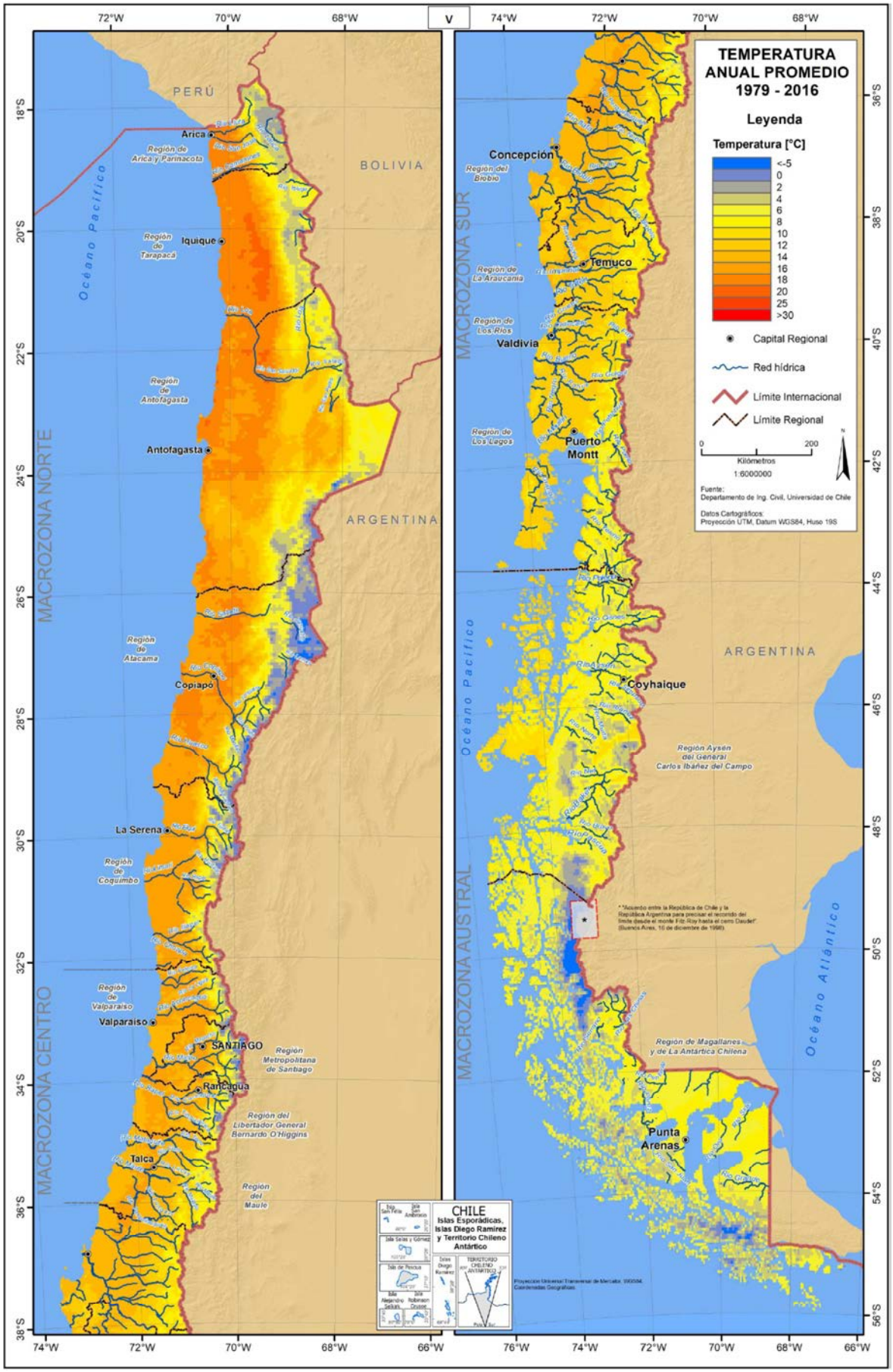
4.1 Resultados Obtenidos Para Forzantes Meteorológicas

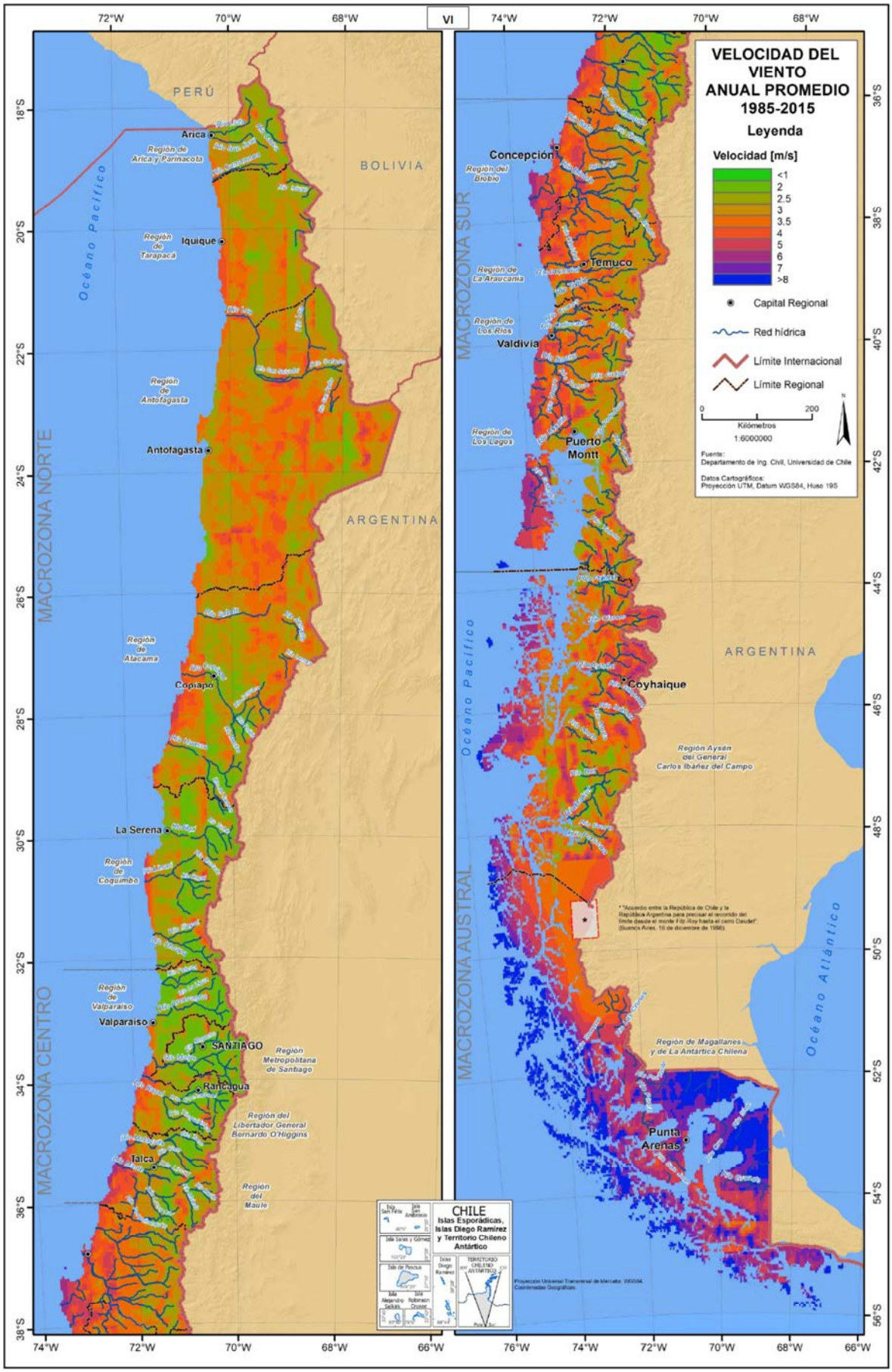
A continuación se presentan los resultados obtenidos para las forzantes meteorológicas utilizadas en el cálculo del balance hídrico, que corresponden a precipitación, temperatura y velocidad del viento. Estos resultados corresponden a promedios anuales, considerando una grilla espacial de 0,5°×0,5° (5,6 × 5,6 km aproximadamente), y se presentan en forma de mapas.

Los periodos de tiempo con los que calcularon los promedios son 1979 – 2016 para el caso de la precipitación y temperatura, y 1980-2015 para el caso de velocidad del viento.

Considerar que los resultados mostrados en forma de mapas permiten ilustrar la distribución espacial de las forzantes meteorológicas sobre el territorio de Chile continental, para el promedio anual. Sin embargo, para efectos de cálculo del balance mediante modelación hidrológica, se cuenta con estos datos distribuidos a una escala temporal de 3 horas, para el período 1985-2015.


PRECIPITACIÓN ANUAL PROMEDIO 1979 - 2016
Leyenda
Precipitación [mm]
5
10
20
30
40
50
100
200
300
400
500
1000
2000
3000
4000
5000
>6000
Capital Regional
Red hídrica
Límite Internacional
Límite Regional
0
200
Kilómetros
1:6000000
Fuente:
Departamento de Ing. Civil, Universidad de Chile
Datos Cartográficos:
Proyección UTM, Datum WGS84, Huso 19S
PERÚ
BOLIVIA
ARGENTINA
Océano Pacífico
Océano Atlántico
MACROZONA NORTE
MACROZONA CENTRO
MACROZONA SUR
MACROZONA AUSTRAL
Arica
Iquique
Antofagasta
Copiapó
La Serena
Valparaíso
SANTIAGO
Rancagua
Talca
Concepción
Temuco
Valdivia
Puerto Montt
Coyhaique
Punta Arenas
Región de Arica y Parinacota
Región de Tarapacá
Región de Antofagasta
Región de Atacama
Región de Coquimbo
Región de Valparaíso
Región Metropolitana de Santiago
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins
Región del Maule
Región del Biobío
Región de La Araucanía
Región de Los Ríos
Región de Los Lagos
Región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo
Región de Magallanes y de La Antártica Chilena
CHILE
Islas Esporádicas, Islas Diego Ramírez y Territorio Chileno Antártico
72°W
70°W
68°W
74°W
76°W
66°W
18°S
20°S
22°S
24°S
26°S
28°S
30°S
32°S
34°S
36°S
38°S
40°S
42°S
44°S
46°S
48°S
50°S
52°S
54°S
56°S


TEMPERATURA
ANUAL PROMEDIO
1979 - 2016
Leyenda
Temperatura [°C]
<-5
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
25
>30
Capital Regional
Red hídrica
Límite Internacional
Límite Regional
0
200
Kilómetros
1:6000000
Fuente:
Departamento de Ing. Civil, Universidad de Chile
Datos Cartográficos:
Proyección UTM, Datum WGS84, Huso 19S
PERÚ
BOLIVIA
ARGENTINA
Océano Pacífico
Océano Atlántico
MACROZONA NORTE
MACROZONA CENTRO
MACROZONA SUR
MACROZONA AUSTRAL
Arica
Iquique
Antofagasta
Copiapó
La Serena
Valparaíso
SANTIAGO
Rancagua
Talca
Concepción
Temuco
Valdivia
Puerto Montt
Coyhaique
Punta Arenas
Región de Arica y Parinacota
Región de Tarapacá
Región de Antofagasta
Región de Atacama
Región de Coquimbo
Región de Valparaíso
Región Metropolitana de Santiago
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins
Region del Maule
Región del Biobío
Región de La Araucanía
Región de Los Ríos
Región de Los Lagos
Región Aysen del General Carlos Ibáñez del Campo
Región de Magallanes y de La Antártica Chilena
CHILE
Islas Esporádicas, Islas Diego Ramírez y Territorio Chileno Antártico


VELOCIDAD DEL VIENTO ANUAL PROMEDIO 1985-2015
Leyenda
Velocidad [m/s]
<1
2
2.5
3
3.5
4
5
6
7
>8
Capital Regional
Red hídrica
Límite Internacional
Límite Regional
0
200
Kilómetros
1:6000000
Fuente:
Departamento de Ing. Civil, Universidad de Chile
Datos Cartográficos:
Proyección UTM, Datum WGS84, Huso 19S
VI
PERÚ
BOLIVIA
ARGENTINA
Océano Pacífico
Océano Atlántico
MACROZONA NORTE
MACROZONA CENTRO
MACROZONA SUR
MACROZONA AUSTRAL
Arica
Región de Arica y Parinacota
Iquique
Región de Tarapacá
Antofagasta
Región de Antofagasta
Copiapó
Región de Atacama
La Serena
Región de Coquimbo
Valparaíso
Región de Valparaíso
SANTIAGO
Región Metropolitana de Santiago
Rancagua
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins
Talca
Región del Maule
Concepción
Región del Bíobío
Temuco
Región de La Araucanía
Valdivia
Región de Los Ríos
Puerto Montt
Región de Los Lagos
Coyhaique
Región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo
Punta Arenas
Región de Magallanes y de La Antártica Chilena
CHILE
Islas Esporádicas, Islas Diego Ramírez y Territorio Chileno Antártico
72°W
70°W
68°W
74°W
76°W
66°W
18°S
20°S
22°S
24°S
26°S
28°S
30°S
32°S
34°S
36°S
38°S
40°S
42°S
44°S
46°S
48°S
50°S
52°S
54°S
56°S

4.2 Resultados Obtenidos al Aplicar las Metodología en Cuencas Piloto

Para validar la metodología, se aplicó en 5 cuencas piloto, distribuidas entre las distintas regiones de Chile. Estas cuencas son las de los ríos Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. Los resultados obtenidos corresponden a precipitación y temperatura media anual, variación estacional de precipitación, escurrimientos y evapotranspiración, y fracción de área cubierta por nieve.

Se debe indicar que el modelo VIC considera que el caudal saliente de la cuenca corresponde a la suma del flujo superficial y subterráneo. Este caudal se compara con los caudales observados en el procese de calibración, para lo cual se considera la intervención en la cuenca.

4.2.1 Cuenca del Río Loa

La distribución espacial media anual de las forzantes meteorológicas para la cuenca del río Loa se muestran en la Figura 4.1 y Figura 4.2.

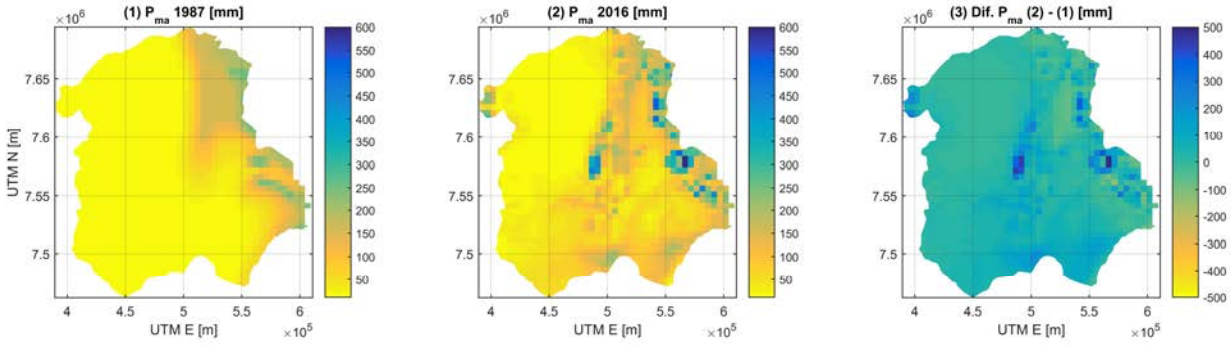


Figura 4.1: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Loa.

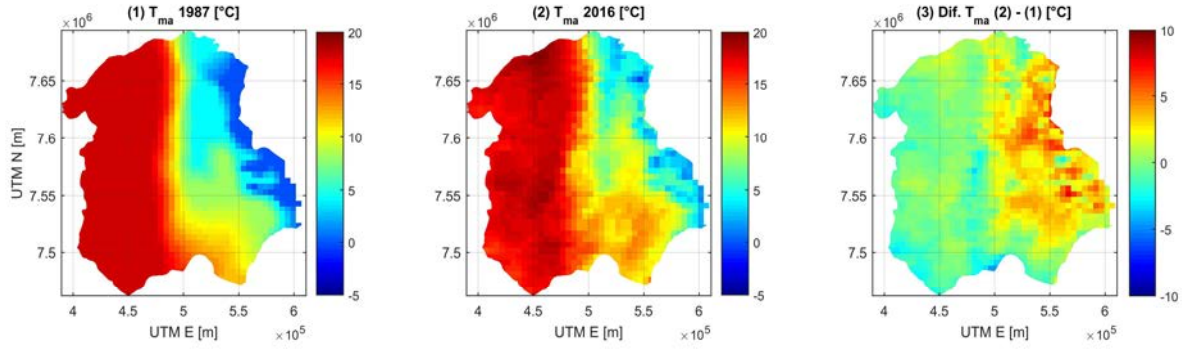
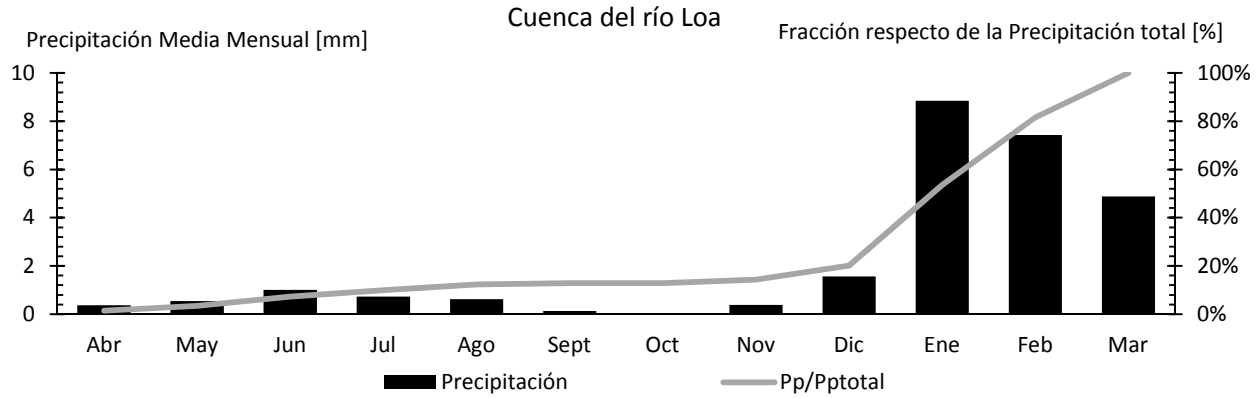
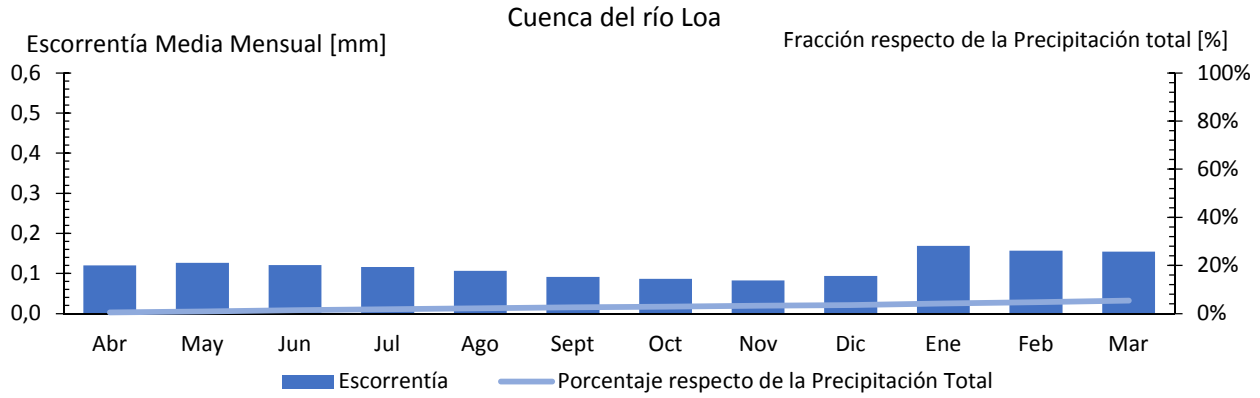


Figura 4.2: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Loa.

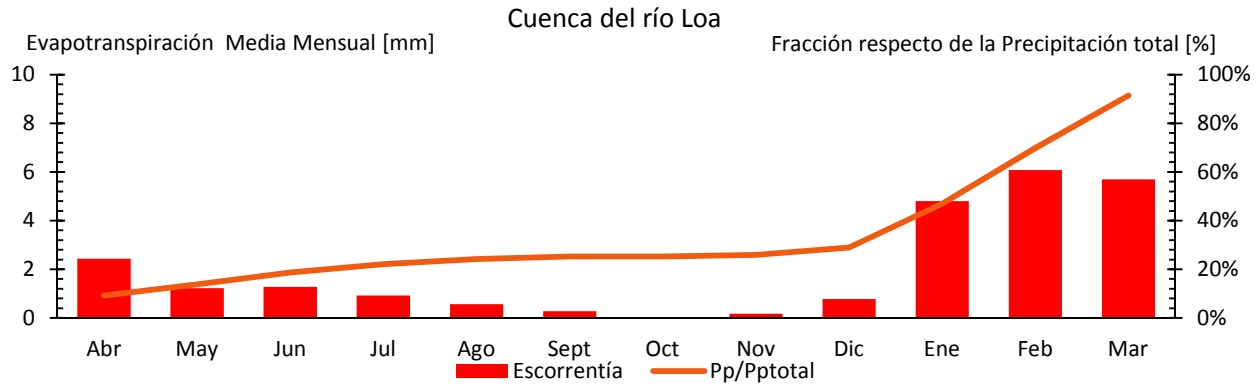
En la Figura 4.3 se muestran los valores mensuales y acumulados para un año promedio, los que consideran la media sobre toda la cuenca de las salidas del modelo VIC. La precipitación media de la cuenca del río Loa es de aproximadamente 26 mm/año, mientras que la evapotranspiración asciende a 24,2 mm/año. La escorrentía en la cuenca del río Loa es baja, y se genera principalmente en la zona altiplánica y es cercana a 1,8 mm/año. En términos relativos, la evapotranspiración representa cerca del 91% de la precipitación, lo que explica la extrema aridez que caracteriza a dicha cuenca.



(a) Distribución mensual de la precipitación promediada sobre la cuenca



(b) Distribución mensual de la escorrentía promediada sobre la cuenca



(c) Distribución mensual de la evapotranspiración promediada sobre la cuenca

Figura 4.3: a) Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación, b) escorrentía, y c) evapotranspiración en la cuenca del río Loa. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

Los valores de la Figura 4.3 se detallan en la Tabla 4.1, donde se muestran los valores en milímetros y en unidades de caudal. Los valores de escorrentía y evapotranspiración corresponden a la cuenca en régimen natural.

Tabla 4.1: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Loa. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015.

Mes	Precipitación			Escorrentía			Evapotranspiración		
	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total
	[mm]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[m^3/s]	[%]	[mm]	[m^3/s]	[%]
Abr	0,4	4,7	1%	0,12	1,53	0%	2,4	31,1	9%
May	0,5	6,7	3%	0,13	1,56	1%	1,2	15,1	14%
Jun	1,0	12,7	7%	0,12	1,54	1%	1,3	16,3	19%
Jul	0,7	9,0	10%	0,12	1,43	2%	0,9	11,3	22%
Ago	0,6	7,7	12%	0,11	1,31	2%	0,6	7,0	24%
Sept	0,1	1,7	13%	0,09	1,17	3%	0,3	3,5	25%
Oct	0,0	0,1	13%	0,09	1,06	3%	0,0	0,2	25%
Nov	0,4	4,9	14%	0,08	1,05	3%	0,2	2,2	26%
Dic	1,6	19,3	20%	0,09	1,15	4%	0,8	9,5	29%
Ene	8,9	109,0	54%	0,17	2,08	4%	4,8	59,2	47%
Feb	7,4	101,4	82%	0,16	2,13	5%	6,1	82,9	70%
Mar	4,9	60,2	100%	0,15	1,90	5%	5,7	70,1	91%

La fracción de área cubierta por nieve se muestra en la Figura 4.4, observándose que no supera el 10% de la cuenca del río Loa, de acuerdo a los productos satelitales MYD10 y MOD10, y los resultados del modelo VIC.

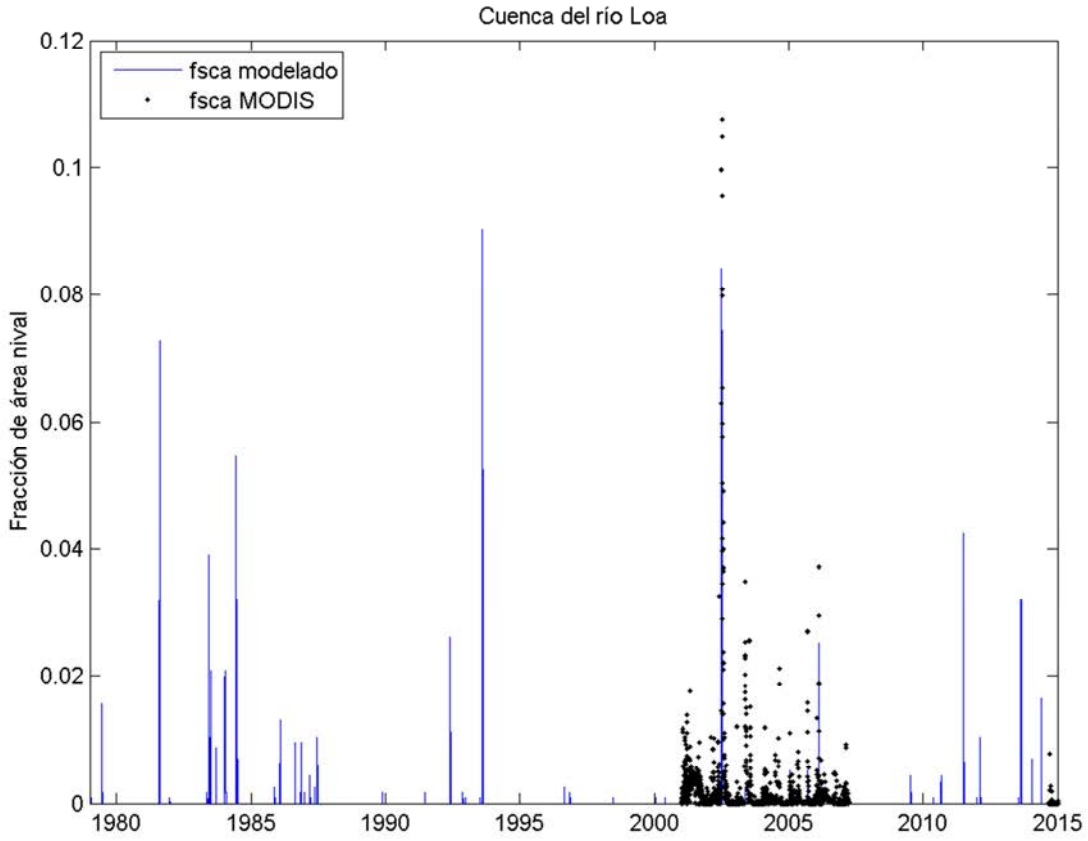


Figura 4.4: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Loa.

4.2.2 Cuenca del Río Choapa

La distribución espacial media anual de las forzantes meteorológicas para la cuenca del río Choapa se muestran en la Figura 4.5 y Figura 4.6.

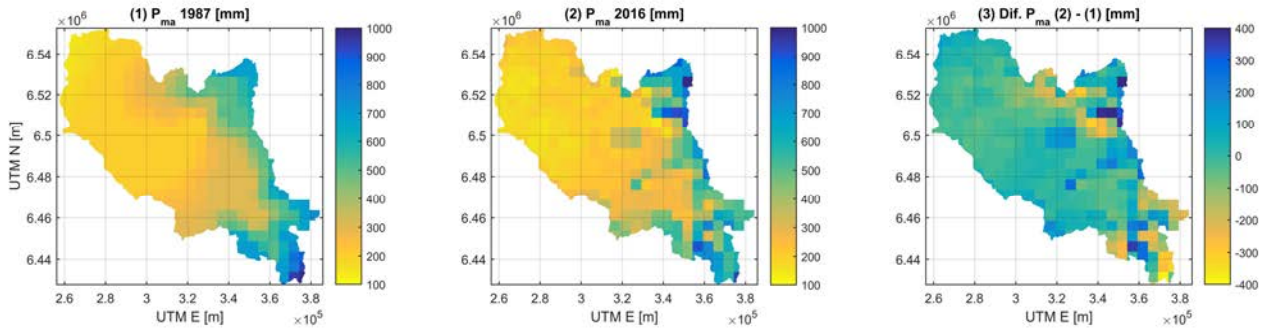


Figura 4.5: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Choapa.

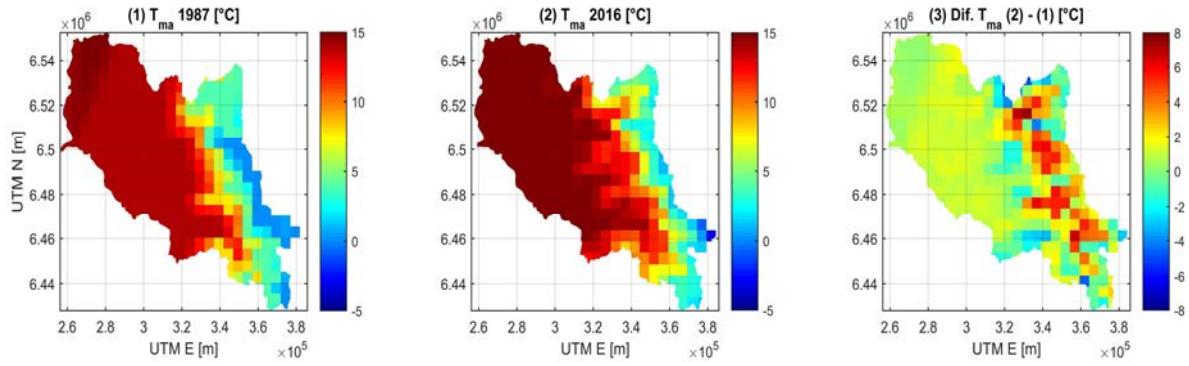
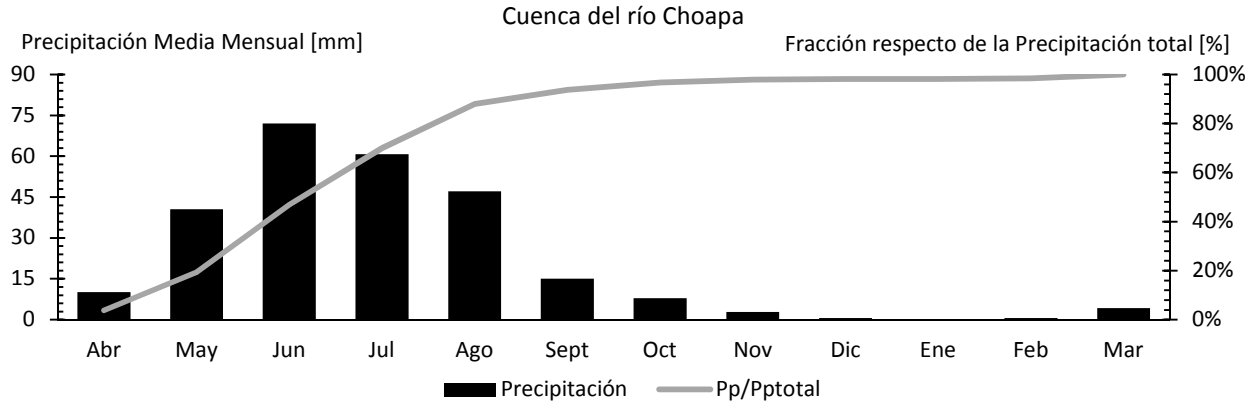
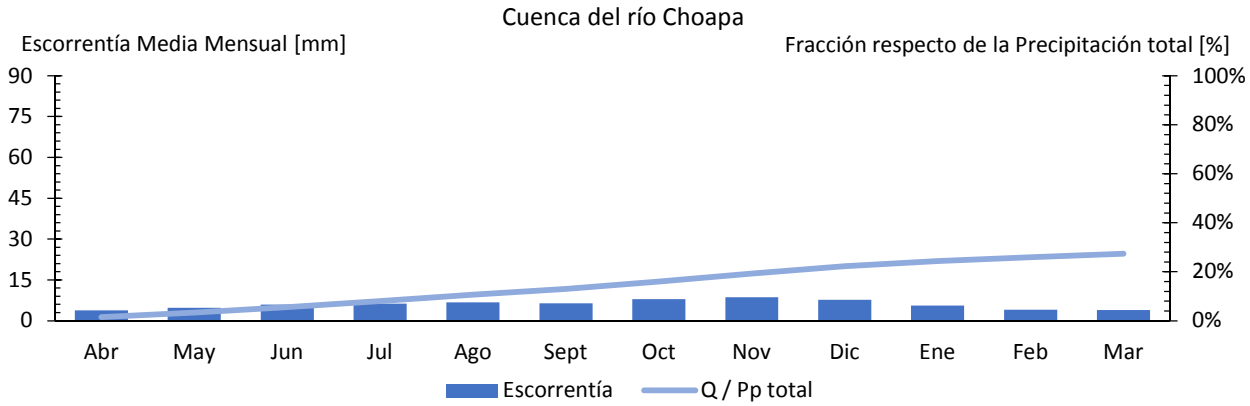


Figura 4.6: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Choapa.

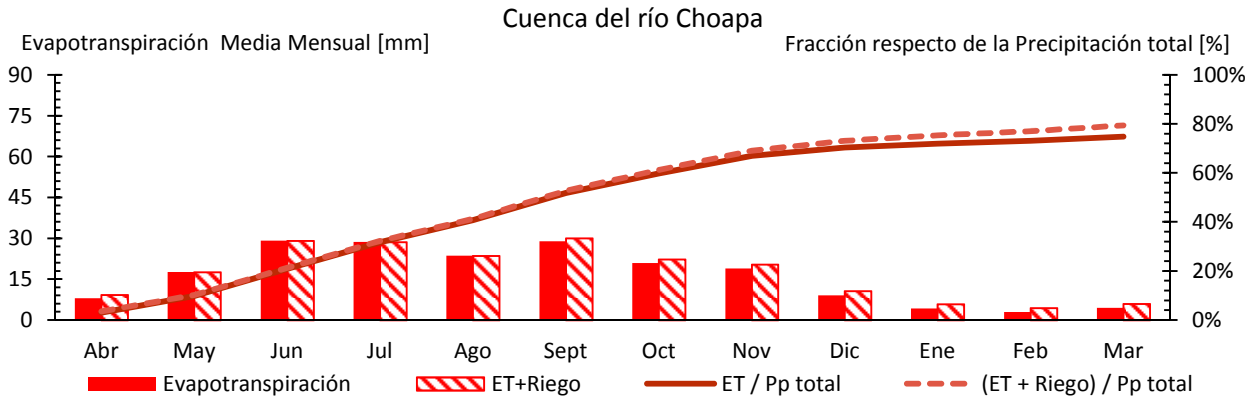
En las cuencas de la zona centro-norte del país la influencia del riego es importante y afecta los flujos evapotranspirativos hacia la atmósfera. En la Figura 4.7 se muestra la curva de variación estacional para la precipitación, escorrentía y evapotranspiración. Se incluye, además la influencia del riego, lo que aumenta la evapotranspiración. Se aprecia la influencia del clima mediterráneo, lo que provoca mayores montos de precipitación en los meses de invierno. La precipitación media anual alcanza los 262 mm/año. La evapotranspiración, que representa el 75% de la precipitación, asciende a 196 mm/año en régimen natural, mientras que con riego aumenta a 207,8 mm/año. Por otra parte, la escorrentía es cercana a 72 mm/año. Los resultados del modelo VIC para la cuenca del río Choapa que se presentan en la Figura 4.7 también se muestran en la Tabla 4.2.



(a) Distribución mensual de la precipitación promediada sobre la cuenca



(b) Distribución mensual de la escorrentía promediada sobre la cuenca



(c) Distribución mensual de la evapotranspiración promediada sobre la cuenca

Figura 4.7: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Choapa. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

Tabla 4.2: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Choapa. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015.

Mes	Precipitación			Escorrentía			Evapotranspiración			ET + Riego		
	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total
	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]
Abr	10,1	30,3	4%	3,8	11,6	1%	7,9	23,9	3%	9,2	27,8	4%
May	40,6	118,3	19%	4,8	14,0	3%	17,6	51,2	10%	17,6	51,2	10%
Jun	72,0	216,8	47%	6,0	17,9	6%	29,1	87,5	21%	29,1	87,5	21%
Jul	60,8	177,0	70%	6,3	18,5	8%	28,6	83,3	32%	28,6	83,3	32%
Ago	47,2	137,4	88%	6,8	19,8	11%	23,6	68,8	41%	23,6	68,8	41%
Sept	15,1	45,5	94%	6,4	19,1	13%	28,9	87,0	52%	30,1	90,5	53%
Oct	7,9	23,0	97%	7,9	23,0	16%	20,8	60,7	60%	22,3	64,9	61%
Nov	2,9	8,7	98%	8,6	25,9	19%	18,9	56,8	67%	20,4	61,4	69%
Dic	0,7	1,9	98%	7,7	22,3	22%	9,0	26,3	70%	10,7	31,2	73%
Ene	0,1	0,4	98%	5,6	16,4	24%	4,2	12,1	72%	5,9	17,1	75%
Feb	0,6	1,8	98%	4,1	13,1	26%	2,9	9,5	73%	4,4	14,3	77%
Mar	4,2	12,2	100%	3,9	11,4	27%	4,4	12,9	75%	6,0	17,4	79%

La fracción de área cubierta por nieve se muestra en la Figura 4.4, observándose que no supera el 40% de la cuenca del río Choapa, de acuerdo a los productos satelitales MYD10 y MOD10, y los resultados del modelo VIC.

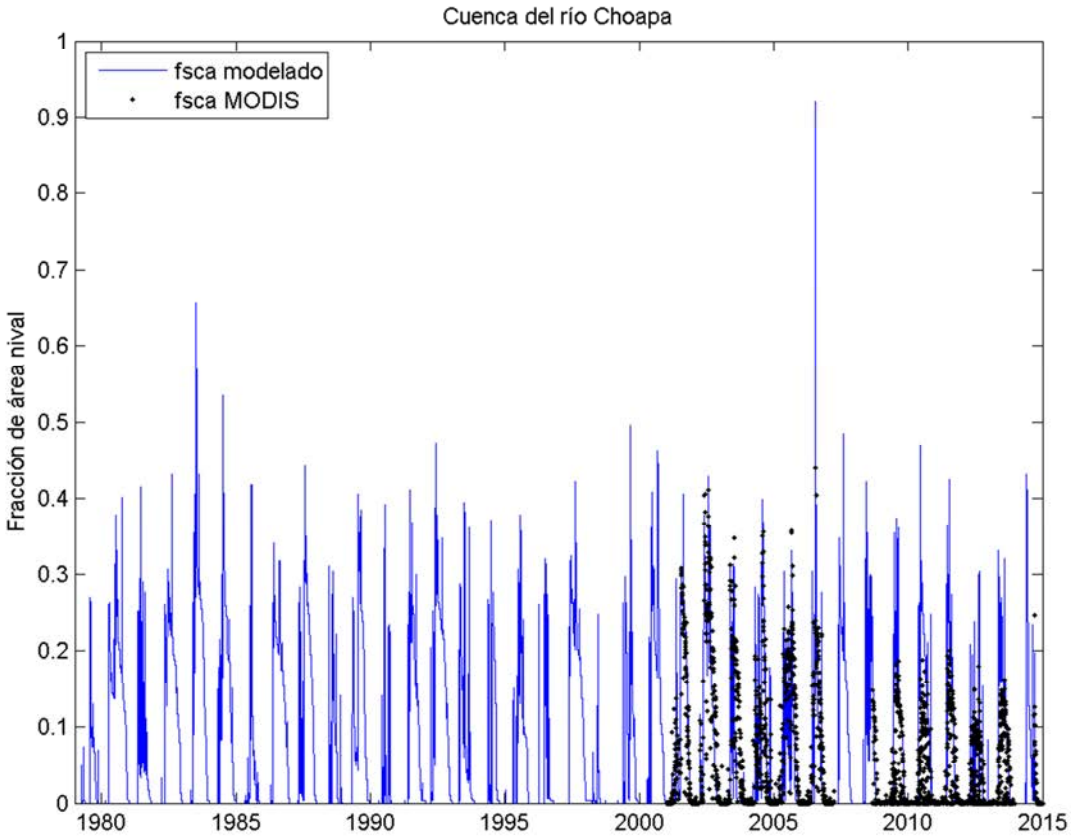


Figura 4.8: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Choapa.

4.2.3 Cuenca del Río Maipo

La distribución espacial media anual de las forzantes meteorológicas para la cuenca del río Maipo se muestran en la Figura 4.9 y Figura 4.10.

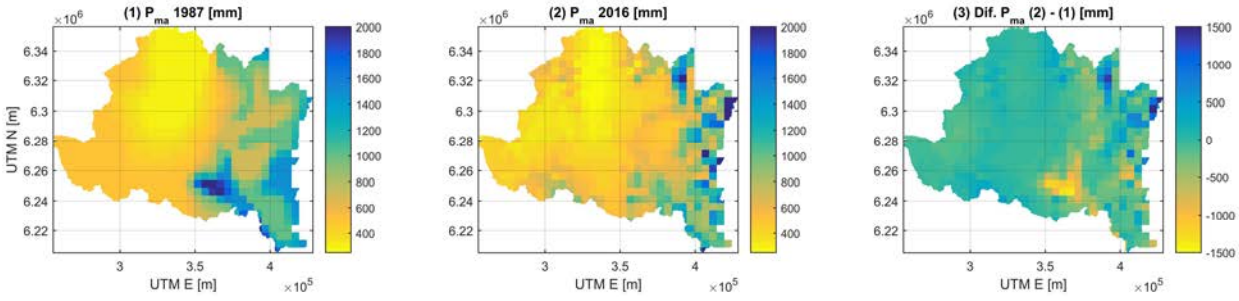


Figura 4.9: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Maipo.

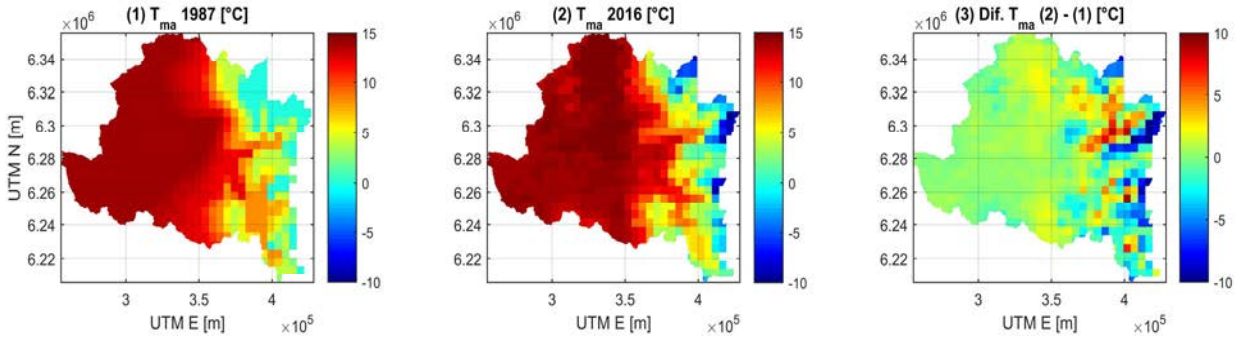
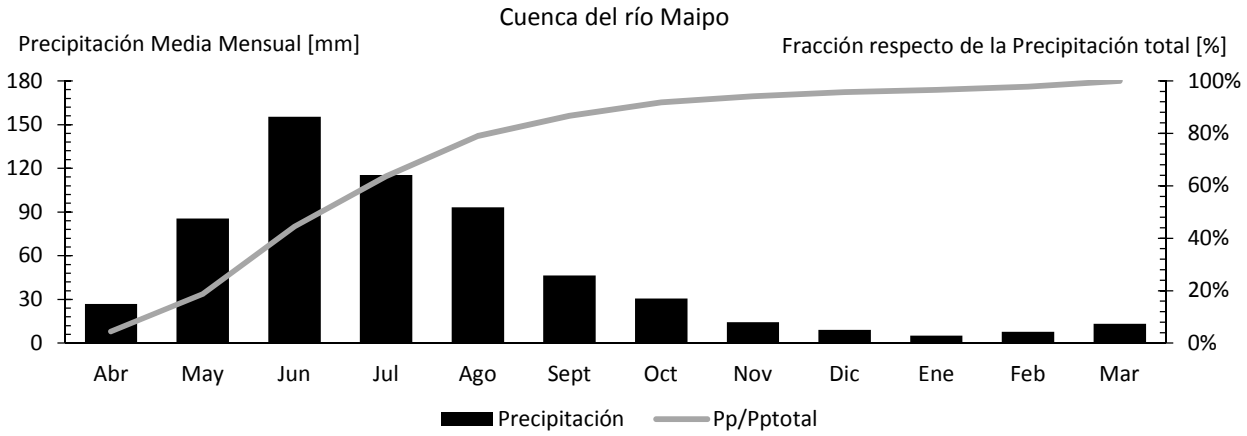
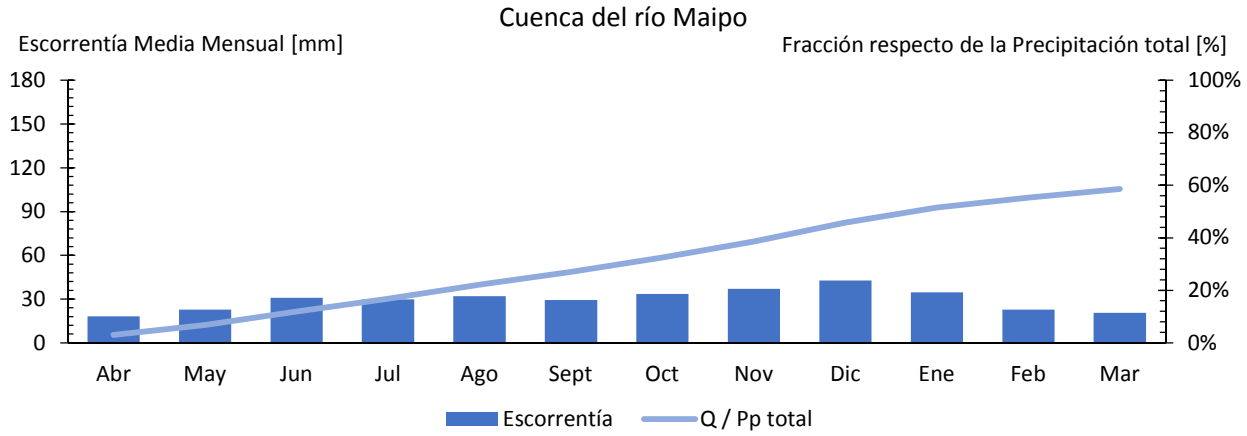


Figura 4.10: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Maipo.

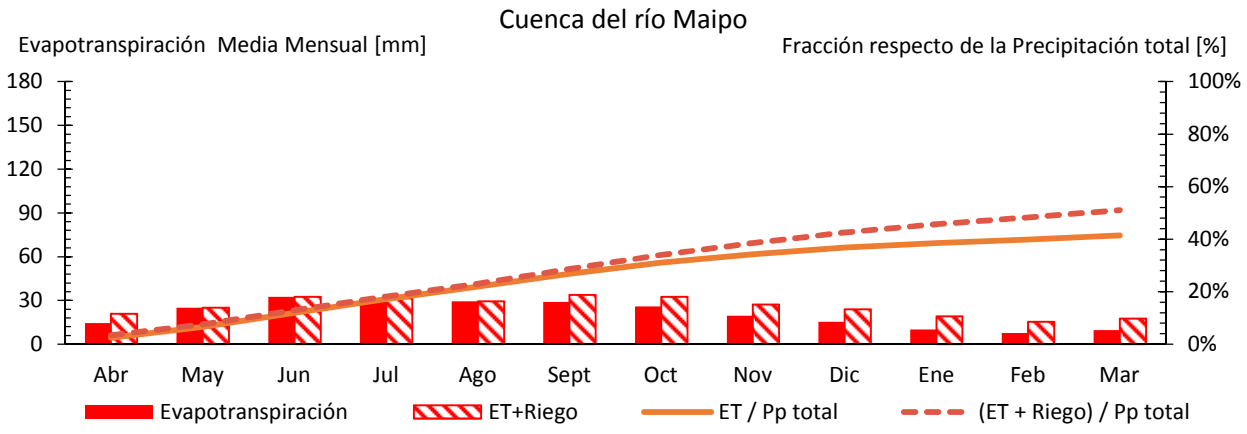
En la cuenca del río Maipo la precipitación media anual alcanza cerca de 603 mm/año, siendo el 59% para la generación de escorrentía y 41% para la evapotranspiración natural. La evapotranspiración natural, que es cercana a 250 mm/año, aumenta a 308 mm/año si se incluye el riego en el análisis. La escorrentía, por otra parte, es de 453 mm/año. En la Figura 4.11 se muestra la distribución mensual de estas variables. La escorrentía y la evapotranspiración se reparten de manera igual para el período de invierno y se separan a medida que aumentan la temperatura, provocando el deshielo de la nieve acumulada en la cordillera. Producto del riego, en los meses de producción agrícola la evapotranspiración se duplica en comparación con las condiciones de régimen natural.



(a) Distribución mensual de la precipitación promediada sobre la cuenca



(b) Distribución mensual de la escorrentía promediada sobre la cuenca



(c) Distribución mensual de la evapotranspiración promediada sobre la cuenca

Figura 4.11: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Maipo. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

El detalle con los valores presentados en la Figura 4.11 se muestra en la Tabla 4.3, donde se incluye la influencia del riego. La escorrentía y la evapotranspiración se encuentran en régimen natural.

Tabla 4.3: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Maipo. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015.

	Precipitación			Escorrentía			Evapotranspiración			ET + Riego		
	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total
Mes	**[mm]**	**[m3/s]**	**[%]**	**[mm]**	**[m3/s]**	**[%]**	**[mm]**	**[m3/s]**	**[%]**	**[mm]**	**[m3/s]**	**[%]**
Abr	27,0	154,0	4%	18,1	103,5	3%	14,6	83,1	2%	20,8	118,7	3%
May	85,6	473,1	19%	22,7	125,7	7%	25,0	138,2	7%	25,0	138,2	8%
Jun	155,5	887,9	44%	31,0	176,7	12%	32,4	184,8	12%	32,4	184,8	13%
Jul	115,5	638,2	64%	29,7	164,0	17%	31,5	173,9	17%	31,5	173,9	18%
Ago	93,2	514,9	79%	31,9	176,3	22%	29,3	162,0	22%	29,3	162,0	23%
Sept	46,5	265,3	87%	29,3	167,6	27%	28,9	164,9	27%	33,8	193,0	29%
Oct	30,5	168,8	92%	33,5	185,1	33%	25,8	142,6	31%	32,4	179,1	34%
Nov	14,4	82,0	94%	36,9	210,8	39%	19,5	111,2	34%	27,2	155,1	39%
Dic	9,1	50,1	96%	42,8	236,3	46%	15,4	85,0	37%	24,0	132,6	42%
Ene	5,1	28,2	97%	34,6	191,2	51%	10,1	56,0	39%	19,0	105,2	46%
Feb	7,7	47,3	98%	22,8	139,3	55%	7,7	47,1	40%	15,4	94,5	48%
Mar	13,3	73,3	100%	20,5	113,1	59%	9,7	53,5	41%	17,5	96,9	51%

Una fracción de aproximadamente el 40% de la superficie de la cuenca del río Maipo recibe precipitación en forma de nieve cada año, según se indica en la Figura 4.12. También se aprecia que el modelo VIC representa fielmente no solo el área cubierta por nieve, sino también la acumulación y tasa de retroceso de área nival, lo que indica que los procesos de acumulación y derretimiento son simulados correctamente por VIC a la escala de análisis.

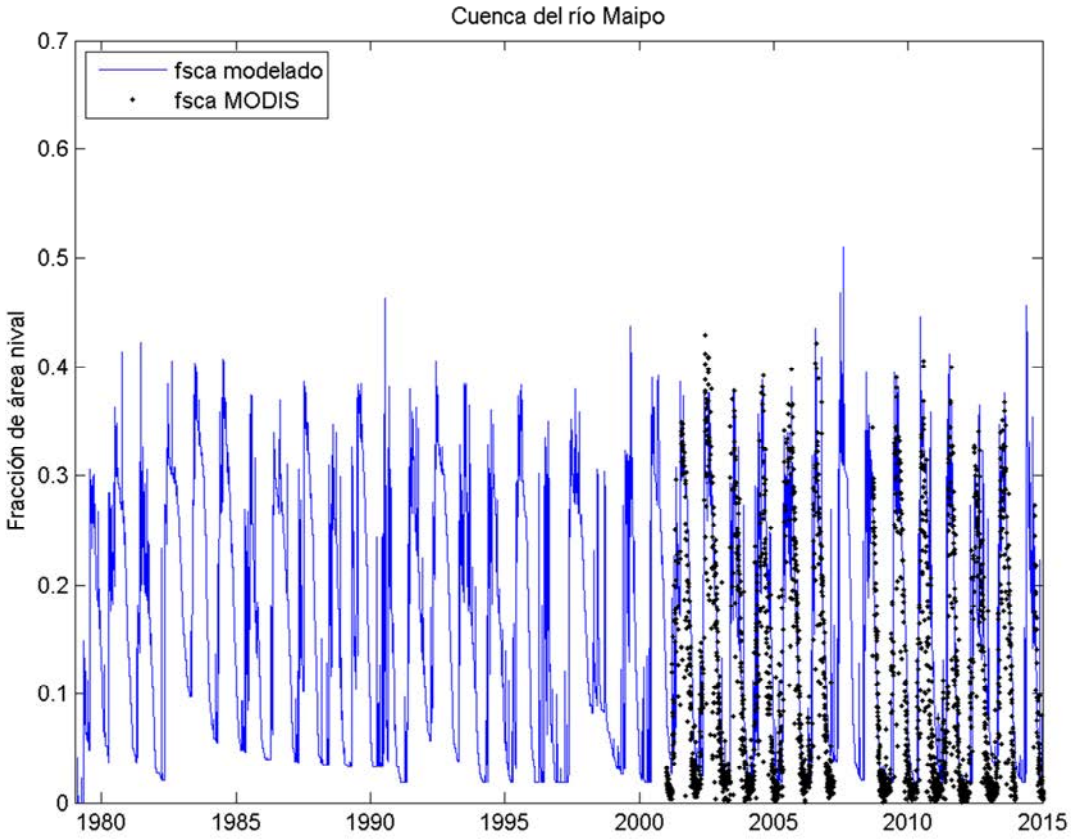


Figura 4.12: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Maipo.

4.2.4 Cuenca del Río Imperial

La distribución espacial media anual de las forzantes meteorológicas para la cuenca del río Imperial se muestran en la Figura 4.13 y Figura 4.14.

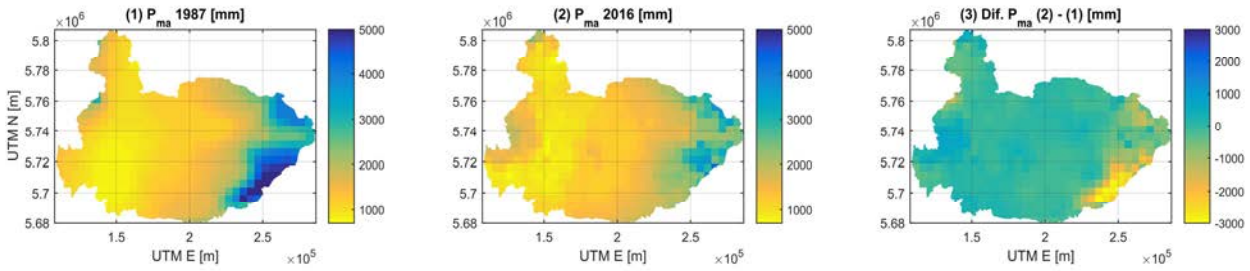


Figura 4.13: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Imperial.

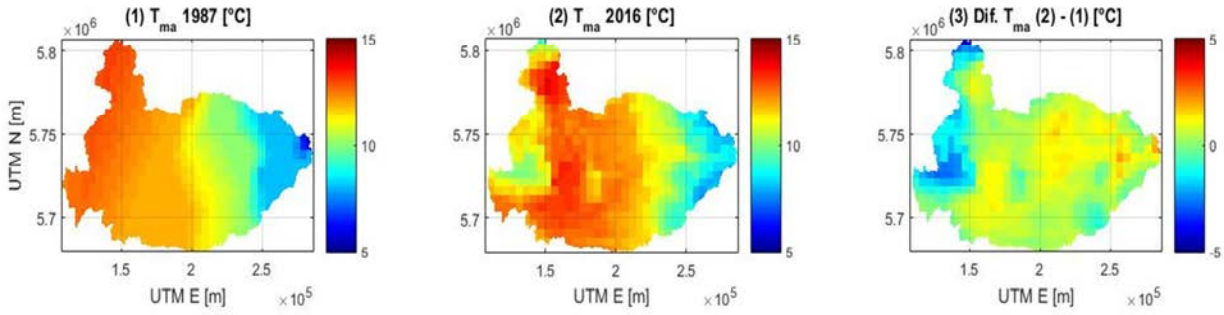
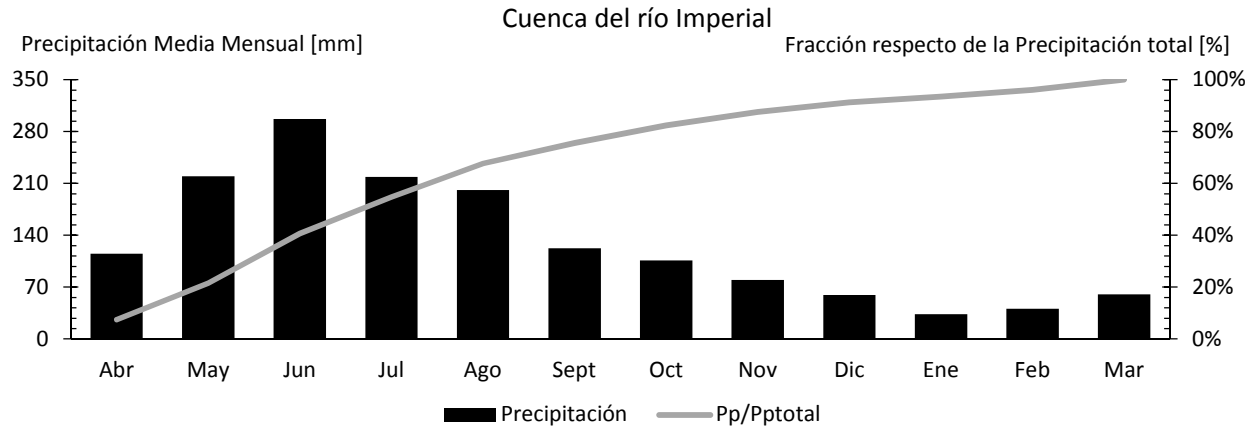
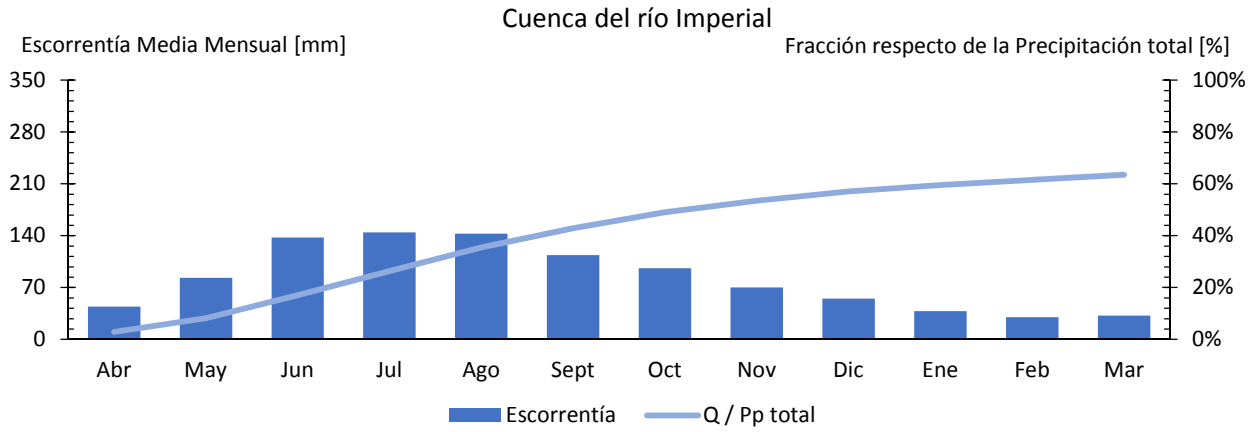


Figura 4.14: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Imperial.

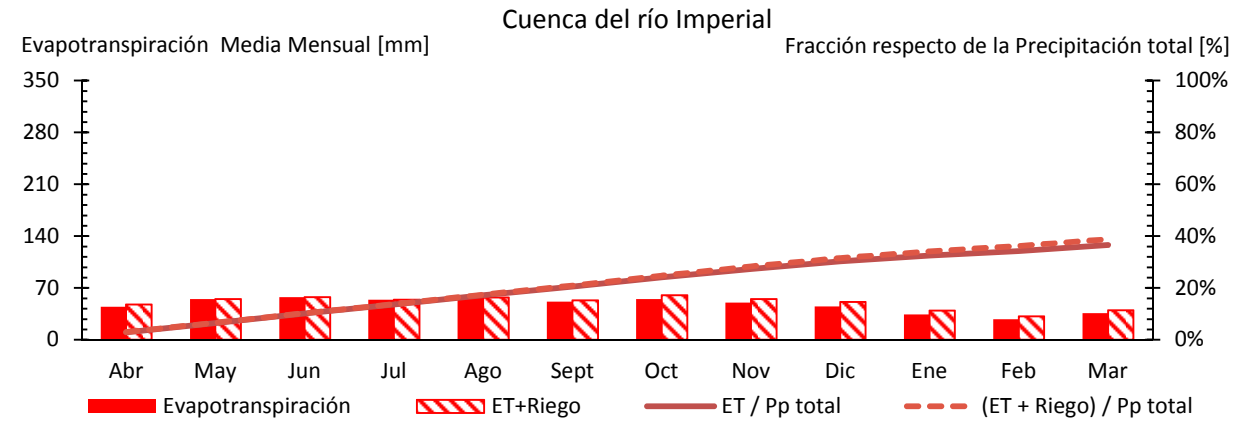
La cuenca del río Imperial muestra un marcado régimen pluvial debido a que la mayor parte de la escorrentía se produce en los meses de invierno, lo cual coincide con los meses de mayor precipitación, según se indica en la Figura 4.15. La precipitación bordea los 1.554 mm/año, con montos mayores en invierno, mientras que la escorrentía y la evapotranspiración alcanzan los 986 y 569 mm/año, respectivamente. Por otra parte, el riego, asciende a 34 mm/año aproximadamente. El factor de escorrentía de la cuenca es cercano al 64%.



(a) Distribución mensual de la precipitación promediada sobre la cuenca



(b) Distribución mensual de la escorrentía promediada sobre la cuenca



(c) Distribución mensual de la evapotranspiración promediada sobre la cuenca

Figura 4.15: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Imperial. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

Los valores presentados en la Figura 4.15 se detallan en la Tabla 4.4 donde se incluyen los valores en milímetros y en unidades de caudal, además de incorporar el riego.

Tabla 4.4: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenda del río Imperial. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015.

Mes	Precipitación			Escorrentía			Evapotranspiración			ET + Riego		
	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total
	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]
Abr	115,2	547,4	7%	44,1	209,5	3%	44,5	211,6	3%	47,5	225,8	3%
May	219,6	1.009,8	22%	83,1	381,9	8%	54,9	252,6	6%	54,9	252,6	7%
Jun	297,0	1.410,8	41%	137,6	653,8	17%	57,6	273,5	10%	57,6	273,5	10%
Jul	218,8	1.006,1	55%	144,6	664,8	26%	54,1	248,5	14%	54,1	248,5	14%
Ago	201,3	925,3	68%	142,7	656,0	36%	57,1	262,5	17%	57,1	262,5	17%
Sept	122,5	581,9	76%	113,8	540,6	43%	51,6	245,1	21%	53,2	252,9	21%
Oct	105,9	486,9	82%	95,9	441,0	49%	55,2	253,6	24%	60,0	276,0	25%
Nov	79,7	378,8	88%	70,3	334,2	54%	50,2	238,3	27%	55,1	261,9	28%
Dic	59,2	272,0	91%	55,1	253,3	57%	45,2	207,6	30%	51,2	235,2	32%
Ene	33,6	154,6	94%	38,2	175,6	60%	34,2	157,3	32%	39,5	181,8	34%
Feb	40,8	207,5	96%	29,9	152,1	61%	28,0	142,6	34%	31,9	162,3	36%
Mar	60,2	276,8	100%	32,2	148,0	64%	36,0	165,5	37%	40,1	184,1	39%

En la cuenca del río Imperial, menos del 15% de la cuenca recibe precipitación en forma de nieve, según se indica en la Figura 4.16. Para los años donde existe información del producto satelital MOD10 y MYD10, el modelo VIC representa adecuadamente la cobertura nival. A pesar de que las temperaturas son más bajas que en las cuencas de Choapa y Maipo, la baja elevación de la cordillera de los Andes en esta latitud incide en que toda la cuenca reciba precipitación en forma líquida, lo que provoca un marcado régimen pluvial en los caudales.

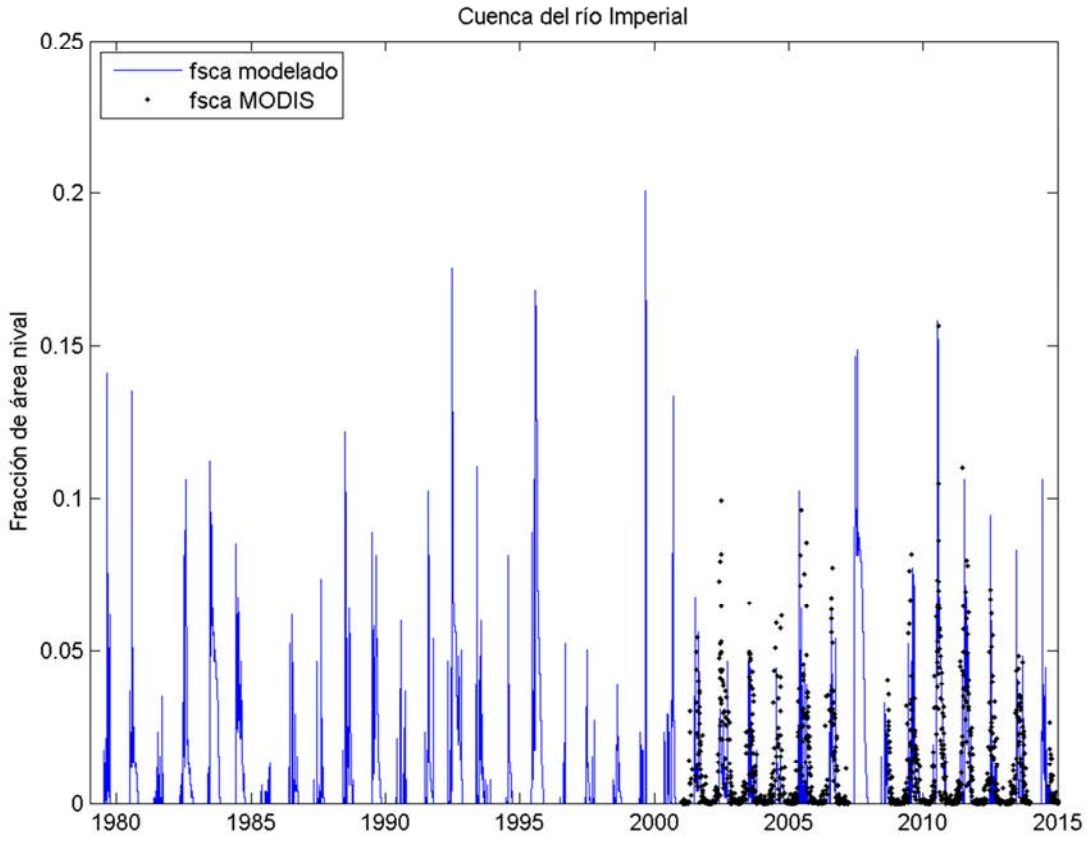


Figura 4.16: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Imperial.

4.2.5 Cuenca del Río Aysén

La distribución espacial media anual de las forzantes meteorológicas para la cuenca del río Aysén se muestran en la Figura 4.17 y Figura 4.18Figura 4.14.

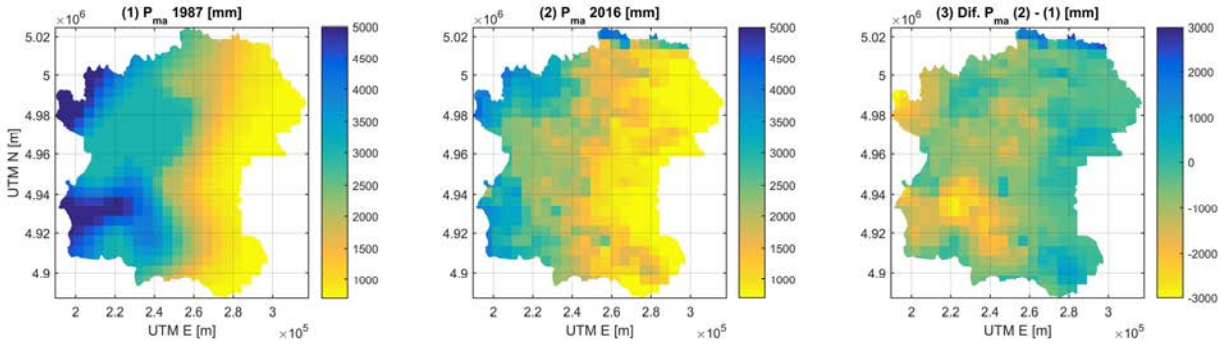


Figura 4.17: Precipitación media anual y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Aysén.

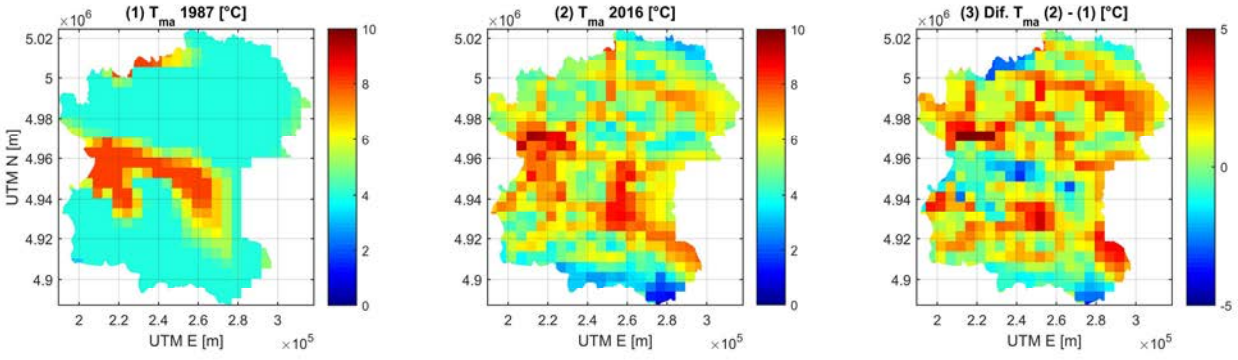
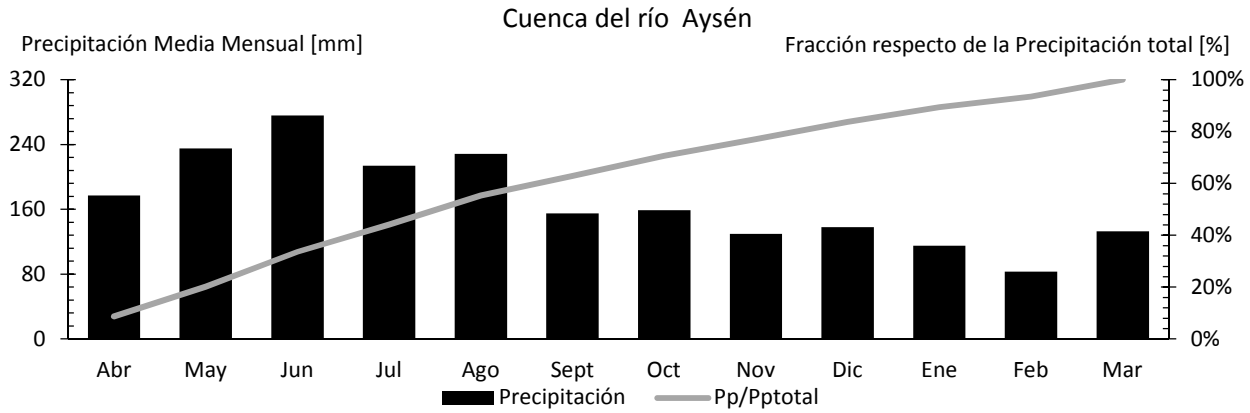
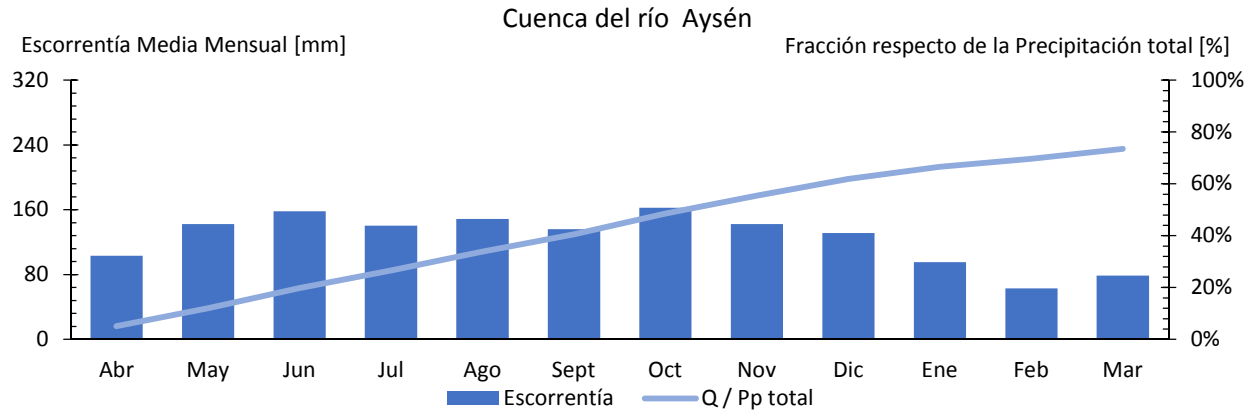


Figura 4.18: Temperatura media anual promedio y diferencia entre las climatologías medias anuales según balance hídrico del año 1987 y la versión actual (beta) para la cuenca del río Aysén.

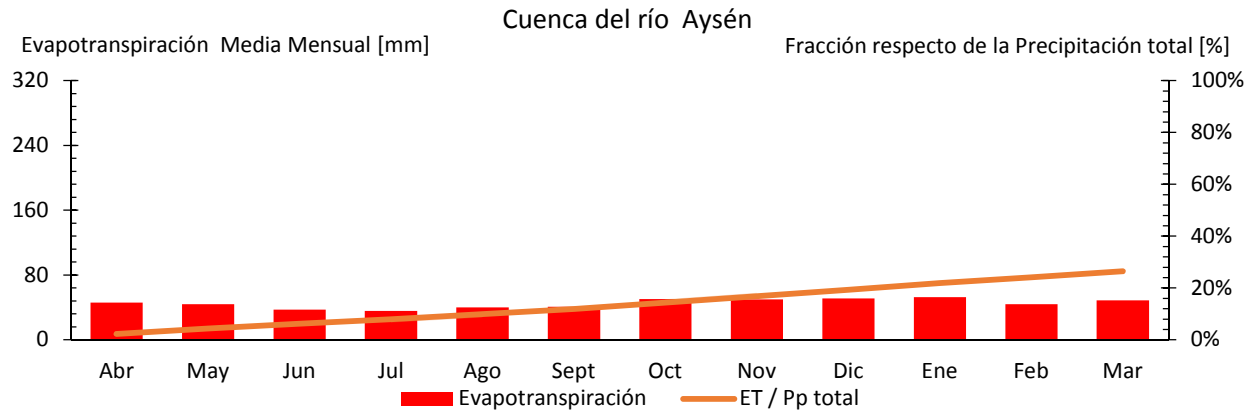
En la cuenca del río Aysén la precipitación ocurre durante todo el año, siendo más importantes las que caen en invierno (ver Figura 4.19). La magnitud total de agua caída en la cuenca es cercano 2.044 mm/año, la que se divide en un 74% para escorrentía y 26% para evapotranspiración, siendo las magnitudes de ambas variables de 1.502 y 542 mm/año, respectivamente.



(a) Distribución mensual de la precipitación promediada sobre la cuenca



(b) Distribución mensual de la escorrentía promediada sobre la cuenca



(c) Distribución mensual de la evapotranspiración promediada sobre la cuenca

Figura 4.19: Curva de variación estacional y fracción acumulada promedio durante el periodo 1985/1986 – 2014/2015 para la precipitación (panel a), escorrentía (panel b) y evapotranspiración (panel c) en la cuenca del río Aysén. Los valores corresponden a las salidas del modelo VIC.

El detalle de la información presente en la Figura 4.19 se muestra en la Tabla 4.5, donde los valores corresponden a la cuenca en régimen natural.

Tabla 4.5: Valores de precipitación, escorrentía y evapotranspiración para la cuenca del río Aysén. Resultados extraídos del modelo VIC para el período 1985/1986 - 2014/2015.

Mes	Precipitación			Escorrentía			Evapotranspiración		
	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total	Magnitud		% Pp total
	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]	[mm]	[m3/s]	[%]
Abr	177,0	821,1	9%	103,25	478,9	5%	46,2	214,1	2%
May	235,2	1.055,8	20%	142,54	639,	12%	43,8	196,7	4%
Jun	276,0	1.280,2	34%	158,17	733,60	20%	37,4	173,4	6%
Jul	213,7	959,3	44%	140,33	629,87	27%	35,8	160,9	8%
Ago	228,4	1.025,2	55%	148,53	666,69	34%	40,2	180,3	10%
Sept	155,0	719,0	63%	136,06	631,08	41%	40,6	188,5	12%
Oct	158,9	713,2	71%	162,56	729,63	49%	50,4	226,3	14%
Nov	129,9	602,4	77%	142,28	659,93	55%	50,0	232,0	17%
Dic	138,2	620,4	84%	131,24	589,09	62%	51,2	230,0	19%
Ene	115,1	516,7	89%	95,23	427,45	67%	52,5	235,8	22%
Feb	83,0	412,4	93%	62,85	312,34	70%	44,0	218,8	24%
Mar	133,1	597,3	100%	78,80	353,67	73%	48,6	218,4	26%

La cobertura del área nival para la cuenca del río Aysén no se representa adecuadamente mediante el modelo VIC, dado que sobredimensiona el área nival para cada año (ver Figura 4.20). Esto se debe a que el exceso de nubosidad y la alta densidad forestal en la zona costera de la cuenca hacen que los productos satelitales sean poco confiables.

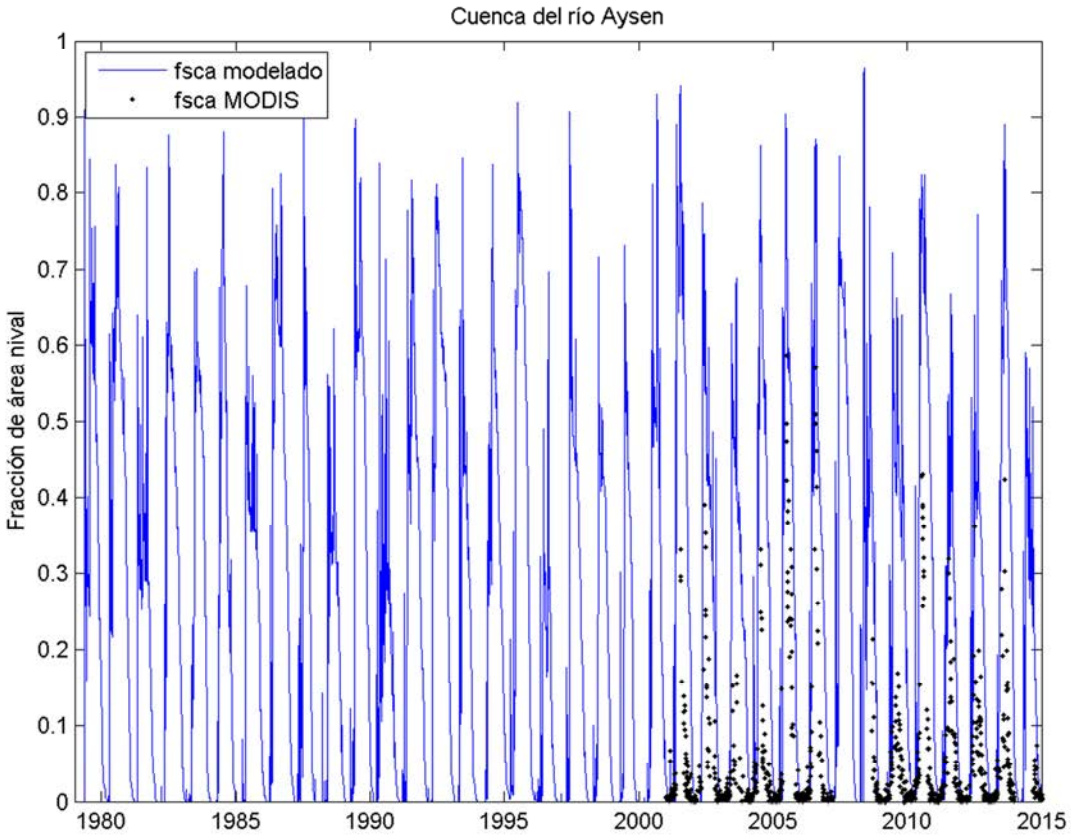


Figura 4.20: Fracción de área cubierta por nieve (fsca en inglés) para el modelo VIC (en azul) y el producto MOD10/MYD10 de los satélites Terra y Aqua, donde se muestran los días con nubosidades que cubren menos del 40% de la cuenca. Datos para la cuenca del río Aysén.

5 COMENTARIOS FINALES

La metodología propuesta para la estimación del balance hídrico nacional permite considerar la variación espacial y temporal de forzantes meteorológicas, tales como precipitación, temperatura y velocidad del viento.

El modelo VIC propuesto en la metodología para la estimación del balance hídrico, al ser un modelo con base físico, permite obtener más resultados que los obtenidos en el balance del año 1987. Esto incluye variables de estado tales como equivalente de agua en nieve y humedad del suelo), y variables de flujo, tales como flujos evapotranspirativos, así como su variación estacional. En cuanto a desempeño del modelo, éste fue adecuado, entregando valores simulados de escurrimiento similares a los observados. La única excepción a esto fue la cuenca del río Loa. Por ejemplo, en la cuenca del río Loa en Lequena, se modela un 86% más de escorrentía superficial respecto a la registrada en la estación fluviométrica. Sin embargo, si se consideran las cuencas del río Salado en Sifón Ayquina y la de San Pedro en Canaleta Parshall N°2, el modelo sobrestima solo un 6% y subestima un 5%, respectivamente.

Respecto a la nieve, en todas las cuencas, salvo la de Aysén, el proceso de incremento y retroceso de área nival (fsca) se encuentra bien representado. Particularmente, en las cuencas de los ríos Choapa y Maipo, donde la acumulación de nieve es más importante debido a la topografía de la Cordillera de los Andes y donde todos los años la cobertura máxima es cercana al 40% (para ambas cuencas), lo que concuerda con el valor estimado según MODIS. En términos de SWE, en Choapa se subestima el volumen acumulado de SWE en la cuenca comparado con Cortés et al. (2016), no obstante, el caudal modelado no difiere más allá del 2% en la cuenca de Choapa en Cuncumén. En el Maipo, los volúmenes de SWE son más cercanos a los estimados por Cortés et al. (2016), Del mismo modo, las estaciones Barros Negros, Estero Plomo y Las Arenas arrojan resultados satisfactorios si se considera que se está comparando una medición puntual (en el tiempo y el espacio, con un pixel que incluye, en la realidad, una alta heterogeneidad en la distribución espacial de SWE.

Un aspecto importante en la metodología planteada para la estimación del balance es la calidad de los datos de las forzantes meteorológicas. Por ejemplo, una fuente de incertidumbre importante es la escasez de mediciones de precipitación y temperatura en zonas de alta montaña. A pesar de que VIC es un modelo lo suficientemente flexible como para compensar errores en las forzantes meteorológicas por medio de la calibración de sus parámetros, sin embargo, no es posible corregir una estacionalidad errónea o sesgos muy grandes en la precipitación. Además, una limitación importante en el proceso de calibración es el uso de series de caudales medios mensuales en la calibración, limitando la cantidad de información que se puede contrastar entre los datos y el modelo.

Respecto a la evapotranspiración, el modelo VIC reproduce bien los valores de ETo en los periodos de mayor intensidad, pero sobreestima los valores en invierno. En relación a la evapotranspiración potencial, VIC y MODIS presentan resultados distintos. El producto MODIS tiende a generar valores muy altos de ETP, mientras que VIC es más acotado. Además, MODIS entrega resultados mucho más homogéneos espacialmente que VIC para los pixeles de las cuencas. El modelo VIC entrega mejores resultados en términos de la variabilidad espacial, pero a simple vista, estaría generando valores de ETP relativamente bajos. Esto puede ser fruto, al menos en las zonas

agrícolas, de los tipos de cobertura vegetal seleccionadas como representativas. Se recomienda una revisión a la parametrización de estas componentes para mejorar los resultados. En relación a la evapotranspiración real, los resultados son difíciles de juzgar. En general, los resultados de ET parecieran estar subestimados por el modelo.

En general, se obtuvieron discrepancias importantes entre los resultados del balance hídrico presentado en este informe y los resultados del balance hídrico publicado en 1987. Por ejemplo, las diferencias de precipitación media anual entre ambos productos superan los 300 mm en algunas celdas de las cuencas de Loa y Choapa, mientras que hacia el sur las discrepancias son cercanas a los 3000 mm en algunos sitios. Para el caso de temperatura media anual, también se observaron diferencias máximas cercanas o superiores a 5° C en las cinco cuencas piloto, destacando (en el caso de la cuenca del río Aysén) una heterogeneidad espacial considerable en las diferencias entre los dos productos. Por otra parte, también se observaron diferencias importantes en los flujos de evapotranspiración. Las diferencias se deben, por una parte, a la diferencia existente en la información meteorológica de precipitación y temperatura, pero por otra parte, están fuertemente relacionadas al método de estimación utilizado, ya que para el balance de 1987 se utilizó el método de Turc para el cálculo de isolíneas de evapotranspiración anual acumulada. Este método es un ajuste empírico para la evapotranspiración real anual que solo considera la temperatura y precipitación promedio anual, por lo que carece de una correcta representación del fenómeno, ya que no considera la demanda evapotranspirativa derivada de la radiación solar ni del déficit de presión de vapor desde la atmósfera, ni tampoco la influencia de la cobertura vegetal o tipo de suelo, así como tampoco las variaciones estacionales de las condiciones hidrometeorológicas.

Sin embargo, es importante destacar que los resultados de este estudio no son directamente comparables con el balance hídrico de 1987 debido a diferencias metodológicas. Éstas incluyen, discrepancias en el período de análisis considerado, así como también diferencias en las herramientas tecnológicas de apoyo (imágenes satelitales, SIG, modelos, etc) que no estaban disponibles en la década de los 80's.

En el caso de la meteorología base del estudio de actualización, la metodología propuesta está basada en mediciones *in situ*, combinando modelos estadísticos con métodos de interpolación. Lo anterior representa un avance importante con respecto al balance hídrico de 1987, ya que se evolucionó desde un enfoque que tiene una fuerte rigidez e invariabilidad en sus resultados, a un enfoque en línea con metodologías que permiten la estimación de incertidumbre. Como resultado de esto se obtuvo una distribución espacio-temporal de variables meteorológicas más realista y consistente con la heterogeneidad geográfica de Chile continental.

En cuando a la caracterización hidrológica, el uso de un modelo con motivación física permitió obtener mucha más información que el balance hídrico de 1987, incluyendo variables de estado (por ejemplo, equivalente de agua en nieve y humedad del suelo) y variables de flujo (por ejemplo, flujos evapotranspirativos, recarga a los acuíferos), así como su variación estacional. Finalmente, la inclusión de escenarios de cambio climático (con estimaciones de cambio hidrológico) constituye una fuente de información imprescindible para futuras decisiones relacionadas con la administración y planificación de recursos hídricos en cuencas chilenas.

6 REFERENCIAS

Carreau, J. and Vrac, M. (2011) Stochastic downscaling of precipitation with neural network conditional mixture models. *Water Resources Research*, *47*(10).

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P. and Bechtold, P. (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, *137*(656), pp.553-597.

DeWalle, D.R. and Rango, A. (2008) Principles of Snow Hydrology. Cambridge University Press, Cambridge.

DGA (1983a) Balance hidrológico nacional regiones V, VI, VII y Metropolitana. Elaborado por: IPLA Ingenieros Consultores. Santiago. Chile.

DGA (1983b) Balance Hídrico Nacional. Regiones VIII, IX y X. Elaborado por: IPLA Ingenieros Consultores. Santiago. Chile.

DGA (1984a) Balance Hidrológico Nacional XI Región. Elaborado por: Ricardo Edwards. Ingenieros Consultores Asociados Ltda. Santiago. Chile.

DGA (1984b) Balance hidrológico nacional regiones III y IV. Elaborado por: IPLA Ingenieros Consultores. Santiago. Chile.

DGA (1985a) Balance hidrológico nacional Cuenca del Rio Itata. Elaborado por: Ricardo Edwards G., Ingenieros Consultores Asociados Ltda. Santiago. Chile.

DGA (1985b) Balance hidrológico nacional II región. Elaborado por: Ricardo Edwards G., Ingenieros Consultores Asociados Ltda. Santiago. Chile.

DGA (1987) Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

Kidson, J.W. and Thompson, C.S. (1998) A comparison of statistical and model-based downscaling techniques for estimating local climate variations. Journal of Climate, 11(4), pp.735-753.

Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P. and Frei, C. (2008) Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D21).

Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges (1994), A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, J. Geophys. Res., 99(D7), 14415–14428.

Mesinger, F., DeMago, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P.C., Ebisuzake, W., Jovic, D., Woolen, J., Rogers, E., Berbery, E.H. and Ek, M.B. (2006). *North American regional reanalysis. BAMS 87. doi: 10.1175*. BAMS-87-3-343.

Unesco (1982) Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur. Montevideo. Uruguay

Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M. (2002) SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, *17*(2), pp.145-157.

ANEXO 1. FICHAS DE ANTECEDENTES

<table>
<tr><td>Tipo de Información</td><td colspan="3">Estudio Licitado</td></tr>
<tr><td>Título</td><td colspan="3">Balance hidrológico nacional regiones V, VI, VII y metropolitana</td></tr>
<tr><td>Año</td><td>1983</td><td>Código ID</td><td>DGA_1</td></tr>
<tr><td>Autor</td><td colspan="3">Dirección General de Aguas</td></tr>
<tr><td>Elaborado por</td><td colspan="3">IPLA Ingenieros Consultores</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Ámbito Geográfico</td><td>Región</td><td>Provincia</td><td>Cuenca(s)</td></tr>
<tr><td>V Región de Valparaíso</td><td>Todas</td><td>Petorca
La Ligua
Costeras La Ligua – Aconcagua
Aconcagua</td></tr>
<tr><td>Región Metropolitana</td><td>Todas</td><td>Costeras Aconcagua – Maipo
Maipo</td></tr>
<tr><td>VI Región del Libertador Bernardo O’Higgins</td><td>Todas</td><td>Costeras Maipo – Rapel
Rapel
Costeras Rapel - Mataquito</td></tr>
<tr><td>VII Región del Maule</td><td>Todas</td><td>Mataquito
Costeras Mataquito y Maule
Maule
Costeras entre Maule e Itata</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Tipo de Antecedentes</td><td>Demanda y Usos de Agua</td><td>Calidad de Aguas</td><td>Otros</td></tr>
<tr><td>X</td><td>X</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="4">Objetivo(s) de la información</td></tr>
<tr><td colspan="4">Calcular los distintos componentes del Balance Hídrico para las cuencas antes señaladas para el periodo 1951/52 – 1980/1981</td></tr>
<tr><td colspan="4">Temática y resultados de interés</td></tr>
<tr><td colspan="4">1. Ecuación de balance
La ecuación de balance planteada considera lo siguiente:

$P + Q_{si} + Q_{ui} – ET - Q_{so} – Q_{uo} – \Delta S – \eta = 0$

Siendo:
P : Precipitación
Q_{si} : Caudal afluente superficial a la cuenca o cuerpo de agua
Q_{ui} : Caudal afluente subterráneo a la cuenca o cuerpo de agua</td></tr>
</table>

ET : Evaporación + Evapotranspiración
Q_{so} : Caudal efluente superficial
Q_{uo} : Caudal efluente subterráneo
ΔS : Variación del almacenamiento de agua en la cuenca o cuerpo de agua
ɳ : término residual de discrepancia, error de medición o estimación.

Para cálculos en áreas extensas y largos periodos de tiempo se utiliza a la formula simplificada:

$$(P)^* - (Q)^* = (ET)^* + \eta$$

Donde cada variable exceptuando el termino de discrepancia a partir de la nomenclatura ( )* corresponde al promedio espaciotemporal que corresponda.

2. Metodología general

Dado que el balance hídrico se realizó para un periodo de treinta años, la ecuación de balance finalmente se expresó como:

$$(P)^* + (Q_{si})^* - (ET)^* - (Q_{so})^* - \eta = 0$$

La metodología contempla aproximaciones sucesivas para cada variable de la ecuación de modo de minimizar el término de discrepancia.
Con la aplicación de esta metodología se consiguió obtener:

-Mapa de isoyetas anuales promedio para la probabilidad isoporcentual de 50% respecto del patrón de precipitaciones.
-Mapa de isotermas medias anuales
-Mapas de isolíneas de evaporación y evapotranspiración madias anuales
-Mapas de isolíneas de escorrentía y caudales específicos para probabilidades de excedencia de 20, 50, 80 y 95%

Las isolíneas dibujadas son las de 5, 10, 20, 50, 100-800 (100), 1000-1600 (200), 2000-3200 (400), 4000-5600 (800) y 8000 mm.
*(): Rango en el intervalo.

3. Análisis y homogenización de estadísticas

En este apartado se homogeneizaron los datos obtenidos de estudios realizados en cuencas que este estudio de balance considera. En otro caso se le aplica la metodología de manera íntegra.

Precipitación:

Se analizó la consistencia: cambio de ubicación, de instrumento o de observador. La consistencia de estos datos se verifico a partir de curvas doble acumuladas (CDA) a partir de la presencia de quiebres o desplazamientos paralelos.
El relleno de información faltante y ampliación de datos se utilizó dos métodos: uso de correlaciones con datos donde si existe información y uso de la pendiente de la CDA.

Temperatura:

Para la obtención de isotermas palanas se interpolaron linealmente valores entre estaciones y en altura se estimó el perfil térmico.

Evaporación:

Uso de registros de evaporímetros clase A existentes. Los valores de las isolíneas vienen corregios por un coeficiente de embalse igual a 0.7

Evapotranspiración real:

En superficies naturales se utilizó el método de Turc y la ley de peñuelas. En superficies regadas se utilizaron como referencias los estudios realizados por la CNR, los cuales a su vez utilizan mayoritariamente el método de Blaney-Criddle.

Fluviometría:

Escorrentía superficial, o mejor dicho caudal medido en estación hidrométrica. Las inconsistencias en este caso pueden deberse a errores en la determinación de curva de descarga, extracciones no consideradas aguas arriba, cambios de uso de suelo, cambios en la ubicación de la estación o en la recolección de datos. Se utilizó CDA para análisis de las consistencias, de modo de comparar todos los comportamientos de las estaciones en la cuenca, utilizándose correlaciones para la expansión de la información a partir de traspaso de información (estaciones cercanas y/o cuencas vecinas). Se obtuvieron así mapas de caudales específicos y de isolíneas de escorrentía.

4. Calculo balance hídrico

El cálculo de balance fue dividido en dos tipos, los que a su vez fueron divididos de la siguiente manera:

a) Cuencas con control fluviométrico a sus salidas
   a.1. Con antecedentes de R (escorrentía), P y ETR: En zonas planas se asume que la ETR = P –R. En zonas montañosas dadas la subestimación de P se utilizaron aproximaciones sucesivas.
   a.2. Con antecedentes de R y P: En este caso se hicieron estimaciones de temperatura de acuerdo al conocimiento que se tenía de la cuenca. A partir de esta estimación de obtuvo el valor aproximado de ETR.
   a.3. Solo con R: En este caso se estimó la temperatura con lo dicho en a.2, en base a lo mismo se estimó P y se procedió a calcular ETR.

b) Cuencas sin control fluviométrico a sus salidas
   b.1. Con antecedentes de P y ETR. Se utilizó el valor de R obtenido desde otras cuencas semejantes para realizar el contraste correspondiente.
   b.2. Solo con antecedentes de P. Se estimó temperatura y ETR solo en el caso en que fuera posible, o se asumió una relación directa entre la P y R.

c) Cuencas sin antecedentes de R, P y ETR: Se utilizaron cuencas análogas para llegar a resultados representativos en función de aspectos fisiográficos, hidrográficos y morfométricos.

Para las cuencas con grandes superficies cubiertas de agua, se consideró la extensión de estas áreas en el cálculo final, y su permanencia en el tiempo.

5. Ejecución de estudio

En el caso de las precipitaciones se consideró un periodo pluvial (abr-sep) y de estiaje (oct-mar). Se completaron estadísticas completas con un periodo de al menos 20 años, entregándose tantos promedios anuales y mensuales.

Para el caso de las temperaturas se entrega el producto para los mismos periodos descritos. Además, cuando es posible, se entregan los valores de las estadísticas de temperaturas máximas y mínimas.
Para la evaporación de embalse se utilizó el descrito coeficiente de 0,7 para los promedios correspondientes.
Para los caudales, se utilizan también los mismos periodos descritos para probabilidades de excedencia
El caudal especifico, luego de hallar una relación directa entre la precipitación y la escorrentía queda supeditado a la razón entre el caudal generado por la cuenca y el área de la superficie de la misma.
Finalmente, para el cálculo del balance, cada una de las cuencas se dividió en dos zonas: cordillerana y baja intermedia, siendo esta división justifica en la cantidad de información meteorológica en ambas zonas.
Los cálculos para ambos casos vienen dados por la superposición de los mapas de isoyetas e isolíneas correspondientes.
El informe entrega los resultados de la metodología planteada para cada una de las cuencas, ms la cartografía de isoyetas e isolíneas anexada en una segunda versión.

Tipo de Información	Estudio Licitado		
Título	Balance Hídrico Nacional. Regiones VIII, IX y X		
Año	1983	**Código ID**	DGA_2
Autor	Dirección General de Aguas		
Elaborado por	IPLA Ingenieros Consultores		
Puntos clave	Balance hídrico		

	Región	**Provincia**	**Cuenca(s)**
Ámbito Geográfico	Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos	Concepción, Arauco, Biobio, Malleco, Cautín y Valdivia	Biobío, cuencas costeras entre los ríos Biobío e Imperial, Imperial, cuencas costeras entre los ríos Imperial y Toltén, Toltén, cuencas costeras entre los ríos Toltén y Valdivia y la cuenca del río Valdivia.

Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**	**Calidad de Aguas**	**Otros**
			x

Objetivo(s) de la información

Estimar la precipitación, evapotranspiración y escorrentía en cuencas ubicadas entre las regiones de Biobío y Los Lagos según metodología UNESCO. Esto se plantea para cuencas con y sin información.

Temática y resultados de interés

Este estudio recoge recomendaciones de la UNESCO para estimar el balance de una cuenca mediante la ecuación simplificada:

$$\boldsymbol{P + Q_{si} - Q_{so} - ET - \eta = 0}$$

Donde $\boldsymbol{P}$ es la precipitación, $\boldsymbol{Q_{si}}$ el caudal superficial de entrada, $\boldsymbol{Q_{so}}$ el caudal de salida, $\boldsymbol{ET}$ la evapotranspiración y $\boldsymbol{\eta}$ el error de cierre que tiene diversos motivos. Las componentes subterráneas del balance y el almacenamiento se asumen cero para grandes áreas geográficas y tiempos de estudio largos. Debido a que existe incerteza en varias de las variables respecto de su medición o distribución espacial, el cálculo se realiza de manera iterativa de tal manera que $\boldsymbol{\eta}$ sea lo más cercano a cero. Cabe destacar que el balance que se realiza es exclusivamente superficial.

En este caso se considera cuencas de las regiones del Biobío, Araucanía y Ríos con registros que abarcan desde 1951/52 a 1980/82. Las cuencas se dividen en tres grandes zonas: cuencas cordilleranas, centrales y costeras. El orden para realizar el balance es desde agua arriba hacia aguas abajo, de manera de mejorar la distribución espacial de las variables.

Como no todas las estaciones de la zona tienen un registro que abarque el período de estudio, se extiende la precipitación usando dos métodos: (1) mediante relaciones lineales entre estaciones y (2) manteniendo la pendiente de la curva doble acumuladas, que se usaron para analizar la consistencia de la información. Los registros de temperatura no se extienden pues se considera que éstos son estacionarios, por lo que los promedios se calculan simplemente con la información registrada y los estadísticos se asumen representativos de todo el período. Los registros de caudales se extienden usando relaciones entre estaciones o relaciones entre precipitación y caudal. Se considera además los evaporímetros, donde la evaporación se estima usando un valor de coeficiente de embalse de 0,7.

La evaporación tampoco se rellena, sino que se asume estacionaria.

La metodología empleada depende de si la zona tiene registros de precipitación, temperatura y caudal. En zonas con todas las variables medidas, se trazan las isolíneas de precipitación y temperatura, y mediante la fórmula de Turc, se calcula la evapotranspiración real en las intersecciones de las isoyetas con las isotermas. Con dichos puntos, se obtiene las isolíneas de evapotranspiración real, y se realiza el balance. Si el valor de $\boldsymbol{\eta}$ es muy grande, se modifica el trazado y el monto de las isoyetas hasta que el balance cierre de manera razonable. En general, en zonas planas, se asume variaciones lineales de temperatura y precipitación, mientras que en zonas montañosas se considera gradientes orográficos. El motivo por el cual se modifica las isoyetas y no las isotermas, es porque según los registros, el gradiente de temperatura es más estable, por lo que sería una variable más confiable al momento de extrapolar espacial y temporalmente.

En zonas con información fluviométrica, precipitación y temperatura, se considera la corrección de la evapotranspiración ($\boldsymbol{ET_c}$) para zonas planas como $\boldsymbol{ET_c = \eta + ET_m}$, donde $\boldsymbol{ET_m}$ es la evapotranspiración calculada mediante Turc, mientras que, en zonas montañosas, se arregla la precipitación para obtener $\boldsymbol{P = R + ET}$, con $\boldsymbol{R = Q_{so} - Q_{si}}$. Esto implica que, en las zonas medias, el error está en la evapotranspiración, debido al uso de suelo, que es más diversos, mientras que en las montañas la variable con mayor incertidumbre es la precipitación, sin embargo, en estas cuencas, el cálculo es iterativo pues la evapotranspiración está en función de la precipitación, por lo que cambia en cada iteración. En zonas sin medición de temperatura, se asume $\boldsymbol{ET = P - R}$. Si tampoco existe información de precipitación, se estima la temperatura y la precipitación y se calcula $\boldsymbol{\eta}$. Si el valor es cercano a cero, se considera aceptable, de lo contrario, se itera hasta cerrar el balance.

Por otro lado, en zonas sin control fluviométrico, la escorrentía se estima como $\boldsymbol{R = P - ET}$ en el caso de que la precipitación y la temperatura estén medidas. En cuencas donde sólo se mida la precipitación, el caudal se estima usando las cuencas vecinas, o con relaciones entre la precipitación y la escorrentía usando cuencas similares. Si ninguna de las variables se mide, se extienden las isolineas de las cuencas adyacentes, de tal manera que en la cuenca cierre el balance.

Las cuencas analizadas son las del Biobío, cuencas costeras entre los ríos Biobío e Imperial, Imperial, cuencas costeras entre los ríos Imperial y Toltén, Toltén, cuencas costeras entre los ríos Toltén y Valdivia y finalmente la cuenca del río Valdivia.

Los resultados muestran que la precipitación se ve fuertemente afectada por la orografía. En el caso de la cuenca del Biobío la precipitación media anual es cercana a los 1.900 mm/a pero en la costa se presentan valores entre 1.200 a 2.000 mm/a, mientras que en la cordillera se estiman valores que llegan a 4.500 mm/a. La ET real media de la cuenca es 1.465 mm/a. En el caso de la cuenca del río Imperial, la precipitación media es 1630 mm/a, pero varía entre 800 y 4000 mm/a entre la costa y la cordillera. Finalmente, la cuenca con mayores niveles de precipitación es la del río Valdivia, donde la precipitación media en la costa varía entre 200 y 2300 mm/a pero en la cordillera se llega a valores de 5500 mm/a.

Tipo de Información	Estudio Licitado			
Título	Balance Hidrológico Nacional XI Región			
Año	1984	Código ID	DGA_3	
Autor	Dirección General de Aguas			
Elaborado por	Ricardo Edwards. Ingenieros Consultores Asociados LTDA			
Ámbito Geográfico	**Región**		**Provincia(s)**	**Cuenca(s)**
	XI de Aysén		Coyhaique, Aysén, Capitán Prat y General Carrera.	Ríos Cisnes, Aysén, Baker, Bravo y Pascua.
Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**		**Calidad de Aguas**	**Otros**
	x			

Objetivo(s) de la información

Establecer el balance hidrológico a nivel de cuenca para obtener los principales parámetros hidrometeorológicas que intervienen en él.

Temática y resultados de interés

Para la elaboración del informe se considera como información de entrada la precipitación, temperatura y caudal entre los años 1951 y 1980. El período de tiempo que se utiliza es anual con un desglose estacional. Las cuencas analizadas se deben separar en cuencas cordilleranas, de valle o costeras. La delimitación de las cuencas se realiza mediante las cartas escala 1:500.000 del Instituto Geográfico Militar.

Para realizar el balance se utiliza la metodología planteada en el texto “Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur” (Unesco, 1982). En términos generales, se utiliza la ecuación de la conservación de masa de manera simplificada, considerando que no existen almacenamientos en la cuenca, de modo que la escorrentía está dada por la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración calculada mediante la fórmula de Turk más una discrepancia, la cual como máximo puede ser un 10% de la escorrentía. Dado que se analizan 30 años de información, se considera correcto el supuesto de que la regulación de embalses y acuíferos son despreciables.

La metodología utilizada se realiza en las subcuencas desde aguas arriba hacia aguas abajo de manera iterativa hasta que las discrepancias se minimicen.

Para analizar la consistencia en la información de precipitación se analiza la curva doble acumulada entre las distintas estaciones (16) y un patrón de precipitación representativo de la región, el que considera las estaciones Aysén, Puerto Puyuhuapi y Balmaceda. Se entrega un plano con las isoyetas asociadas a la precipitación anual de probabilidad de 50%, además de los histogramas de las precipitaciones mensuales tanto de las estaciones del patrón como las representativas de la región.

En el caso de la temperatura, las estaciones en la región se encuentran principalmente a baja altura (9), lo que dificulta la obtención de las isotermas, por lo que se utilizó información de perfiles térmicos de otras zonas del país y perfiles obtenidos mediante globosondas.

Se analiza la consistencia de la información de caudales mediante la curva doble acumulada. Sin embargo, dada la escasa información existente (8 estaciones con más de 4 años de información) se utiliza el patrón de precipitación para realizar la comparación. Al igual que para la precipitación, en el plano de isolíneas de escorrentía se incluye los histogramas de variación estacional de los caudales medios mensuales de las principales estaciones de la región.

Tipo de Información	Estudio Licitado		
Título	Balance hidrológico nacional regiones III y IV		
Año	1984 **Código ID**	DGA_4	
Autor	Dirección General de Aguas		
Elaborado por	IPLA Ingenieros Consultores		
Ámbito Geográfico	Región	Provincia	Cuenca(s)
	III Región de Atacama Y IV Región de Coquimbo	Todas	Endorreicas Salado Costeras Q.Pan de Azucar – Rio Salado Copiapó Costeras Rio Salado – Rio Copiapó Costeras Rio Copiapó – Rio Huasco Huasco Costeras Rio Huasco – Elqui Elqui Costeras entre Rio Elqui y Rio Limarí Limarí Costeras entre Rio Limarí y rio Choapa Choapa Costeras entre Rio Choapa y Rio Petorca
Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**	**Calidad de Aguas**	**Otros**
	x	x	x

Objetivo(s) de la información

Desarrollar el Balance Hídrico de la zona de estudio para el periodo comprendido entre 1951/52 y 1980/81

Temática y resultados de interés

El estudio hace una presentación metodológica y de resultados respecto al Balance Hídrico de la zona comprendida entre la Región de Atacama y la Región de Coquimbo. Los detalles de la aproximación metodológica se ajustan a la *Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur* (UNESCO-ROSTLAC, 1982), cuya síntesis puede ser encontrada en la ficha correspondiente al estudio titulado “Balance hidrológico nacional regiones V, VI, VII y metropolitana”

La zona de estudio está caracterizada por la complejidad topográfica impuesta por las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, y un conjunto de otros cordones montañosos de importancia. En el sector norte del área de estudio se generan mesetas de altura, las cuales, por no tener desagüe hacia el mar, se convierten en cuencas endorreicas o cerradas con algunas subcuencas arreicas. La depresión intermedia en la Región de Atacama está caracterizada por extensos llanos o “pampas”, las cuales son interrumpidas por la aparición de los Valles Transversales desde la cuenca del Río Copiapó al sur.

En la zona Norte el clima es desértico, condición que varía hacia el Sur donde el ingreso de escasas precipitaciones de frentes polares entre mayo y septiembre crea un clima semi-desértico. Otras condiciones en la zona, tales como la Camanchaca, y el Invierno Boliviano generan condiciones particulares en la pluviometría de algunas áreas dentro de esta zona del país. La temperatura aumenta desde la costa, pese al aumento en altitud, fenómeno característico donde domina el Anticiclón Sub-tropical. En relación a la evaporación, esta es consistentemente alta en base a observaciones de embalses en la zona.

En base a la geomorfología y climatología, el estudio distingue tres grupos de cuencas características en la zona:

1. Cuencas cerradas o endorreicas, con precipitaciones estivales relativamente altas en la Cordillera de Los Andes con un gradiente de disminución hacia el Pacífico.
2. Cuencas que nacen en la Cordillera Central con escaso desagüe hacia el mar debido a la escasez de precipitaciones.
3. Cuencas exorreicas o abiertas, cuyos ríos nacen en la Cordillera de Los Andes, con un régimen pluviométrico suficiente para permitir la llegada de aguas al Océano.

Tipo de Información	Estudio Licitado			
Título	Balance Hidrológico Nacional: X Región. Informe Final			
Año	1984	**Código ID**	DGA_5	
Autor	Dirección General de Aguas			
Elaborado por	REG. Ricardo Edwards G. – Ingenieros Consultores Asociados Ltda.			
Puntos clave	Balance hidrológico a escala de cuenca. Metodología basada en Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur (UNESCO-ROSTLAC 1982). Isoyetas. Isotermas. Evapotranspiración. Isolíneas de escurrimiento. Rendimiento específico por cuenca.			
Ámbito Geográfico	**Región**		**Provincia**	**Cuenca(s)**
	Región X		Ranco	Río Bueno
			Ranco-Osorno	Río Pilmaiquén
			Osorno	Río Rahue
			Osorno- Llanquihue	Río Negro
			Ranco	Río Ranco
			Llanquihue	Río Puyehue
			Osorno	Río Rupanco
			Llanquihue	Río Maullín
			Llanquihue	Río Llanquihue
			Llanquihue	Río Petrohue
			Llanquihue	Río Chamiza
			Llanquihue	Lago Chapo
			Llanquihue	Río Puelo
			Chiloé	Isla Chiloé, drena al Canal de Chacao
			Chiloé	Isla Chiloé, drena al Océano Pacífico
			Chiloé	Isla Chiloé, drena al Golfo de Ancud
			Chiloé	Isla Chiloé, drena al Golfo Corcovado
			Palena	Río Yelcho
			Palena	Río Futaleufú
			Palena	Río Palena
Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**		**Calidad de Aguas**	**Otros**
				x
Objetivo(s) de la información				
Establecer un balance hidrológico a nivel de cuenca, el cual permita evaluar los principales parámetros hidrometeorológicos que intervienen en el balance.				
Temática y resultados de interés				
Se elabora un balance hidrológico a escala de cuenca o área de interés entre las provincias de Ranco y Palena, buscando obtener planos de isoyetas, isotermas y de evapotranspiración, y con ello elaborar planos de isolíneas de escurrimiento y rendimientos específicos. Con la finalidad de homogenizar los balances hidrológicos a nivel nacional, la DGA propone el uso de la				

metodología expuesta en la guía de la UNESCO de 1982, considerando: un periodo comprendido entre los años 1951 y 1980, planos confeccionados a escala 1:500.000, el balance hidrológico será anual y desglosado en dos periodos, el balance será realizado a escala de cuencas y subcuencas, las cuencas principales deberán ser subdivididas, los planos de isolíneas deberán tener una variación de valores que se ajuste a una degradación.
La metodología de elaboración del balance hidrológico se efectuará en cuatro partes: Ecuación de balance hídrico, metodología general, análisis y estudio de los parámetros que intervienen en la ecuación de balance hídrico y presentación de los resultados. La ecuación del balance hídrico comprende: Precipitación, Caudal afluente superficial a la cuenca, Caudal afluente subterráneo a la cuenca, Evaporación y Evapotranspiración, Caudal efluente superficial, Caudal efluente subterráneo, Variación del almacenamiento de agua en la cuenca y un término residual de discrepancia, error de medición o estimación.
La metodología general que se utiliza considera un periodo de 31 años entre 1950 y 1980 a escala anual, desglosándose en los periodos de abril-septiembre y octubre-marzo. El método empleado permitirá obtener: mapa de isoyetas anuales promedio de probabilidad 50% e isoporcentuales respecto al patrón de precipitación, mapas de isotermas medias anuales, mapas de isolíneas de evapotranspiración real media anual, mapas de isolíneas de escorrentía media anual y mapas de caudales específicos para el promedio, periodo pluvial y para la probabilidad de excedencia anual del 20%, 50%, 80% y 95%. Posteriormente, fueron definidas las cuencas, subcuencas o zonas de interés. Se analizó la información de precipitación, temperatura, se determinó la ET real, se analizaron caudales superficiales, y estimaron caudales específicos.
El análisis de la información pluviométrica consideró un análisis de consistencia por medio del método de curvas dobles acumuladas (CDA), posteriormente homogenizadas todas las series pluviométricas se procedió a realizar el análisis estadístico-probabilístico en cada una de ellas. Luego fueron ajustadas las distribuciones de probabilidades.
El análisis de las temperaturas se caracterizó por presentar poca variabilidad interanual, encontrándose registros a baja elevación respecto al nivel del mar, lo que dificulta el trazado de isotermas, por lo que fueron utilizados gradientes térmicos de otras zonas del país y perfiles obtenidos mediante globosondas.
La estimación de la Evapotranspiración real (ETR) fue confeccionada despreciando la extensión de lagos, donde fueron utilizados los escasos datos medidos sólo como referencia. La ETR fue estimada por medio de la fórmula TURC de 1955 usando como datos de entrada sólo precipitación anual y temperatura media anual.
La estadística de caudales superficiales es obtenida a partir de mediciones, las cuales se encuentran sujetas a múltiples fuentes de error. El análisis de consistencia y homogenización del conjunto estadístico de los datos registrados en cada cuenca se logra a través de las DCA.
En el cálculo del balance hídrico, se clasificaron cuencas con y sin control fluviométrico a su salida. Para ello se realizó una simplificación en la ecuación del balance, considerando precipitación, Evapotranspiración, escorrentía y discrepancia. En el caso de cuencas sin control fluviométrico se consideraron válidos los planos de isoyetas y evapotranspiración, pudiendo estimar escorrentía.
La región X, fue divida en 3 zonas, con el fin de caracterizar cada una de ellas: Norte desde cuenca río Bueno a río Puelo, Sur desde cuenca río Puelo a límite región X y XI continental, y Chiloé considerando la isla grande.

En el informe es posible advertir la falta de información disponible, dificultando la estimación de isotermas debido a la falta de registros a mayor elevación. Por último, la estimación de ETR considera poco relevante el área asociado a cuerpos de agua como son los lagos.

Tipo de Información	Estudio Licitado		
Título	Balance hidrológico nacional Cuenca del Rio Itata		
Año	1985	**Código ID**	DGA_6
Autor	Dirección General de Aguas		
Elaborado por	Ricardo Edwards G., Ingenieros Consultores Asociados Ltda.		
Ámbito Geográfico	Región	Provincia	Cuenca(s)
	VIII Región del Biobio	Ñuble	Itata
Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**	**Calidad de Aguas**	**Otros**
	x	x	x

Objetivo(s) de la información

Desarrollar el Balance Hídrico de la zona de estudio para el periodo comprendido entre 1951/52 y 1980/81.

Temática y resultados de interés

El estudio hace una presentación metodológica y de resultados respecto al Balance Hídrico de la zona comprendida entre la Región de Atacama y la Región de Coquimbo. Los detalles de la aproximación metodológica se ajustan a la *Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur* (UNESCO-ROSTLAC, 1982), cuya síntesis puede ser encontrada en la ficha correspondiente al estudio titulado "Balance hidrológico nacional regiones V, VI, VII y metropolitana"

La zona de estudio corresponde a la cuenca del Río Itata. El Río Itata nace en la junta de los ríos Huepil y Cholguán, y tiene por afluente principal el Río Ñuble. El clima es de tipo templado con una estación lluviosa prolongada y una estación seca corta. La pluviometría es uniforme producto de su origen ciclónico, y varía como consecuencia de los componentes orográficos. En la zona de la Cordillera de Los Andes y Nevados de Chillán la disminución de temperaturas en altura resulta en un incremento de las precipitaciones en forma nival, la cual durante su derretimiento abastece de agua a la cuenca durante el periodo de primavera – verano.

La media anual de precipitaciones en la zona alta de la cuenca está por sobre 2.500 mm mientras que en las zonas de valle y la costa estas disminuyen entorno en una magnitud entorno a los 1.031 mm. Además, los resultados indican que en la parte alta de la cuenca la razón de caudal a evapotranspiración anual es en torno a 4,68, en las zonas de valle la relación es más dispersa en torno a 1, y finalmente en la zona de la costa en torno a 0,7.

Tipo de Información	Estudio Licitado			
Título	Balance hidrológico nacional II región			
Año	1986	**Código ID**	DGA_7	
Autor	Dirección General de Aguas			
Elaborado por	Departamento de Hidrología			
Ámbito Geográfico	Región		Provincia	Cuenca(s)
	II Región de Antofagasta			
Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**		**Calidad de Aguas**	**Otros**
	x		x	x

Objetivo(s) de la información

Desarrollar el Balance Hídrico de la zona de estudio para el periodo comprendido entre 1961/62 y 1980/81

Temática y resultados de interés

Cabe señalar que la metodología utilizada es la misma que la aplicada en las regiones V, VI, VII y Metropolitana descrita en otro cuadro resumen. De modo que esta síntesis esclarece asuntos particulares de la zona geográfica analizada. Cabe notar que el resumen expuesto es de la metodología planteada.

1. Variables meteorológicas
   1.1. Precipitación

   Escasos montos de precipitación al año, hace caracterizar un clima desértico de abundante nubosidad en la zona costera hasta un clima estepario en la zona altiplánica. Presenta lluvias débiles en invierno en la costa. En la pampa del tamarugal y el desierto de Atacama las precipitaciones son prácticamente nulas.

   En las zonas altas cordilleranas se presentan lluvias convectivas durante los meses de verano.

   Para hacer estimación de valores, se asoció el patrón de precipitaciones con el perfil de altura obteniendo buenas aproximaciones, definiendo para cada estación el perfil de elevación más adecuado para representatividad de los datos.

   Dadas las relaciones descritas con anterioridad se generó un mapa de isoyetas para la zona de estudio.

   1.2. Temperatura

   El régimen de temperatura en la zona costera es homogéneo a través de todo el año como consecuencia del efecto moderador del océano.

   En la pampa existe una amplia aptitud térmica diaria, mientras que en la cordillera lo más preponderante es el marcado descenso de la temperatura con la elevación.

   Existe una relación directa de la elevación con la temperatura, de modo que se generó un perfil para realizar rellenos y extensiones de valores faltantes.
2. Escorrentía superficial

   Asumiendo que los ríos de la zona poseen baja variabilidad y tomando como base las estaciones fluviométricas se realizó la estimación de escorrentía anual.

   2.1. Extracciones

   Para regadío de superficies agrícolas se consideraron áreas puntuales asociadas solamente a las cuencas del rio Loa y a las del Salar de Atacama. También se consideran aquellas

extracciones para uso no agrícola, las que están concentradas en el rio Loa. Se tiene en cuenca también el uso domiciliario e industrial que se le da al agua en la zona, diferenciando cada una de las extracciones procedentes de los ríos que conforman las cuencas del sector.

2.2. Relleno y extensión de registros fluviométricas

Dada las extensiones y lagunas de registros, los datos fueron rellenados y extendidos solo para los caudales medios anuales. En aquellos años en donde al menos faltaban 5 meses para completar el periodo se utilizaron correlaciones. Para efectos de ajuste, se decidió el año hidrológico en 2: diciembre a abril (invierno altiplánico) y mayo a noviembre. Todo este proceso se realizó a partir de correlaciones en el vecindario de estudio.

2.3. Caudal medio anual del periodo

No solo de estaciones fluviométricas se extrajo información sino de aquellas también de aforo. Esto ayudo a generar una función de regresión para estimar el aporte total del rio Salado al Loa.

3. Evaporación y evapotranspiración

Análisis de las pérdidas del recurso hídrico hacia la atmosfera.

3.1. Zonas de cultivo

Se afirma que la agricultura de las últimas décadas en la zona se ha mantenido más o menos estacionaria, de modo que sus demandas de agua son también constantes, implicando esto que las demandas de agua también se han mantenido en el tiempo.

3.2. Superficies de agua libre

Para la estimación, se utilizó la información obtenida de los tanques evaporímetros clase A, ajustando los valores para representatividad de un lago a partir de un coeficiente de embalse.

3.3. Cauces

Se realizaron estimaciones dependiendo de la superficie del cauce a partir de los valores obtenidos desde tanques evaporímetros clase A, analizándose también posibles variaciones estacionales de las pérdidas en el cauce.

3.4. Salares

Dependiendo de los niveles freáticos y del movimiento de los niveles de humedad en suelos no saturados y condiciones de temperatura puede deducirse la evaporación. Todo esto no considera los flujos de calor en el suelo.

Tipo de Información	Estudio Licitado			
Título	Balance Hídrico de Chile			
Año	1987	**Código ID**	DGA_8	
Autor	Dirección General de Aguas			
Elaborado por	Dirección General de Aguas y consultores asociados.			
Puntos clave	Balance hídrico nacional vigente			
Ámbito Geográfico	**Región**		**Provincia**	**Cuenca(s)**
	Territorio nacional		Territorio nacional	Todo Chile continental
Tipo de Antecedentes	**Demanda y Usos de Agua**		**Calidad de Aguas**	**Otros**
				X

Objetivo(s) de la información

Se evalúa en todo el país los diversos componentes del balance hídrico medio anual para un periodo homogéneo de 30 años a nivel de cuencas y subcuencas principales desarrollando mapas temáticos correspondientes. Entre 1983 y 1986 se elaboraron informes parciales, compilándose en 1987 esta versión final.

Temática y resultados de interés

Metodología

Se plantea la ecuación del balance hídrico, donde se incorpora un término residual de discrepancia ($\boldsymbol{\eta}$). Se establece que para periodos de tiempo largo y en áreas extensas el balance se reduce a: $\boldsymbol{P - E = Q + \eta}$, donde P: Precipitación, E: Pérdidas y Q: Caudal efluente, todos promediados en el tiempo y el espacio. Se establece que el término de Q se refiere al flujo superficial como subterráneo, aunque este se desprecia en gran parte del análisis. Del mismo modo en el término E se incorpora la evaporación, evapotranspiración y pérdidas por consumos, se establece que en gran parte de las cuencas se utiliza la evapotranspiración de superficies naturales.

En cuencas endorreicas se establece que: $\boldsymbol{P - E = \eta}$. Es decir el escurrimiento es prácticamente nulo.

Por último se hace una salvedad en el caso de que la cuenca pueda separarse en dos sectores: Hacia donde drena el conjunto de la cuenca y cuencas afluentes.

La Evaluación de las pérdidas se realiza mediante la formulación de Turc:

$$\boldsymbol{ETR_n = \frac{P}{(0.9 + P^2/L^2)^{0.5}}}$$

Donde

$\boldsymbol{ETR_n}$: Evapotranspiración real anual [mm/año]
$\boldsymbol{P}$: Precipitación anual [mm/año]
$\boldsymbol{L}$: Parámetro heliotérmico, que se determina con la relación:

$$\boldsymbol{L = 300 + 25T + 0.05T^3}$$

$\boldsymbol{T}$: Temperatura media anual en °C.
Se valuó también el método modificado de Blaney y Criddle para zonas con cubierta vegetal. Para

determinar la evaporación de superficie libre se ocupan mediciones de tanques evaporimétricos corregidos. En el caso de la evaporación de suelo desnudo importante en la zona norte del país pro la presencia de salares, se realizaron investigaciones especiales utilizando física del movimiento del agua en la zona no saturada, trazadores isotópicos naturales y mediciones de lisímetros que se incorporaron al estudio.

Se estiman valores de P y ETR en todo el territorio de Chile continental, evaluando otras pérdidas de estudios específicos, para el análisis de subcuencas se calcula el balance desde aguas arriba a aguas abajo.

En cuencas con control fluviométrico se obtiene el término de discrepancia el cual si es demasiado grande implica el re-trazado de las isolíneas, buscando el error de estas estimaciones.

En cuencas sin control fluviométrico, se asume que el término de discrepancia es nulo, determinando directamente la componente de la escorrentía.

Se establecen dos casos especiales: Cuencas endorreicas y la determinación en cuencas de montaña. Para el primer caso, se evalúan de forma independiente P y ETR, corrigiendo dichas estimaciones buscando minimizar el residual en caso de que sea importante. Existe una diferencia en estas cuencas cuando se conoce el caudal afluente a una depresión de cada cuenca siguiendo el siguiente procedimiento:

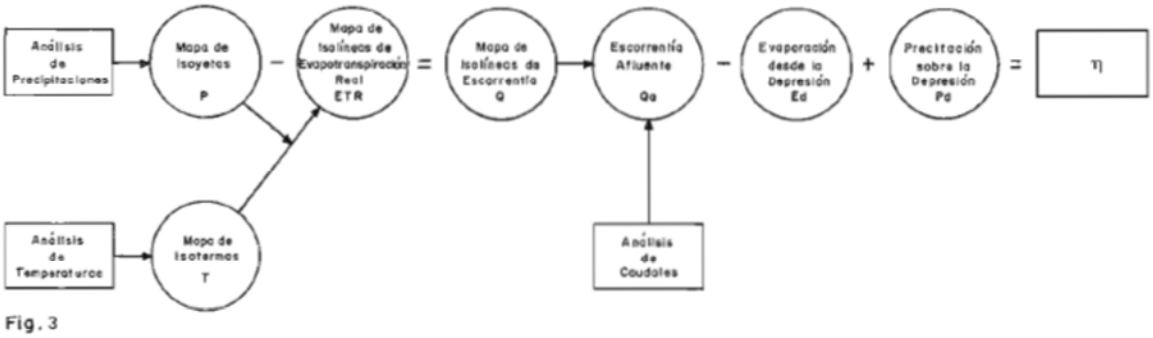


Fig. 3

En el caso de cuencas de montaña, se estudia el gradiente de las forzantes con la elevación extrapolándola para mayores elevaciones. En caso de tener registro fluviométrico se ajustan estos gradientes para obtener un término de discrepancia aceptable.

Determinación del balance hídrico de Chile

- Extensión espacial y división de área: Chile continental sin la Antártica. En zona de las islas al sur del Canal de Chacao es solo referencial. Se distingue las cuencas en cordilleranas, depresión y costeras.
- Periodo de análisis: 1951-1980. En las regiones I y II 1961-1980. En la III región el caudal resultó un 25% más bajo al comparar con fluviometría de 60 años, similar en la IV región. En el resto del país las diferencias no son significativas.
- Escala cartográfica: 1:500.000. Se establece que la calidad de los resultados depende de la densidad de estaciones más que del mapa base. Establece una advertencia para el uso en zonas pequeñas por situaciones locales, especialmente de montaña.

- Variaciones de almacenamiento: El considerar que la variación de almacenamiento es nulo es aceptable salvo en caso de zonas áridas con extensa explotación de aguas subterráneas donde los descensos del nivel freático son comparables con el caudal de un periodo de tiempo largo. Para el caso de hielo se establece que su efecto es del mismo orden de magnitud que el error de evaluación del caudal.
- Escorrentía subterránea: Se incorpora sólo en cuencas donde existen antecedentes que prueban que el escurrimiento subterráneo en el punto de cierre del balance es importante en relación al escurrimiento superficial.
- Término de discrepancia: Considerada del orden del 10% del valor de la escorrentía. Se aceptaron valores mayores cuando no era posible identificar el origen de las diferencias.

Los antecedentes básicos (procesados) usados son:

TIPO DE ESTACION	INSTITUCIONES				
	DGA	DMCH	ENDESA	SAG	TOTAL
ESTACIONES HIDROMETRICAS	22,6	–	71	–	297
ESTACIONES PLUVIOMETRICAS	24,3	377	92	6	718
ESTACIONES TERMOMETRICAS	84	99	22	4	209
ESTACIONES EVAPORIMETRICAS	84	20	32	3	139

DGA : Dirección General de Aguas
DMCH : Dirección Meteorológica de Chile
ENDESA : Empresa Nacional de Electricidad
SAG : Servicio Agrícola y Ganadero

Para cada componente se presentan:

- Caudales: Consistencia, relleno y/o ampliación de estadísticas en régimen observado y no en régimen natural, llevando a nivel mensual la información. Se presentan coordenadas, elevación, área aportante, caudal medio y caudal específico.
- Precipitaciones: Consistencia, correcciones rellenos y extensiones. Se presentan coordenadas, elevación, periodo considerado y precipitación media del periodo.
- Temperaturas: Se considera que esta variable varía poco por lo que no se extendió, considerando una longitud mínima de 3 años. Se establecen coordenadas, elevación, periodo estadístico y temperatura media anual.
- Evaporación: Estadísticas de tanques evaporimétricos Clase A. Se consideró que no varía significativamente en el tiempo, entregan variaciones anual y mensual.

Los resultados se presentan en mapas de isolíneas 1:1.000.000 para temperatura y evaporación, y 1:500.000 para precipitación escorrentía y evapotranspiración real. Incluyendo diagramas de distribución mensual. Se incluyen tablas con valores medios de los componentes por estación y por grupos de cuencas y subcuencas (P, Q, ETR, ETP-regado, E desde lagos y salares y el término de discrepancia).

La escorrentía establece el caudal que realmente se observa y no su régimen natural, deduciendo la naturalidad al sumar los distintos usos.

Conclusiones generales

Se muestra distribución espacial de precipitación por latitud, y de costa a la cordillera. Se muestra además el porcentaje de precipitación de abril a septiembre respecto al valor anual definiendo zonas de precipitaciones estivales, invernales y no diferenciables por latitud. Del mismo modo se traza perfil de temperatura y evaporación de tanque por latitud. En término de caudales se presentan variaciones por latitud y variaciones del coeficiente de escorrentía por latitud.

Se presentan balances regionales, descomponiendo precipitación, escorrentía y diferenciando la evaporación desde lagos y salares así como de evapotranspiración sobre superficie natural y exceso de ETP sobre superficie regada.

Finalmente se presenta una tabla resumen del balance por macro-zona, comparando con la región de Sudamérica y el territorio mundial.

	PRECIPITACION		ESCORRENTIA		EVAPORACION	
	m^3/s	mm	m^3/s	mm	m^3/s	mm
I y II	340	58,8	21	3.6	319	55,3
III a X	13120	1246	9130	867	3990	379
XI y XII	23490	2363	20260	2555	3230	408
CHILE (Excluye Territorio Chileno Antártico	36950	1522	29411	1211	7539	311
SUDAMERICA	$888x10^3$	1564	$351x10^3$	618	$537x10^3$	946
MUNDIAL (Fase Terrestre)	$3522x10^3$	746	$1256x10^3$	266	$2266x10^3$	480

Se afirma que solo en las regiones II y III los usos forman parte sustancial de la escorrentía natural. Establece además que una fracción muy elevada de los recursos hidrológicos existentes, son compartidos con países limítrofes.