



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

**INFLUENCIA DE LA RESOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS FORZANTES
METEOROLÓGICAS EN LA MODELACIÓN DE CUENCAS ANDINAS DE LA
REGIÓN DE COQUIMBO MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO VIC.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

FELIPE FRANCISCO DURÁN CHANDÍA

PROFESORA GUÍA:
HAYDEE XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAVIER CEPEDA ABAD
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA

Powered@NLHPC: Esta investigación/tesis fue parcialmente apoyada por la
infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02)

SANTIAGO DE CHILE
2019

**INFLUENCIA DE LA RESOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS FORZANTES
METEOROLÓGICAS EN LA MODELACIÓN DE CUENCAS ANDINAS DE LA REGIÓN
DE COQUIMBO MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO VIC.**

Este trabajo busca responder una interrogante natural que surge al momento modelar hidrológicamente una cuenca, ¿En qué escala temporal es pertinente resolver las ecuaciones del modelo? Si se busca modelar periodos extensos, la escala temporal define el nivel de detalle (resolución temporal) que requieren las forzantes meteorológicas, así como el costo computacional que conlleva la modelación, por tanto, la elección no es arbitraria.

Para responder lo anterior se modelan seis cuencas en la Región de Coquimbo con el modelo hidrológico VIC, a pasos temporales de 3, 6, 12 y 24 horas, calibrando siempre a nivel diario mediante los caudales observados. Se busca analizar si existen diferencias sistemáticas en la representación de los procesos hidrológicos de cada paso temporal, así como en el ajuste que alcanzan sus caudales simulados respecto los observados.

Los resultados muestran que, la representación de los procesos hidrológicos en cuanto a escorrentía, evaporación, sublimación y estacionalidad de los caudales tiende a ser similar entre los pasos de 3, 6 y 12 horas, alcanzando un KGE del caudal medio diario casi idéntico durante calibración. Por lo mismo, la variación de sus parámetros calibrados en esta etapa corresponde a un reajuste por efecto del cambio de resolución temporal. Aún así, existen leves diferencias en los procesos nivales de estos pasos temporales, que en validación se traducen en ajustes disímiles. Es así como según la cuenca, puede existir una mejora al pasar desde las 3 a 12 horas, un empeoramiento o una variación nula. En promedio, en términos de KGE, las modelaciones de 3 y 6 horas son equivalentes durante validación y la modelación de 12 horas levemente inferior.

Por otro lado, el paso de 24 horas, tiene una representación de los procesos hidrológicos diferente a los demás pasos, que se caracteriza por una sublimación muy menor (casi nula). Su ajuste de caudales medios diarios tiende a ser igual o incluso mejor que los otros pasos, tanto en calibración como validación, y lo mismo ocurre con el ajuste la curva de variación estacional de caudales y los sesgos de las curvas de duración. Por lo tanto, respecto si existe un paso temporal más conveniente para modelar se aconseja, en esta zona geográfica, modelar a 3, 6 o 24 horas teniendo en cuenta que para las 24 horas la representación de los procesos hidrológicos es diferente pero con un ajuste que, en ciertas cuencas, es muy superior.

Dedicado a mis padres, hermano y tío.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero señalar que estoy muy contento por terminar este trabajo que se me ha extendido, por diferentes circunstancias, durante bastante tiempo. Por lo mismo, agradezco a la universidad que me ha dado prórrogas para terminar de manera satisfactoria y a mi familia que ha tenido paciencia y me ha apoyado de manera permanente en este tiempo. Mis agradecimientos para mis padres, Mabel y Miguel, mi hermano Miguel y mi tío Arnoldo.

Agradezco a mi profesora guía Ximena Vargas, que siempre ha tenido la disposición de ayudarme ante cualquier duda o problema que surgiera, y que ha tenido un rol activo preocupándose por mis avances o anticipando contratiempos.

También agradezco al Nico y al Mota que siempre han tenido tiempo para responder mis dudas, a mi profesor de comisión Pablo Mendoza que ha sido muy gentil y cercano para atender mis consultas. A Fabiola Borne y a Álvaro Torrent, del departamento de civil, que siempre han atendido mis consultas de manera diligente y al NLHPC por disponer de sus computadores para la realización de la memoria, sin los cuales hubiera sido posible llevarla a cabo.

Agradezco haber conocido grandes personas y amigos durante mi instancia en la universidad como el gran Claudio; los civiles Alondra, Pablito, Daslav; los hidráulicos Angela, Frodo, Max, Cami, Cata, Oscar, Javi y aquellos de plan común César, Kurt, Fafeto, Iquique, Memo, entre otros. Finalmente, le agradezco a la vida y a Dios, por todo lo que me da y le pido que me proteja a mí y a todos los que lo necesitan, para que nos mantenga en la senda del bien, la humildad y el altruismo.

Tabla de contenido

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Organización del documento	2
Capítulo 2 : Revisión Bibliográfica	2
2.1 Modelo VIC.....	2
2.1.1 Estructura del modelo.....	3
2.2 Resolución temporal.....	6
2.3 <i>Shuffled Complex Evolution</i> (SCE)	7
Capítulo 3 : Zona de estudio.....	9
Capítulo 4 : Metodología	12
4.1 Resolución temporal.....	13
4.2 Producto de SWE	14
4.3 Modelamiento.....	14
4.4 Calibración	15
4.5 Índices hidrológicos.....	17
Capítulo 5 : Resultados	18
5.1 Cuenca Toro.....	18
5.2 Cuenca Hurtado	25
5.3 Cuenca Mostazal.....	32
5.4 Cuenca Tascadero	38
5.5 Cuenca Chalinga.....	44
5.6 Cuenca Choapa.....	50
Capítulo 6 : Análisis	57
Capítulo 7 : Conclusiones	61
Capítulo 8 : Bibliografía	62

Índice de tablas

Tabla 3.1: Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas.....	10
Tabla 4.1: Periodos de simulación en años hidrológicos.....	15
Tabla 4.2: Parámetros a calibrar.....	16
Tabla 5.1: KGE y sus componentes para cuenca Toro.....	18
Tabla 5.2: Índices hidrológicos en cuenca Toro.....	20
Tabla 5.3: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Toro.....	20
Tabla 5.4: Parámetros calibrados para cuenca Toro.....	24
Tabla 5.5: KGE y sus componentes para cuenca Hurtado.....	25
Tabla 5.6: Índices hidrológicos en cuenca Hurtado.....	27
Tabla 5.7: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Hurtado.....	28
Tabla 5.8: Parámetros calibrados para cuenca Hurtado.....	31
Tabla 5.9: KGE y sus componentes para cuenca Mostazal.....	32
Tabla 5.10: Índices hidrológicos en cuenca Mostazal.....	33
Tabla 5.11: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Mostazal.....	35
Tabla 5.12: Parámetros calibrados en cuenca Mostazal.....	37
Tabla 5.13: KGE y sus componentes para cuenca Tascadero.....	38
Tabla 5.14: Índices hidrológicos en cuenca Tascadero.....	38
Tabla 5.15: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Tascadero.....	40
Tabla 5.16: Parámetros calibrados en cuenca Tascadero.....	43
Tabla 5.17: KGE y sus componentes para cuenca Chalinga.....	44
Tabla 5.18: Índices hidrológicos para cuenca Chalinga.....	44
Tabla 5.19: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Chalinga.....	46
Tabla 5.20: Parámetros calibrados en cuenca Chalinga.....	49
Tabla 5.21: KGE y sus componentes para cuenca Choapa.....	50
Tabla 5.22: Índices hidrológicos para cuenca Choapa.....	50
Tabla 5.23: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Choapa.....	51
Tabla 5.24: Parámetros calibrados en cuenca Choapa.....	56

Índice de figuras

Figura 2.1: Estructura del modelo hidrológico VIC. Fuente: Gao et al., 2010.....	3
Figura 2.2: Representación del flujo base en la capa profunda dependiente del contenido de humedad de la misma. Fuente: Liang, et al. (1994).	5
Figura 2.3: En a) una población inicial se divide en dos conjuntos que, luego de evolucionar, convergen en diferente óptimos locales (b). En c) se vuelve a dividir la población y se repite el proceso de evolución. Esta vez ambos conjuntos alcanzan el óptimo global (d). Fuente: Duan et al., 1994.	8
Figura 3.1: Mapa de cuencas en estudio. Región de Coquimbo, Chile.....	9
Figura 3.2: Caudales medios mensuales a partir de caudales observados en años hidrológicos 1985 - 2014.....	11
Figura 4.1: Ejemplo de cambio de resolución temporal para caso de evento en salida de cuenca Mostazal.	13
Figura 5.1: KGE en calibración y validación para cuenca Toro.....	18
Figura 5.2: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Toro. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.	19
Figura 5.3: Curvas de duración en cuenca Toro.	20
Figura 5.4: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Toro.	21
Figura 5.5: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Toro.	21
Figura 5.6: Escorrentía anual en cuenca Toro.	22
Figura 5.7: Evaporación anual en cuenca Toro.	22
Figura 5.8: Sublimación anual cuenca Toro.	23
Figura 5.9: Descomposición de la precipitación media anual en cuenca Toro en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB).	23
Figura 5.10: Parámetros calibrados en cuenca Toro.....	24
Figura 5.11:KGE en calibración y validación para cuenca Hurtado.	25
Figura 5.12: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Hurtado. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.	26
Figura 5.13: Curvas de duración en cuenca Hurtado.	27
Figura 5.14: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Hurtado.....	28
Figura 5.15: Curvas de variación estacional del SWE en cuenca Hurtado.	29
Figura 5.16: Escorrentía anual cuenca Hurtado.....	29
Figura 5.17: Evaporación y sublimación anual para cuenca Hurtado.	30

Figura 5.18: Descomposición de la precipitación media anual en cuenca Hurtado en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB).....	30
Figura 5.19: Parámetros calibrados en cuenca Hurtado.	31
Figura 5.20: KGE en calibración y validación para cuenca Mostazal.....	32
Figura 5.21: Curvas de duración en cuenca Mostazal.	33
Figura 5.22: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Mostazal. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.	34
Figura 5.23: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Mostazal.	35
Figura 5.24: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Mostazal.	35
Figura 5.25: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Mostazal en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB).....	36
Figura 5.26 Parámetros calibrados para cuenca Mostazal.....	37
Figura 5.27: KGE en calibración y validación para cuenca Mostazal.....	38
Figura 5.28: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Tascadero. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.	39
Figura 5.29: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Tascadero.....	40
Figura 5.30: Curva de variación estacional del SWE en cuenca Tascadero.	40
Figura 5.31: Escorrentía anual para cuenca Tascadero.....	41
Figura 5.32: Evaporación y sublimación anual para cuenca Tascadero.	41
Figura 5.33: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Tascadero en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB).....	42
Figura 5.34: Parámetros calibrados para cuenca Tascadero.	43
Figura 5.35: KGE en calibración y validación para cuenca Chalinga.....	44
Figura 5.36: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Chalinga. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.	45
Figura 5.37: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Chalinga.	46
Figura 5.38: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Chalinga.	46
Figura 5.39: Escorrentía anual cuenca Chalinga.	47
Figura 5.40: Evaporación y sublimación anual cuenca Chalinga.....	47
Figura 5.41: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Chalinga en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..	48
Figura 5.42: Parámetros calibrados para cuenca Chalinga.....	49
Figura 5.43: KGE de calibración y validación para cuenca Choapa.	50
Figura 5.44: Curvas de variación estacional del caudal para cuenca Choapa.	51

Figura 5.45: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Choapa. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.	52
Figura 5.46: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Choapa.....	53
Figura 5.47: Escorrentía anual cuenca Choapa.	53
Figura 5.48: Evaporación anual para cuenca Choapa.....	54
Figura 5.49: Sublimación anual para cuenca Choapa.....	54
Figura 5.50: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Choapa en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..	55
Figura 5.51: Parámetros calibrados para cuenca Choapa.	56
Figura 6.1: Diferencia entre el KGE de caudales medios diarios de 6, 12 y 2 horas respecto del de 3 horas durante el proceso de calibración y validación.	57
Figura 6.2: Escorrentía media anual respecto de precipitación media anual durante periodo de calibración.	58
Figura 6.3: Descomposición de la evaporación media anual en sublimación y evapotranspiración + evaporación del suelo.	59
Figura 6.4: Fracción de precipitación sólida respecto de la precipitación media anual durante calibración, por cada cuenca y según cada paso temporal.	60

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Los modelos hidrológicos son una representación simplificada de los procesos hidrológicos de una cuenca, y son de gran importancia cuando se pretenden estimar los recursos hídricos en una zona geográfica. Mediante estos modelos, es posible cuantificar flujos de salida de una cuenca como escorrentía, equivalente en agua de nieve, evaporación, sublimación, entre otros. Además, es posible proyectar, a corto o largo plazo, el valor de los flujos anteriores con el objetivo de tomar decisiones en cuanto al uso o distribución del recurso.

En la modelación hidrológica existen términos asociados a la escala temporal de modelación, entre los que se encuentran: paso temporal de resolución numérica, resolución temporal de las forzantes, escala temporal de resultados, paso temporal de calibración y validación (Melsen *et al.*, 2016). En general, estos términos están vinculados de tal forma, que el paso temporal de resolución numérica implica la resolución temporal necesaria en las forzantes; y el paso temporal de calibración implica la escala temporal a la que se deben agrupar los resultados del modelo.

Existe bibliografía que estudia la relación entre estas escalas temporales y el ajuste que se puede esperar de un modelo hidrológico. Es así como, Wang *et al.*, 2009, señala que una alta resolución temporal de precipitación es deseable para modelar y pronosticar crecidas, pero si se trata de procesos hidrológicos donde el tiempo característico es mayor que la resolución temporal de la precipitación, el aumento de la resolución no necesariamente conduce a mejores resultados (Bastola and Murphy, 2013). Por otro lado, usar una resolución innecesariamente alta de precipitación genera aumento del costo computacional del modelamiento (Sikorska & Seibert, 2018).

Para esta investigación, surge la idea de estudiar las diferencias en el ajuste que conlleva la utilización de distintas resoluciones temporales de las forzantes meteorológicas. En esta línea, autores como Sikorska & Seibert (2018) han encontrado que la resolución óptima, en el caso de la precipitación, varía según el tamaño de la cuenca en que se desea modelar, concluyendo que en cuencas mayores ($>200 \text{ km}^2$) no es necesaria una resolución temporal de precipitación fina (horaria) para encontrar resultados correctos a nivel horario. Por otro lado, Bauwe et al. (2017), observa que, si se desea calibrar a nivel diario no es necesario suministrar forzantes sub-horarias para encontrar resultados razonables. Finalmente, Ficchi et al. (2016) concluye que, al calibrar a nivel diario, utilizar resoluciones temporales más finas que 24 horas mejora los resultados, pero solo hasta las 6 horas a partir de la cual la mejora de los resultados se mantiene o disminuye.

Por todo lo anterior, interesa estudiar en Chile el efecto que tiene la resolución temporal de las forzantes meteorológicas en el modelamiento de cuencas, con el fin de encontrar aquella que

permita representar los procesos hidrológicos de forma correcta a un costo computacional razonable.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Modelar hidrológicamente seis cuencas con cuatro pasos temporales de resolución numérica distintos (3, 6, 12 y 24 horas) utilizando forzantes meteorológicas con la resolución temporal respectiva y, calibrando siempre a nivel diario, a través de los caudales medios diarios observados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el desempeño de cada paso temporal para simular la escorrentía observada, tanto en periodo de calibración como validación.
- Analizar si cada paso temporal implica una manera diferente o similar de representar los procesos hidrológicos de una cuenca.
- Observar, a nivel global de cuencas, si existen tendencias al cambiar el paso temporal.

1.3 Organización del documento

En el Capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica sobre el modelo VIC, la resolución temporal y el algoritmo de calibración *Shuffled Complex Evolution*. En el Capítulo 3 se describe la zona de estudio; sus características topográficas, climáticas e hidrológicas. En el Capítulo 4 se describe la metodología general para alcanzar los objetivos, y en los Capítulos 5, 6 y 7 se muestran los resultados, análisis y conclusiones respectivamente.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

2.1 Modelo VIC

Variable Infiltration Capacity (VIC) es un modelo hidrológico de macro-escala, semi-distribuido y con base física, desarrollado por Xu Liang (Liang *et al.*, 1994) en la Universidad de Washington. Resuelve ecuaciones de balance de agua y energía en celdas según paso temporal (diario o subdiario). La estructura del modelo posee las siguientes características:

- Las forzantes meteorológicas corresponden a series, diarias o sub-diarias, de precipitación, temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, radiación de onda larga y radiación de onda corta.

- Solo se consideran flujos de energía y masa en sentido vertical; por ende, no existen flujos horizontales entre celdas (modelo unidimensional). Esto se considera supuesto válido para celdas de gran tamaño.
- Sus principales variables de estado son: humedad del suelo, equivalente en agua de nieve, interceptación en follaje; y sus flujos de masa corresponden a escorrentía superficial, flujo base, evaporación del suelo, sublimación, derretimiento nival, evapotranspiración, entre otros.
- El modelo tiene parámetros libres que se calibran para ajustar las simulaciones a los flujos observados (escorrentía).

2.1.1 Estructura del modelo

El modelo consta de una superficie de follaje y tres capas de suelo (Figura 2.1). La superficie de follaje modela procesos de interceptación y evaporación de agua; en tanto, las capas de suelo modelan principalmente escorrentía superficial, flujo base, evaporación del suelo y drenaje entre capas. Además, el modelo ingresa precipitación sólida que se acumula en un manto nival el cual, según un balance de energía, sublima o derrite nieve.

Las capas superficiales (capa 1 y 2), según la humedad que tengan, determinan el monto de precipitación que infiltra y el exceso que se transforma en escorrentía superficial. El mecanismo para esto es la curva de infiltración (ecuación 2.1) que asigna a la celda una distribución espacial de la capacidad de infiltración i que va desde 0 hasta i_m . Esta curva de infiltración se calibra a través del parámetro b_i (*binfilt*) que, tomando valores entre $]0; 0,4]$ entrega mayor escorrentía al aumentar el valor y, a través de la profundidad de la capa 2 (*Depth 2*), que a mayor valor genera una mayor capacidad para infiltrar al suelo (ecuación 2.3).

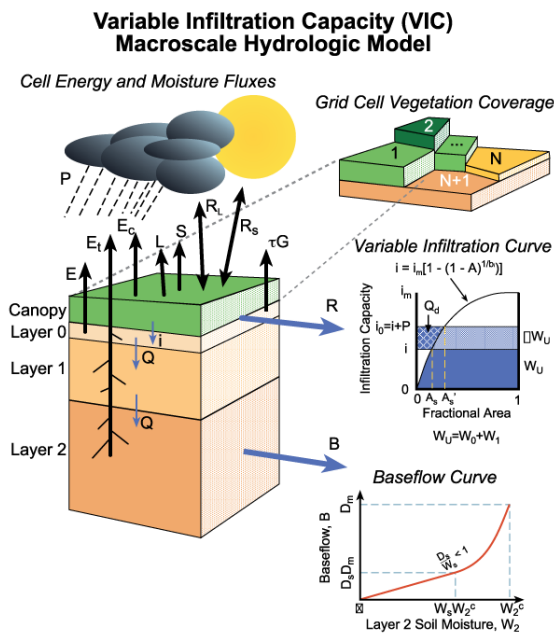


Figura 2.1: Estructura del modelo hidrológico VIC. Fuente: Gao et al., 2010.

$$i = i_m [1 - (1 - A)^{1/b_i}] \quad 2.1$$

$$i_m = W_1^c (1 + b_i) \quad 2.2$$

$$W_1^c = \theta \cdot Z_1 \quad 2.3$$

- Donde i (mm) e i_m (mm) son la capacidad de infiltración y capacidad máxima de infiltración, A es la fracción de área para la cual la infiltración es menor que i y b_i es el parámetro de forma de la curva de infiltración. W_1^c (mm) es el contenido máximo de humedad posible en la capa 1, θ (-) es la porosidad del suelo y Z_1 (m) la profundidad de la capa.

Para modelar el flujo base existe mecanismo de recarga desde capa 2 a la capa 3 que se modela a través de la ecuación (2.4). Su uso requiere la calibración del parámetro de conductividad hidráulica K_h , cuyo rango se calibra entre 0 y 600 mm/día, y cuyo aumento significa mayor transferencia entre capas, y del parámetro $cexpt$, en el rango]3; 20], cuyo aumento significa disminución del drenaje Q_{23} .

$$Q_{23} = K_h \left(\frac{W_2 - \theta_r}{W_2^c - \theta_r} \right)^{cexpt} \quad 2.4$$

- Donde Q_{23} (mm) humedad desde capa 2 a 3, K_h (mm/día) conductividad hidráulica del suelo, W_2 (mm) contenido de humedad en la capa 2, θ_r (mm) humedad residual que no puede ser removida por evaporación y $cexpt$ parámetro a calibrar.

La capa 3 genera el flujo base linealmente hasta cierto contenido de humedad ($W_s W_3^c$) según la ecuación 2.5 y luego se comporta aceleradamente según la ecuación 2.6, hasta un valor máximo $Dsmax$ que se debe calibrar. El parámetro Ds , corresponde a la fracción del flujo base máximo ($Dsmax$) en que comienza el flujo acelerado y junto a W_s deben ser calibrados. La profundidad de la capa 3 ($Depth 3$) también se calibra y a mayor valor entrega menor flujo base.

La Figura 2.2 grafica el comportamiento del flujo base donde se puede observar el flujo acelerado cuando se alcanza la humedad $W_s W_3^c$. Cabe hacer notar que si $D_s = W_s$ entonces el flujo se comporta, en todo momento, de manera proporcional a la humedad en la capa 3.

$$Q_b = \frac{D_s D_{smax}}{W_s W_3^c} W_3 \quad 2.5$$

$$Q_b = \frac{D_s D_{smax}}{W_s W_3^c} W_3 + \left(D_{smax} - \frac{D_s D_{smax}}{W_s} \right) \left(\frac{W_3 - W_s W_3^c}{W_3^c - W_s W_3^c} \right) \quad 2.6$$

- Donde Q_b (mm) es el flujo base, D_{smax} flujo base máximo (mm), D_s fracción de D_{smax} , W_s fracción de W_3^c , W_2 (mm) humedad en capa 3, W_3^c (mm) humedad máxima en capa 3. Se debe cumplir que ($D_s \leq W_s$).

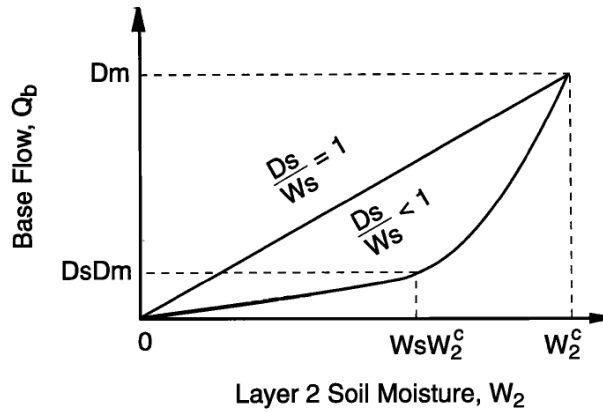


Figura 2.2: Representación del flujo base en la capa profunda dependiente del contenido de humedad de la misma. Fuente: Liang, et al. (1994).

El manto nival de la celda se modela con un mecanismo de acumulación-ablación que se resuelve mediante balance de masa y energía. Este último resuelve la ecuación 2.7 que considera los flujos de radiación de onda larga y corta, calor sensible, calor latente, calor transferido por precipitación y calor por derretimiento o congelamiento.

$$\rho_w c_s \frac{dWT_s}{dt} = Q_r + Q_s + Q_l + Q_p + Q_m \quad 2.7$$

- Donde ρ_w (kg m^{-3}) es densidad del agua, c_s ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) calor específico del hielo, W (mm) equivalente de agua, T_s temperatura del manto nival ($^{\circ}\text{C}$), Q_r flujo de radiación (W m^{-2}), Q_s calor sensible (W m^{-2}), Q_l calor latente (W m^{-2}), Q_p calor transferido por precipitación (W m^{-2}) y Q_m calor de derretimiento (W m^{-2}).

Para el modelamiento anterior ser requiere el parámetro T_{max} , correspondiente a la temperatura a la cual comienza a nevar, y T_{min} , temperatura en la que el total de la precipitación cae de forma sólida. De esta forma se determina la cantidad de precipitación que entra sólida o líquida; interpolando linealmente en caso de ser una temperatura entre T_{min} y T_{max} .

También es requerido el parámetro de rugosidad de la nieve irs cuyo valor tiene efectos en los flujos de calor sensible y latente del manto nival. Mayores valores de rugosidad entregan mayor

sublimación de la nieve y mayores flujos de calor sensible. En esta investigación se calibra la rugosidad en el rango $[10^{-6}; 0,03]$ metros.

Finalmente, el proceso de evaporación se subdivide en tres tipos: evaporación del suelo (capa 2), transpiración de las coberturas vegetales y evaporación del agua interceptada por las mismas. Para su cálculo se utiliza fundamentalmente la evapotranspiración potencial dada por la ecuación Penman-Monteith (Shuttleworth, 1993).

2.2 Resolución temporal

Diversos autores han investigado sobre la influencia de la resolución temporal de las forzantes meteorológicas en los modelos hidrológicos, por ejemplo:

Ficchi et al. (2016), investigó el beneficio de utilizar precipitación sub-horaria y sub-diaria para simular caudales diarios asociados a eventos de crecidas por tormentas. Para esto estudió de 2400 crecidas asociadas a 240 cuencas con un área promedio de 356 km^2 , todas ellas pertenecientes a Francia. Se utilizó el modelo *GR4J* (Perrin et al., 2003) con precipitaciones de resolución temporal de 6-min, 12-min, 30-min, 1-hora, 3-horas, 6-horas, 12-horas, 1-día, calibrado y validando con caudales diarios. En general obtuvo mejoras de resultados a medida que la resolución aumentaba, pero solo hasta las 6-horas de resolución. Luego, desde las 3-horas de resolución hacia abajo los resultados se mantenían invariantes y tendían a empeorar el índice KGE (Gupta et al., 2009).

Bauwe et al. (2017), estudió la utilidad de usar datos de precipitación sub-horarios para el caso de una cuenca de 2 km^2 en el noroeste de Alemania. Para ello usó el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) utilizando resoluciones temporales de 5-min, 15-min, 30-min y 60 min, calibrando los caudales de salida a nivel diario. La validación de sus resultados fue casi idéntica para los distintos pasos temporales por lo cual sugiere que no hay necesidad de usar una resolución sub-horaria cuando la calibración es diaria.

Sikorska & Seibert (2018) investigaron la resolución temporal de precipitación más apropiada para obtener la descarga de salida horaria en una cuenca. Para ello analizaron 13 cuencas de diversos tamaños en Suiza, abarcando áreas desde los 10 hasta los 1000 km^2 . Su investigación mostró que una resolución fina (horaria) de precipitación no siempre es requerida para obtener resultados aceptables, encontrando que en cuencas pequeñas ($<60 \text{ km}^2$) una resolución de hasta 12 horas entrega resultados fiables, para medianas ($<200 \text{ km}^2$) desde 12 hasta 21 horas y para cuencas grandes ($>200 \text{ km}^2$) hasta 24 horas de resolución.

2.3 *Shuffled Complex Evolution (SCE)*

El algoritmo SCE nace como respuesta ante las dificultades que enfrentaron los investigadores al tratar de calibrar los modelos de precipitación-escorrentía con algoritmos de optimización tradicionales. Lo anterior se debe a que los modelos hidrológicos presentan las siguientes peculiaridades que dificultan la estimación de sus parámetros:

1. Gran número de regiones de atracción.
2. Numerosos óptimos locales en cada región de atracción.
3. Superficie de la función objetivo con derivadas discontinuas.
4. Parámetros pueden exhibir variados niveles de sensibilidad y gran interacción entre ellos, que puede ser no lineal.

Ante esto Duan *et al.* (1992) desarrollaron el algoritmo SCE, el cual busca utilizar distintas poblaciones de puntos en el espacio que puedan evolucionar de manera independiente y luego compartir información entre ellos; tal de realizar una exploración extensiva del espacio de parámetros factibles reduciendo así las probabilidades de caer en óptimos locales.

A continuación, se describe cada paso de iteración en el algoritmo SCE:

1. Se escoge un número s de puntos al azar mediante distribución uniforme en el espacio de factible de parámetros.
2. Se ordenan los puntos de mejor a peor (*ranking*) según su valor en la función objetivo.
3. Se particiona la población inicial s en p subgrupos (conjuntos), con m puntos en cada conjunto, tal que, $s = mxp$. Asegurar que el desempeño de los m puntos, en términos de la función objetivo, sea uniforme a través de los conjuntos.
4. Se evoluciona cada conjunto de acuerdo al algoritmo *Competitive Complex Evolution (CCE)*.
5. Se disuelven los conjuntos y se genera nuevamente una sola población de s puntos. Se ordenan nuevamente los puntos según el paso 2 y se verifica criterio de convergencia.
6. Si se satisface la convergencia detenga las iteraciones, si no, vuelva al paso 3.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.3, se tiene el caso de una calibración de dos parámetros (X e Y) donde las curvas de nivel representan el valor de la función objetivo en dichas zonas. Como se observa, existen dos óptimos locales, uno de los cuales es óptimo global. En a) comienza el algoritmo con $s = 10$ puntos aleatorios que se agrupan en $p = 2$ conjuntos; diferenciándose en la figura a través de asteriscos y puntos. En b) cada conjunto lleva a cabo los procesos de evolución de manera independiente convergiendo en diferentes óptimos. En c), como aún no convergen todos los puntos, se reagrupan en nuevos conjuntos que llevaran a cabo otra evolución. Finalmente, ambos complejos convergen de manera independiente al mismo óptimo. De esta manera, luego de una exploración extensiva del espacio de parámetros y de sus óptimos locales, se converge al óptimo global.

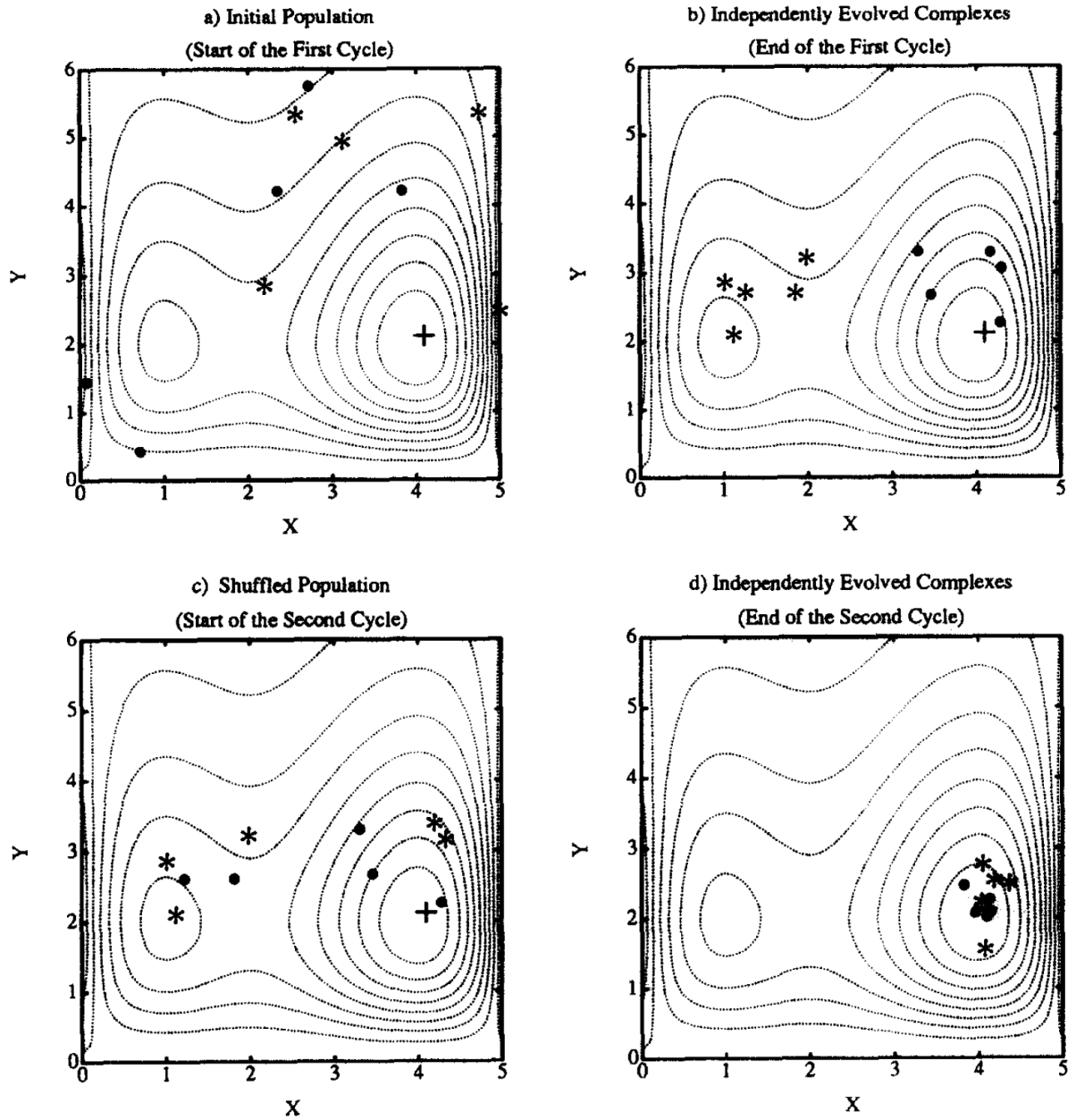


Figura 2.3: En a) una población inicial se divide en dos conjuntos que, luego de evolucionar, convergen en diferente óptimos locales (b). En c) se vuelve a dividir la población y se repite el proceso de evolución. Esta vez ambos conjuntos alcanzan el óptimo global (d). Fuente: Duan et al., 1994.

Capítulo 3: Zona de estudio

Las cuencas en estudio encuentran en su totalidad en la Región de Coquimbo. Son un total de seis repartidas entre las cuencas del Elqui, Limarí y Choapa (Figura 3.1). Se ubican en la Precordillera y Cordillera Andina entre las latitudes -29° a -33° y longitudes -70° a -71° , con altitudes medias entre los 2500 y 4000 m.s.n.m. En general, presentan poca intervención humana y escasa presencia glaciaria, motivo por el cual son escogidas para su modelación en régimen natural.

En la Tabla 3.1 se presentan parámetros geomorfológicos como área, altitud mínima, media y máxima (Z_{min} , Z_{mean} , Z_{max}), largo de tramo de río más largo (L) y el tiempo de concentración de la cuenca (T) estimado para cada cuenca. Además, se muestra la precipitación media anual (P_p), estimada con el producto de forzantes del proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional, para el periodo de calibración de cada cuenca, y la fracción que representa la escorrentía media anual de la precipitación media anual (Q/P_p) en el mismo periodo.

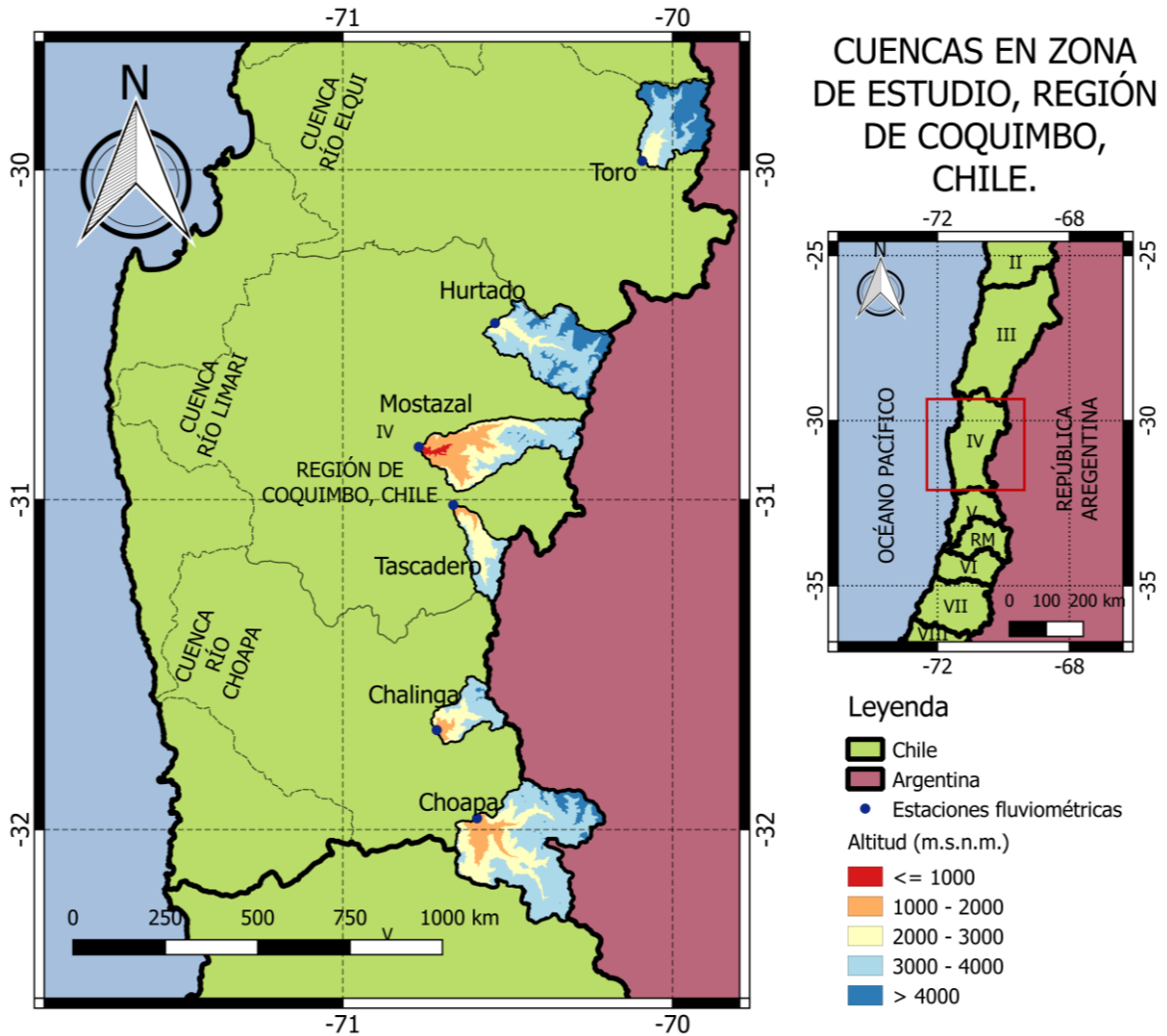


Figura 3.1: Mapa de cuencas en estudio. Región de Coquimbo, Chile.

El clima en la Región de Coquimbo es del tipo semiárido caracterizado por déficit hídrico (Ferrando, 2002). En las cuencas el clima corresponde al tipo Templado Frío de Altura, clima localizado a lo largo de la Cordillera de los Andes sobre los 3.000 metros de altitud. Este se caracteriza por altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que significan escorrentía en periodo estival.

- Tiempo de concentración (California Culvert Practice, 1995):

$$T = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (hrs) \quad (3.1)$$

Donde L (km) corresponde al tramo de río más largo y H (m) al desnivel máximo en la cuenca.

Tabla 3.1: Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas.

Estación Fluviométrica	Cuenca	Área (km ²)	Z _{min} (msnm)	Z _{mean} (msnm)	Z _{max} (msnm)	L (km)	T (hrs)	Pp (mm)	Q/Pp (-)
Río Toro Antes Junta Río La Laguna	Toro	459	2107	3910	6130	41	2,9	110	0,44
Río Hurtado En San Agustín	Hurtado	664	2038	3727	5550	42	3,1	157	0,88
Río Mostazal En Carén	Mostazal	632	699	2594	4410	54	4,0	211	0,38
Río Tascadero En Desembocadura	Tascadero	238	1229	2891	3851	40	3,2	293	0,68
Río Chalinga En La Palmilla	Chalinga	242	1432	3037	4431	25	1,8	313	0,44
Río Choapa En Cuncumén	Choapa	1046	1187	3152	5054	47	3,3	414	0,70

Respecto la estacionalidad de los ríos se tiene, en general, una predominancia del régimen nival por sobre el pluvial (Figura 3.2). Si se compara el volumen de escorrentía promedio anual, Toro y Chalinga muestran la menor magnitud, seguido de las cuencas Hurtado, Mostazal, Tascadero y en mayor medida la cuenca Choapa.

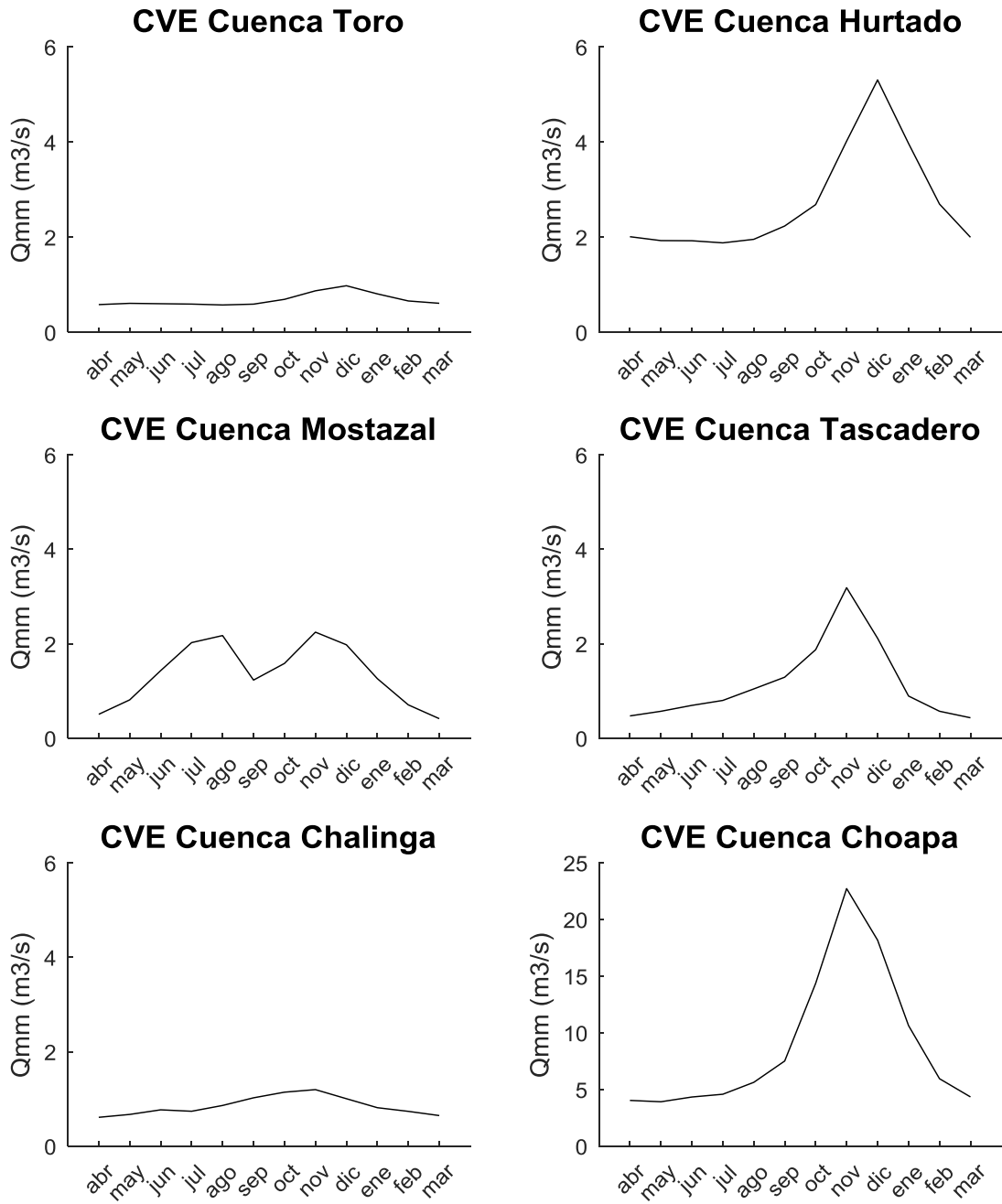


Figura 3.2: Caudales medios mensuales a partir de caudales observados en años hidrológicos 1985 - 2014.

Capítulo 4: Metodología

Para alcanzar los objetivos el procedimiento es:

1. Preparar las forzantes meteorológicas a resolución temporal de 3, 6, 12 y 24 horas.
2. Modelar cada cuenca con un paso temporal de 3, 6, 12 y 24 horas.
3. Calibrar sus parámetros con los caudales medios diarios observados.

Las forzantes meteorológicas de esta memoria son proporcionadas por el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Este producto es grillado entre las latitudes -17° y -57° y longitudes -77° a -66° con equiespaciado de $0,05^\circ$, generando una cuadrícula de 800×220 en Chile continental. Posee las forzantes meteorológicas de precipitación, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa a un paso temporal de 3 horas en los años hidrológicos de 1979 hasta 2014.

Para cambiar resolución al producto de forzantes la idea es quitar resolución a través del promedio simple de pasos consecutivos de 3 horas. Se aplica la siguiente metodología: Sea j la resolución buscada (6, 12 o 24 horas) entonces se seleccionan los primeros n datos de un mismo día tal que $3n = j$, por ejemplo, para las 12 horas se seleccionan los primeros 4 datos de un día. Se promedia el valor de los n datos y se considera tal valor como el representativo de las primeras j horas de ese día. Se prosigue la misma metodología con los siguientes n datos de aquel día, y con los siguientes días de la serie histórica.

El método tiene dos excepciones; cuando la forzante es la precipitación, en vez del promedio simple se considera la suma de los n datos, y cuando la forzante es la temperatura del aire, a resolución de 24 horas, se busca el máximo y el mínimo de los n datos en vez de su promedio, esto por requerimientos del modelo VIC.

4.1 Resolución temporal

A continuación, se muestran resultados de cambiar la resolución temporal al producto de forzantes meteorológicas. Como ejemplo, se propone el evento meteorológico del día 19-08-2003 en la celda de salida de la cuenca Mostazal. Se puede inferir de la Figura 4.1 que el cambio de resolución de 3, 6 y 12 horas atenúa los valores máximos, visible en el caso de la precipitación y ciclo diario de la temperatura del aire. El cambio más fuerte parece ocurrir en la resolución de 24 horas donde se diluye toda variación diaria de la forzante atmosférica.

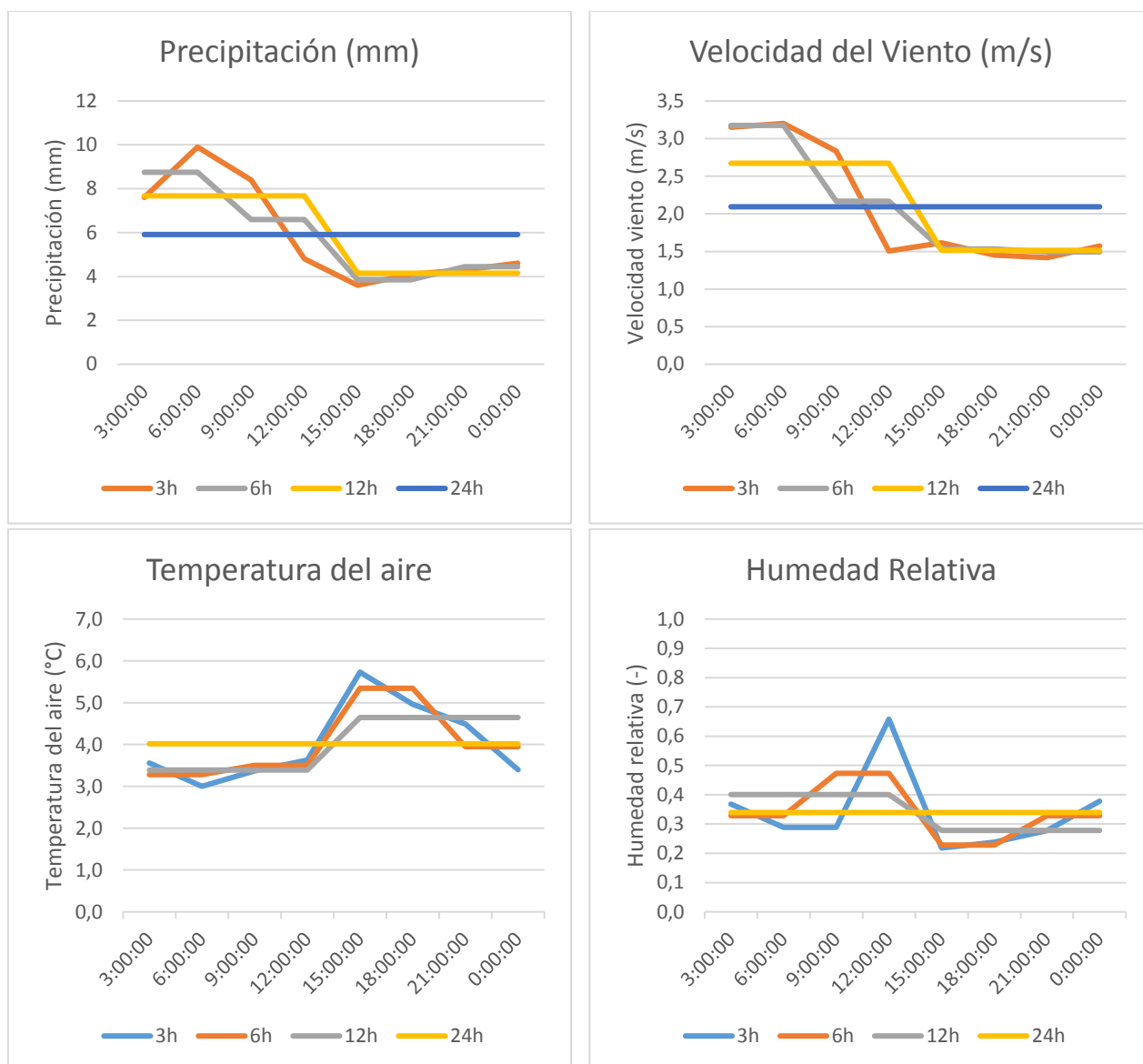


Figura 4.1: Ejemplo de cambio de resolución temporal para caso de evento en salida de cuenca Mostazal.

4.2 Producto de SWE

Inicialmente esta investigación buscaba, además de estudiar la influencia de la resolución y pasos temporales, realizar una calibración multi-objetivo para aprovechar la existencia de un producto con el equivalente en agua de nieve diario (SWE) estimado para la zona. Se desistió de realizar lo anterior debido a que el SWE estimado por Cortés & Margulis (2017) distaba de lo que naturalmente estimaba el modelo VIC al calibrar solo con caudales medios diarios, por tanto, la calibración multi-objetivo traía más perjuicios que beneficios al forzar al modelo a alcanzar un SWE que no se generaba naturalmente a través de las forzantes suministradas. De todas formas, se utiliza el producto a través de las curvas de variación estacional del SWE para constatar las diferencias. A continuación, se explica el producto de Cortés & Margulis (2017).

Ellos utilizaron el modelo SSiB3 LSM (Yang et al., 1997; Xue et al., 2003) combinado con un modelo *Snow Depletion Curve* (SDC) (Liston, 2004) más forzantes atmosféricas del reanálisis MERRA (Rienecker et al., 2011). Con ello, realizaron estimaciones del SWE para la Cordillera de las Andes desde las latitudes -27° a -37° las cuales fueron ajustadas según imágenes satelitales Landsat (sensores TM+, ETM+ y OLI) de fracción de área nival (fSCA). De esta forma generaron un producto del con 31 años de datos desde 1984 a 2015, los cuales validaron con mediciones en terreno obteniendo una correlación de 0.73, RMSE de 0.29 m y un error promedio menor a 0.01 m.

4.3 Modelamiento

Respecto al modelamiento existen consideraciones que se mencionan a continuación.

- Los parámetros que se calibran toman valor uniforme para todas las celdas de una misma cuenca.
- La profundidad de la primera capa de suelo se considera 0.1 metros según lo estipulado por Liang et al. (1996).
- La grilla de modelación es equivalente a la del producto de forzantes meteorológicas.
- Son celdas de una cuenca aquellas con algún porcentaje de su área ($> 0\%$).
- Aunque cada celda se modela con paso temporal de 3, 6, 12 o 24 horas, sus resultados siempre se solicitan a escala diaria, vale decir, sumados dentro del día si es un flujo o el último valor del día en caso de ser variable de estado.
- Las variables de estado (SWE y humedad del suelo) o flujos de la cuenca (escorrentía superficial, flujo base, evaporación, etc.) se calculan mediante suma ponderada a través de sus celdas por el respectivo porcentaje de área que representa cada una (ecuación 4.1).
- El caudal medio diario de la cuenca corresponde a la suma del flujo base diario y la escorrentía superficial diaria.
- Se omite el rastreo del caudal debido a que, en la mayoría de las cuencas, el tiempo de concentración estimado es menor que el mínimo paso temporal de modelación (3 horas).

$$X_t = \sum_{i=1}^N (X_{i,t}) \cdot A_i$$

4.1

- Donde X_t corresponde a cualquier flujo o variable de estado para un día t en la cuenca, N número de celdas de cuenca, $X_{i,t}$ corresponde al valor del flujo o variable en la celda i en el día t , A_i es la fracción de área que representa la celda respecto del área total de la cuenca.

4.4 Calibración

La calibración se lleva a cabo con el algoritmo SCE; buscando optimizar el ajuste de caudales observados mediante la función objetivo KGE (Gupta et al., 2009). Esta función busca ajustar el promedio, la desviación estándar y la correlación de la variable simulada con la observada. A continuación, se muestra la ecuación del KGE.

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - \alpha)^2 + (1 - \beta)^2 + (1 - r)^2} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \quad (4.4)$$

Donde:

- σ_{sim} : desviación estándar de los caudales medios diarios simulados.
- σ_{obs} : desviación estándar de los caudales medios diarios observados.
- μ_{sim} : promedio de los caudales medios diarios simulados.
- μ_{obs} : promedio de los caudales medios diarios observados.
- r : Correlación Pearson entre los caudales medios diarios simulados y observados.

El proceso de calibración de constará además de un periodo de *spin-up* y otro de validación. En la siguiente tabla se muestran dichos periodos por cada cuenca.

Tabla 4.1: Periodos de simulación en años hidrológicos.

Cuenca	<i>Spin-up</i>	Calibración	Validación
Toro	1979 – 1989	1990 – 2002	2003 – 2009
Hurtado	1979 – 1989	1990 – 2002	2003 – 2009
Mostazal	1979 – 1989	1990 – 2002	2003 – 2009
Tascadero	1979 – 1989	1990 – 2002	2003 – 2009

Chalinga	1979 – 1993	1992 – 2003	2003 – 2009
Choapa	1979 – 1989	1990 – 2002	2003 – 2009

Finalmente, los parámetros a calibrar corresponden a un total de once que se detallan en la Tabla 4.2. Estos parámetros se relacionan con la estructura del modelo y se explican en la sección 2.1. Se adjunta su descripción y el rango de valores en el que son calibrados.

Tabla 4.2: Parámetros a calibrar.

Parámetro	Descripción	Límite inferior	Límite superior
b infilt (-)	Parámetro de forma de la curva de infiltración.	10^{-5}	0,4
Depth2 (m)	Profundidad de la segunda capa de suelo.	0,5	3
Ds (-)	Fracción de Dsmax en la que el flujo base acelera.	0,01	1
Dsmax (mm/día)	Velocidad máxima del flujo base.	0,1	30
Ws (-)	Fracción de la máxima humedad posible en la capa 3 de suelo la cual comienza flujo base acelerado.	0,01	1
Depth3 (m)	Profundidad de la última capa del suelo asociada al flujo base y su contenido de humedad.	0,5	3
cexpt (-)	Exponente en la ecuación de la recarga. Valores deben ser mayores que 3.	3	20
Ksat (mm/día)	Conductividad hidráulica de las capas del suelo.	0	600
Tmin (°C)	Temperatura mínima a la que puede precipitar en forma líquida.	-2	2
Tmax (°C)	Temperatura máxima a la que puede nevar.	-2	4
Irs (m)	Rugosidad de la nieve. Mayores valores implican mayores flujos sensibles y latentes.	10^{-6}	0,3

4.5 Índices hidrológicos

Con el fin de analizar el ajuste del caudal medio diario simulado se analiza, además del KGE, el sesgo en la curva de duración simulada a través de los siguientes índices hidrológicos (Yilmaz, K.K. et al, 2008).

- Sesgo de volumen:

$$BiasRR = 100 \cdot \frac{\sum_{t=1}^N (QS_t - QO_t)}{\sum_{t=1}^N QO_t} (\%) \quad (4.5)$$

Donde QO corresponde al caudal observado y QS al simulado.

- Sesgo pendiente sección media:

$$BiasFMS = 100 \cdot \frac{[\log(QS_{m1} - QS_{m2})] - [\log(QO_{m1} - QO_{m2})]}{[\log(QO_{m1} - QO_{m2})]} (\%) \quad (4.6)$$

Donde $m1$ y $m2$ son la parte media de la curva de duración ($p_{exc} = 0.2$ y $p_{exc} = 0.7$ respectivamente)

- Sesgo volumen caudales altos:

$$BiasFHV = 100 \cdot \frac{\sum_{h=1}^H (QS_h - QO_h)}{\sum_{t=1}^N QO_h} (\%) \quad (4.7)$$

Donde $h = 1,2,3, \dots, H$ corresponden a los índices inferiores a una probabilidad de excedencia igual a 0.02.

- Sesgo volumen caudales bajos:

$$BiasFLV = -100 \cdot \frac{\sum_{l=1}^L [\log(QS_l - QS_L)] - \sum_{l=1}^L [\log(QO_l - QO_L)]}{\sum_{l=1}^L [\log(QO_l - QO_L)]} (\%) \quad (4.8)$$

Donde $l = 1,2,3, \dots, L$ son los índices en las probabilidades 0.7 y 1.0, con L el índice del mínimo caudal ($p_{exc} = 1$).

Capítulo 5: Resultados

En esta sección se presenta, por cada cuenca, los resultados en cuanto al ajuste de caudales y representación de los procesos hidrológicos, por cada paso temporal. Entre los resultados se encuentra: serie histórica de caudales medios diarios con el respectivo KGE de calibración y validación, índices hidrológicos de curvas de duración, curvas de variación estacional de caudales, curvas de variación estacional del SWE, escorrentía anual, sublimación anual, evaporación anual y parámetros calibrados.

5.1 Cuenca Toro

En la Figura 5.2 se tiene la serie histórica de caudales medios diarios observados y simulados durante el periodo de calibración y validación. El ajuste según paso temporal se presenta en la Tabla 5.1. El KGE durante calibración es similar en todos los pasos temporales (Figura 5.1), en tanto, en validación el KGE es similar en los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas (0,3) y menor para el paso de 24 horas (0,2) por menor ajuste de la desviación estándar (α) y promedio (β) observado.

Tabla 5.1: KGE y sus componentes para cuenca Toro.

Delta t	Calibración				Validación			
	KGE	α	β	r	KGE	α	β	r
3h	0,86	1,0	1,0	0,87	0,28	1,1	0,9	0,31
6h	0,87	1,0	1,0	0,87	0,28	1,2	0,9	0,32
12h	0,87	1,0	1,0	0,87	0,30	1,1	0,8	0,33
24h	0,85	1,0	1,0	0,85	0,24	1,3	0,8	0,31

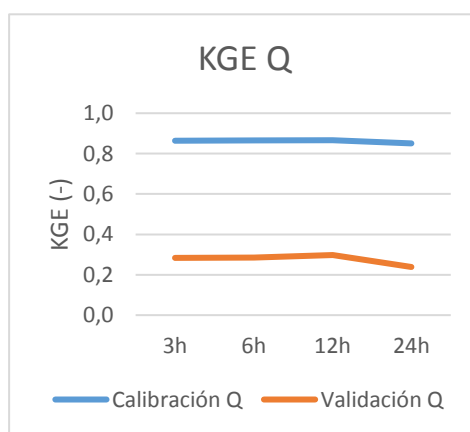


Figura 5.1: KGE en calibración y validación para cuenca Toro.

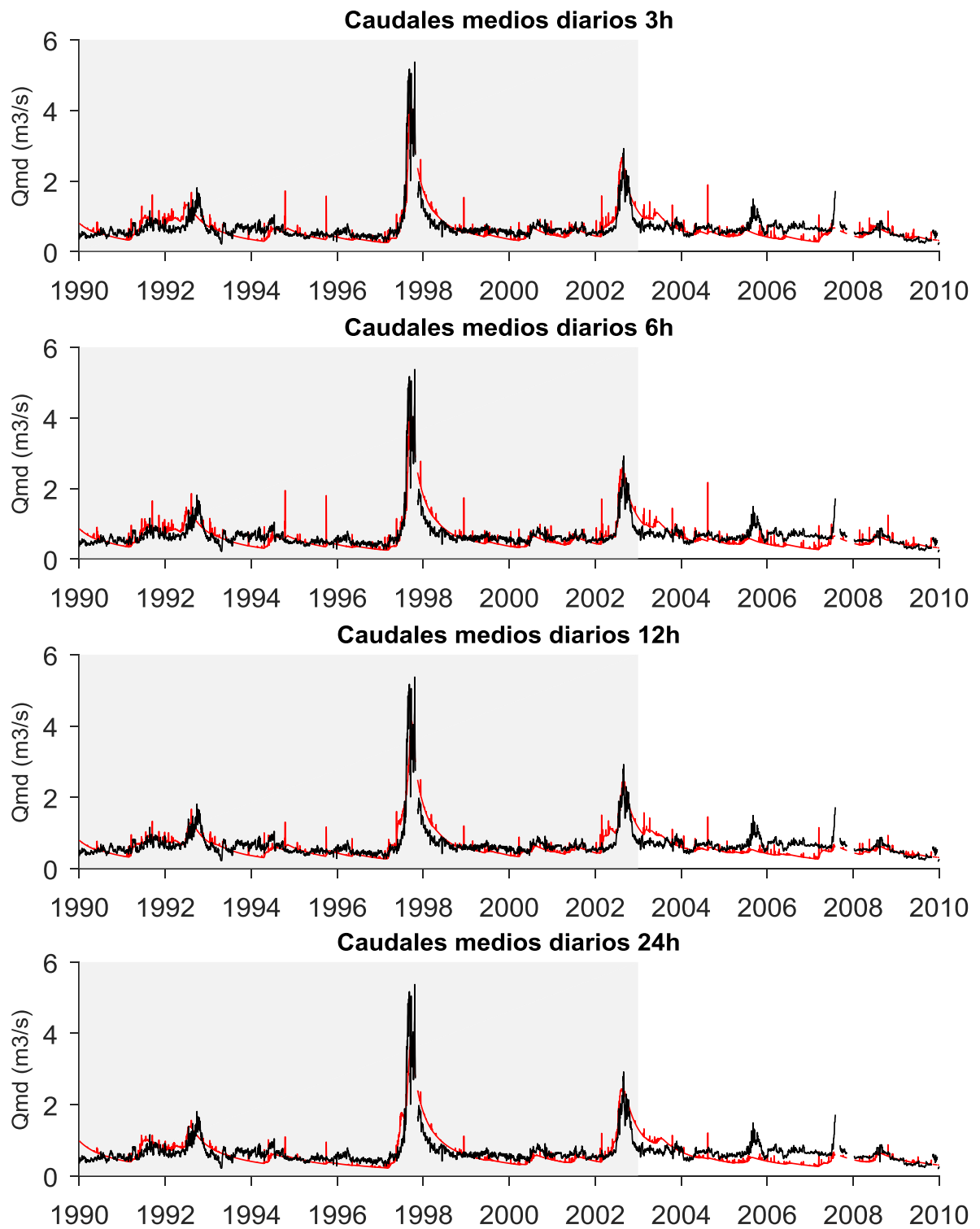


Figura 5.2: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Toro. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.

Si se analizan los índices hidrológicos de la curva de duración asociada a el caudal medio diario (Tabla 5.2), se puede encontrar que el paso de 24 horas tienen más sesgos de caudales altos

(FHV), medios (FMS) y bajos (FLV) durante la validación. Entre los pasos de 3, 6 y 12 horas, resalta la calibración de 12 horas por menores sesgos.

Tabla 5.2: Índices hidrológicos en cuenca Toro.

Delta t	Calibración				Validación			
	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV
3h	-3%	94%	9%	54%	-13%	45%	1%	61%
6h	-2%	79%	10%	52%	-15%	42%	1%	62%
12h	-1%	70%	11%	55%	-16%	19%	-1%	63%
24h	-2%	102%	14%	43%	-17%	58%	4%	68%

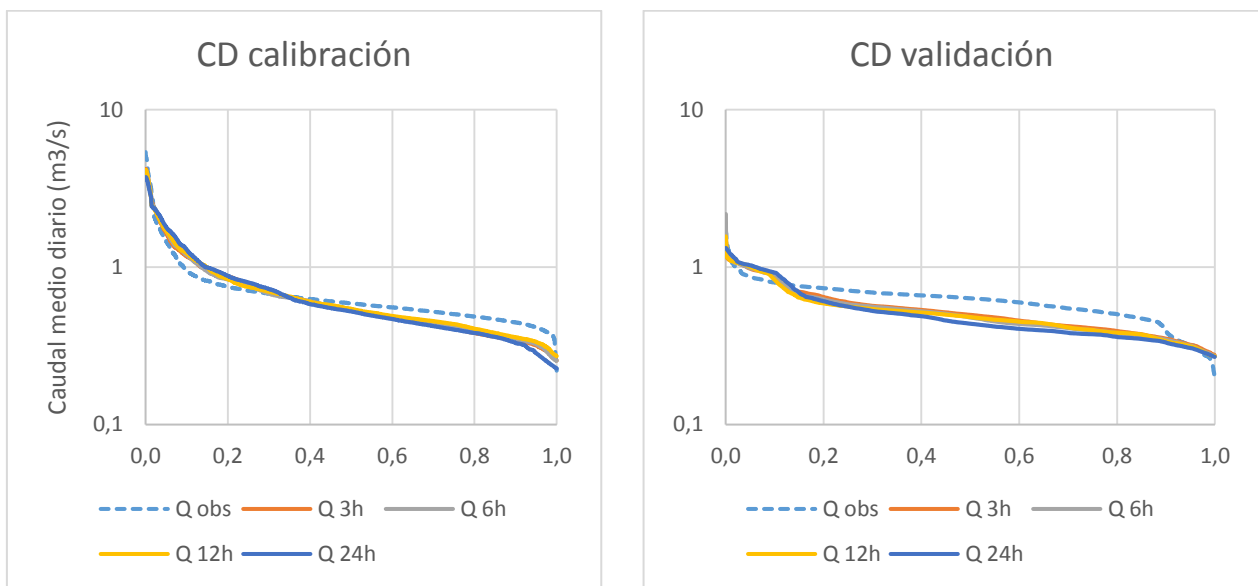


Figura 5.3: Curvas de duración en cuenca Toro.

Si se analiza a nivel mensual, mediante la curva de variación estacional de caudales (Figura 5.4), se tiene un ajuste similar durante calibración con un R^2 semejante en todo paso temporal (Tabla 5.3). En validación, las formas de las curvas difieren estando mejor representadas las de 12 y 24 horas en términos de R^2 .

Tabla 5.3: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Toro.

	R^2 3h	R^2 6h	R^2 12h	R^2 24h
Calibración	0,93	0,95	0,96	0,92
Validación	0,06	0,26	0,07	0,38

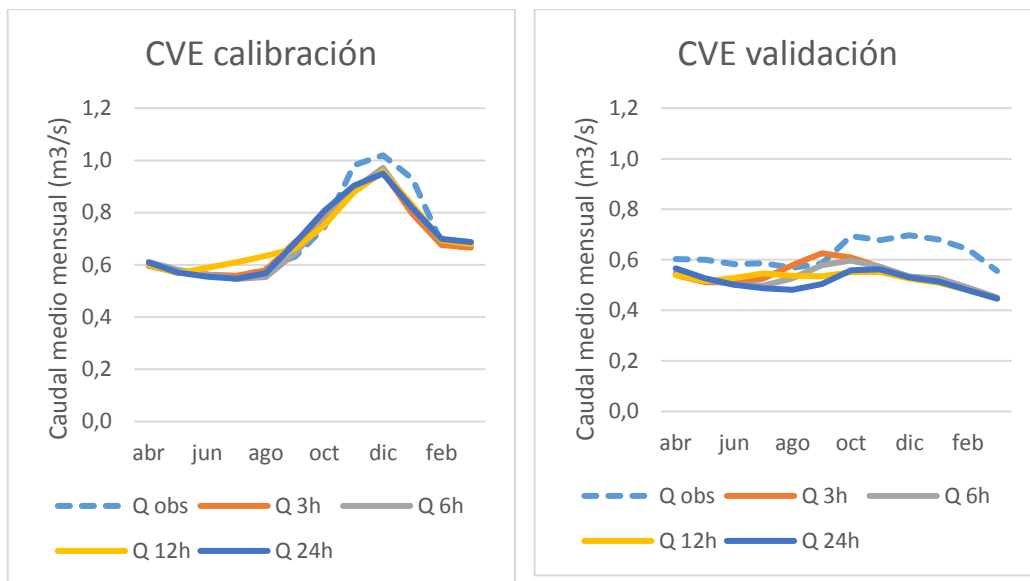


Figura 5.4: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Toro.

La estacionalidad del equivalente en agua de nieve (Figura 5.5) revela diferencias importantes en la acumulación máxima de cada paso temporal. Además, se observa que el producto Cortés & Margulis (2017) estima valores mayores que lo de lo simulado por VIC.

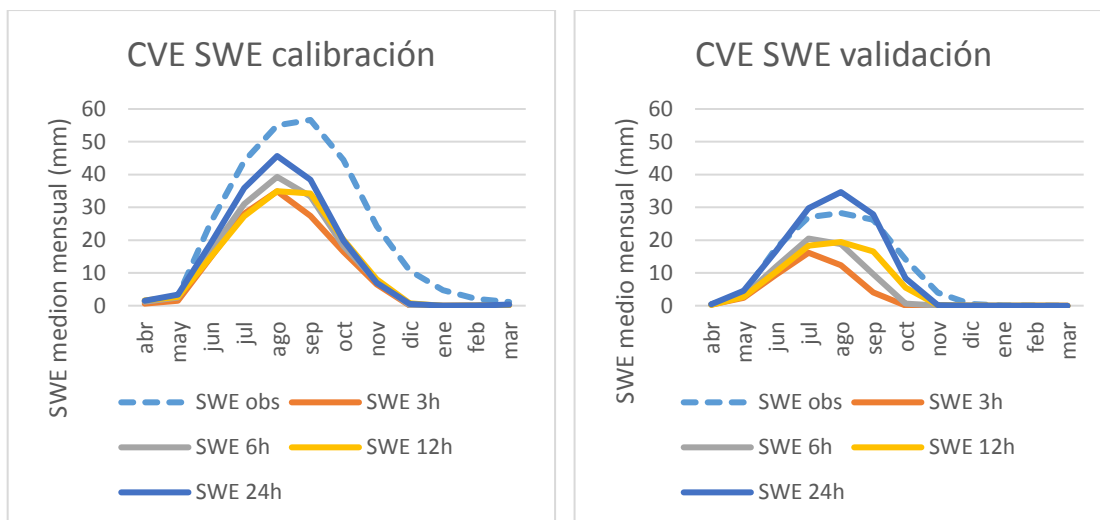


Figura 5.5: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Toro.

En cuanto a la representación de los procesos hidrológicos, en la Figura 5.6 se tiene la escorrentía anual simulada durante calibración y validación. Como se observa esta es idéntica para todos los pasos temporales y representa en promedio 0,44 de la precipitación media anual, que corresponde a 110 mm en el periodo de calibración. En tanto, la escorrentía observada también representa 0,44 de la precipitación media anual.

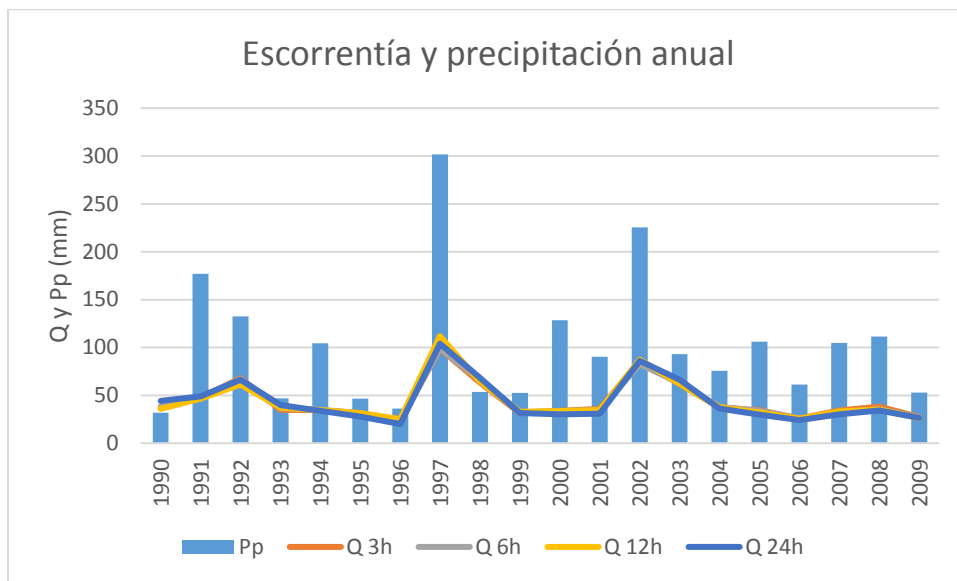


Figura 5.6: Escoorrentía anual en cuenca Toro.

La evaporación anual (evapotranspiración + evaporación del suelo) se muestra en la Figura 5.7. Esta muestra que los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas simulan valores cercanos, en tanto, el paso de 24 horas simula sostenidamente valores mayores. En cuanto a la sublimación anual (Figura 5.8), esta alcanza valores cercanos en los pasos de 3, 6 y 12 horas y sostenidamente menores para el paso de 24 horas.

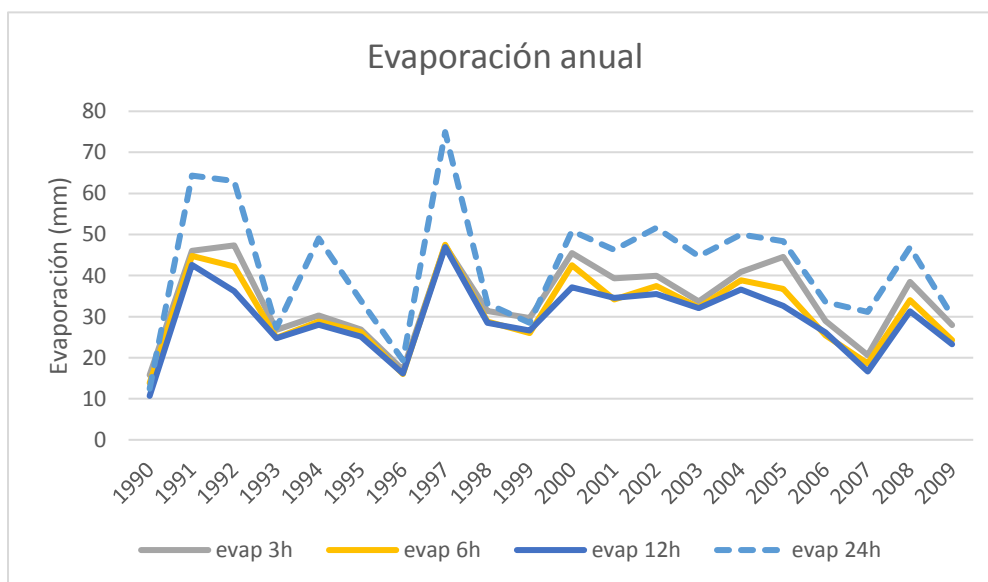


Figura 5.7: Evaporación anual en cuenca Toro.

Si se calcula el valor medio de escoorrentía, evaporación y sublimación respecto del valor medio de precipitación durante el periodo de calibración, se constata (Figura 5.9) que los pasos de 3, 6 y 12 horas representan los procesos de forma semejante, en tanto, el paso de 24 horas es diferente sobre todo en lo referido a los flujos de sublimación y evaporación. Si además se

analiza, la precipitación sólida respecto la precipitación media anual (Figura 5.9), se observan diferencias en el ingreso nivel sobre todo en los pasos de 12 y 24 horas.

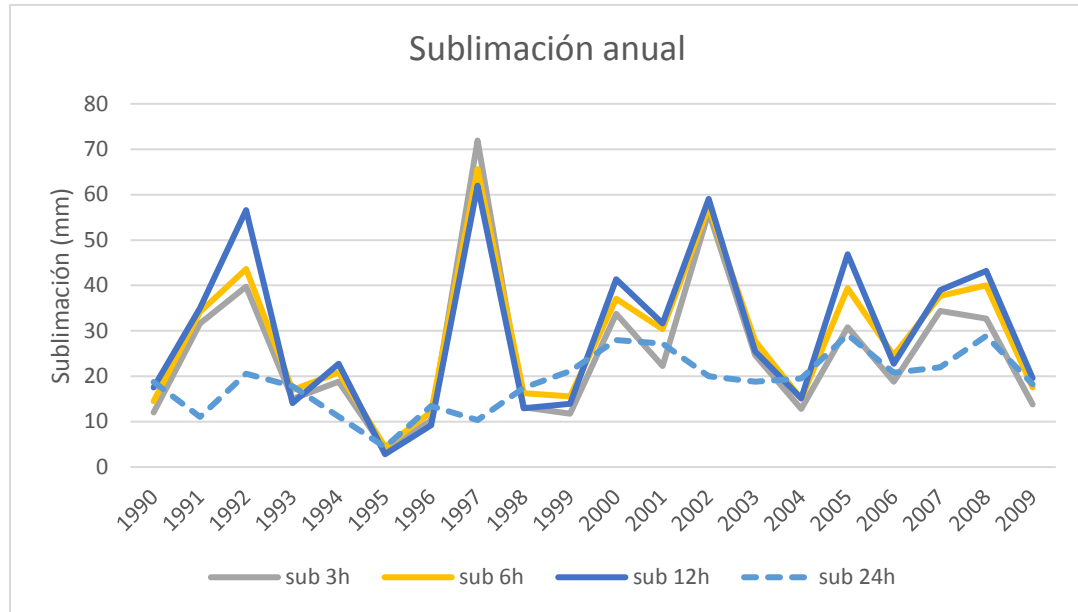


Figura 5.8: Sublimación anual cuenca Toro.

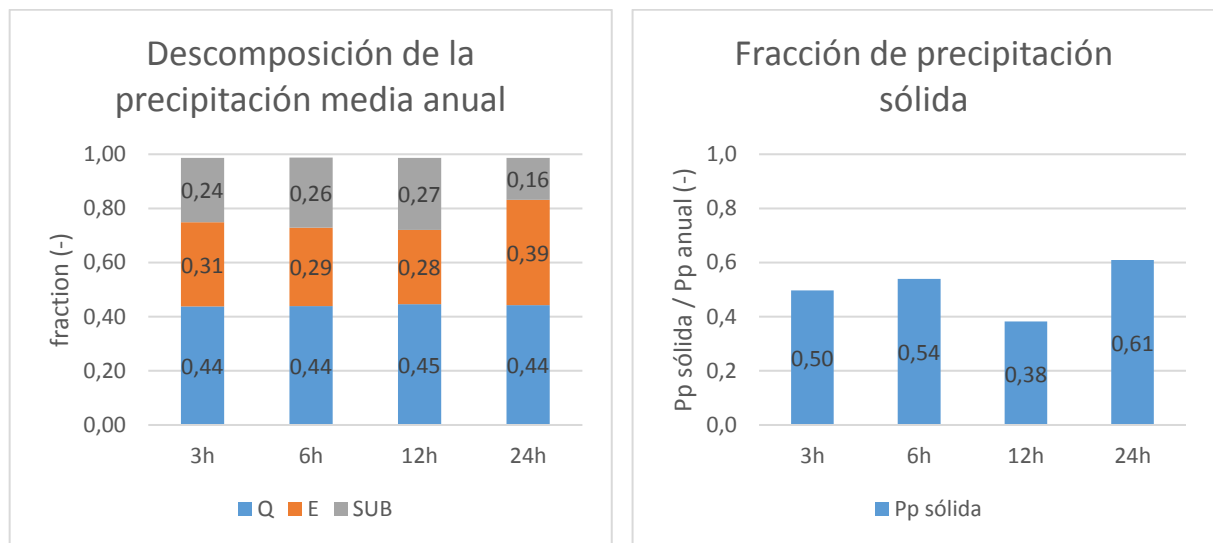


Figura 5.9: Descomposición de la precipitación media anual en cuenca Toro en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB).

Dado lo anterior, se pueden entender los parámetros calibrados de la Figura 5.10, como un reajuste por efecto del cambio de resolución temporal en los pasos de 3, 6 y 12 horas, y como una modelación diferente para el paso de 24 horas. De esta manera, los parámetros que más varían son binfilt, irs, ksat y el rango de ingreso nivel.

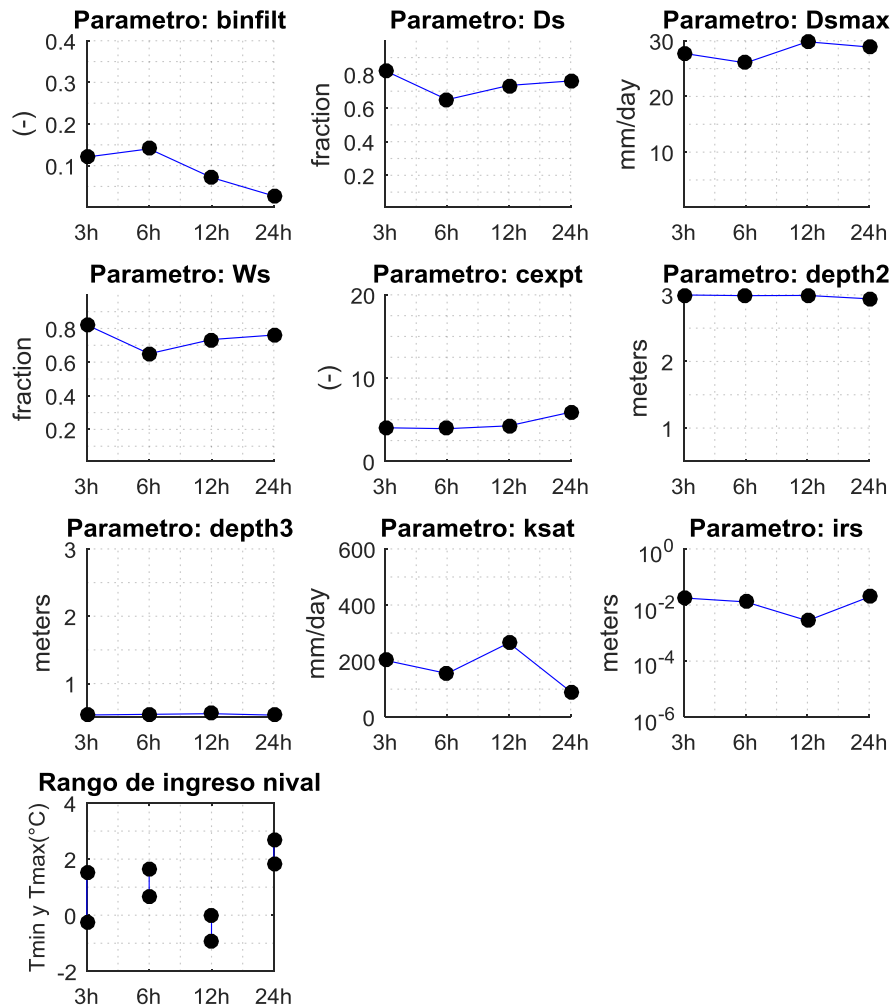


Figura 5.10: Parámetros calibrados en cuenca Toro.

Tabla 5.4: Parámetros calibrados para cuenca Toro.

Delta t	b infiltr	Ds	Ds max	Ws	cexpt	depth 2	depth 3	ksat	irs	Tmin	Tmax
3h	0,12	0,8	28	0,8	4	3,0	0,5	203	2E-02	-0,2	1,5
6h	0,14	0,6	26	0,6	4	3,0	0,5	156	1E-02	0,6	1,7
12h	0,07	0,7	30	0,7	4	3,0	0,6	265	3E-03	-0,9	0,0
24h	0,03	0,8	29	0,8	6	2,9	0,5	91	2E-02	1,8	2,7

Resumiendo los resultados para esta cuenca, la modelación de 3, 6 y 12 horas representan los flujos del balance hídrico (escorrentía, evaporación y sublimación) de forma similar, con ajustes diarios semejantes tanto en calibración como validación. Aún así tienen diferencias en la representación de procesos nivales como la cantidad de precipitación sólida y la curva de variación estacional del SWE, que son más notorias en el paso de 12 horas respecto del de 3 y 6 horas.

La modelación de 24 horas se muestra diferente por sus montos de sublimación, ingreso nival y estacionalidad del SWE; lo que se traduce en un ajuste diario levemente menor que los demás pasos temporales tanto en calibración como validación. De todas formas, este paso temporal representa de buena forma la curva de variación estacional de caudales en calibración y validación.

5.2 Cuenca Hurtado

En la Figura 5.12 se tiene la serie histórica de caudales medios diarios observados y simulados durante el periodo de calibración y validación. La calibración de los caudales medios diarios alcanza (Tabla 5.5) ajuste similar para las 3, 6 y 12 horas y superior para el paso de 24 horas (Figura 5.11); explicado por una mejor representación del promedio observado (β) y la correlación (r). En validación, se observa un deterioro desde los pasos de 3 a 12 horas por menor representación de la desviación estándar observada (α) (Figura 5.12) y el paso de 24 horas mantiene un ajuste superior.

Tabla 5.5: KGE y sus componentes para cuenca Hurtado.

Delta t	Calibración				Validación			
	KGE	α	β	r	KGE	α	β	r
3h	0,80	1,0	0,9	0,83	0,39	1,4	0,8	0,57
6h	0,79	1,0	0,9	0,82	0,33	1,5	0,8	0,60
12h	0,78	1,0	0,8	0,84	0,16	1,7	0,8	0,58
24h	0,87	1,0	1,0	0,87	0,41	1,5	0,9	0,62

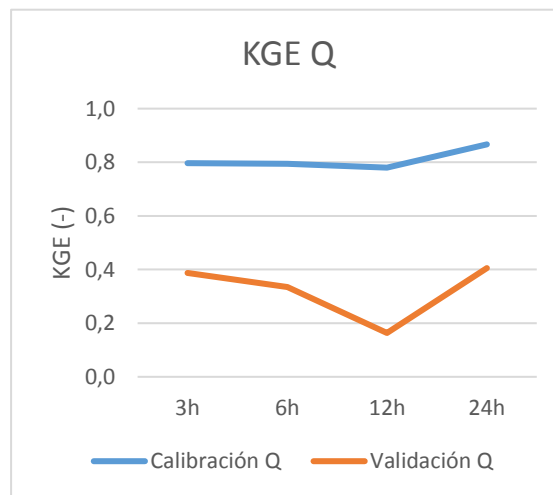


Figura 5.11: KGE en calibración y validación para cuenca Hurtado.

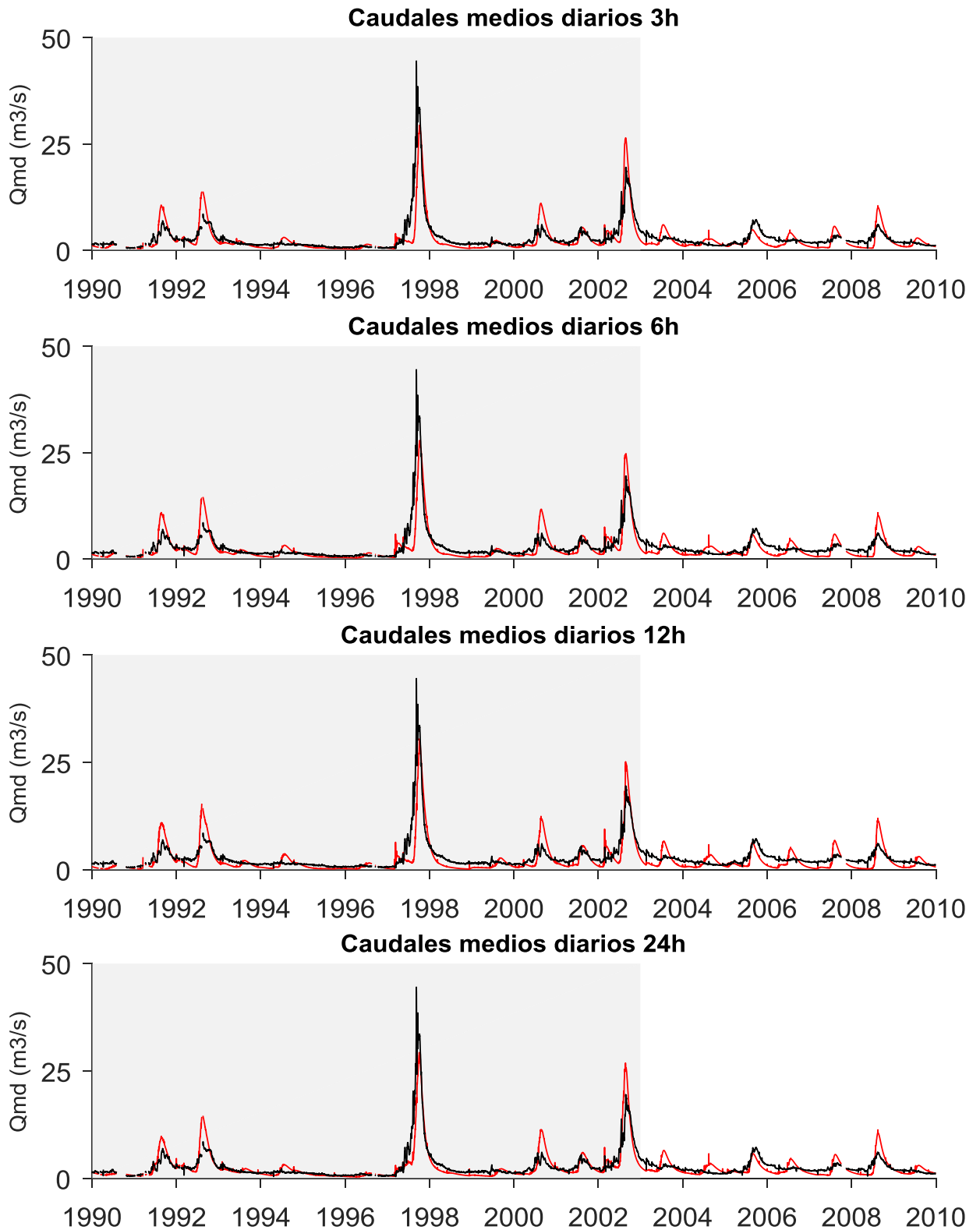


Figura 5.12: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Hurtado. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.

Si se analizan los índices hidrológicos de la curva de duración asociada a los caudales medios diarios (Tabla 5.6) se puede constatar el deterioro desde los pasos de 3 a 12 horas, a través de un mayor sesgo de caudales medios (BIAS FMS), y la mejora en el paso de 24 horas, también a través de un menor sesgo de caudales medios. Las curvas de duración de la Figura 5.13 constatan los índices hidrológicos.

Tabla 5.6: Índices hidrológicos en cuenca Hurtado.

Delta t	Calibración				Validación			
	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV
3h	-12%	30%	0%	19%	-16%	75%	10%	53%
6h	-10%	47%	3%	23%	-16%	109%	15%	63%
12h	-15%	74%	4%	6%	-23%	165%	19%	22%
24h	-4%	32%	4%	23%	-6%	65%	17%	67%

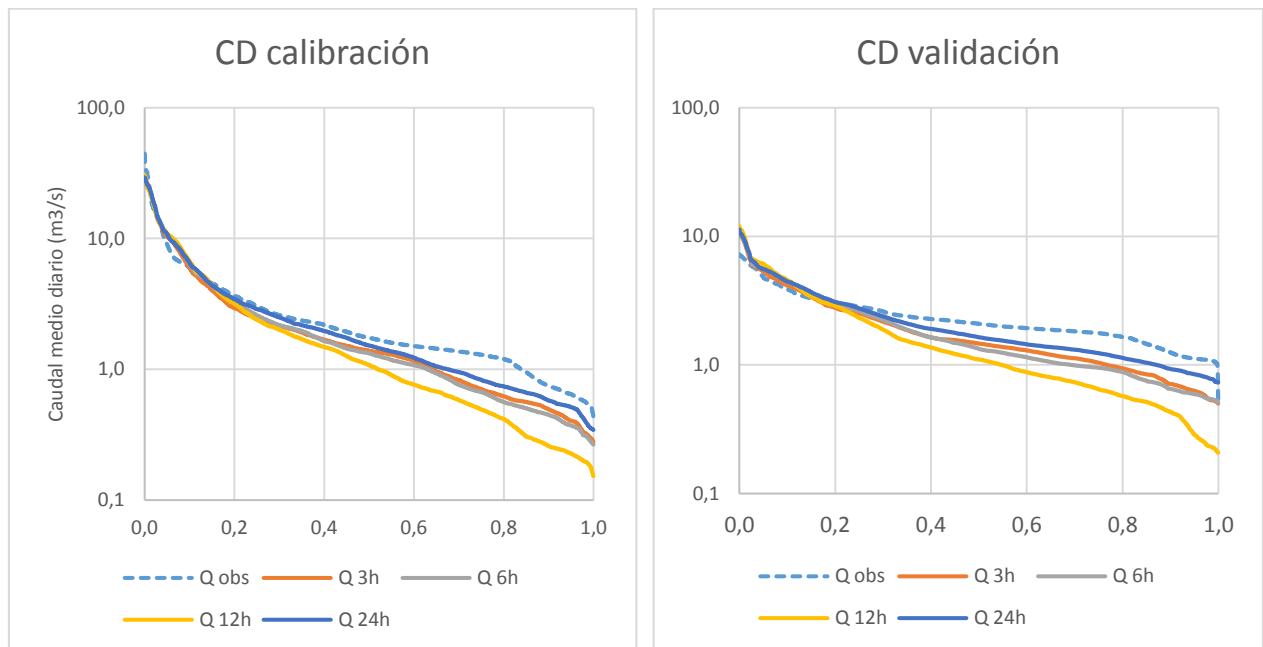


Figura 5.13: Curvas de duración en cuenca Hurtado.

Las curvas de variación estacional de caudales muestran que, a nivel mensual, la escorrentía es similar para todos los pasos temporales presentando el mismo ajuste respecto la curva de variación observada (Tabla 5.7). En validación, todos los pasos modelan de la misma forma, con las mismas falencias.

Tabla 5.7: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Hurtado.

	R^2 3h	R^2 6h	R^2 12h	R^2 24h
Calibración	0,95	0,95	0,96	0,95
Validación	0,81	0,85	0,87	0,87

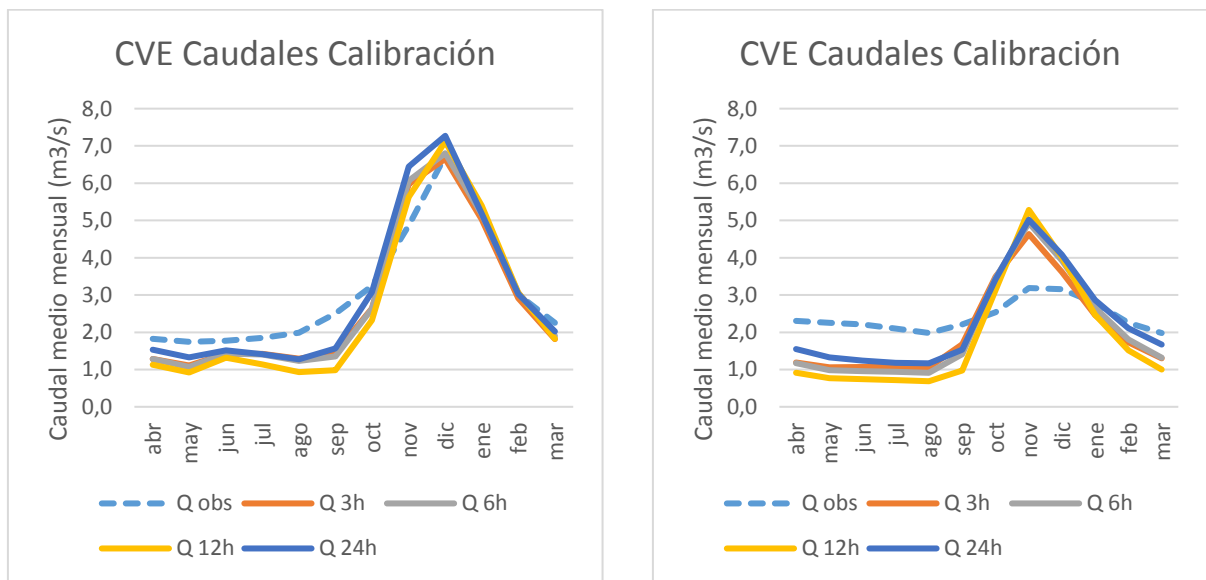


Figura 5.14: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Hurtado.

En cuanto a la estacionalidad del equivalente en agua de nieve (Figura 5.15) esta muestra diferencias relevantes sobre todo en los pasos temporales de 12 y 24 horas respecto los de 3 y 6 horas. Además, se constata que el producto de Cortés & Margulis (2017) estima valores muy mayores a los simulados por VIC (SWE obs).

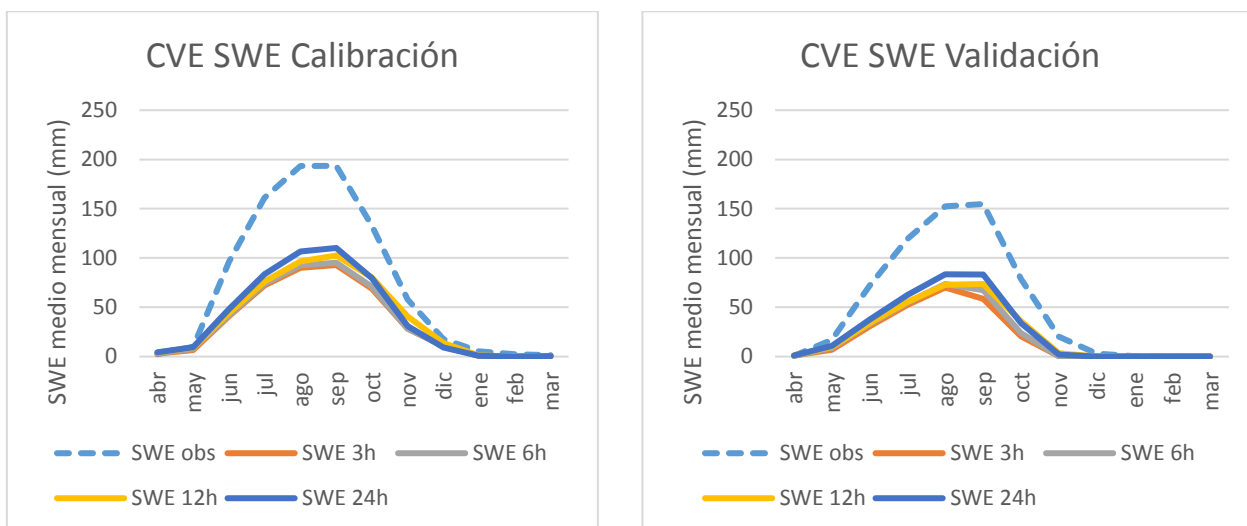


Figura 5.15: Curvas de variación estacional del SWE en cuenca Hurtado.

Respecto la representación de los procesos hidrológicos, en la Figura 5.16 se tiene la escorrentía y precipitación anual para el periodo de calibración y validación. Se observan diferencias sostenidas entre los pasos temporales, que se constatan al calcular la escorrentía media respecto de la precipitación media durante calibración (Figura 5.18). Es así como la escorrentía a las 24 horas es sostenidamente mayor (0,86 de la precipitación media de 157 mm), menor para las 12 horas (0,76) y equivalente para los pasos de 3 y 6 horas (0,80). La escorrentía observada, en tanto, representa 0,88 de la precipitación media anual.

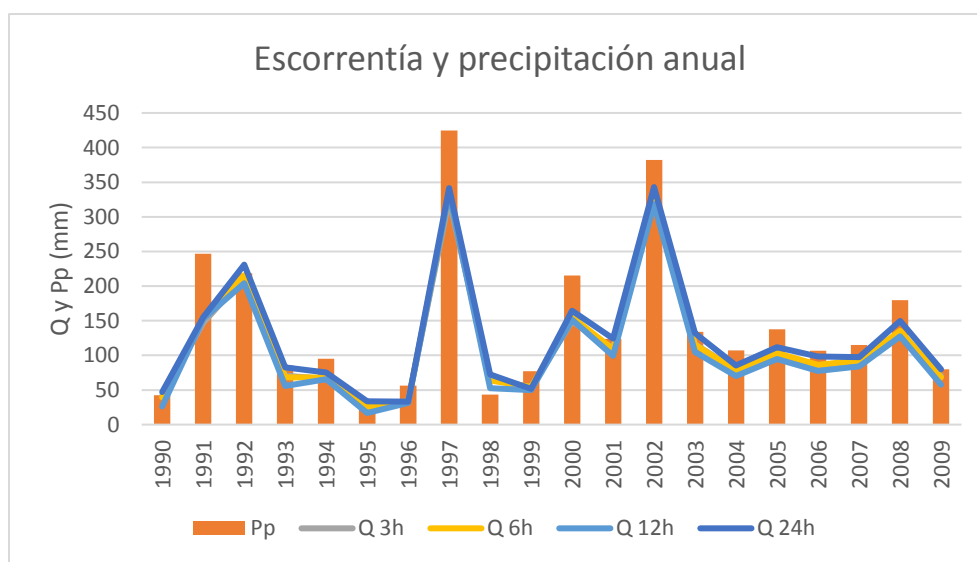


Figura 5.16: Escorrentía anual cuenca Hurtado.

En cuanto a la evaporación y sublimación anual (Figura 5.17), la primera difiere según cada paso temporal y la segunda es similar para los pasos de 3 y 6 horas, y, sostenidamente mayor a las 12 horas y menor a las 24 horas.

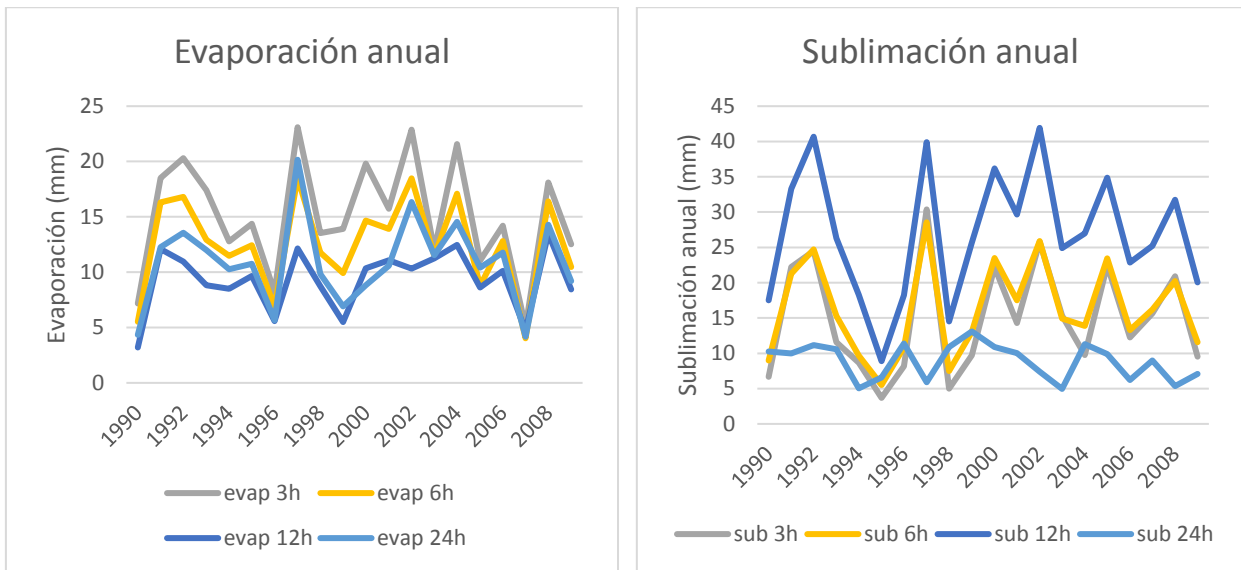


Figura 5.17: Evaporación y sublimación anual para cuenca Hurtado.

La descomposición de la precipitación media anual durante el periodo de calibración (Figura 5.18) señala que las modelaciones de 3 y 6 horas son similares, en tanto las de 12 horas y 24 horas difieren sobre todo en lo respectivo al flujo de sublimación anual. Si se analiza la fracción de precipitación sólida, esta se muestra mayor en los pasos de 12 y 24 horas. Por lo tanto, de los parámetros calibrados de la Figura 5.19, cabe destacar el relacionado a la rugosidad de la nieve (irs) y los rangos de ingreso nival (T_{min} y T_{max}) ya que estos tienen consecuencias relevantes en la modelación.

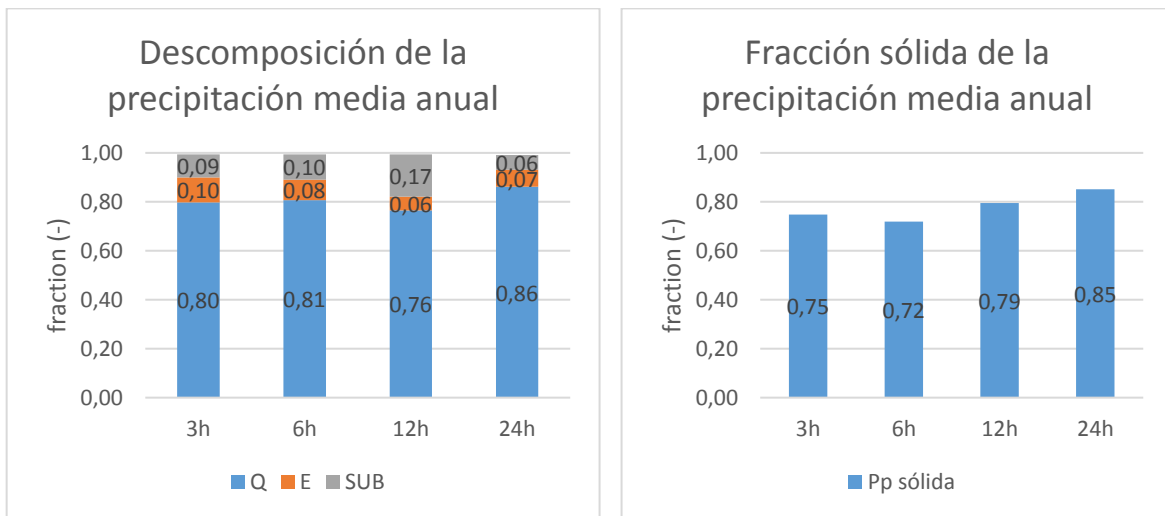


Figura 5.18: Descomposición de la precipitación media anual en cuenca Hurtado en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..

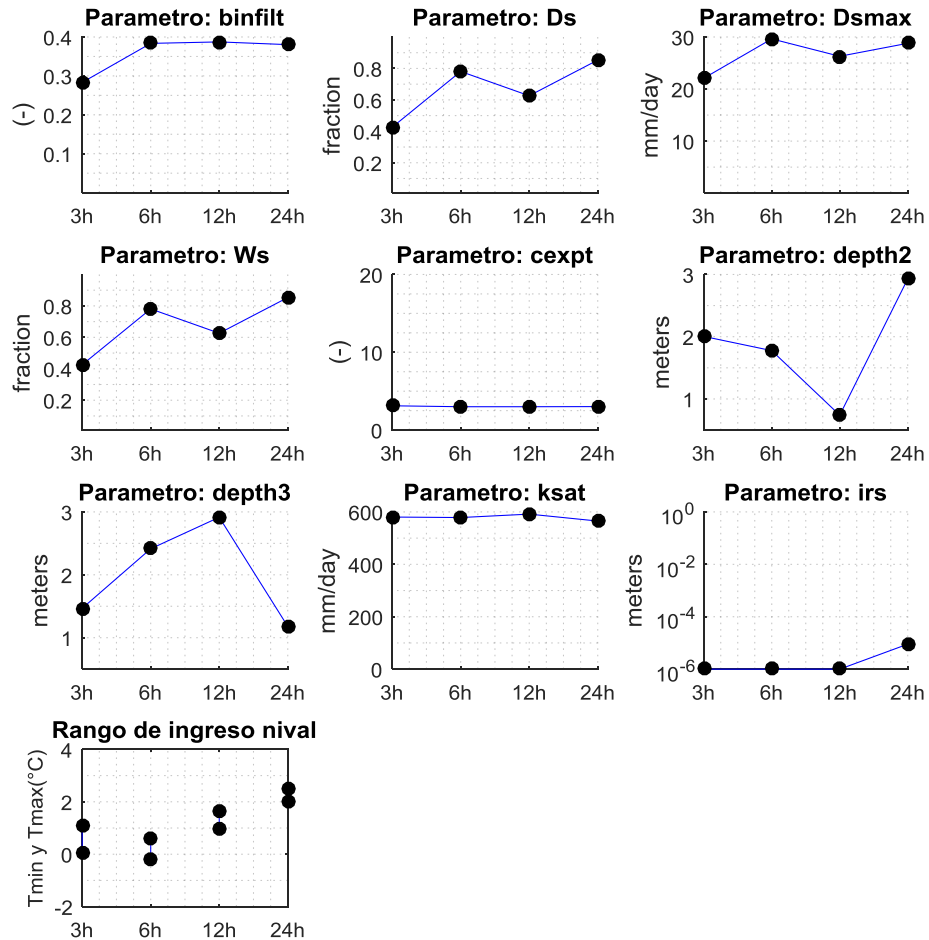


Figura 5.19: Parámetros calibrados en cuenca Hurtado.

Tabla 5.8: Parámetros calibrados para cuenca Hurtado.

Delta t	b infiltr	Ds	Ds max	Ws	cexpt	depth 2	depth 3	ksat	irs	Tmin	Tmax
3h	0,3	0,4	22	0,4	3	2,0	1,5	580	1,00E-06	0,1	1,1
6h	0,4	0,8	30	0,8	3	1,8	2,4	579	1,00E-06	-0,2	0,6
12h	0,4	0,6	26	0,6	3	0,7	2,9	592	1,00E-06	1,0	1,6
24h	0,4	0,9	29	0,9	3	2,9	1,2	565	9,00E-06	2,0	2,5

Resumiendo los resultados para esta cuenca, las modelaciones de 3 y 6 horas son las más cercanas entre sí en cuanto a la representación de los procesos hidrológicos. Esto se observa en la descomposición de la precipitación media anual, los montos de ingreso nival, la estacionalidad del SWE y caudales. De todas formas el ajuste de la modelación de 6 horas es menor que el de 3 horas durante validación.

Por otro lado, la modelación de 12 horas es difiere de las de 3 y 6 en cuanto a la representación de los procesos hidrológicos con un peor ajuste en validación. La modelación de

24 horas también difere por un menor flujo de sublimación pero su ajuste resulta más conveniente en calibración y validación respecto los demás pasos temporales.

5.3 Cuenca Mostazal

En la Figura 5.22 se tiene la serie histórica observada y simulada por cada paso temporal en periodo de calibración y validación. El modelamiento del caudal medio diario muestra que (Tabla 5.9), en calibración, el ajuste es similar para todo paso temporal con un KGE aproximado de 0,8. En validación, el KGE mejora al engruesar el paso temporal (Figura 5.20) lo que se explica por una mejora en el ajuste de la desviación estándar observada (α) y correlación (r) que se corroboran visualmente en la serie histórica.

Tabla 5.9: KGE y sus componentes para cuenca Mostazal.

Delta t	Calibración				Validación			
	KGE	α	β	r	KGE	α	β	r
3h	0,77	0,9	1,0	0,79	0,21	1,5	1,4	0,53
6h	0,77	0,9	1,0	0,79	0,30	1,4	1,4	0,56
12h	0,79	0,9	1,0	0,81	0,36	1,3	1,3	0,58
24h	0,79	0,9	1,0	0,80	0,41	1,2	1,4	0,60

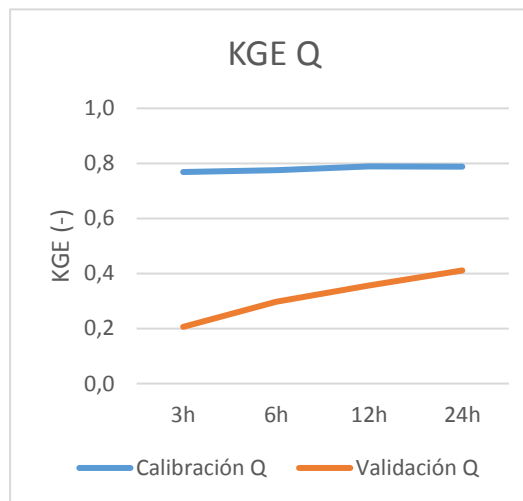


Figura 5.20: KGE en calibración y validación para cuenca Mostazal.

El análisis de los índices hidrológicos (Tabla 5.10) replica la mejora de ajuste al engruesar el paso temporal, lo que se observa en una disminución del sesgo de caudales medios (FMS) y altos (FHV) en la etapa de validación.

Tabla 5.10: Índices hidrológicos en cuenca Mostazal.

Delta	Calibración				Validación			
	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV
3h	0%	-8%	4%	74%	44%	38%	48%	77%
6h	1%	-3%	3%	69%	40%	33%	41%	73%
12h	2%	0%	4%	64%	35%	25%	36%	74%
24h	2%	-6%	4%	67%	40%	16%	29%	70%

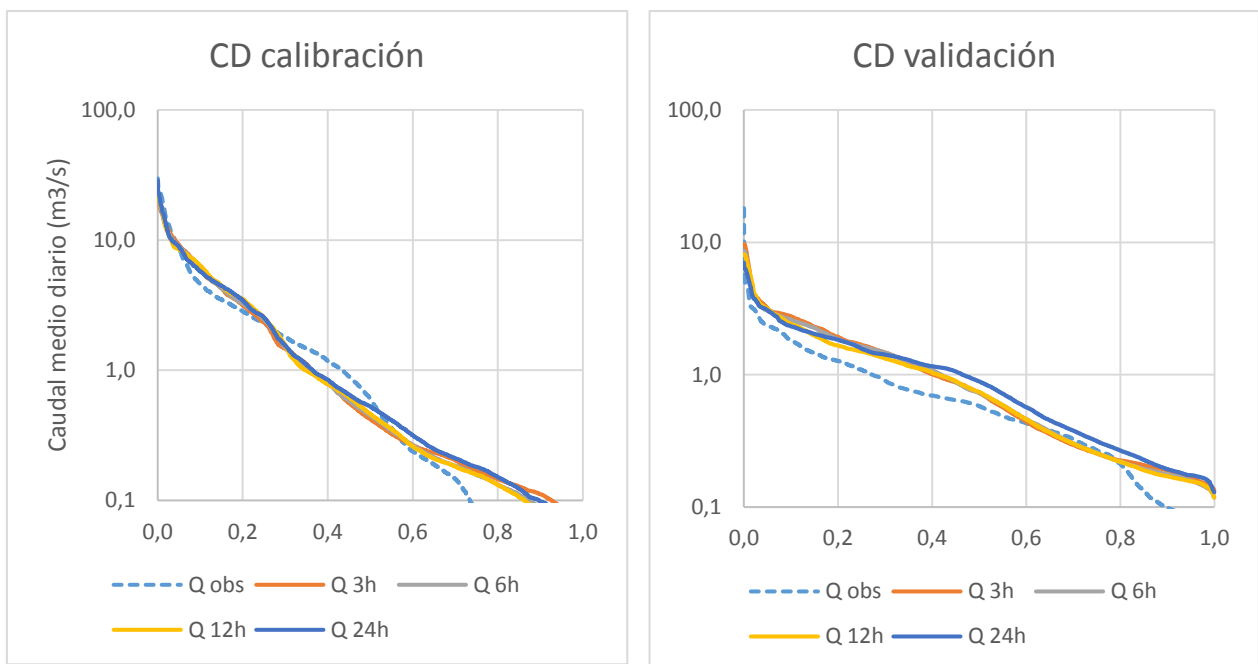


Figura 5.21: Curvas de duración en cuenca Mostazal.

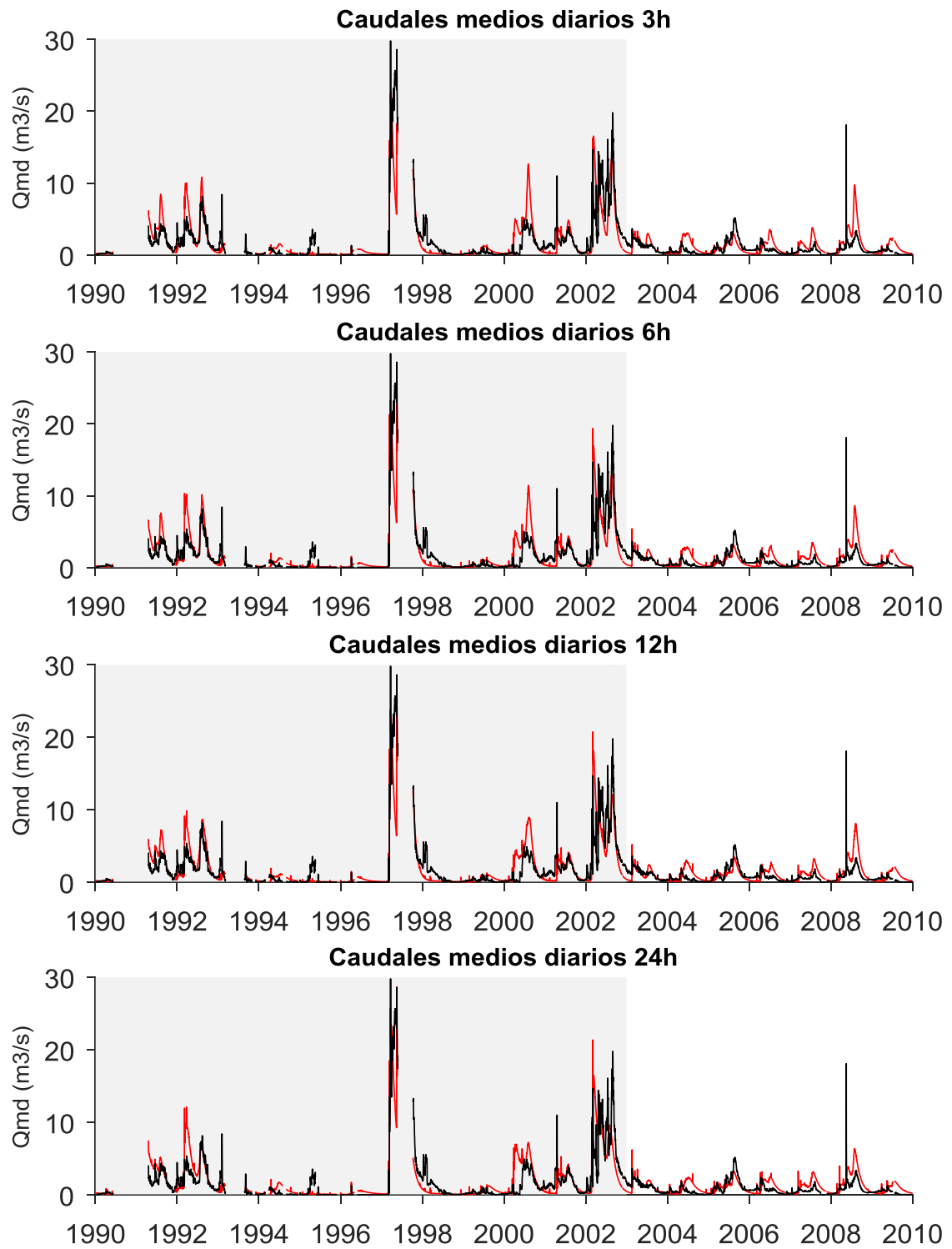


Figura 5.22: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Mostazal. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.

A nivel mensual, se observan curvas de variación (Figura 5.23) estacional semejantes en los pasos de 3, 6 y 12 horas; y una bastante diferente a las 24 horas pero con un ajuste mayor (Tabla 5.11). En validación todos los pasos temporales representan la curva de forma semejante.

Tabla 5.11: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Mostazal.

	R^2 3h	R^2 6h	R^2 12h	R^2 24h
Calibración	0,78	0,80	0,82	0,89
Validación	0,69	0,70	0,71	0,70

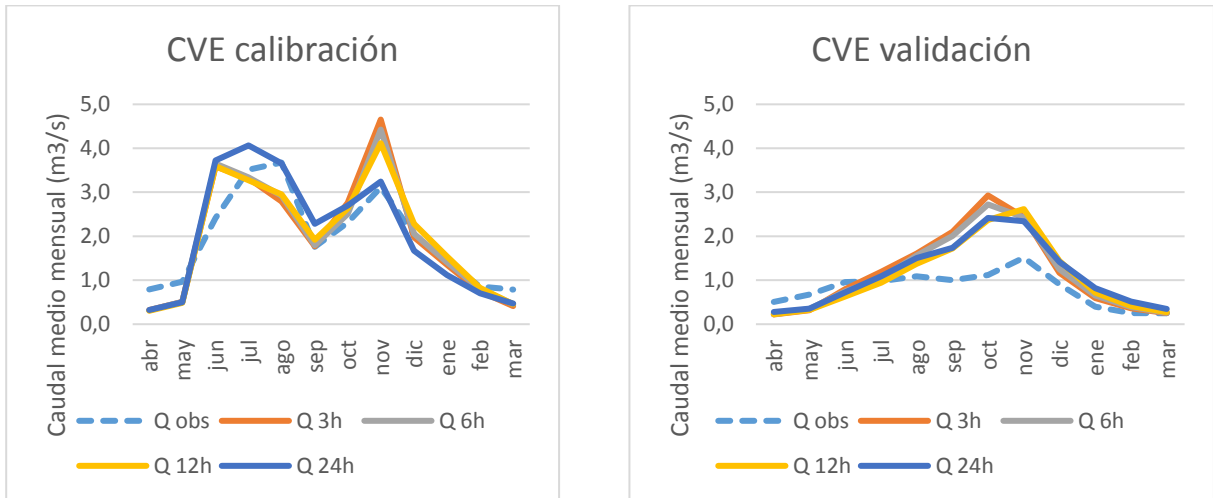


Figura 5.23: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Mostazal.

La estacionalidad del SWE (Figura 5.24) se muestra similar durante las 3, 6 y 12 horas, y diferente a las 24 horas. En tanto, el producto con estimaciones del SWE es bastante superior a lo simulado por VIC.

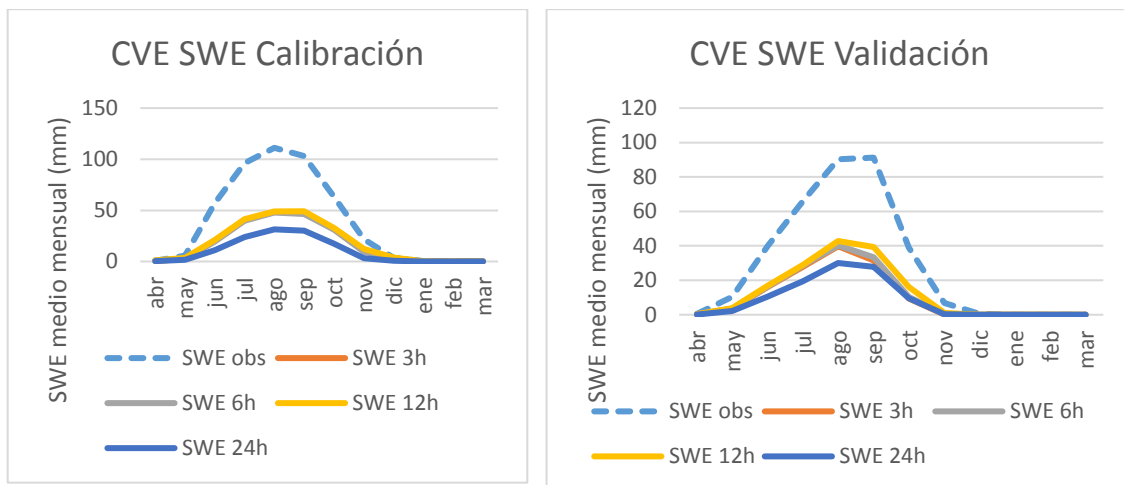


Figura 5.24: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Mostazal.

Respecto la representación de los procesos hidrológicos, la descomposición de la precipitación media anual durante el periodo de calibración (Figura 5.25), muestra un modelamiento similar para los pasos de 3, 6 y 12 horas, y un modelamiento diferente para el paso de 24 horas debido a un menor flujo de sublimación. Si además se calcula, el valor medio de precipitación sólida anual respecto del valor medio de precipitación anual, se observa que el paso de 24 horas ingresa menos precipitación sólida que los pasos de 3, 6 y 12 horas.

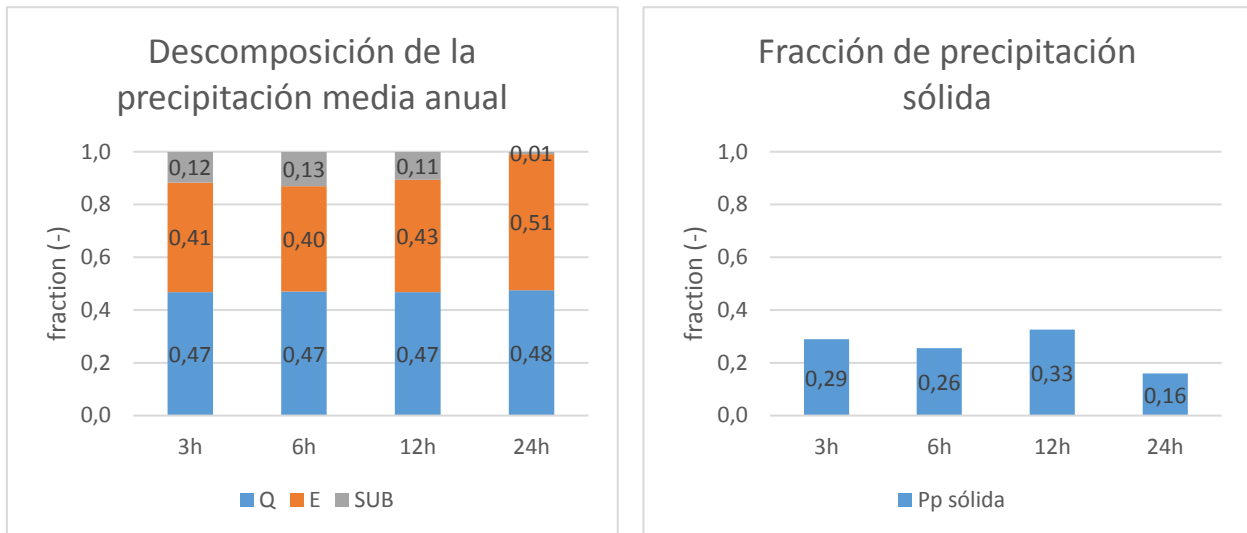


Figura 5.25: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Mostazal en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..

En la Figura 5.26 se presentan los parámetros calibrados para esta cuenca. A partir de los resultados, se concluye las variaciones en los parámetros entre los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas corresponde a un reajuste por efecto del cambio de resolución temporal. De esta manera, los parámetros con mayores cambios son binfilt, irs, ksats y Depth3.

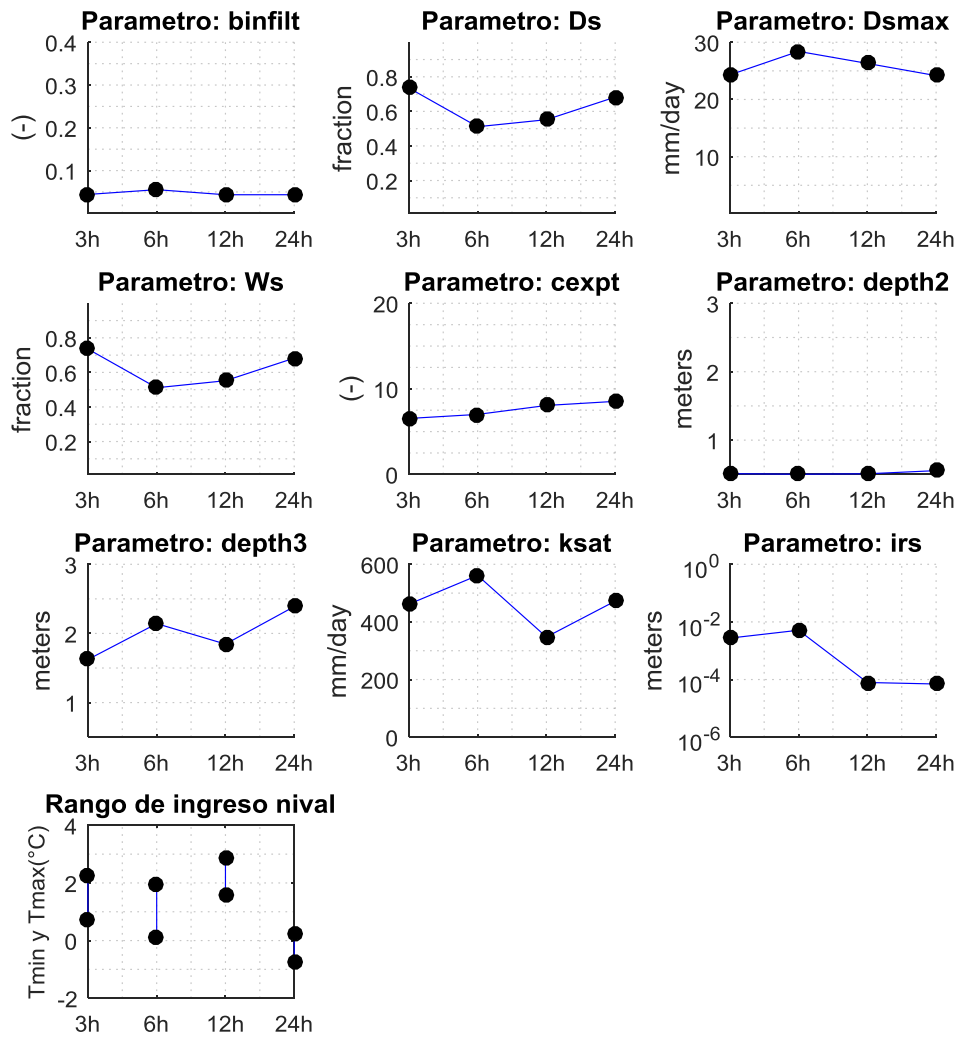


Figura 5.26 Parámetros calibrados para cuenca Mostazal.

Tabla 5.12: Parámetros calibrados en cuenca Mostazal.

Delta	b infiltr	Ds	Dsmax	Ws	cexpt	depth 2	depth 3	ksat	irs	Tmin	Tmax
3h	0,04	0,7	24	0,7	7	0,5	1,6	462	3E-03	0,7	2,3
6h	0,06	0,5	28	0,5	7	0,5	2,1	561	5E-03	0,1	2,0
12h	0,04	0,6	26	0,6	8	0,5	1,8	348	8E-05	1,6	2,9
24h	0,04	0,7	24	0,7	9	0,6	2,4	472	7E-05	-0,8	0,2

5.4 Cuenca Tascadero

En la Figura 5.28 se tiene la serie histórica observada y simulada por cada paso temporal en periodo de calibración y validación. Los resultados para la calibración de esta cuenca se tienen en la Tabla 5.13. En calibración el ajuste es similar para todo paso temporal, cercano a 0,8. En validación los pasos de 3, 6 y 24 horas tienen ajuste similar de 0,5 (Figura 5.27) y el paso de 12 horas un ajuste superior de 0,6 lo que se explica por un mejor ajuste del promedio (β) y desviación estándar (α) observados.

Tabla 5.13: KGE y sus componentes para cuenca Tascadero.

Delta t	Calibración				Validación			
	KGE	α	β	r	KGE	α	β	r
3h	0,78	1,0	1,0	0,78	0,49	1,3	1,3	0,75
6h	0,78	1,0	1,0	0,79	0,50	1,3	1,3	0,77
12h	0,76	0,9	1,0	0,78	0,59	1,2	1,2	0,75
24h	0,76	0,9	1,0	0,78	0,49	1,3	1,3	0,73

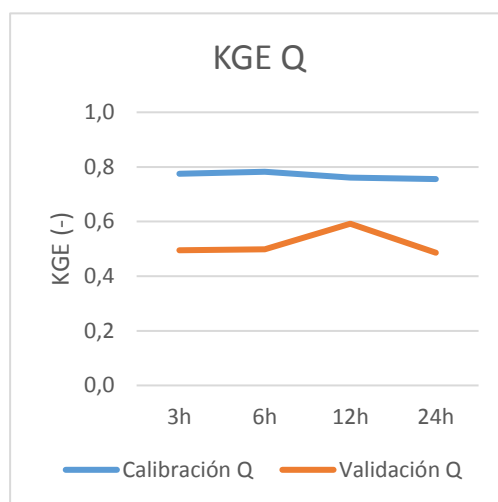


Figura 5.27: KGE en calibración y validación para cuenca Mostazal.

Si se analizan los índices hidrológicos de la curva de duración de caudales medios diarios durante validación, destaca el paso temporal de 12 horas con menor sesgo de volumen (BIAS RR) y menor sesgo de caudales altos (FHV).

Tabla 5.14: Índices hidrológicos en cuenca Tascadero.

Delta	Calibración				Validación			
	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV
3h	-3%	16%	4%	87%	28%	43%	41%	72%
6h	-3%	6%	4%	89%	30%	27%	40%	74%
12h	-5%	34%	3%	85%	22%	52%	30%	71%

24h	-1%	46%	6%	87%	30%	64%	41%	70%
-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	-----

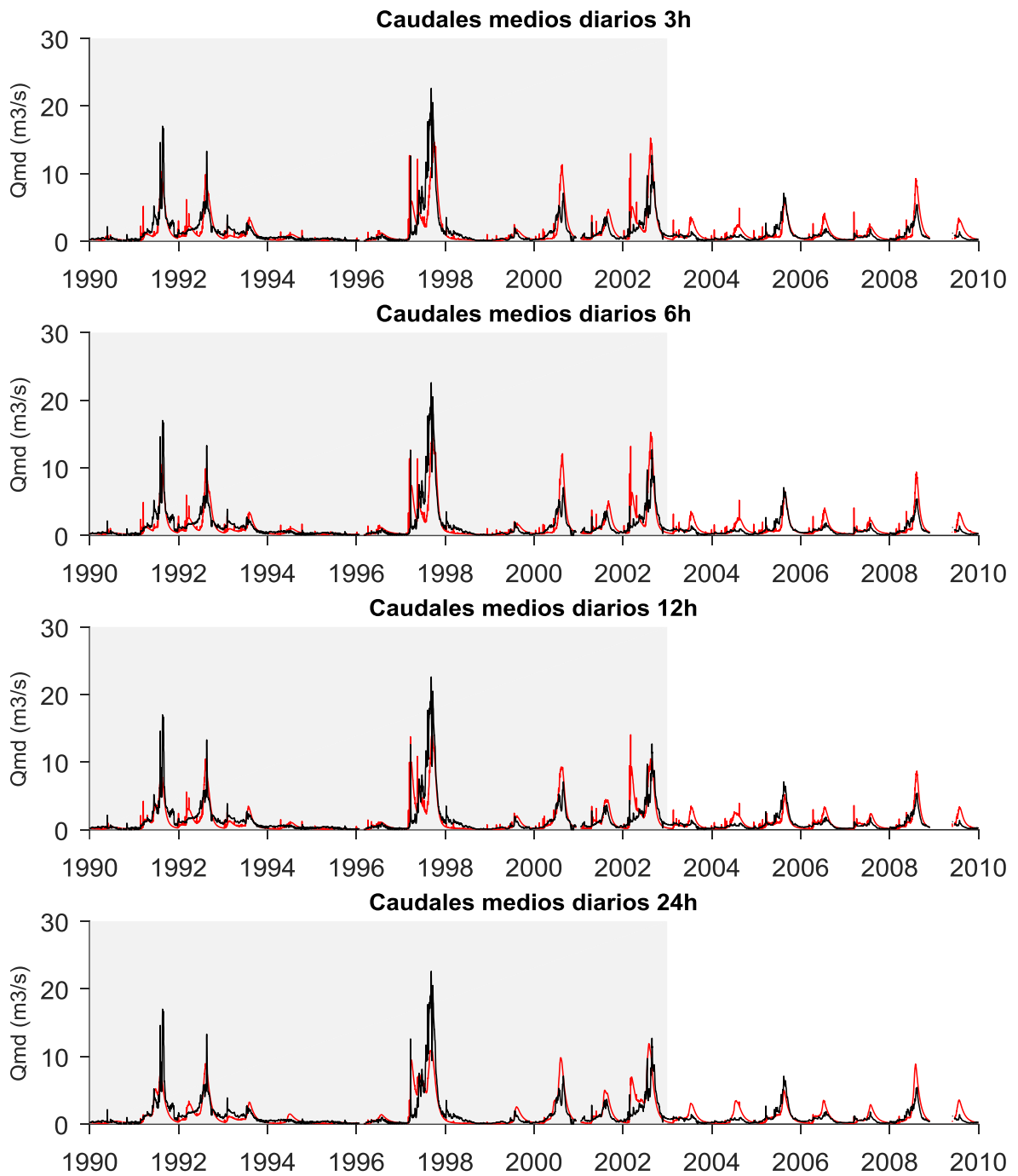


Figura 5.28: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Tascadero. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.

Si ahora se analiza a nivel mensual, mediante la curva de variación estacional de caudales (Figura 5.29), la diferencia entre los pasos temporales en calibración es menor, salvo para el paso de 24 horas que es levemente diferente y con mayor ajuste (Tabla 5.15).

Tabla 5.15: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Tascadero.

	R^2 3h	R^2 6h	R^2 12h	R^2 24h
Calibración	0,91	0,91	0,92	0,94
Validación	0,85	0,87	0,94	0,88

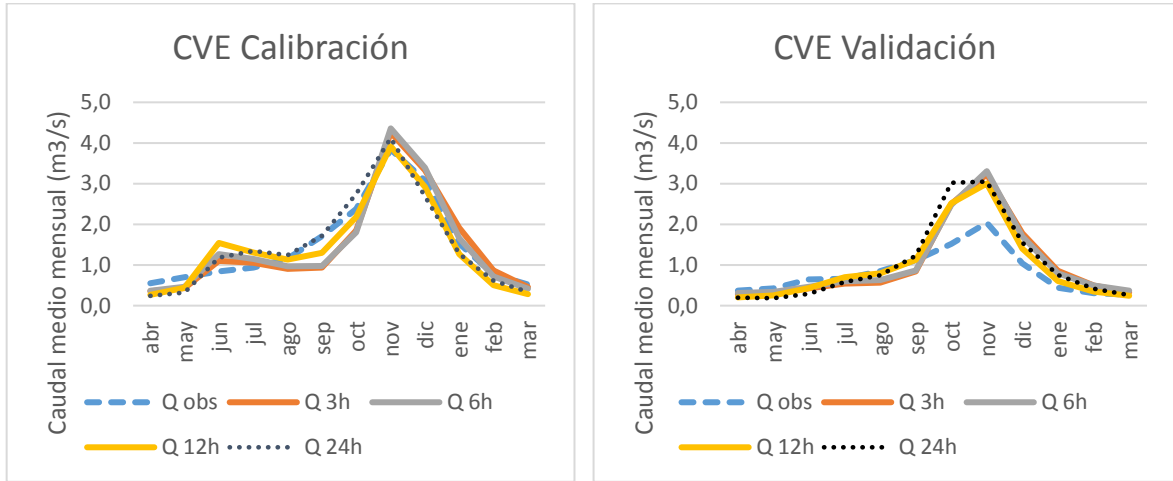


Figura 5.29: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Tascadero.

La estacionalidad del SWE (Figura 5.30), revela un comportamiento similar durante los pasos de 3 y 6 horas, y diferente para los pasos de 12 y 24 horas. Además, el producto con estimaciones del SWE (SWE obs) se muestra mayor que las simulaciones de VIC.

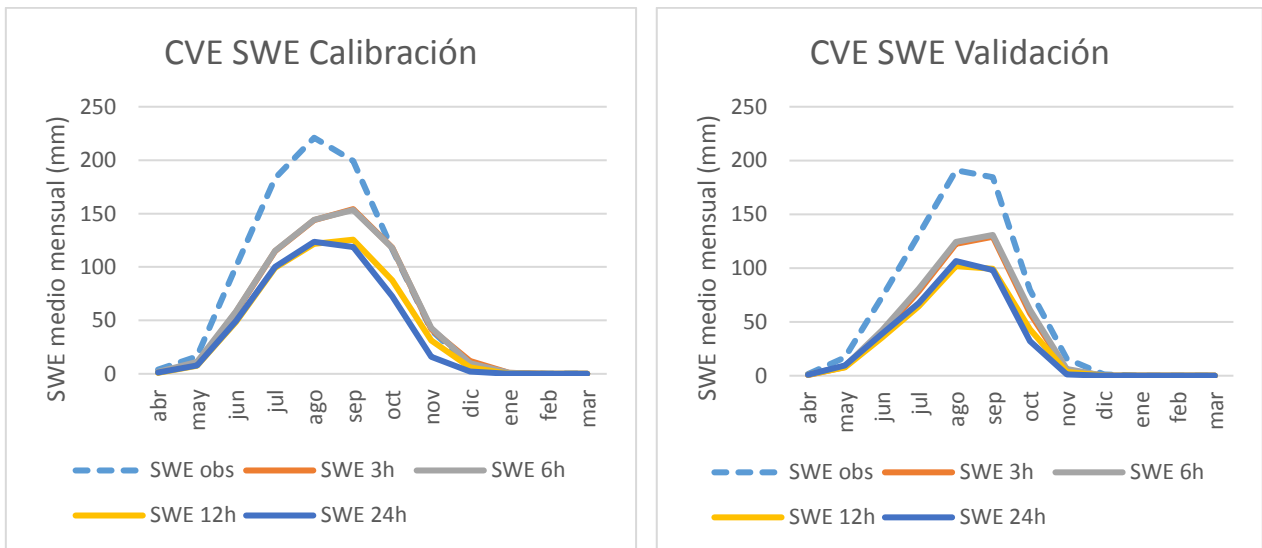


Figura 5.30: Curva de variación estacional del SWE en cuenca Tascadero.

Respecto la representación de los procesos hidrológicos, las diferencias de la escorrentía anual según paso temporal son prácticamente nulas (Figura 5.31), representando en promedio un 0,66 de la precipitación media anual durante el periodo de calibración. En tanto, la escorrentía observada representa 0,68 respecto a la precipitación media anual.

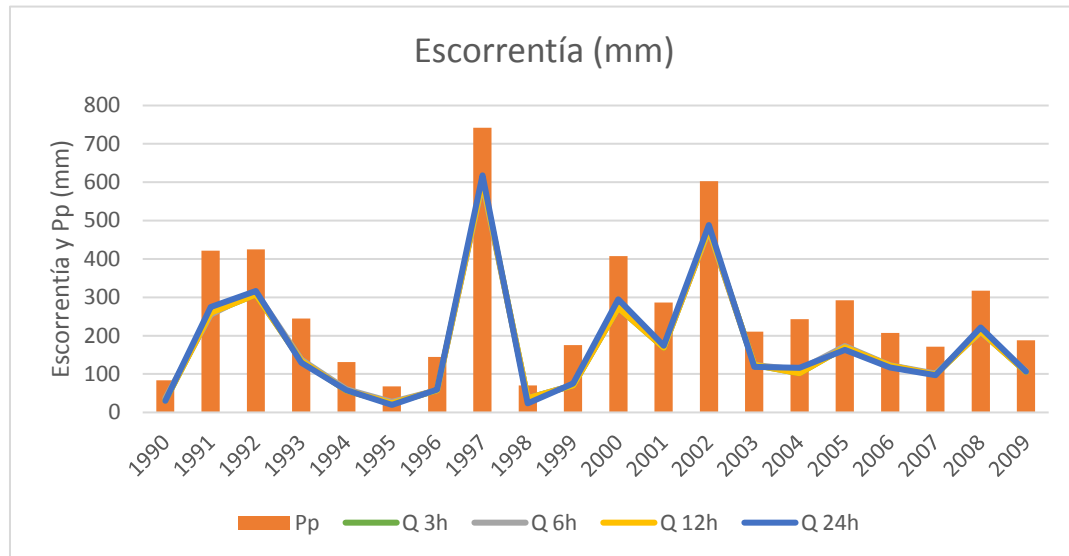


Figura 5.31: Escorentía anual para cuenca Tascadero.

Respecto la sublimación anual (Figura 5.32), resalta el paso de 24 horas al tener una sublimación muy menor que los demás pasos siendo prácticamente nula. La evaporación, en tanto, se muestra similar para todos los pasos temporales, aunque es consistente mayor a las 24 horas.

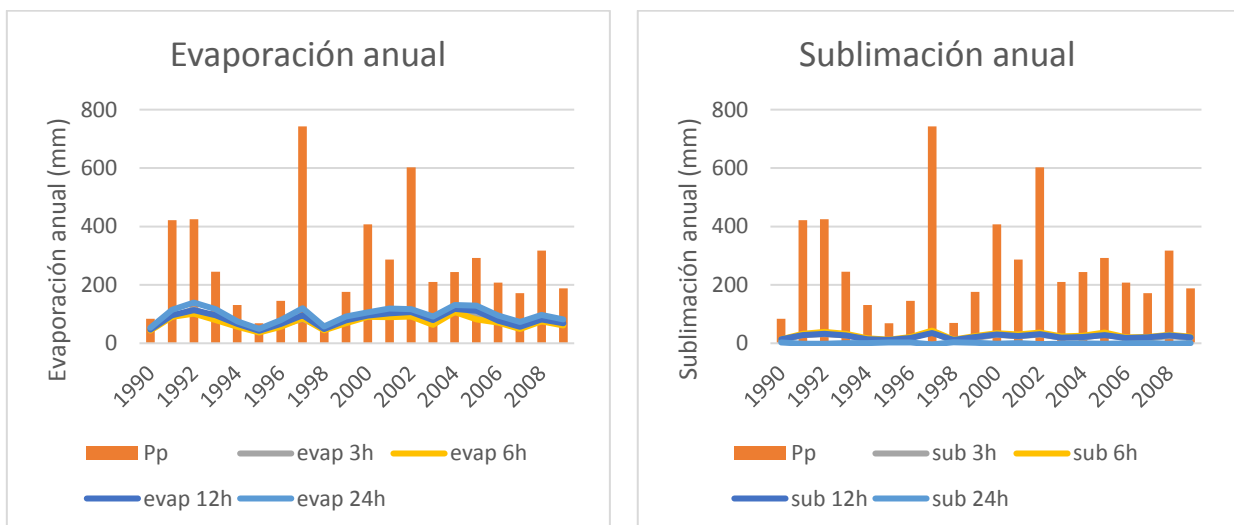


Figura 5.32: Evaporación y sublimación anual para cuenca Tascadero.

Finalmente, si se calculan los valores medios anuales de escorrentía, evaporación y sublimación (Figura 5.33) respecto de la precipitación media anual durante calibración, se observa que los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas realizan modelaciones similares y el paso de 24 horas modela diferente por aminorar el flujo de sublimación. Además, la fracción de precipitación sólida en calibración se muestra invariante para los pasos temporales.

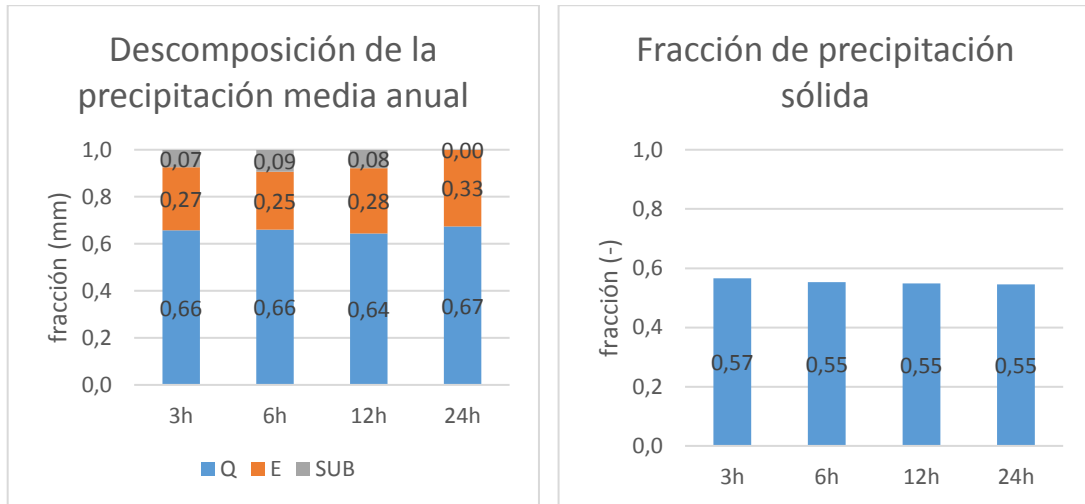


Figura 5.33: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Tascadero en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..

Por lo tanto, para esta cuenca, las modelaciones de 3, 6 y 12 horas son más bien similares; con igual estructura de modelación y ajuste en calibración y, por ende, la variación de los parámetros calibrados (Figura 5.34) representa solo un reajuste producto del cambio de resolución temporal. Por otro lado, los parámetros calibrados del paso temporal de 24 horas representan una modelación diferente. Entre los parámetros que más varían se observa binfilt, depth3, ksats, irs.

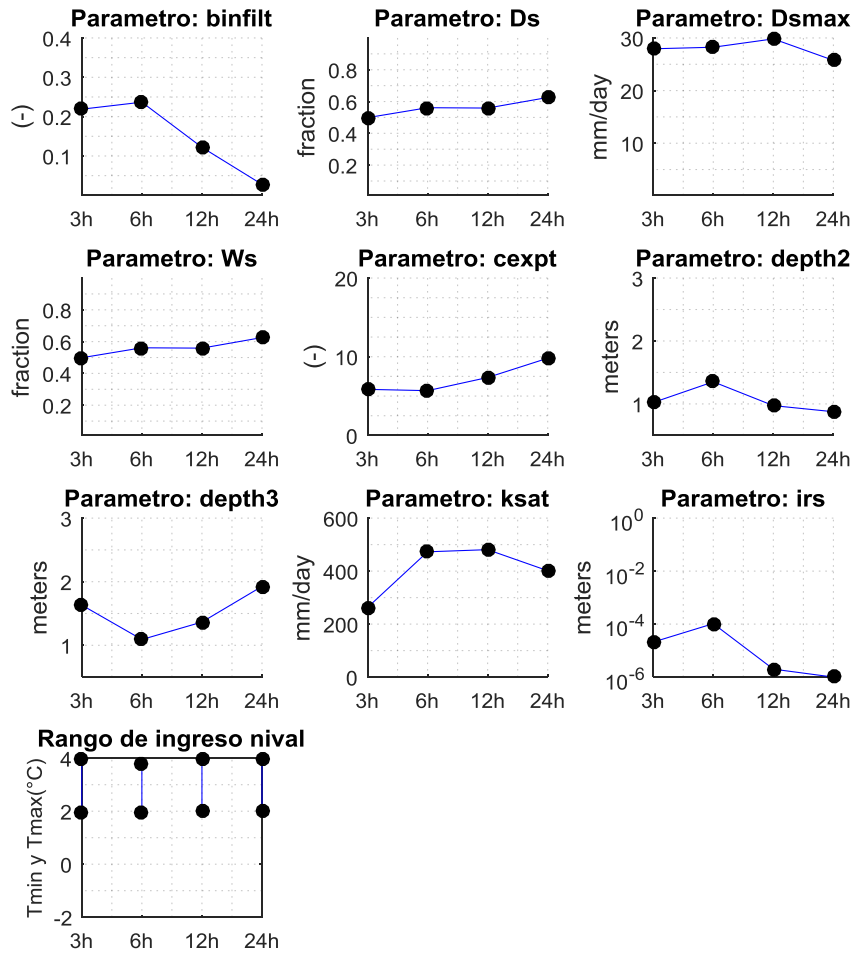


Figura 5.34: Parámetros calibrados para cuenca Tascadero.

Tabla 5.16: Parámetros calibrados en cuenca Tascadero.

Delta	b infiltr	Ds	Dsmax	Ws	cexpt	depth 2	depth 3	ksat	irs	Tmin	Tmax
3h	0,2	0,5	28	0,5	6	1,0	1,6	263	2E-05	2,0	3,9
6h	0,2	0,6	28	0,6	6	1,4	1,1	473	1E-04	2,0	3,8
12h	0,1	0,6	30	0,6	7	1,0	1,4	481	2E-06	2,0	4,0
24h	0,03	0,6	26	0,6	10	0,9	1,9	401	1E-06	2,0	4,0

5.5 Cuenca Chalinga

En la Figura 5.36 se tiene la serie histórica observada y simulada por cada paso temporal en periodo de calibración y validación. Los resultados de la calibración de esta cuenca muestran un ajuste similar para todos los pasos temporales (0,8). En validación se observa un deterioro de ajuste desde el paso de 3 horas hasta el de 12 horas (0,5 a 0,4), explicado por pérdida en la correlación r . En tanto, el paso de 24 horas, muestra un ajuste superior a los demás pasos (0,6) por mejor correlación.

Tabla 5.17: KGE y sus componentes para cuenca Chalinga.

Delta t	Calibración				Validación			
	KGE	α	β	r	KGE	α	β	r
3h	0,81	1,0	1,0	0,81	0,54	0,9	1,0	0,55
6h	0,80	1,0	1,0	0,80	0,50	0,8	1,0	0,53
12h	0,81	1,0	1,0	0,82	0,40	0,8	1,1	0,46
24h	0,84	1,0	1,0	0,84	0,59	0,9	1,1	0,61

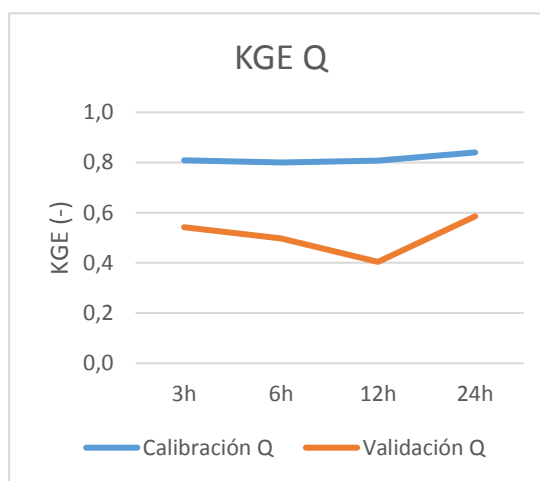


Figura 5.35: KGE en calibración y validación para cuenca Chalinga.

Si se analizan los índices hidrológicos, no se observan una caída del ajuste desde las 3 horas a 12 horas durante validación. Si se destaca en dicho periodo el paso de 24 horas, por un bajo sesgo de caudales altos (FHV) y caudales medios (FMS).

Tabla 5.18: Índices hidrológicos para cuenca Chalinga.

Delta	Calibración				Validación			
	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV
3h	3%	27%	5%	21%	3%	23%	-2%	10%
6h	2%	27%	3%	32%	-5%	15%	-11%	0%
12h	5%	16%	3%	45%	5%	-7%	-8%	14%
24h	2%	32%	2%	28%	7%	9%	-2%	-13%

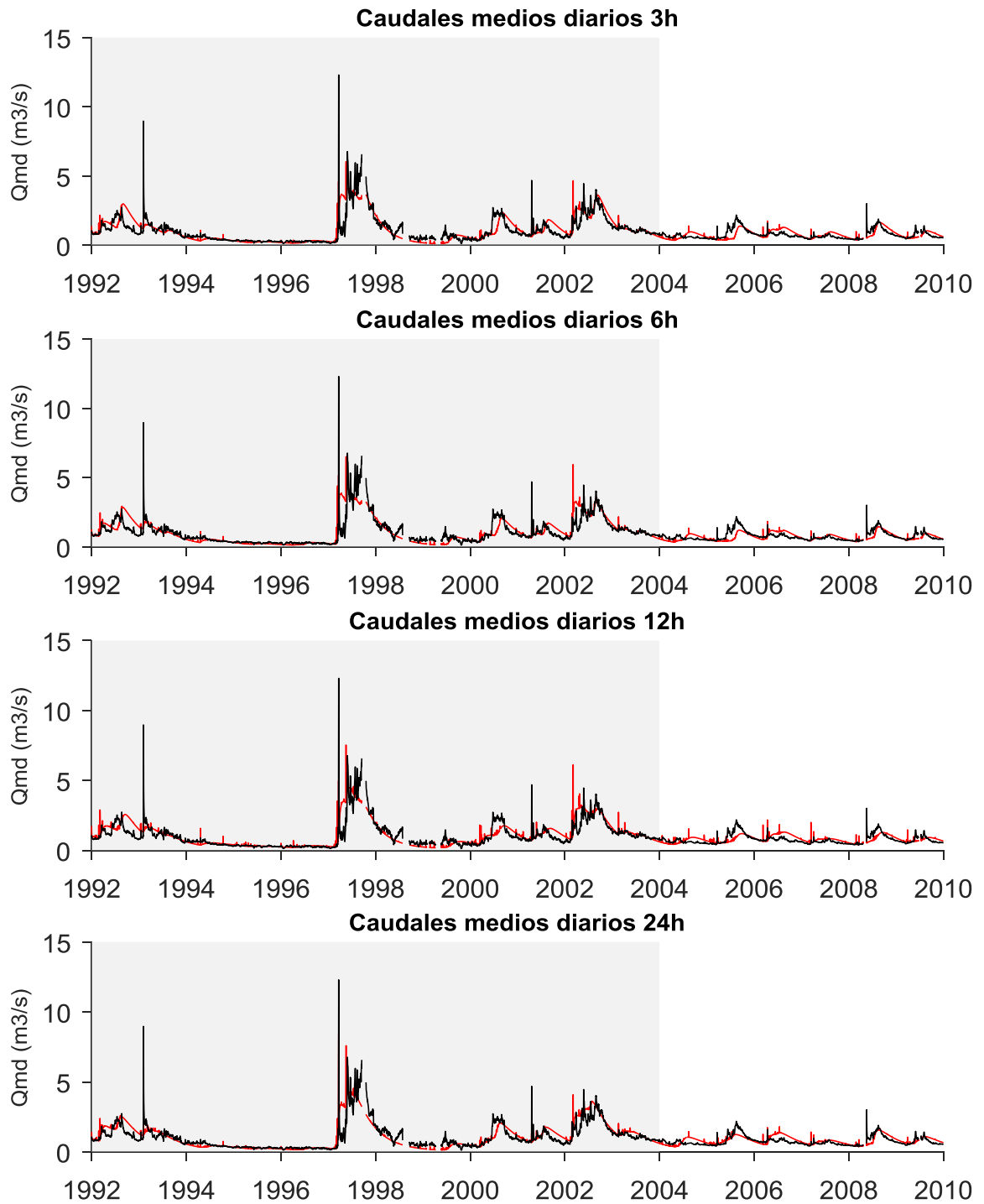


Figura 5.36: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Chalinga. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.

Si se analiza a escala mensual, la curva de variación estacional durante calibración muestra diferente estacionalidad según paso temporal (Figura 5.37). Los pasos de 3, 6 y 12 horas son diferentes, pero ninguno parece correlacionar bien lo observado. El paso de 24 horas si parece ajustarse mejor en calibración y validación.

Tabla 5.19: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Chalinga.

	R^2 3h	R^2 6h	R^2 12h	R^2 24h
Calibración	0,47	0,51	0,63	0,83
Validación	0,55	0,63	0,53	0,82

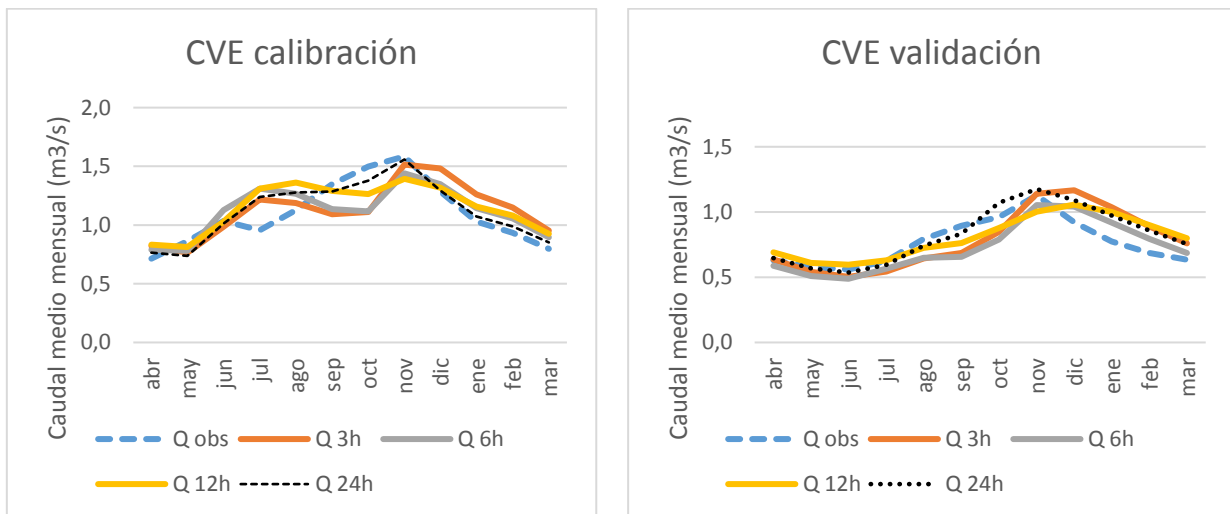


Figura 5.37: Curva de variación estacional del caudal para cuenca Chalinga.

La estacionalidad del SWE (Figura 5.38), revela comportamientos similares para las 3 y 6 horas y diferentes a las 12 y 24 horas. El producto SWE al igual que en otras cuencas es mucho mayor a lo simulado.

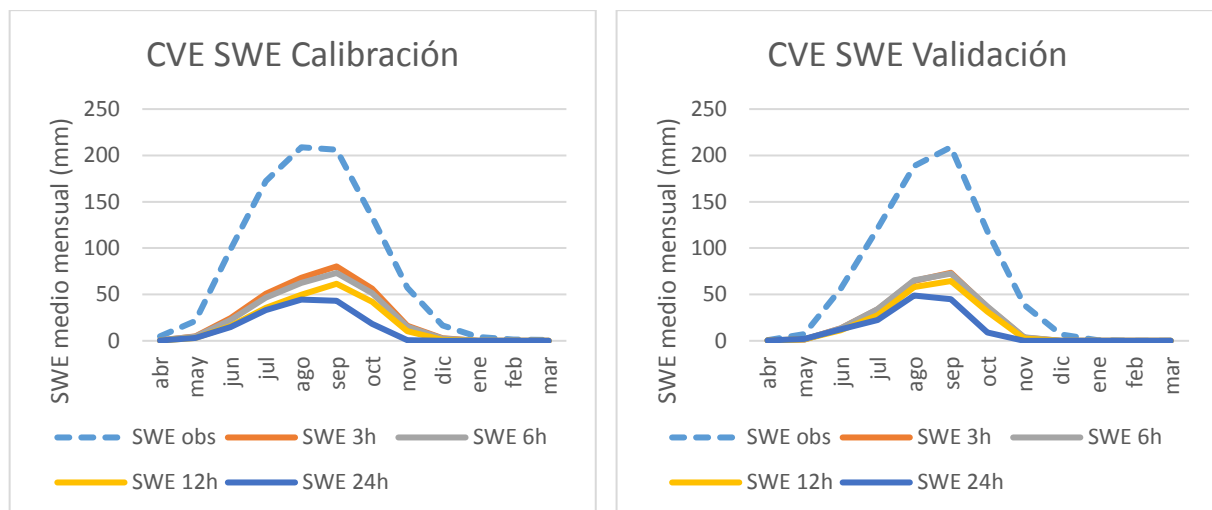


Figura 5.38: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Chalinga.

La escorrentía anual (Figura 5.39) se muestra similar para todo paso temporal representando en promedio 0,47 de la precipitación media anual que corresponde a 313 mm durante el periodo de calibración. Para la evaporación y sublimación anual (Figura 5.40) se constata, al igual que en cuencas anteriores, que la evaporación es sostenidamente mayor para el paso de 24 horas y la sublimación es sostenidamente menor en el mismo paso.

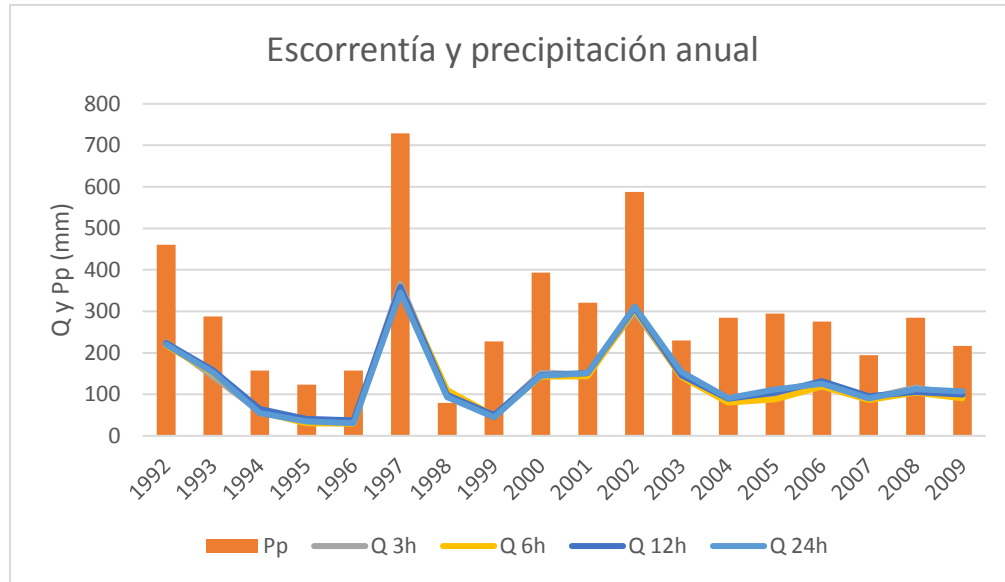


Figura 5.39: Escorrentía anual cuenca Chalinga.

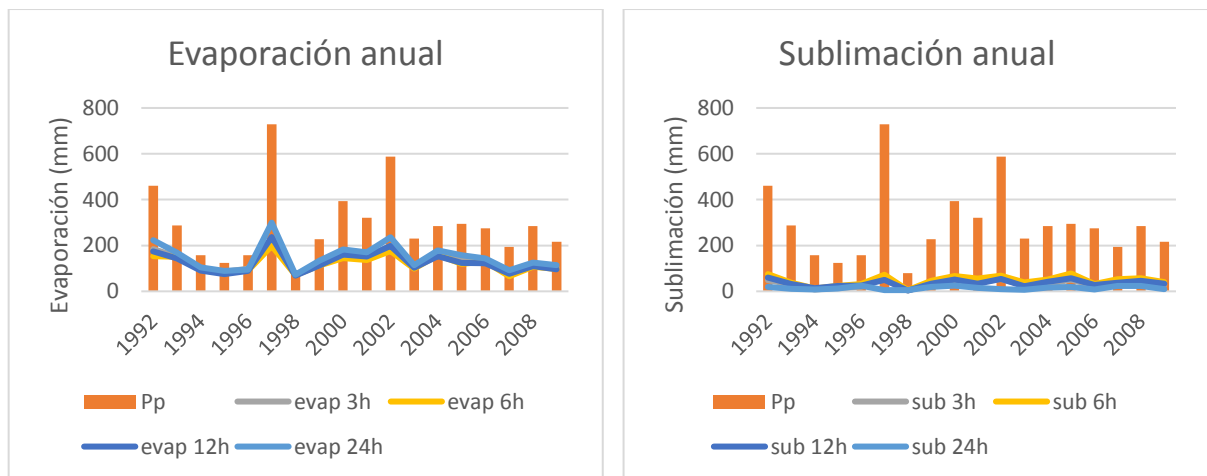


Figura 5.40: Evaporación y sublimación anual cuenca Chalinga.

La descomposición de la precipitación media anual (Figura 5.41), confirma que las modelaciones de 3, 6 y 12 horas son semejantes y diferentes a la modelación de 24 horas, en este caso, en lo referido al monto de sublimación anual y precipitación sólida. Por tanto, los parámetros calibrados de la Figura 5.42 corresponde a un reajuste por efecto del cambio de resolución temporal para los pasos de 3, 6 y 12 horas. Se observa que los mayores reajustes están en los parámetros de profundidad del suelo (Depth2 y Depth3), en el parámetro de rugosidad de la nieve (irs) y en el parámetro cexpt.

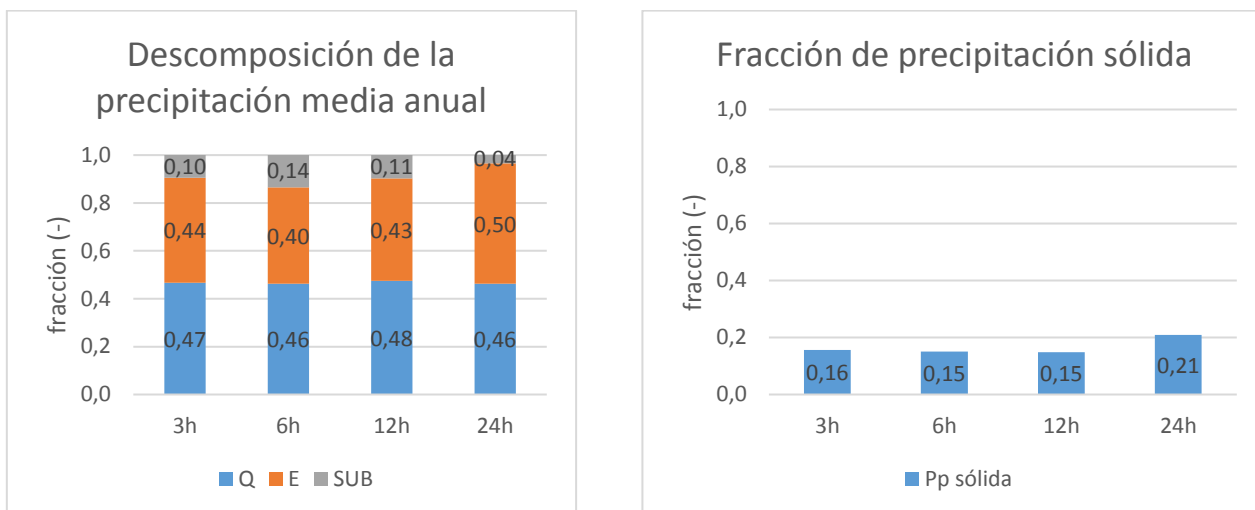


Figura 5.41: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Chalinga en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..

No obstante, las modelaciones de 3, 6 y 12 horas son similares, la estacionalidad de sus caudales (Figura 5.37), así como del equivalente en agua de nieve (Figura 5.38) tiene diferencias que en validación se traducen en un peor KGE del caudal medio diario (Figura 5.35) al pasar desde las 3 hasta las 12 horas. Por otro lado, la modelación de 24 horas, que modela de forma distinta, y también presenta una estacionalidad de caudales y SWE diferente, tiene en validación un KGE del caudal medio diario mayor que los demás pasos.

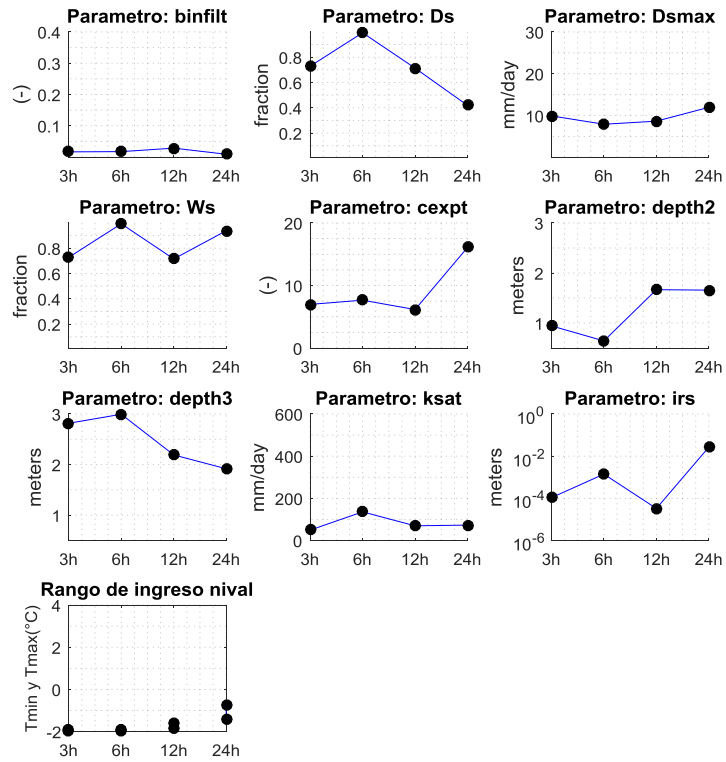


Figura 5.42: Parámetros calibrados para cuenca Chalinga.

Tabla 5.20: Parámetros calibrados en cuenca Chalinga.

Delta	b infiltr	Ds	Dsmax	Ws	cexpt	depth 2	depth 3	ksat	irs	Tmin	Tmax
3h	0,02	0,7	10	0,7	7	0,9	2,8	49	1E-04	-2,0	-1,9
6h	0,02	1,0	8	1,0	8	0,6	3,0	136	1E-03	-2,0	-1,9
12h	0,03	0,7	9	0,7	6	1,7	2,2	70	3E-05	-1,9	-1,6
24h	0,01	0,4	12	0,9	16	1,7	1,9	73	3E-02	-1,4	-0,7

5.6 Cuenca Choapa

En la Figura 5.45 se tiene la serie histórica de caudales medios diarios simulados y observados durante el periodo de calibración y validación. Los resultados de calibración para esta cuenca se tienen en la Tabla 5.21. Los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas muestran ajuste similar tanto en calibración como validación. Por otro lado, el paso de 24 horas destaca con un ajuste superior por una mejor correlación r . En la Figura 5.45 se visualiza lo anterior.

Tabla 5.21: KGE y sus componentes para cuenca Choapa.

Delta t	Calibración				Validación			
	KGE	α	β	r	KGE	α	β	r
3h	0,78	1,0	1,0	0,78	0,74	0,9	0,8	0,81
6h	0,78	1,0	1,0	0,78	0,72	0,9	0,8	0,80
12h	0,80	1,1	1,0	0,80	0,75	0,9	0,8	0,83
24h	0,91	1,0	1,0	0,91	0,75	0,9	0,8	0,88

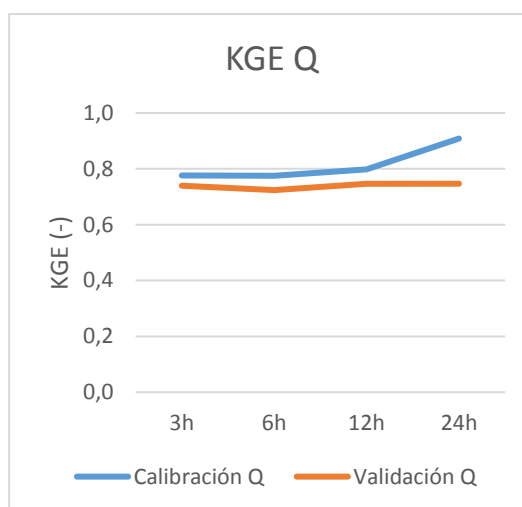


Figura 5.43: KGE de calibración y validación para cuenca Choapa.

Si se analizan los índices hidrológicos (Tabla 5.22) se corrobora el mejor ajuste del paso de 24 horas debido a un menor sesgo de caudales medios (FMS) y bajos (FLV) tanto en calibración como validación.

Tabla 5.22: Índices hidrológicos para cuenca Choapa.

Delta	Calibración				Validación			
	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV	BIAS RR	BIAS FMS	BIAS FHV	BIAS FLV
3h	-2%	56%	5%	-116%	-16%	84%	-6%	-185%
6h	-3%	61%	6%	-79%	-18%	103%	-5%	-60%
12h	0%	58%	8%	-67%	-17%	85%	-7%	-111%
24h	-1%	36%	5%	-21%	-18%	66%	-11%	-20%

Respecto si la estructura de modelación es similar, la curva de variación estacional de caudales (Figura 5.44) muestra que los pasos de 3, 6 y 12 horas tienen una estacionalidad similar, y el paso de 24 horas calibra de una diferente. Esta última se ajusta mejor a la curva observada tanto en calibración como validación (Tabla 5.23).

Tabla 5.23: R^2 para curvas de variación estacional en cuenca Choapa.

	R^2 3h	R^2 6h	R^2 12h	R^2 24h
Calibración	0,80	0,78	0,86	0,99
Validación	0,90	0,86	0,92	0,99

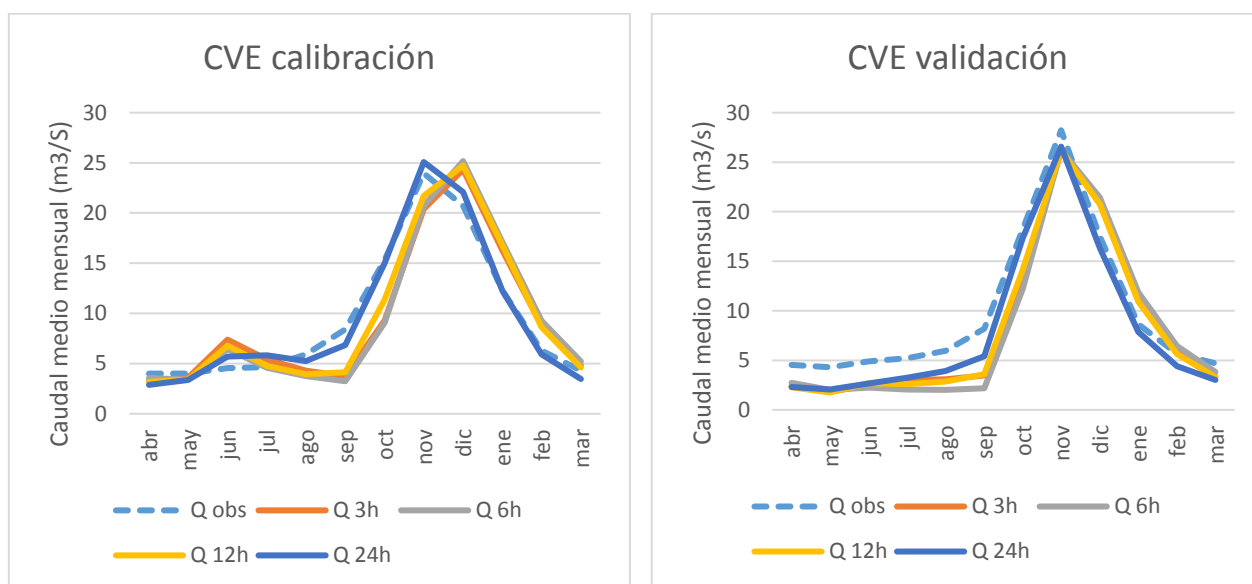


Figura 5.44: Curvas de variación estacional del caudal para cuenca Choapa.

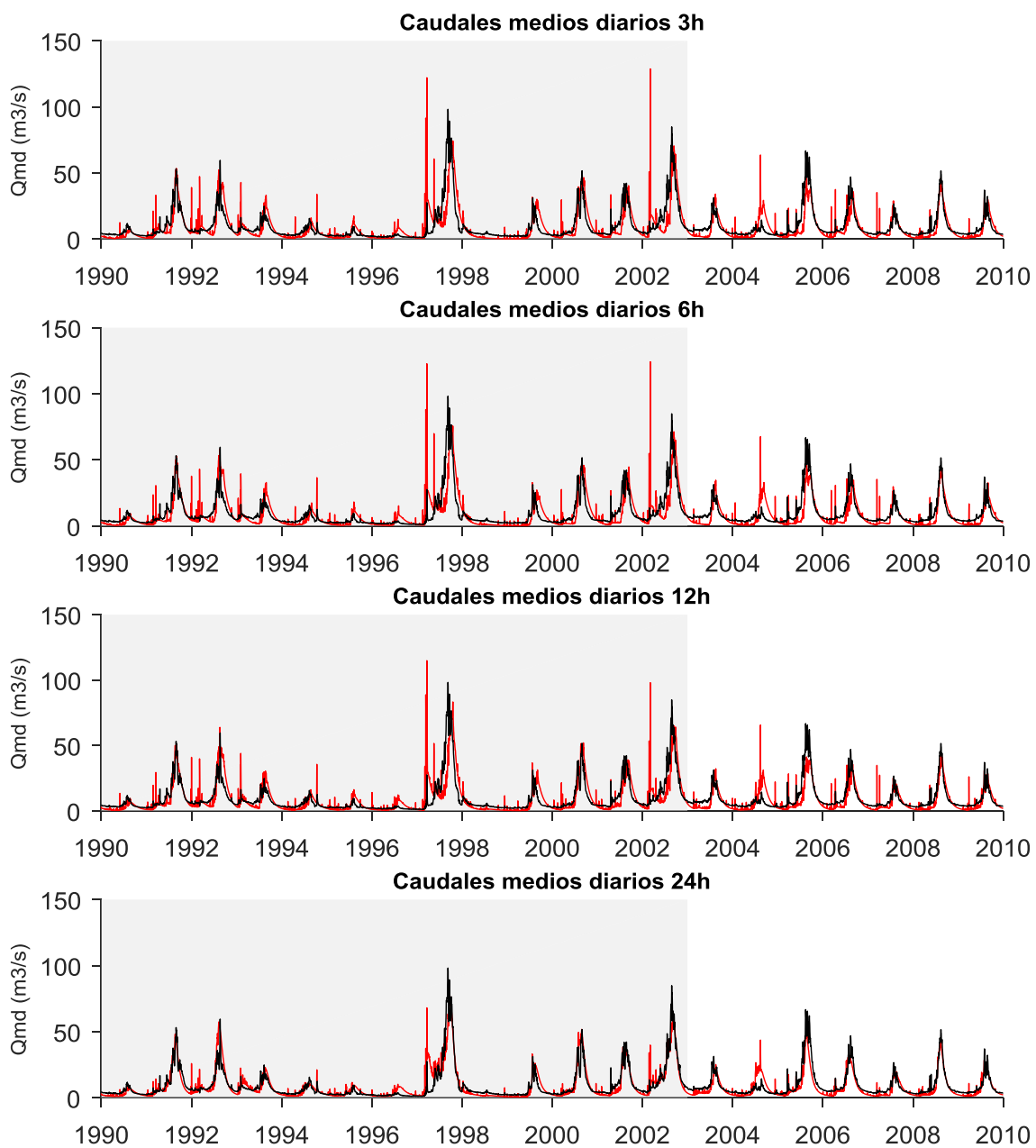


Figura 5.45: Serie histórica de caudales medios diarios para cuenca Choapa. En gris periodo de calibración y en blanco periodo de validación; en rojo caudales simulados y en negro caudales observados.

Respecto la estacionalidad del equivalente en agua de nieve (Figura 5.46) se observa que esta difiere en el paso temporal de 24 horas por un derretimiento anticipado respecto los demás pasos. Además, las simulaciones del SWE difieren de manera importante con el producto estimado (SWE obs).

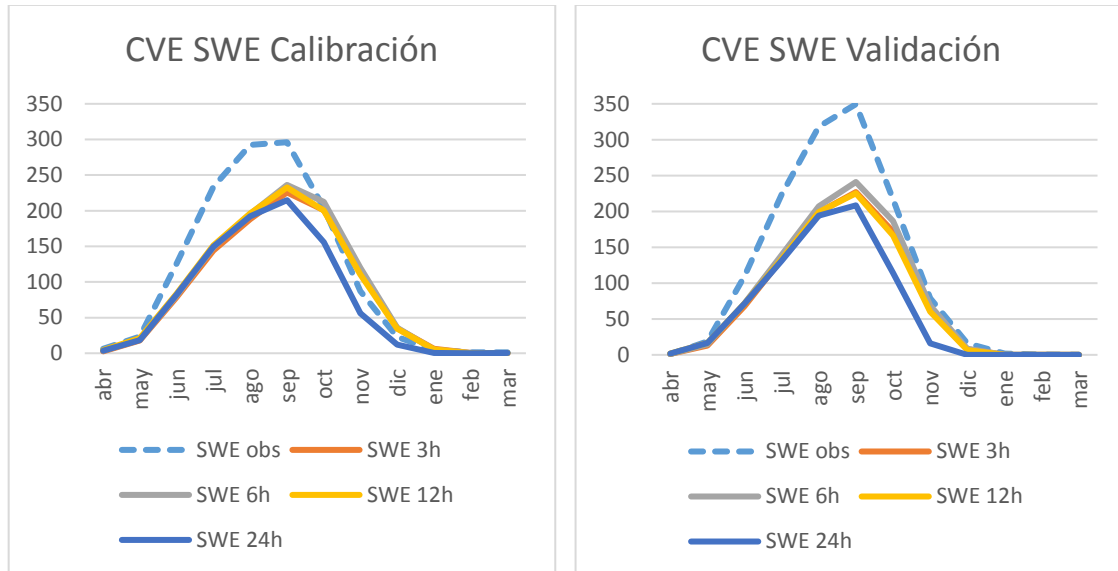


Figura 5.46: Curva de variación estacional del SWE para cuenca Choapa.

En cuanto a la representación de los procesos hidrológicos, la escorrentía anual es similar para todos los pasos temporales como se observa en la Figura 5.47 representando en promedio 0,68 de la precipitación media anual durante calibración que corresponde a 414 mm. En tanto, la escorrentía observada representa 0,70.

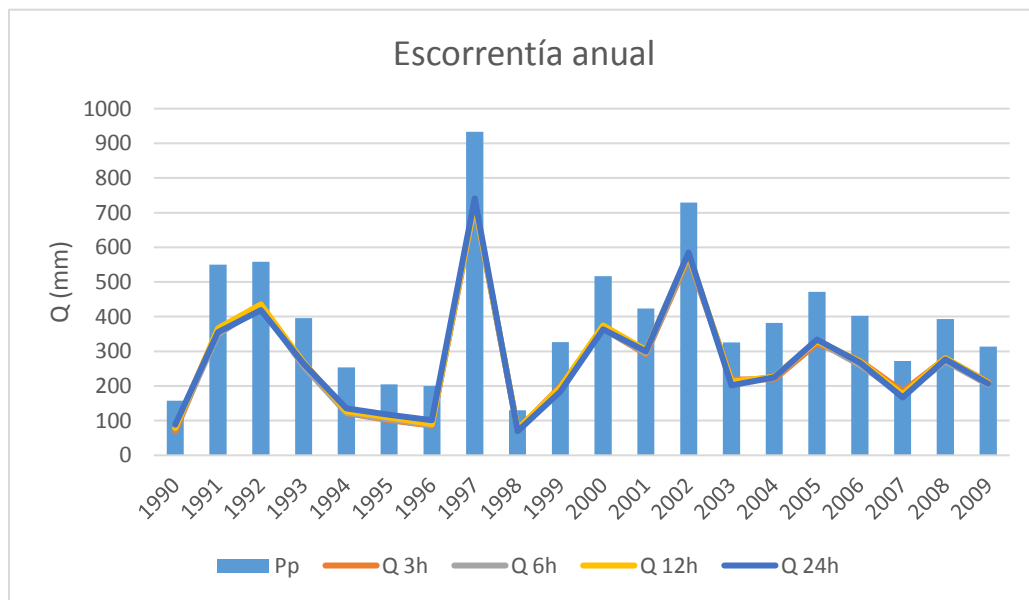


Figura 5.47: Escorrentía anual cuenca Choapa.

Respecto la evaporación anual (Figura 5.48) ésta difiere según paso temporal, representando 0,2 de la precipitación media anual (en calibración) para el paso de 3 horas y 0,3 para el paso de 24 horas. La sublimación anual (Figura 5.49) también revela diferentes comportamientos, a las 3 horas representa un 0,12 de la precipitación media anual y para las 24 horas un 0,01.

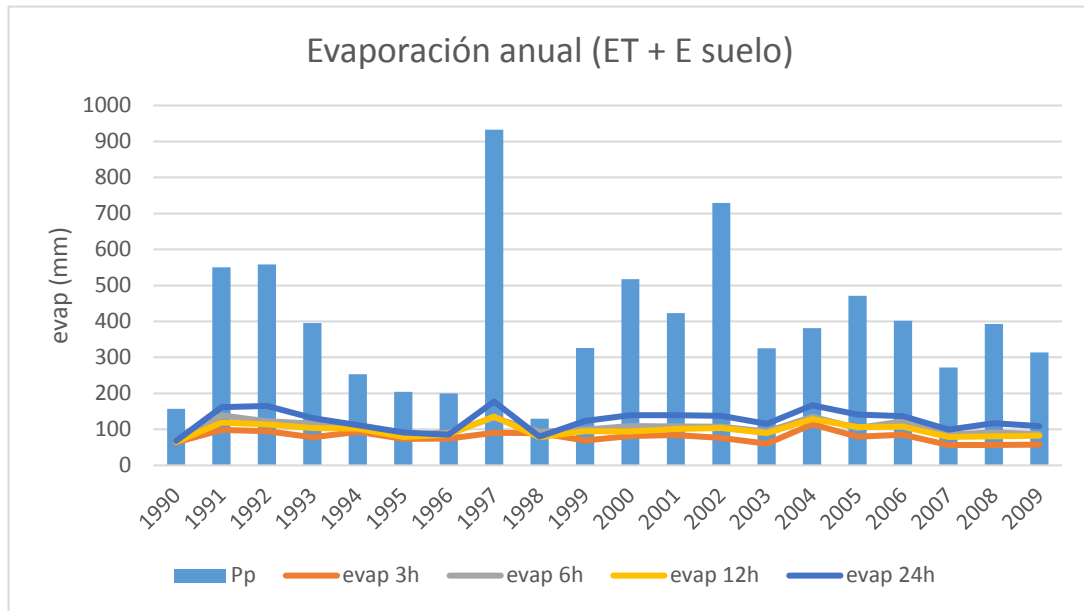


Figura 5.48: Evaporación anual para cuenca Choapa.

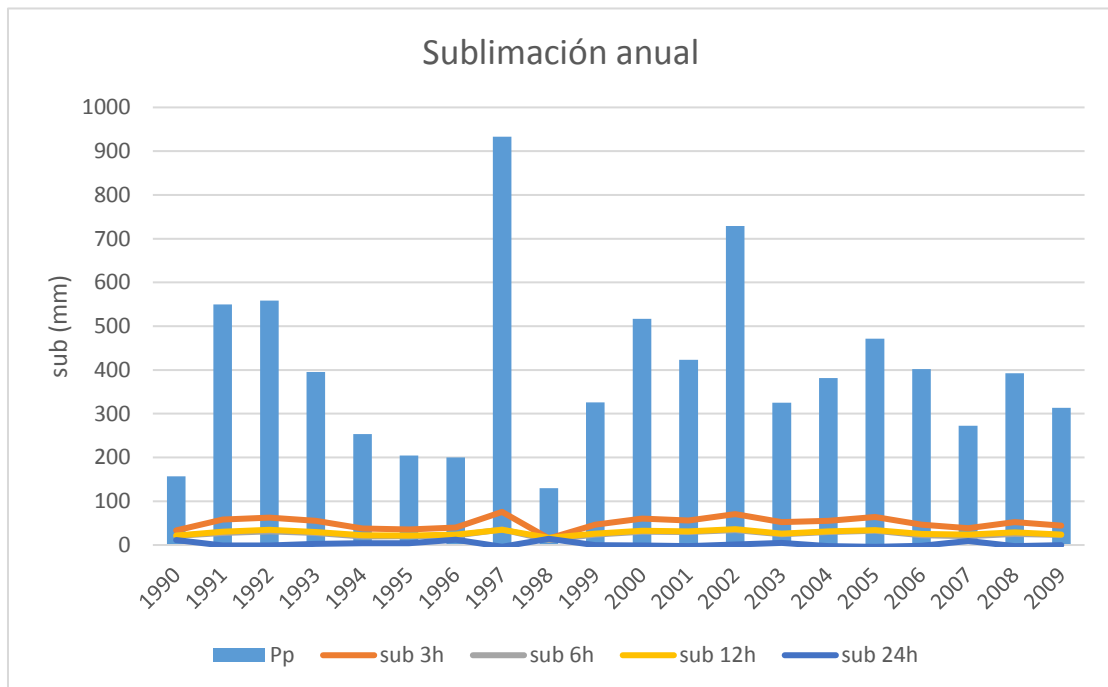


Figura 5.49: Sublimación anual para cuenca Choapa.

La descomposición de la precipitación media anual (Figura 5.50) revela, al igual que en cuencas anteriores, un comportamiento diferente sobre todo para el paso temporal de 24 horas al disminuir el flujo de sublimación respecto los demás pasos temporales. La fracción de precipitación sólida respecto la precipitación media anual, muestra diferencias en el paso de 24 horas con un mayor ingreso nival.

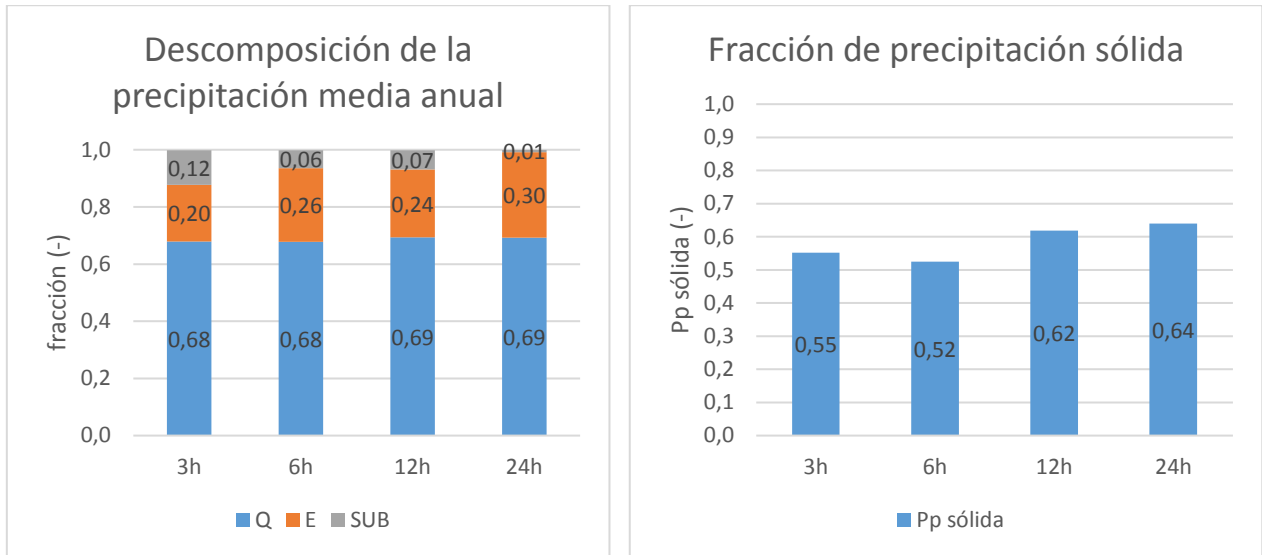


Figura 5.50: Descomposición de la precipitación media anual cuenca Choapa en escorrentía (Q), evaporación (E) y sublimación (SUB)..

Resumiendo los resultados para esta cuenca, los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas presentan un ajuste a nivel diario similar tanto en calibración como validación. De todas formas, existe un efecto del cambio de resolución temporal visible en la descomposición de la precipitación media anual, donde los flujos de evaporación, sublimación y precipitación sólida difieren entre estos tres pasos temporales.

Caso aparte es la modelación de 24 horas, que ajusta de mejor manera el caudal medio diario tanto en calibración como validación, así como también las curvas de variación estacional de caudales. Su modelación muestra un flujo anual de sublimación muy menor a los demás pasos temporales, así un como un mayor ingreso nival y una diferente estacionalidad de los caudales y del SWE; lo que indica que se trata de una representación de los procesos hidrológicos diferente.

Por lo tanto, los parámetros calibrados (Figura 5.51) indican un reajuste por efecto del cambio de resolución en los pasos de 3, 6 y 12 horas y una modelación diferente para el paso de 24 horas. Entre los parámetros con mayor variación se encuentra binfilt, las profundidades de las capas de suelo (Depth2 y Depth 3), rugosidad de la nieve (irs) y el rango de ingreso nival.

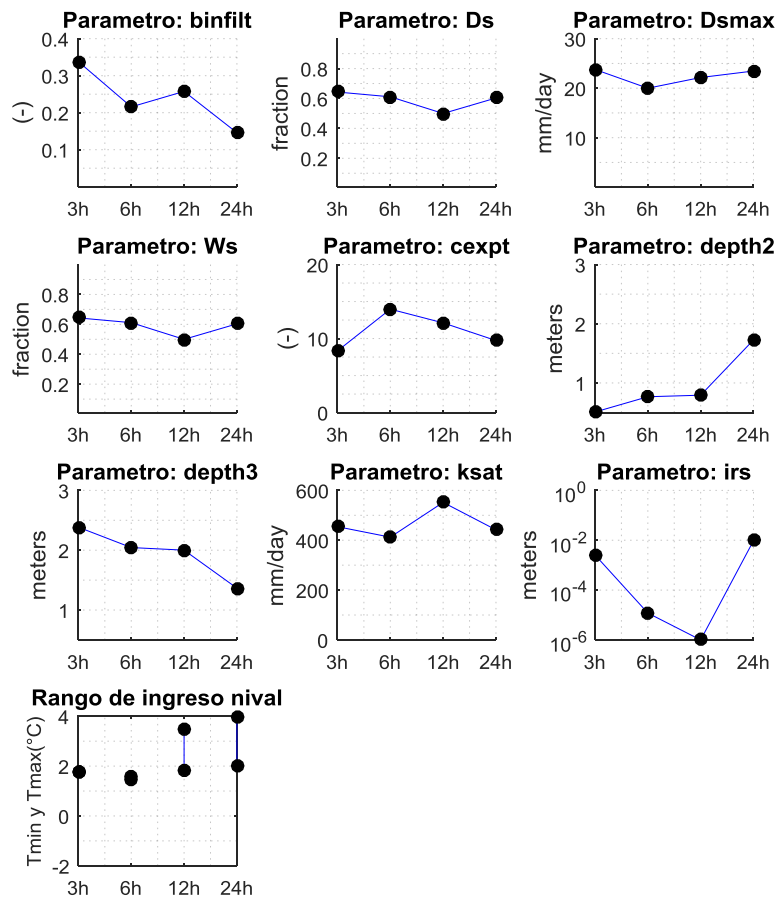


Figura 5.51: Parámetros calibrados para cuenca Choapa.

Tabla 5.24: Parámetros calibrados en cuenca Choapa.

Delta	b infiltr	Ds	Dsmax	Ws	cexpt	depth 2	depth 3	ksat	irs	Tmin	Tmax
3h	0,3	0,6	24	0,6	8	0,5	2,4	454	3E-03	1,7	1,8
6h	0,2	0,6	20	0,6	14	0,8	2,0	412	1E-05	1,5	1,6
12h	0,3	0,5	22	0,5	12	0,8	2,0	552	1E-06	1,8	3,5
24h	0,1	0,6	23	0,6	10	1,7	1,4	442	1E-02	2,0	4,0

Capítulo 6: Análisis

Respecto si existe diferencia en el ajuste del caudal medio diario, se analiza cuanto varía el KGE de 6, 12 y 24 horas respecto del KGE de 3 horas (Figura 6.1) en cada cuenca durante el proceso de calibración. Se observa que para las 6 horas la variación es leve ($\pm 0,01$) y en promedio es nula en todas las cuencas. Para las 12 horas la variación también es leve pero mayor que para las 3 horas ($\pm 0,02$) aunque en promedio sigue siendo nula. Para las 24 horas se tienen las mayores diferencias con un rango entre $-0,02$ y $0,13$ con una variación promedio de $0,04$. Por lo tanto, el KGE indica que no existe pérdida o ganancia de ajuste en los caudales diarios si se calibra a 3, 6 o 12 horas, en cambio para las 24 horas si muestra ser más conveniente.

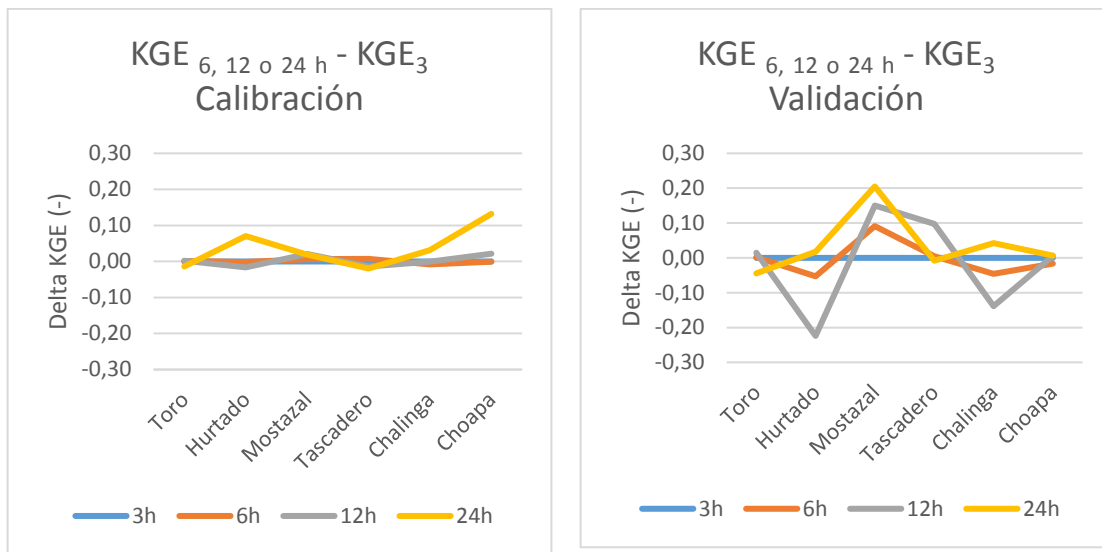


Figura 6.1: Diferencia entre el KGE de caudales medios diarios de 6, 12 y 24 horas respecto del de 3 horas durante el proceso de calibración y validación.

En el periodo de validación, se observa que los pasos de 3, 6 y 12 horas muestran mayor rango de variación que durante el proceso de calibración ($-0,22$ a $0,15$). Esto hace suponer que las diferencias en la estructura de modelación de cada paso temporal, que son leves en calibración, si tienen mayor impacto en la etapa de validación. Si se evalúa en promedio, el paso de 6 horas varía $0,00$ y el paso de 12 horas $-0,02$. Respecto el paso temporal de 24 horas, este continúa siendo más conveniente al estar sus variaciones en el rango $-0,04$ a $0,20$ y su promedio corresponder a $+0,04$.

Ahora se analizan las diferencias en la representación de los procesos hidrológicos según cada paso temporal. Para esto se estudia la descomposición de la precipitación media anual en el periodo de calibración, la cual contempla los valores medios anuales de escorrentía, sublimación y evaporación (incluye evaporación del suelo y evapotranspiración) según el balance de la ecuación 6.1. Notar que este balance es válido si se considera que la acumulación en el suelo es nula para un periodo extenso como el de calibración.

$$P = Q + E + SUB \quad 6.1$$

- Donde P (mm) es precipitación media anual, Q escorrentía media anual (mm), E evaporación media anual y SUB es sublimación media anual.

La escorrentía respecto de la precipitación media anual (Figura 6.2) se muestra, en general, invariante en todo paso temporal y, salvo la cuenca Hurtado, su rango de variación es mínimo. Además, salvo la cuenca Mostazal, todas las cuencas simulan correctamente la escorrentía media observada (Obs).

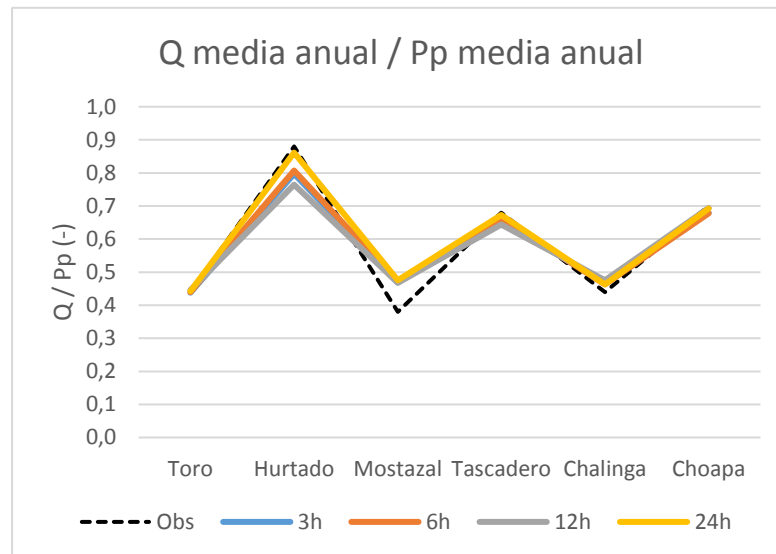


Figura 6.2: Escorrentía media anual respecto de precipitación media anual durante periodo de calibración.

La evaporación y sublimación respecto de la precipitación media anual se muestra en la Figura 6.3. Se concluye que la sublimación, en la modelación de 24 horas, es sostenidamente menor que en los demás pasos y, por lo mismo, la evaporación sostenidamente mayor para este paso temporal. Así mismo, se constata que, los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas alcanzan fracciones muy cercanas de sublimación y evaporación en cada cuenca.

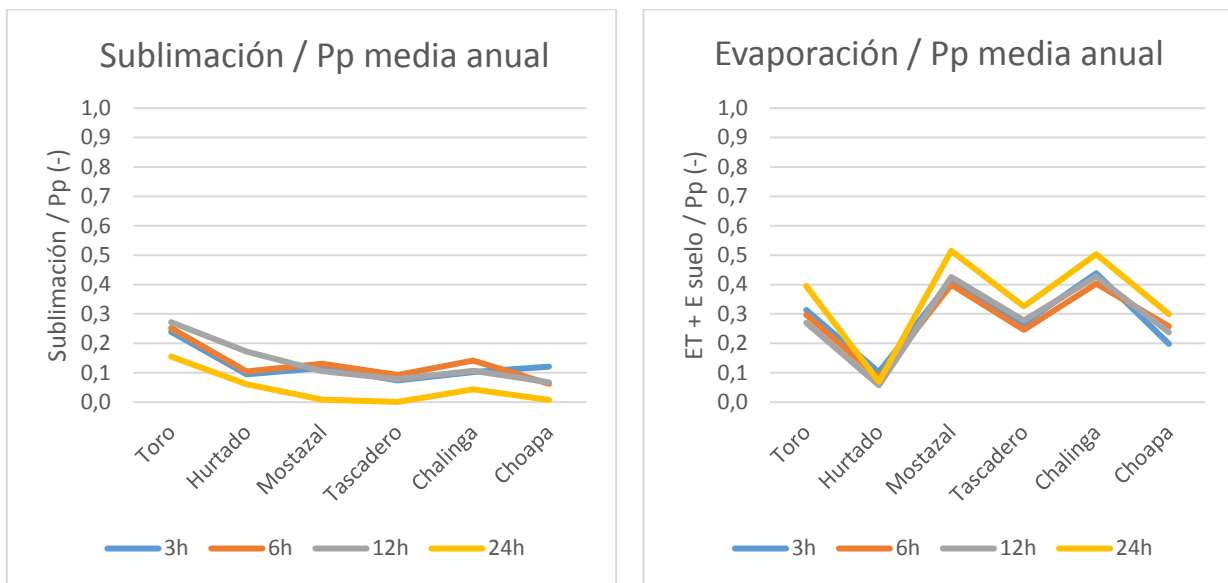


Figura 6.3: Descomposición de la evaporación media anual en sublimación y evapotranspiración + evaporación del suelo.

De esta manera una primera conclusión apunta a que los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas tienden a representar los procesos hidrológicos de forma similar y más cercana que respecto la modelación de 24 horas. Esto también se apoya en la estacionalidad de los caudales de los pasos de 3, 6 y 12 horas, que tienden a ser curvas de variación similares en todas las cuencas. Cabe preguntarse si lo anterior implica parámetros calibrados idénticos en aquellos pasos temporales. Los resultados indican que existe variación de estos entre las 3, 6 y 12 horas, por lo tanto, considerando que la representación de sus procesos se asemeja, esto correspondería a un reajuste producto del cambio de resolución temporal.

Por otro lado, dado que el KGE de los caudales medios diarios en calibración presenta una variación casi nula en los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas (Figura 6.1) se concluye que el modelo se adapta de buena forma al cambio de resolución temporal entre estos pasos y siempre busca la misma representación de los procesos a cambio de una modificación en los parámetros calibrados. Pero a pesar de esto, se pueden encontrar leves diferencias entre los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas, sobre todo en lo que respecta a los montos de ingreso nival (Figura 6.4) así como también en la estacionalidad del equivalente en agua de nieve (véase curvas de variación estacional del SWE en cuenca Toro, Tascadero y Chalinga).

Estas leves diferencias pueden explicar porque en validación el KGE de estos pasos temporales difiere en mayor medida que durante la calibración donde prácticamente no difieren (Figura 6.1). Es así como estas diferencias se traducen en validación en; mejores resultados para Mostazal y Tascadero al pasar de las 3 a las 12 horas, peores resultados en Hurtado y Chalinga al pasar de las 3 a las 12 horas y nulo efecto para Toro y Choapa al pasar de 3 a 12 horas. Si se calcula la variación promedio en validación, respecto de las 3 horas, esta es 0,00 para las 6 horas y -0,02 para las 12 horas; por lo que desde ese punto de vista la calibración de 6 horas sería igual de conveniente que las 3 horas y la 12 horas levemente peor.

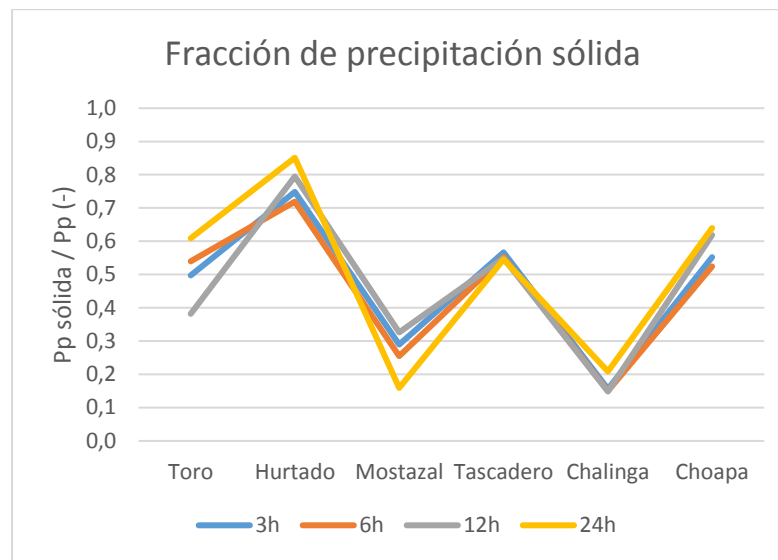


Figura 6.4: Fracción de precipitación sólida respecto de la precipitación media anual durante calibración, por cada cuenca y según cada paso temporal.

En lo referido a la modelación de 24 horas esta demuestra ser, a través de la descomposición de la precipitación media anual, una representación distinta de los procesos hidrológicos caracterizada por una sublimación menor (casi nula) respecto de los demás pasos temporales. También se pueden observar diferencias importantes en la estacionalidad de caudales (véase curvas de variación estacional de cuencas Mostazal, Tascadero, Chalinga y Choapa) y estacionalidad del SWE respecto los demás pasos temporales. Esto implica que los parámetros calibrados a este paso temporal corresponden a una modelación distinta y no a una adaptación producto del cambio de resolución como ocurre en los demás pasos.

Además, los resultados indican que esta calibración tiene un mejor ajuste en general, observable en:

- Calibración: los caudales medios diarios en esta etapa se calibran en promedio de mejor forma (+0,04 respecto la modelación de 3 horas) sobre todo por una mayor correlación r observable en las cuencas Hurtado, Chalinga y Choapa.
- Validación: los caudales medios diarios se ajustan en promedio con un KGE de +0,04 respecto la modelación de 3 horas para esta etapa, también por una mayor correlación r observable en cuencas Hurtado, Mostazal, Chalinga y Choapa.
- Curvas de duración: Se observan menores sesgos en este paso temporal como por ejemplo el de caudales medios (BIAS FMS) para las cuencas Hurtado, Mostazal, Chalinga y Choapa.
- Curva de variación estacional de caudales: En general, el ajuste de esta curva es igual o superior para el paso de 24 horas respecto los demás pasos, lo que se constata a través de los coeficientes de determinación R^2 . Ejemplo de lo anterior se observa en las cuencas Mostazal, Chalinga y Choapa.

Capítulo 7: Conclusiones

Para finalizar, respecto a la pregunta inicial si existe un paso temporal de modelación; entre 3, 6, 12 y 24 horas que sea más conveniente para simular caudales medios diarios se concluye que, para cuencas en la Región de Coquimbo en un rango de 200 a 1000 km², es más conveniente utilizar el paso temporal de 24 horas porque presenta, en general, un KGE de caudales medios diarios igual o superior a los demás pasos temporales. Esta mejora también se observa a nivel mensual, a través de la curva de variación estacional de caudales, cuya forma se asemeja de mejor manera a la observada en este paso temporal.

Respecto a los pasos temporales de 3, 6 y 12 horas; el ajuste de los caudales medios diarios se muestra invariante en el periodo de calibración, alcanzando valores similares de KGE. Así mismo, la representación de los procesos hidrológicos es similar en estos pasos, lo que se observa en que la descomposición de la precipitación media anual (en escorrentía, evaporación y sublimación) es cercana entre sí. También las curvas de variación estacional de caudales tienden a ser similares en estos pasos temporales, por lo tanto, cualquier cambio en los parámetros calibrados corresponde a un reajuste por efecto del cambio de resolución temporal y no a una modelación diferente.

De todas formas, diferencias sutiles se pueden encontrar en las modelaciones de 3, 6 y 12 horas como, por ejemplo, en los montos de ingreso nival anual o en la estacionalidad del equivalente en agua de nieve. Estas diferencias, pueden explicar porque en validación estos pasos temporales alcanzan distinto KGE del caudal medio diario, existiendo cuencas donde existe mejora importante al pasar de 3 a 12 horas (Mostazal y Tascadero), otras cuencas donde existe un deterioro al pasar de 3 a 12 horas (Hurtado y Chalinga) y otras donde no existe variación (Toro y Choapa). En promedio para todas las cuencas (en validación) los pasos de 3 y 6 horas alcanzan valores de KGE idénticos y el paso temporal de 12 horas valores levemente inferiores, lo que convierte a esta modelación en menos recomendable.

Por otra parte, la modelación de 24 horas representa una modelación diferente a los demás pasos temporales, en término de su representación de los procesos hidrológicos. Su principal característica es que los flujos de sublimación son muy inferiores (casi nulos) a los demás pasos temporales. Por lo tanto, los parámetros calibrados a este paso temporal indican una modelación diferente y no una respuesta al cambio de resolución temporal como en el caso de las modelaciones de 3, 6 y 12 horas.

En las cuencas Hurtado, Mostazal, Chalinga y Choapa la modelación de 24 horas es superior a los demás pasos temporales en términos de ajuste del caudal diario, lo que se cumpla en el periodo de validación y calibración. Esta mejora se explica por una mayor correlación r que se puede constatar visualmente en las series históricas de caudales. Otras métricas que sustentan el desempeño de este paso temporal son; el sesgo de caudales medios (BIAS FMS), que es

sostenidamente menor en las cuencas mencionadas, y el coeficiente R^2 de la CVE de caudales en las mismas cuencas.

Capítulo 8: Bibliografía

Alvarez-Garreton, C., Mendoza P., Boisier, J. P., et al. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large simple studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 5817-5846. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>

Bastola, S. and Murphy, C. (2013). Sensitivity of the performance of a conceptual rainfall-runoff model to the temporal sampling of calibration data. *Hydrology Research*, 44(3), 484–494. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2012.061>

Bauwe, A., Tiedemann, S., et al. (2017). Does the temporal resolution of precipitation input influence the simulated hydrological components employing the SWAT model?. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 53(5), 997–1007. doi: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12560>

California Curvert Practice. (1955). Department of Public Works, Division of Highways, 2th edition Sacramento.

DGA: Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT No. 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile, 2017.

Duan, Q., Sorooshin, S., Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SEC-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, 265-284.

Duan, Q., Sorooshin, S., Gupta, V. K. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.

Ferrando, F. (2002). Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la Oferta y Demanda de Agua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 30, 23-44.

Ficchi, A., Charles P., et al. (2016). Impact of temporal resolution of inputs on hydrological model performance: An analysis based on 2400 flood events. *Journal of Hydrology*, 538, 454-470. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.016>

Gao, H., et al. (2010). Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model. *Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records*.

Gupta, Hoshin V., Kling H., et al. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Liang, X., et al. (1994). A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 99(D7), 14415-14428.

Liang, X., Wood, E. F., and Lettenmaier, D. P. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and Modifications. *Global and Planetary Change*, 13, 195-206. doi: [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)

Melsen, L. A., Teuling, A. J., Torfs, P. J. J. F., Uijlenhoet, R., Mizukami, N., and Clark, M. P. (2016). HESS Opinions: The need for process-based evaluation of large-domain hyper-resolution models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1069-1079. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-20-1069-2016>

Muttill, N. & Jayawardena, A. W. (2008). Shuffled Complex Evolution model calibrating algorithm: enhancing its robustness and efficiency. *Hydrological Processes*, 22, 4628-4638. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.7082>

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)

Shuttleworth, W. J. (1993). Evaporation, in *Handbook of Hydrology*, edited by D. R. Maidment, pp. 4.1-4.53, McGrawHill, Inc., New York.

Sikorska, A. E. & Seibert, J. (2018). Appropriate temporal resolution of precipitation data for discharge modelling in pre-alpine catchments. *Hydrological Sciences Journal*. 63(1), 1-16. doi: [10.1080/02626667.2017.1410279](https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1410279)

Wang, Y., He, B., and Takase, K. (2009). Effects of temporal resolution on hydrological model parameters and its impact on prediction of river discharge. *Hydrological Sciences Journal*, 54 (5), 886–898. doi: <https://doi.org/10.1623/hysj.54.5.886>

Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., Wagener T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrological model. *Water Resources Research*, 44, W09417. doi: <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>

Zhao, Y., Feng, D., Yua, L., et al. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>