TABLA DE CONTENIDOS

1.- INTRODUCCIÓN 1
2.- OBJETIVOS 2
3.- METODOLOGÍA DE TRABAJO 4
3.1 Metodología General del Estudio 4
3.2 Sectorización de la Zona de Estudio 4
3.3 Secuencia Metodológica 4
4.- MODELO HIDROLÓGICO WEAP 10
4.1 Modelo Conceptual y Parámetros Involucrados 10
4.2 Balance Hidrológico en WEAP 11
5.- INFORMACIÓN BASE 15
5.1 Fuentes de Información 15
5.2 Hipsometría 15
5.3 Meteorología 27
5.3.1 Precipitación 27
5.3.2 Temperatura 30
5.3.3 Viento 35
5.3.4 Humedad Relativa 37
5.4 Información Fluviométrica de Calibración 40
5.4.1 Estación de Monitoreo NE5 42
5.4.2 Estación de Monitoreo NE2A 43
5.4.3 Estación de Monitoreo NE1A 43
5.4.4 Estación de Monitoreo NE4 46
5.4.5 Estación de Monitoreo PX2 48
5.4.6 Estaciones de Monitoreo CN2-CN2N 49
5.4.7 Estación de Monitoreo NE7 50
5.4.8 Estación de Monitoreo NE8 51
5.4.9 Estación de Monitoreo CN7 52
5.4.10 Estación de Monitoreo CN8 53
5.4.11 Estación de Monitoreo NE9 54
5.5 Parámetros Hidrogeológicos 55

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

6.- CONSIDERACIONES TÉCNICAS 59
6.1 Caudal de Aporte Glacial 59
6.2 Datos Observados 59
6.3 Modelo WEAP Adoptado 64
7.- CALIBRACIÓN DEL SISTEMA 66
7.1 Consideraciones Generales 66
7.2 Resultados Proceso de Calibración 67
7.2.1 NE5: Río Estrecho en Zona Alta o Superior 67
7.2.2 NE2A: Río Estrecho antes de junta con Barriales 71
7.2.3 NE1A: Quebrada Barriales 75
7.2.4 NE3: Río Estrecho después de junta con Barriales 79
7.2.5 PX1: Quebrada agua de la Falda 83
7.2.6 NE4: Río Estrecho después de junta con agua de la Falda 87
7.2.7 PX2: Río Estrecho antes de junta con río Toro 91
7.2.8 CN2-CN2N: Río Toro en junta con quebrada Sin Nombre 95
7.2.9 PX3: Río Estrecho después de junta con Toro 100
7.2.10 NE7: Río Blanco 104
7.2.11 NE8: Río Chollay después de junta con Blanco 108
7.2.12 CN7: Río Chollay antes de junta con Pachuy 112
7.2.13 CN8: Río Pachuy 116
7.2.14 NE9: Río Chollay antes de junta con el río Conay 120
7.3 Cierre del Sistema 124
8.- ANÁLISIS HIDROLÓGICO SECTOR DE AGUAS DE CONTACTO 128
8.1 Aspectos Generales 128
8.2 Modelo Hidrológico para NE5 128
8.3 Sectorización 131
8.4 Metodologías de Estimación del Caudal por Sector 133
8.4.1 Factores de Aporte por Banda de elevación y Obra (Sector) 133
8.4.2 Caudales Netos por Banda de Elevación 135
8.5 Resultados por Sector 136
8.5.1 Canal Perimetral Norte (CPN) 136
8.5.2 Canal Perimetral Sur (CPS) 136
8.5.3 Sector Aguas Abajo del Cortafuga (AgAbCF) 137
8.5.4 Sector Aguas Arriba del Cortafuga (AgArrCF) 137
8.5.5 Resumen Estadístico 138
8.6 Comentarios Generales 138

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

9.- CONCLUSIONES 139
9.1 Información Base 139
9.2 Resultados del proceso de calibración 139
10.- BIBLIOGRAFÍA 141



Carlos Espinoza C.
Ingeniero Civil, Ph.D.
Representante Legal HIDROMAS

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

1.- INTRODUCCIÓN

En el contexto de la modelación de los recursos hídricos, uno de los objetivos más recurrentes es conocer cuál es la disponibilidad de agua en un punto determinado de su cauce y estimar cuál es la interacción del sistema superficial con el sistema subterráneo.

Por otra parte, el crecimiento de la actividad minera ha aumentado la atención sobre los sistemas hídricos de alta montaña, en los cuales se conjugan varios factores que dificultan su análisis y modelación. Por un lado, la información disponible en estos sistemas ha sido históricamente menos densa que en el valle y zonas costeras, tanto espacial como temporalmente, debido principalmente a las dificultades de acceso y condiciones climáticas extremas.

Junto con lo anterior, se pueden mencionar las siguientes dificultades inherentes a estos sistemas:

- Existe un mayor desconocimiento de los sistemas subterráneos existentes, lo que limita el estudio de su influencia en el retardo de la disponibilidad de agua de deshielo.
- La presencia de nieves y glaciares cuyos aportes hídricos dependen de factores poco monitoreados, como ocurre con la radiación.
- La escasez de modelos que aborden estos sistemas, debido a la complejidad de la física involucrada y de la influencia que tiene la topografía en su comportamiento.

Por esta razón, Barrick ha invertido tiempo y recursos en cerrar esta brecha a través de la instalación de estaciones de control de flujo, meteorología y la instalación de diversas baterías de pozos que han permitido recopilar información en la parte alta de la zona de emplazamiento del proyecto Pascua Lama. Dicha información ya ha permitido desarrollar un modelo hidrológico/hidrogeológico elaborador inicialmente por MJ (2006), actualizado por Knight Piésold (2009) y revisado por HIDROMAS (2014) en la cuenca del Río Chollay, cuenca que presenta un régimen hidrológico mixto pluvial, nival y glacial.

Adicionalmente, se ha visto la necesidad de integrar las diversas fuentes de información en un modelo hidrológico general que permita la simulación de flujos, que considere toda la información disponible y que permita acoplar los resultados del modelo de simulación hidrogeológico, mejorando así la estimación del aporte que realiza el acuífero, como flujo base, a la escorrentía para el sistema definido por el Río Chollay, antes de la junta con el río Conay.

Para lograr la integración propuesta, se requiere que el modelo a utilizar sea versátil, de manera que sea posible evaluar escenarios relacionados con la operación misma del sistema, instalación de faenas, etc. Por este motivo se ha seleccionado el software Water Evaluation and Planning (WEAP), el cual representa un modelo hidrológico (e hidrogeológico simple) y de operación, que permite evaluar de manera rápida sensibilidades relacionadas a variaciones en la meteorología, faenas operacionales y estimación de caudales en puntos estratégicos.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

2.- OBJETIVOS

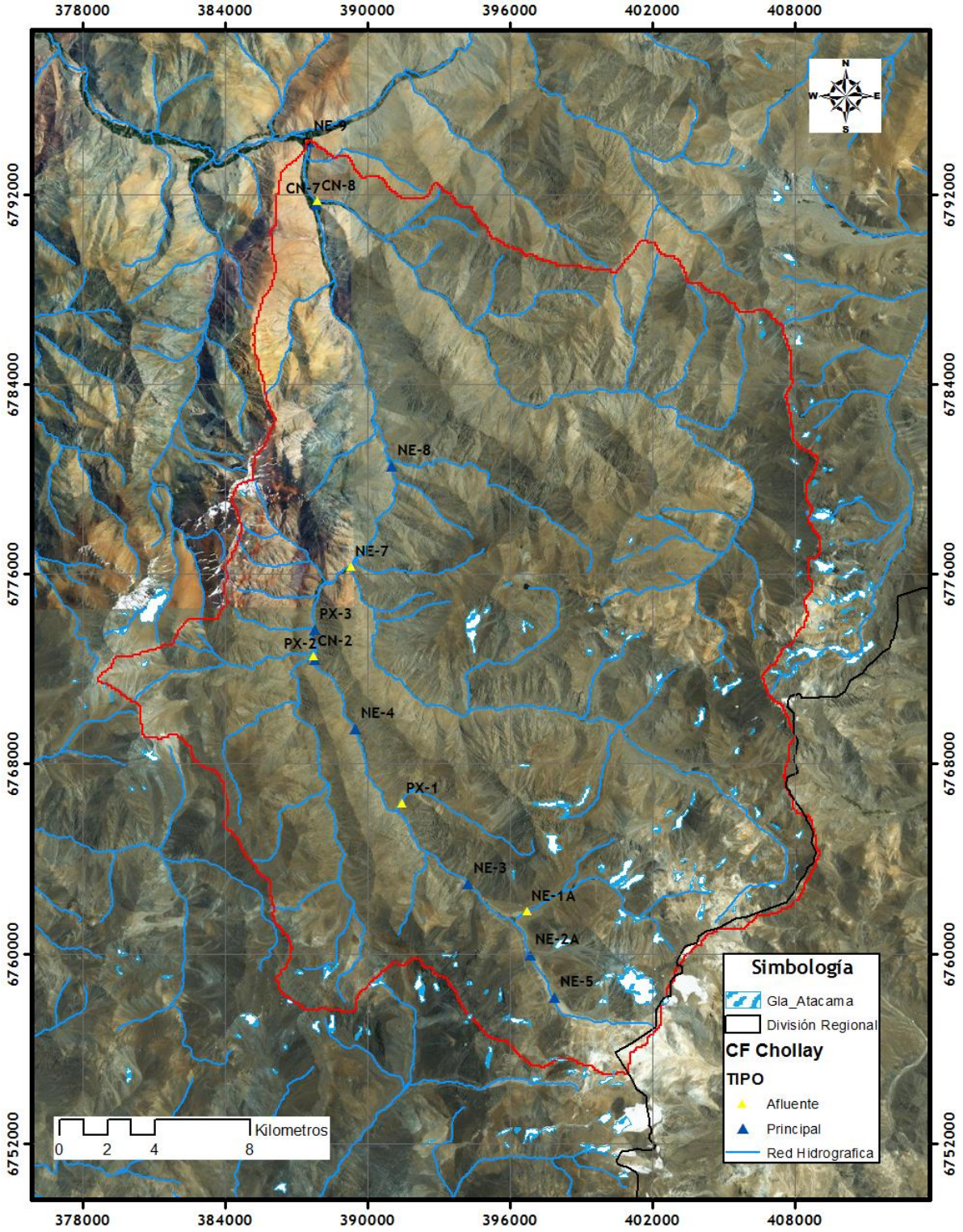
El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo y calibración de un modelo hidrológico (recursos hídricos totales) para la cuenca del río Chollay antes de la junta con el río Conay.

Para los propósitos de la aplicación de esta modelación a futuro se deben cumplir los siguientes requisitos:

- La modelación requiere que el modelo conceptual a aplicar sea por bandas de elevación.
- Se debe incorporar el máximo de información meteorológica y fluviométrica obtenida por Barrick en post de obtener un modelo representativo y debidamente validado.
- La zona de estudio, en adelante sistema, debe dividirse en 14 subcuencas en donde Barrick cuenta con controles fluviométricos y además se requiere de la estimación de caudales sintéticos.
- De acuerdo a las necesidades de Barrick, el proceso de modelación se dividirá en dos etapas. La primera etapa comprenderá la calibración del sistema hasta **NE4**. La segunda etapa comprenderá la calibración desde NE4 hasta **NE9**, incluyendo así todo el sistema original. La delimitación del sistema, como los puntos de interés, definidos como los controles fluviométricos disponibles, se presentan en la **Figura 2.1**.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 2.1
Zona de Estudio. Cuenca Río Chollay antes junta con Conay. Datum: WGS84-H19



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

3.- METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Metodología General del Estudio

En términos metodológicos este estudio se puede subdividir en tres etapas secuenciales:

- Procesamiento preliminar de la información: Su objetivo es recopilar y procesar todos los antecedentes disponibles que puedan aportar como información base al modelo y a la comprensión de la zona de estudio. En este caso, es vital el análisis de la información hidrometeorológica y la generación de la hipsometría de la zona de estudio.
- Diseño o creación del modelo conceptual a aplicar: Decidir, en función de los objetivos de estudio, cuál es el esquema que equilibra de mejor forma los requerimientos del cliente con la viabilidad técnica de la solución. En este caso se ha optado por la agrupación por bandas de elevación (**Acápite 3.3.1**) y la plataforma de modelación WEAP (**Acápite 3.2**). El producto final de esta etapa corresponde al modelo en la plataforma WEAP construido.
- Calibración y análisis: Su objetivo es la aplicación del modelo construido con la información base de las etapas I y II, la generación de los caudales simulados y el entendimiento de los aciertos y limitaciones del modelo, lo cual permitirá identificar áreas de mejora, por ejemplo, en el monitoreo y realización de estudios complementarios.

3.2 Sectorización de la Zona de Estudio

Tal como se muestra en la **Figura 2.1**, los sectores a modelar corresponden a las subcuencas (SC) definidas por los controles fluviométricos (CF) presentados en la **Tabla 3.1**, en la que se aprecia la delimitación de cada uno de los sectores descritos. Las coordenadas de los controles fluviométricos (CF) se presentan en la **Tabla 3.2**. En la **Tabla 3.1** el término CI hace referencia a Cuencas Intermedias.

Esta información corresponde a la oficial, presentada en los antecedentes del estudio. Se verificaron las coordenadas para que cada una correspondiera al sector que mide y, conforme a esa verificación, se determinaron las áreas aportantes que se presentan en la **Figura 3.1**.

3.3 Secuencia Metodológica

Tal como se describió anteriormente, el estudio puede ser dividido en tres etapas. La **Figura 3.2** muestra el esquema metodológico para las etapas I y II descritas anteriormente. Estas etapas tienen como producto final la construcción de un modelo hidrológico en la plataforma WEAP, siguiendo el esquema conceptual de una modelación por bandas de elevación.

Cabe destacar que el período de calibración del modelo comprende desde el mes de abril del año 1981 al mes de septiembre del año 2009, justo antes del inicio de la fase de construcción del proyecto Pascua Lama.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 3.1
Puntos de Control Fluviométrico para la Definición de Sectores a Modelar

SC	CF Asociado	Descripción	Cauce Asociado
C_NE5	NE5	Cuenca aportante a NE5	Río Estrecho
CI_NE2A	NE2A Y NE5	Representa la CI entre NE2A y NE5	Río Estrecho
C_NE1A	NE1A	Cuenca aportante NE1A	Quebrada (Qda). Barriales
CI_NE3	NE3, NE2A Y NE1A	CI entre NE3, NE2A y NE1A	Río Estrecho después de junta con Barriales
C_PX1	PX1	Cuenca aportante a PX1	Quebrada (Qda). Agua de la Falda
CI_NE4	NE4, NE3,PX1	CI entre los 3 puntos.	Río Estrecho después de junta con Falda y antes de junta con Toro
C_CN2	CN2	Cuenca aportante a CN2	Río del Toro
C_CN2N	CN2	Cuenca afluente a CN2	Quebrada sin Nombre
CI_PX2	PX2 y NE4	CI entre ambos	Río Estrecho antes de Junta con Toro
CI_PX3	PX3, PX2,CN2N y CN2	CI entre los 4 puntos	Río Estrecho después de junta con Toro.
CI_NE8	NE8, NE7 y PX3	CI entre los 3 puntos	Río Estrecho en sector de junta con Blanco
C_NE7	NE7	Cuenca aportante NE7	Río Blanco.
CI_CN7	CN7, NE8	CI entre ambos	Río Chollay antes junta con Pachuy y después de junta con Blanco.
C_CN8	CN8	Cuenca aportante CN8	Río Pachuy antes de junta con Chollay
CI_NE9	CN7, CN8 y NE9	CI entre los 3 puntos	Río Chollay después de junta con Pachuy y antes de junta con Conay.

Nota: CI=Cuenca Intermedia
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

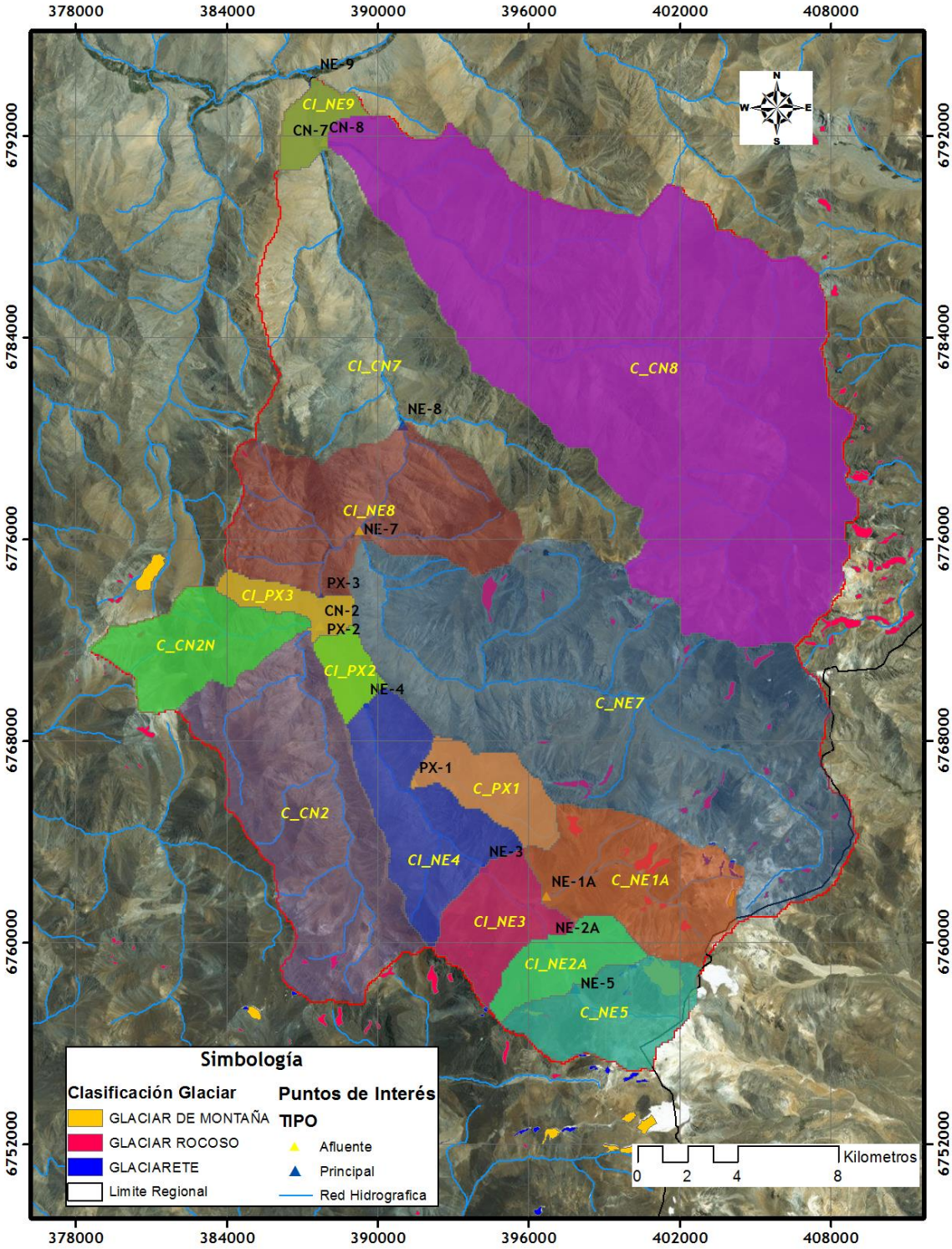
Tabla 3.2
Coordenadas UTM de los Controles Fluviométricos Utilizados en el Estudio

CF	Cauce / Río	Tipo	Coordenadas WGS 84	
			Norte [m]	Este [m]
NE5	Del Estrecho	Principal	6.758.150	397.878
NE2A	Del Estrecho	Principal	6.759.928	396.857
NE1A	Qda. Barriales	Afluente	6.761.807	396.724
NE3	Del Estrecho	Principal	6.762.948	394.239
PX1	Qda. Agua de la Falda	Afluente	6.766.319	391.469
NE4	Del Estrecho	Principal	6.769.472	389.489
PX2	Del Estrecho	Principal	6.772.402	387.788
CN2	Del Toro	Afluente	6.772.553	387.727
PX3	Chollay	Principal	6.773.627	387.777
NE7NE7	Blanco	Afluente	6.776.331	389.295
NE8	Chollay	Principal	6.780.525	391.011
CN7	Chollay	Principal	6.791.594	387.848
CN8	Pachuy	Afluente	6.791.741	387.891
NE9	Chollay	Principal	6.794.202	387.516

Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

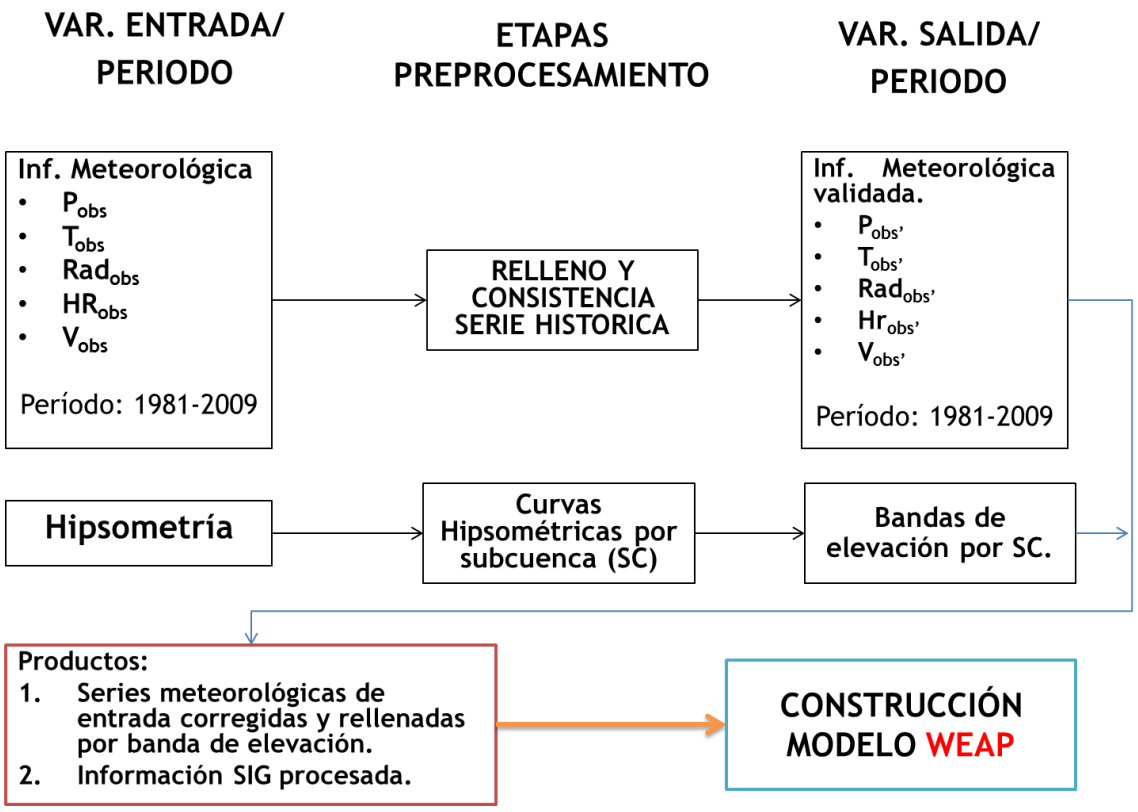
Figura 3.1
Sectorización de la Zona de Estudio. Datum: WGS84-H19



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 3.2
Esquema Metodológico de la Etapa I y II

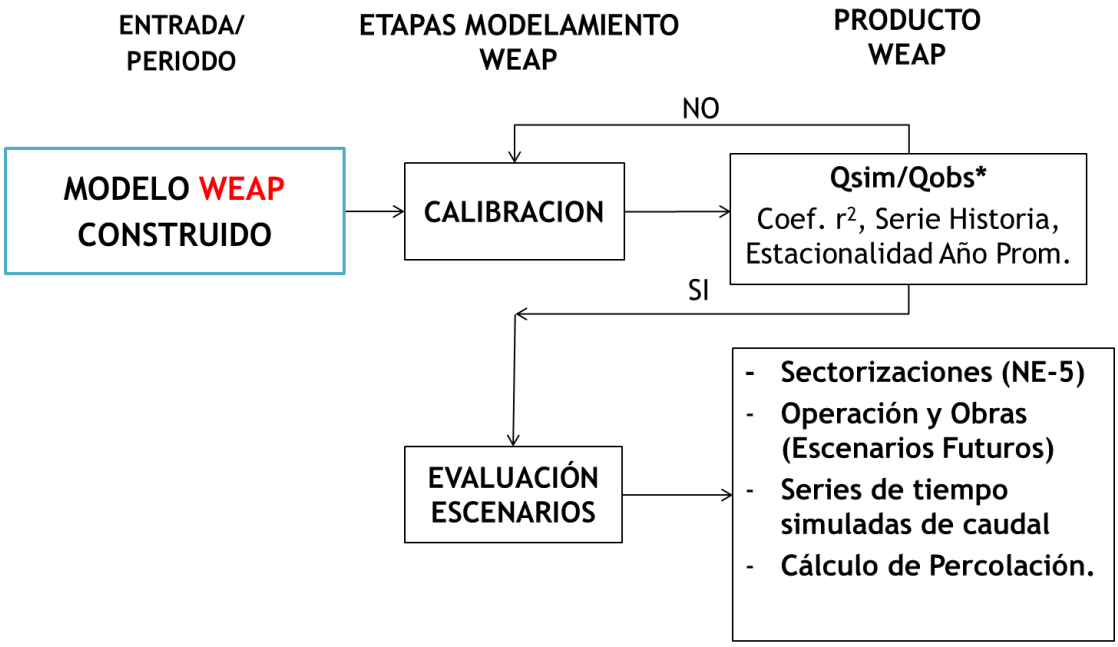


Fuente: Elaboración Propia

En la **Figura 3.3** se muestra un esquema simplificado de la Etapa III, donde se indica la información de entrada y el período de análisis que viene de la Etapa I de pre-procesamiento, junto con la configuración de las etapas de modelamiento con el software WEAP (Etapas II y III), y los productos del modelo que sirven para evaluar escenarios futuros, operación, obras u otra estimación que se requiera.

En este sentido no se ha incluido un valor específico del coeficiente de determinación para detener el proceso de calibración, en parte, debido a que la información observada presenta grandes vacíos, y además parte de ésta presenta directrices respecto del orden de magnitud de los flujos más que su estacionalidad. Esto será discutido con mayor profundidad en los **Acápites 3.3.3 y 4.**

Figura 3.3
Esquema Metodológico Simplificado de la Etapa III.



Nota: (*) Considera subconjunto de años. La información de caudales observados (Qobs) fue elegida de acuerdo a la calidad de la información
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

4.- MODELO HIDROLÓGICO WEAP

4.1 Modelo Conceptual y Parámetros Involucrados

WEAP[1] es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos desarrollada por el Stockholm Environment Institute[2] sede en Boston y el Tellus Institute[3]. Proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas de manejo de aguas.

WEAP apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico, a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal, con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). Para ello, se utiliza una gama de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores (*stakeholders*) de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible.

WEAP es un modelo forzado por variables climáticas, a diferencia de modelos de operación y gestión de recursos hídricos que se basan en modelación hidrológica externa, es decir, que separan el modelo hidrológico del operacional. Por otra parte, WEAP incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua para diferentes tipos de usuarios, desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo apropiado para realizar estudios de cambio climático, donde es importante estimar cambios en la oferta de agua (e.j. cambios en la precipitación proyectados) y demanda de agua (e.j. cambios en las demanda por evaporación en cultivos), y como estos cambios convergen en un balance de agua diferente al correspondiente al escenario base o actual (Purkey *et al*., 2007).

Si bien WEAP fue creado como una herramienta para la modelación operacional de sistemas de recursos hídricos, incluyendo elementos tales como centrales hidroeléctricas, demandas de riego, canales, embalses, etc., actualmente se ha ampliado su capacidad incluyendo módulos de hidrología (distintos métodos de cálculo de precipitación-escorrentía), calidad de agua y aguas subterráneas mediante el uso de enlaces con otro software de uso común (por ejemplo. MODFLOW).

El módulo hidrológico integrado en el modelo WEAP que se utiliza en este estudio se basa en un esquema de dos estanques, capaces de reproducir distintas componentes de los flujos subterráneos y superficiales. En la **Figura 4.1** se muestra un esquema gráfico del modelo.

WEAP simula el proceso de precipitación-escorrentía a partir de una función de transferencia (depende del módulo hidrológico seleccionado) en la que se determina una variable de salida (el caudal) a partir de una o varias variables de entrada, generalmente de carácter meteorológico (precipitación, temperatura,

[1] http://www.weap21.org/
[2] http://www.sei-us.org/
[3] http:/www.tellus.org/

etc.). Internamente el modelo utiliza numerosos parámetros para representar el fenómeno físico. En la **Tabla 4.1** se muestra una clasificación general de las variables involucradas.

4.2 Balance Hidrológico en WEAP

WEAP resuelve numéricamente dos balances de masas planteados en cada estanque. Estos balances pueden ser resumidos mediante las **ecuaciones 1 y 2**.

$$z_{1max}\frac{dz_1}{dt} = \left[P_e(t) - ET_o k_c \frac{5z_1 - 2z_1^2}{3}\right] - P_e(t) z_1^{FR} - f K_1^2 - (1-f)K_1^2 \qquad \textbf{Ec. 1}$$

$$z_{2max}\frac{dz_2}{dt} = (1-f)k_1^2 - K_2 z_2^2 \qquad \textbf{Ec. 2}$$

donde:

P_e: Precipitación más derretimiento.
f: Dirección preferencial del flujo.

El cálculo de la evapotranspiración (ET_0) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, resumido según la **Ec. 3**.

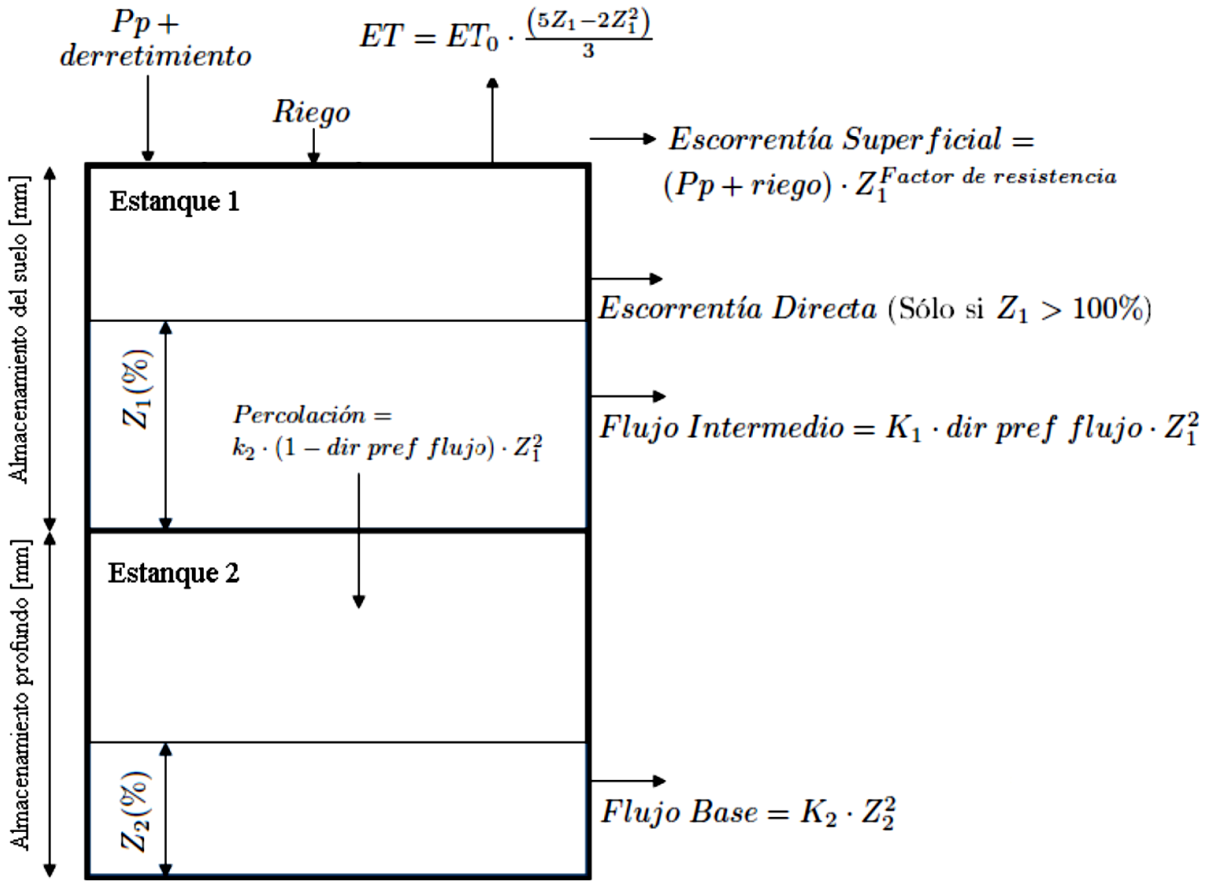
$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34u_2)} \qquad \textbf{Ec. 3}$$

donde:

- ET_0: Evapotranspiración de referencia.
- R_n: Radiación neta.
- G: Densidad de flujo de calor del suelo.
- T: Temperatura media diaria.
- u_2: Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.
- e_s: Presión de saturación de vapor de agua.
- e_a: Presión de vapor.
- Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor.
- γ: Constante psicométrica.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 4.1
Esquema gráfico modelo WEAP



Fuente: Ayala (2011)

donde:

- Pp: Precipitación líquida.
- ET: Evapotranspiración real.
- ET_0: Evapotranspiración potencial.
- z_1: Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada.
- z_2: Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada.
- K_1: Conductividad del estanque superior.
- K_2: Conductividad del estanque inferior.
- Dir pref flujo: Dirección preferencial de flujo. Determina la fracción de flujo vertical y horizontal.

Tabla 4.1
Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP

TIPO DE PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	NOMBRE PARÁMETRO
Uso de suelo	Variables de entrada	- Área de la cuenca - Coeficiente de cosecha (kc)
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	- Almacenamiento del suelo, estanque superior (z1 max) - Almacenamiento profundo, estanque inferior (z2 max) - Conductividad de la zona radicular o estanque 1 (K1) - Conductividad de la zona profunda o estanque 2 (K2) - Factor de resistencia al escurrimiento (FR) - Dirección preferencial del flujo - Almacenamiento inicial en el estanque 1 (z1 inicial) - Almacenamiento inicial en el estanque 2 (z1 inicial)
Clima	Variables de entrada	- Series de precipitación - Series de temperatura - Latitud - Humedad relativa - Viento - Fracción nublada - Radiación - Albedo de la nieve
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	- Nivel de nieve inicial - Temperatura de fusión de la nieve - Temperatura de derretimiento de la nieve - Albedo de nieve vieja - Albedo de nieve nueva
Cauces naturales	Variables de entrada	- Series históricas de caudal (para calibración)

Fuente: Elaboración propia a partir de Ayala (2011)

La evapotranspiración en el modelo WEAP se genera desde el estanque superior. Por esto, el volumen de agua almacenado allí influye directamente en la satisfacción de la demanda evapotranspirativa y debe ser observado con cuidado en el proceso de calibración ya que distintas soluciones, correctas en la simulación de caudal, pueden entregar valores irreales de evaporación.

Otro proceso de importancia en la simulación del proceso físico corresponde a la acumulación y derretimiento de nieve. Esto se hace mediante la utilización de dos parámetros a calibrar denominados temperatura de congelamiento (T_c) y derretimiento (T_d). Teóricamente ambos corresponden a 0°C; sin embargo, debido a fenómenos que están siendo dejados de lado en la modelación a nivel mensual, T_c y T_d son generalmente calibrados en un rango que va de -5 a 5 °C, respectivamente (US-SEI, 2010).

Los coeficientes de derretimiento y congelamiento determinan la proporción de agua líquida y sólida en la precipitación y la fracción de cobertura nival que se derrite en cada paso de tiempo. La **Ec. 4** resume este último fenómeno.

$$P_e(t) = \left(A_c(t) + P_p(t) m_c\right) \qquad \textbf{Ec. 4}$$

donde:

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i > T_d \\ \dfrac{T_i - T_c}{T_d - T_c} & T_c < T_i < T_d \end{cases} \qquad \textbf{Ec. 5}$$

- P_e: Aportes a la escorrentía de precipitación líquida y derretimiento de nieve.
- A_c: Cobertura nival en unidades de longitud.
- P_p: Precipitación total.
- T_i: Temperatura media mensual del mes i.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.- INFORMACIÓN BASE

5.1 Fuentes de Información

La hipsometría que se detalla en el **Acápite 3.3.1** fue procesada mediante el análisis morfológico de un modelo digital de elevación del USGS, utilizando el software libre GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), mientras que la obtención y manejo de la información geográfica se realizó con el software QGIS 2.2.

La información meteorológica se obtuvo de distintas fuentes y fue procesada por el equipo de HIDROMAS. En la **Tabla 5.1** se resumen la información meteorológica por estación. Se indican la variable, el período, el tipo de dato y la fuente.

La información fluviométrica se obtuvo de los registros de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick. La información empleada proviene de registros de aforos manuales realizados por la compañía para todos los puntos en cuestión. El detalle de dicha información se presenta en el **Acápite 3.3.3.**

5.2 Hipsometría

La hipsometría corresponde a una característica morfológica básica de la cuenca pues permite relacionar las elevaciones del terreno en función de las superficies correspondientes a dichas elevaciones. Esta relación entre la altura (o altura relativa) y la superficie asociada a dicha elevación se le conoce como la curva hipsométrica o curva de área-elevación del sistema en cuestión. La construcción de una curva hipsométrica permite, entre otras cosas:

- Definir el relieve y estudiar su influencia sobre la respuesta hidrológica de una cuenca.
- Calcular la elevación media de la cuenca.
- Proporciona información sintetizada sobre la altitud de la cuenca.
- De acuerdo a su forma (ver **Figura 5.1**), permite reconocer si la cuenca es de alta montaña con valles extensos (Ríos jóvenes), o altas planicies y valles profundos (Ríos viejos).

Las curvas hipsométricas para el conjunto de subcuencas de la parte alta (6 sistemas) y baja (9 sistemas), se indican en la **Tabla 5.2** y son graficadas (adimensionalmente) en la **Figura 5.2** y **Figura 5.3**. De acuerdo a estas figuras, la morfología de las cuencas responde a ríos jóvenes de alta montaña.

Al comparar las subcuencas, la cuenca NE4-CI representa a un río maduro, lo cual es acorde con:

- la ubicación del punto de salida más abajo que las demás, vale decir, las demás subcuencas están anidadas en la cuenca CH_NE4-CI, y
- el desarrollo de una planicie de valle mayor a las demás subcuencas.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.1
Resumen de Información para Cada Estación Meteorológica

Estación	Datos	Período	Tipo de dato	Fuente
Frontera	Temperatura	2008-2012 (27 nov)	Valor diario	Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick
	Humedad relativa	2008-2012 (nov)	Valor diario	
	Velocidad viento (10 m)	2008-2012 (nov)	Valor diario	
	Velocidad viento	1999-2002	-	
	Velocidad viento (5 m)	Abr 2008-Dic 2010	Valor mensual	Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009". Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2009-2010".
	Evaporación total	2008-2013 (ago)	Valor diario	Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick
	Radiación solar	2008-2013 (12 ago)	Valor diario	
Guanaco	Temperatura	19/12/07-04/01/11	Valor diario	Registros meteorológicos de estaciones del Centro de Estudios Científicos (CECs).
	Humedad relativa	2007 (dic)-2011 (ene)	-	
	Velocidad viento (2 m)	2007-2011	-	
	Albedo	19/12/07-04/01/11	Valor horario	
La Olla	Temperatura	2008-2013 (ago)	Valor horario	Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick
	Humedad relativa	2008-2013	-	
	Velocidad viento (10 m)	2008-2013	-	
	Evaporación total	2008-2013	-	
	Radiación solar	2008-2012(sept)	Valor diario y horario	

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.1 (Continuación)
Resumen de Información para Cada Estación Meteorológica

Estación	Datos	Período	Tipo de dato	Fuente
Aeropotrerillos	Temperatura	2008-2010	Valor mensual	Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009" / Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2009-2010"
	Velocidad viento		Valor mensual	
	Radiación solar		-	
	Humedad relativa		-	
Cumbre	Temperatura		Valor mensual	Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009" / Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2009-2010"
	Velocidad viento		Valor mensual	
	Radiación solar		-	
	Humedad relativa		-	
Aerocolorado	Temperatura		Valor mensual	Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009" / Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2009-2010"
	Viento		Valor mensual	
	Radiación solar		-	
	Humedad relativa		-	
Tres Quebradas	Temperatura		Valor mensual	Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009" / Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2009-2010"
	Velocidad viento		Valor mensual	
	Radiación solar		-	
	Humedad relativa		-	

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.1 (Continuación)
Resumen de Información para Cada Estación Meteorológica

Estación	Datos	Período	Tipo de dato	Fuente
Toro 1	Temperatura	2008-2010	Valor diario	Registros meteorológicos de estaciones del Centro de Estudios Científicos (CECs).
	Radiación solar	Mar-oct 2012	Valor diario	CECs (2012). Centro de Estudios Científicos. "Informe Anual de Condiciones Meteorológicas Observadas Sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama
	Humedad relativa	Mar-oct 2012	Valor diario	
	Velocidad viento	Mar-oct 2012	Valor diario	
	Velocidad viento (2 m)	Mar-oct 2012	Valor diario	
El Indio	Precipitación	1981-2004	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volumenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
	Temperatura	2009 (may)-2012 (feb)	Valor horario	Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick
	Radiación solar	2009 (may)-2012 (feb)	-	Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick
Conay en Albaricoque	Precipitación	1999-2004	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
	Temperatura	1999-2011	Valor mensual	Banco Nacional de Aguas, Dirección General de Aguas (BNA-DGA)
El Transito	Precipitación	1999-2004	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
	Temperatura	1993-2011	Valor mensual	Banco Nacional de Aguas, Dirección General de Aguas (BNA-DGA)
Laguna Embalse	Precipitación	1999-2004	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
	Temperatura	1981-2012	Valor mensual	Banco Nacional de Aguas, Dirección General de Aguas (BNA-DGA)

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.1 (Continuación)
Resumen de Información para Cada Estación Meteorológica

Estación	Datos	Período	Tipo de dato	Fuente
Huanta	Precipitación	1989-2013	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
Manflas	Precipitación	1967-2013	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
Iglesia Colorada	Precipitación	1989-2013	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
El Corral	Precipitación	1995-2013	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
Juntas	Precipitación	1990-2013	Valor mensual	CONIC-BF (2014). Conic-Bf Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.2
Resumen de Curvas Hipsométricas para el Conjunto de Subcuencas en Estudio

CH_NE5		CH_NE2A-CI		CH_NE1A		CH_NE3-CI		CH_PX1		CH_NE4-CI		CH_PX2-CI		CH_NE9-CI	
% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM
0%	0,71	0%	0,7	0%	0,67	0%	0,7	0%	0,64	0%	0,59	0%	0,77	0%	0,57
5%	0,74	14%	0,73	4%	0,7	11%	0,73	2%	0,68	4%	0,63	4%	0,79	21%	0,61
15%	0,77	32%	0,76	15%	0,74	27%	0,76	6%	0,72	15%	0,67	12%	0,81	34%	0,65
29%	0,8	52%	0,79	31%	0,77	42%	0,79	12%	0,75	33%	0,71	26%	0,84	46%	0,70
43%	0,82	67%	0,82	45%	0,8	59%	0,82	26%	0,79	52%	0,75	40%	0,86	59%	0,74
57%	0,85	79%	0,85	58%	0,83	76%	0,85	49%	0,82	68%	0,79	54%	0,88	70%	0,78
70%	0,88	87%	0,88	69%	0,87	86%	0,88	73%	0,86	83%	0,83	69%	0,91	80%	0,83
83%	0,91	93%	0,91	82%	0,9	92%	0,91	86%	0,89	95%	0,88	82%	0,93	88%	0,87
92%	0,94	97%	0,94	92%	0,93	97%	0,94	93%	0,93	98%	0,92	93%	0,95	93%	0,91
97%	0,97	99%	0,97	97%	0,97	99%	0,97	98%	0,96	99%	0,96	99%	0,98	97%	0,96
100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00

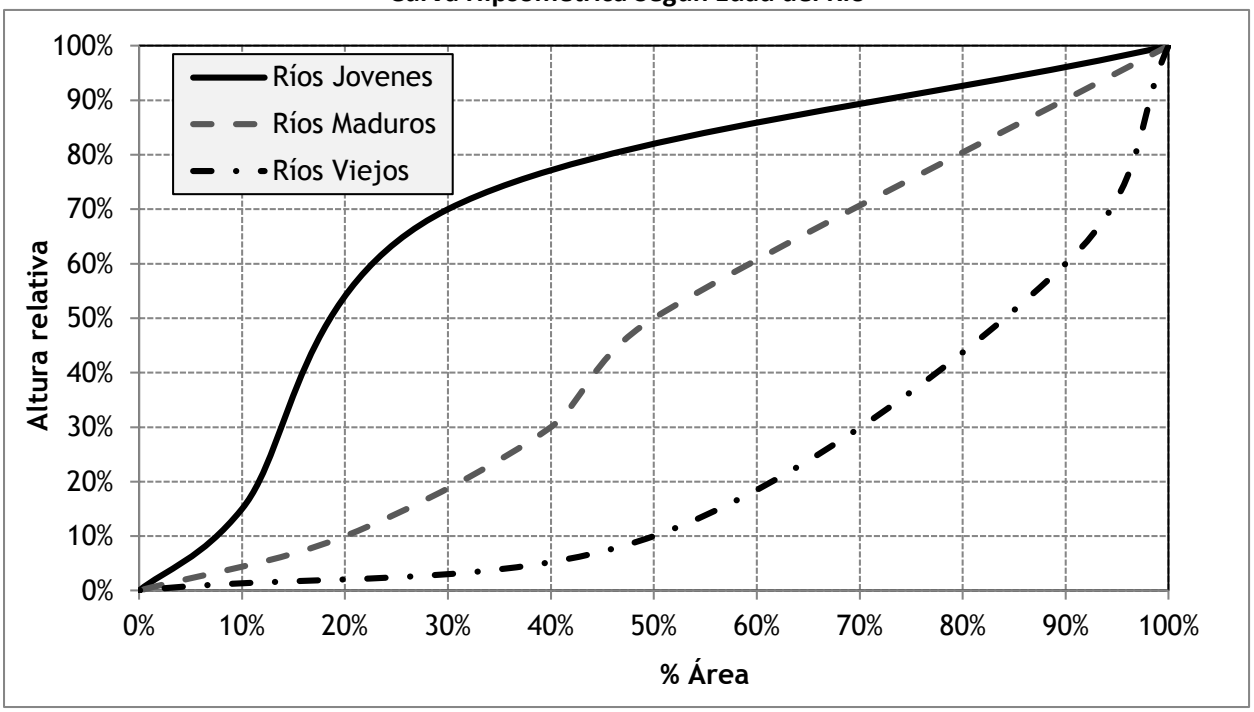
CH_CN2N		CH_CN2		CH_PX3-CI		CH_NE7NE7		CH_NE8-CI		CH_CN8		CH_CN7-CI	
% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM	% A	Z/ZM
0%	0,55	0%	0,52	0%	0,62	0%	0,49	0%	0,44	0%	0,28	0%	0,33
2%	0,60	2%	0,57	12%	0,66	1%	0,49	4%	0,50	2%	0,35	6%	0,39
6%	0,64	6%	0,62	28%	0,70	5%	0,54	14%	0,55	7%	0,43	17%	0,46
11%	0,69	14%	0,67	41%	0,73	11%	0,60	28%	0,61	15%	0,50	32%	0,53
20%	0,73	24%	0,71	53%	0,77	18%	0,66	42%	0,67	26%	0,57	47%	0,60
34%	0,78	39%	0,76	66%	0,81	31%	0,72	54%	0,72	38%	0,64	59%	0,66
53%	0,82	67%	0,81	74%	0,85	58%	0,77	66%	0,78	53%	0,71	70%	0,73
74%	0,87	88%	0,86	79%	0,89	83%	0,83	79%	0,83	80%	0,78	79%	0,80
87%	0,91	96%	0,90	86%	0,92	95%	0,89	92%	0,89	97%	0,86	86%	0,87
96%	0,96	99%	0,95	94%	0,96	99%	0,94	99%	0,94	100%	0,93	96%	0,93
100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00	100%	1,00

%A= Porcentaje de área de la SC.
Z/ZM=Z/Zmax
CH: Curva Hipsométrica
CI: Cuenca Intermedia.

Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.1
Curva Hipsométrica Según Edad del Río

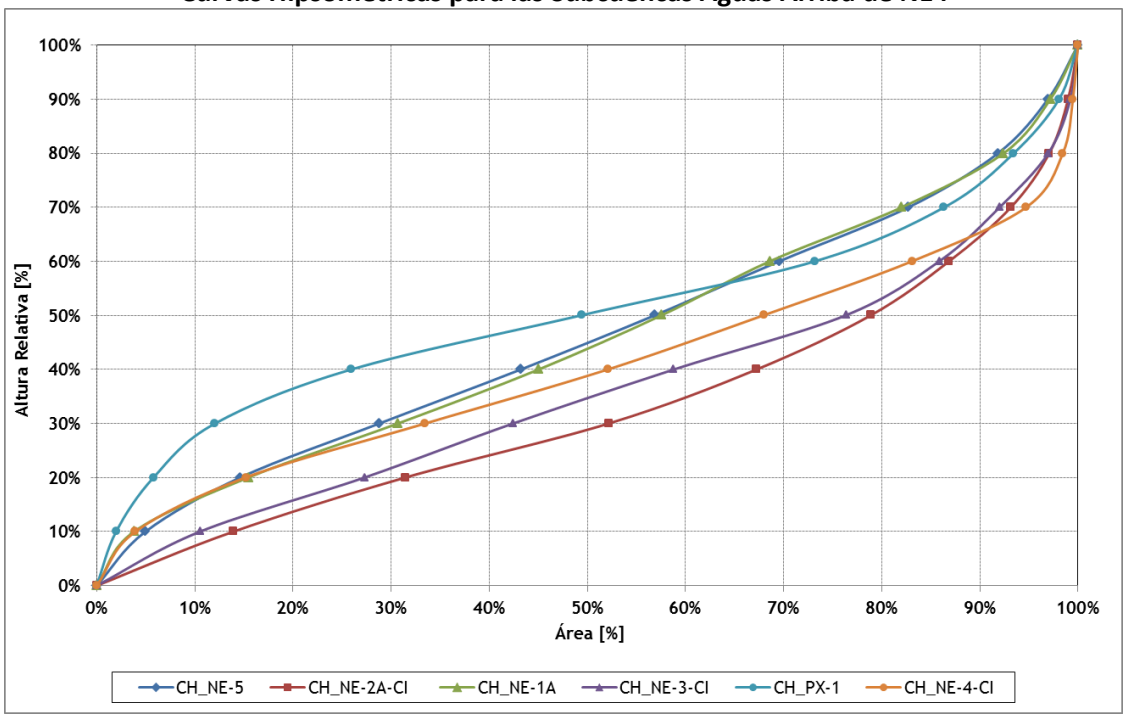


Fuente: Llamas, J. (1993)

Adicionalmente, la **Figura 5.3** muestra el mismo comportamiento antes señalado. En ella se observa una mezcla entre ríos jóvenes y maduros, que, probablemente se diferencian por distintos períodos de erosión. La altura relativa ha sido determinada como la razón entre la resta de la cota de la banda menos su cota base y la resta entre la cota máxima con la cota base. De esa manera, en el punto de salida de la SC, cuando la cota es igual a la cota base, la altura relativa es nula, mientras que cuando la cota es igual a la cota máxima, la altura relativa es 1 o 100%.

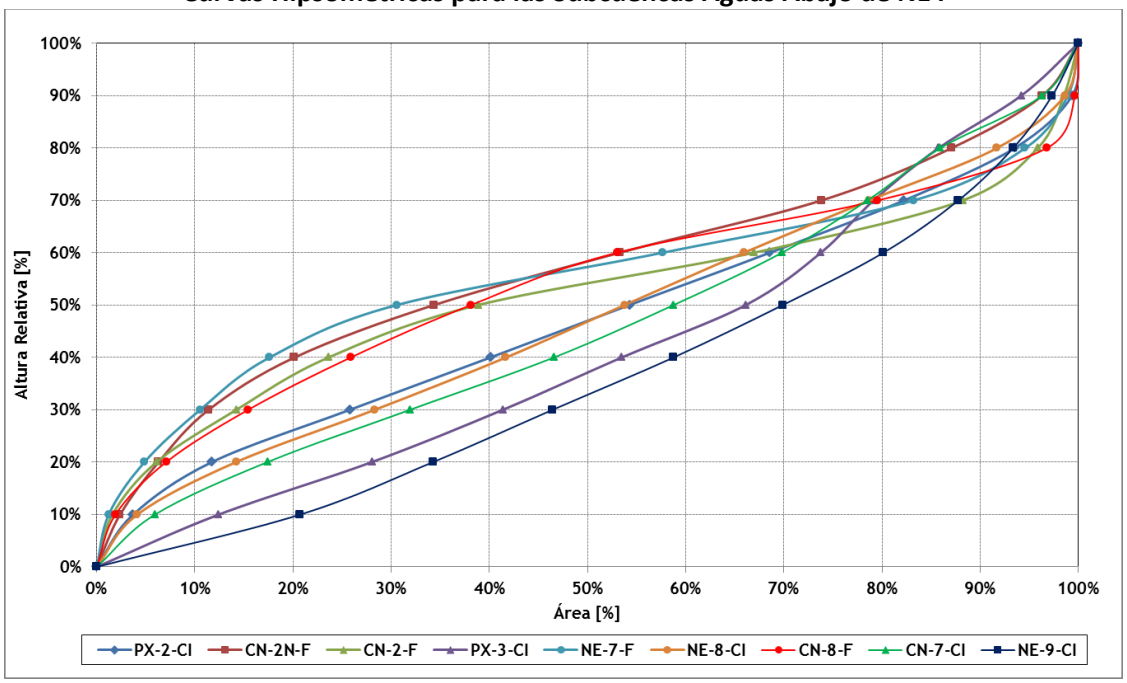
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.2
Curvas Hipsométricas para las Subcuencas Aguas Arriba de NE4



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.3
Curvas Hipsométricas para las Subcuencas Aguas Abajo de NE4



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Mediante las curvas hipsométricas se dividió cada subcuenca en 5 bandas de elevación, de manera que cada banda fuera de igual área. El criterio aplicado corresponde como sigue:

- Banda B1: Área entre 80% y 100% de la subcuenca.
- Banda B2: Área entre 60% y 80% de la subcuenca.
- Banda B3: Área entre 40% y 60% de la subcuenca.
- Banda B4: Área entre 20% y 40% de la subcuenca.
- Banda B5: Área entre 0% y 20% de la subcuenca.

De acuerdo a esta nomenclatura la banda de mayor elevación corresponde a la banda B1, mientras que la banda de menor elevación es la banda B5. Cada banda tiene asociada una cota límite o curva de nivel que envuelve a dicha área, vale decir, un cota de elevación inicial (Zini), una cota de elevación final (Zfin), y una cota de elevación promedio entre Zini y Zfin (Zmed).

Para asociar cada banda a una ubicación geográfica dentro del modelo WEAP, se le asignó la coordenada de latitud referencial, asociada al centro de gravedad de la subcuenca definida en la sectorización descrita en el **Acápite 3.1.1**.

En la **Tabla 5.3** se resume la información obtenida de las curvas hipsométricas para caracterizar cada una de las cinco bandas de cada subcuenca modelada, además de la latitud ingresada a WEAP. La latitud ingresada corresponde a la latitud aproximada del centro de gravedad de cada subcuenca.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.3
Resumen de Áreas, Cotas de Elevación y Latitud por Banda para cada una de las Subcuencas en Estudio

Subcuenca	Banda N°	Área Acumulada [km^2]	Z_{ini} [m s.n.m.]	Z_{fin} [m s.n.m.]	Z_{med} [m s.n.m.]	Latitud [°]
C_NE5	B5	4,32	3.951,0	4.340,0	4.145,5	-29,309
	B4	8,63	4.340,0	4.568,7	4.454,3	-29,309
	B3	12,95	4.568,7	4.809,1	4.688,9	-29,309
	B2	17,26	4.809,1	5.062,2	4.935,7	-29,309
	B1	21,58	5.062,2	5587,0	5.324,6	-29,309
CI_NE2A	B5	2,31	3.825,0	4.044,7	3.934,8	-29,293
	B4	4,62	4.044,7	4.219,0	4.131,8	-29,293
	B3	6,93	4.219,0	4.399,6	4.309,3	-29,293
	B2	9,24	4.399,6	4.664,3	4.531,9	-29,293
	B1	11,55	4.664,3	5.458,0	5.061,2	-29,293
C_NE1A	B5	6,94	3.726,0	4.148,7	3.937,4	-29,257
	B4	13,87	4.148,7	4.397,5	4.273,1	-29,257
	B3	20,81	4.397,5	4.686,4	4.541,9	-29,271
	B2	27,75	4.686,4	4.986,1	4.836,2	-29,271
	B1	34,69	4986,1	5.566,0	5.276,1	-29,271
CI_NE3	B5	3,43	3.552,0	3.789,7	3.670,9	-29,273
	B4	6,87	3.789,7	3.983,4	3.886,6	-29,273
	B3	10,3	3.983,4	4.170,4	4.076,9	-29,273
	B2	13,74	4.170,4	4.371,0	4.270,7	-29,273
	B1	17,17	4.371,0	5.073,0	.4722	-29,273
C_PX1	B5	2,64	3.290,0	3.938,2	3.614,1	-29,229
	B4	5,28	3938,2	4.124,4	4.031,3	-29,229
	B3	7,92	4.124,4	4.277,5	4.201	-29,229
	B2	10,56	4.277,5	4.472,0	4.374,7	-29,229
	B1	13,2	4.472,0	5.104,0	.4788	-29,229
CI_NE4	B5	5,95	2.909,0	3.373,9	3.141,5	-29,223
	B4	11,9	3.373,9	3.596,8	3.485,4	-29,223
	B3	17,84	3.596,8	3.832,7	3.714,7	-29,241
	B2	23,79	3.832,7	4.099,1	3.965,9	-29,269
	B1	29,74	4.099,1	4.962,0	4.530,5	-29,269

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.3 (Continuación)
Resumen de Áreas, Cotas de Elevación y Latitud por Banda para cada una de las Subcuencas en Estudio

Subcuenca	Banda N°	Área Acumulada [km^2]	Z_{ini} [m s.n.m.]	Z_{fin} [m s.n.m.]	Z_{med} [m s.n.m.]	Latitud [°]
CI_PX2	B5	1,2	2.693,0	2.905,2	2.799,1	-29,185
	B4	2,4	2.905,2	3.020,4	2.962,8	-29,185
	B3	3,6	3.020,4	3.135,4	3.077,9	-29,185
	B2	4,8	3.135,4	3.252,5	3.194,0	-29,185
	B1	6,0	3.252,5	3.512,0	3.382,3	-29,185
C_CN2N	B5	4,6	2.750,0	3.630,5	3.190,2	-29,175
	B4	9,2	3.630,5	3.920,7	3.775,6	-29,175
	B3	13,8	3.920,7	4.148,2	4.034,5	-29,175
	B2	18,4	4.148,2	4.400,1	4.274,1	-29,175
	B1	23,0	4.400,1	4.960,0	4.680,0	-29,175
C_CN2	B5	13,6	2.726,0	3.622,7	3.174,3	-29,201
	B4	27,2	3.622,7	3.975,8	3.799,2	-29,232
	B3	40,8	3.975,8	4.152,4	4.064,1	-29,232
	B2	54,4	4.152,4	4.366,1	4.259,3	-29,266
	B1	68,1	4.366,1	5.206,0	4.786,1	-29,266
CI_PX3	B5	1,3	2.584,0	2.819,7	2.701,9	-29,159
	B4	2,7	2.819,7	3.043,6	2.931,7	-29,159
	B3	4,0	3.043,6	3.300,6	3.172,1	-29,159
	B2	5,4	3.300,6	3.715,6	3.508,1	-29,159
	B1	6,7	3.715,6	4.171,0	3.943,3	-29,159
C_NE7NE7	B5	32,2	2.656,0	3.659,3	3.157,6	-29,161
	B4	64,3	3.659,3	4.021,4	3.840,4	-29,209
	B3	96,5	4.021,4	4.253,4	4.137,4	-29,209
	B2	128,7	4.253,4	4.496,7	4.375,1	-29,209
	B1	160,8	4.496,7	5.471,0	4.983,9	-29,239
CI_NE8	B5	10,6	2.050,6	2.673,7	2.362,1	-29,127
	B4	21,2	2.673,7	3.052,2	2.862,9	-29,127
	B3	31,9	3.052,2	3.475,4	3.263,8	-29,127
	B2	42,5	3.475,4	3.886,6	3.681,0	-29,127
	B1	53,1	3.886,6	4.636,0	4.261,3	-29,127

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.3 (Continuación)
Resumen de Áreas, Cotas de Elevación y Latitud por Banda para cada una de las Subcuencas en Estudio

Subcuenca	Banda N°	Área Acumulada [km^2]	Z_{ini} [m s.n.m.]	Z_{fin} [m s.n.m.]	Z_{med} [m s.n.m.]	Latitud [°]
C_CN8	B5	43,1	1.495,0	2.798,9	2.146,9	-29,015
	B4	86,2	2.798,9	3.438,4	3.118,6	-29,060
	B3	129,2	3.438,4	3.869,7	3.654,1	-29,085
	B2	172,3	3.869,7	4.158,9	4.014,3	-29,085
	B1	215,4	4.158,9	5.297,0	4.728,0	-29,132
CI_CN7	B5	19,7	1.494,0	2.166,4	1.830,2	-29,011
	B4	39,3	2.166,4	2.589,9	2.378,1	-29,048
	B3	59,0	2.589,9	3.071,2	2.830,6	-29,048
	B2	78,6	3071,2	3.716,9	3.394,1	-29,079
	B1	98,3	3.716,9	4.581,0	4.148,9	-29,079
CI_NE9	B5	1,3	1.416,0	1.520,3	1.468,1	-28,987
	B4	2,7	1.520,3	1.681,8	1.601,1	-28,987
	B3	4,0	1.681,8	1.858,2	1.770,0	-28,987
	B2	5,4	1.858,2	2.059,5	1.958,8	-28,987
	B1	6,7	2.059,5	2.491,0	2.275,2	-28,987

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Meteorología

5.3.1 Precipitación

Para la generación de la estadística de precipitación de entrada al modelo se hace necesario estimar la precipitación para cada una de las bandas de elevación señaladas en la **Tabla 5.3**. Para esto se recurrió a la metodología de la estimación del gradiente de precipitación con la altura. Primero se intentó estimar este gradiente a nivel medio mensual, pero los coeficientes de determinación fueron muy bajos y la calidad de los ajustes muy pobre. Por ese motivo se determinó un gradiente estacional (Abr-Sep y Oct-Mar) de manera de estimar la precipitación total para ambas estaciones: Pluvial y Nival. Este gradiente se calculó en base a la información del año promedio de 9 estaciones pluviométricas, las que se detallan en la **Tabla 5.4.**

Tabla 5.4
Estaciones de Precipitación, Coordenadas, y Gradiente Estacional

N°	Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19		Cota [m s.n.m]	Periodo de registro	Gradiente [mm/m]		
		Este [m]	Norte [m]			abr-sept	oct-mar	Anual
1	El Tránsito	374.948	6.805.357	1.100	1993-2013	0,0474	0,0066	0,0539
2	Huanta	366.029	6.696.897	1.240	1989-2013			
3	Manflas	404.044	6.887.231	1.410	1967-2013			
4	Iglesia Colorada	413.310	6.884.686	1.550	1988-2013			
5	Conay en Albaricoque	391.773	6.796.784	1.600	1999-2013			
6	El Corral	365.971	6.775.857	1.820	1995-2013			
7	Juntas	394.208	6.682.885	2.150	1990-2012			
8	Laguna Embalse	399.475	6.657.844	3.160	1964-2013			
9	El Indio	403.973	6.703.538	3.850	1981-2004			

Fuente: Elaboración Propia

Para repartir estos montos estacionales para cada uno de los meses se utilizó la información de la estación Laguna Embalse, la que presenta los registros más completos y de mejor consistencia, dado que la estación el Indio no posee registros para períodos posteriores al año 2004 y la relación entre esta estación y Laguna Embalse (en base a correlaciones mensuales) es inadecuada para poder efectuar un relleno confiable. Se le llama entonces a la estación Laguna Embalse la **estación base**.

Posteriormente, se calculó para cada mes "i" (i de 1 a 12) de cada año "j" (j desde 1981-2009) la razón entre la precipitación de ese mes "i" sobre la precipitación estacional correspondiente (Abr-Sep ó Oct-Mar; según sea el caso) para ese año "j". A esta razón se le denominó **coeficiente de reparto estacional (CRE)**, pues representa el peso relativo de un mes "i" respecto de la estacionalidad (pluvial o nival) del año "j".

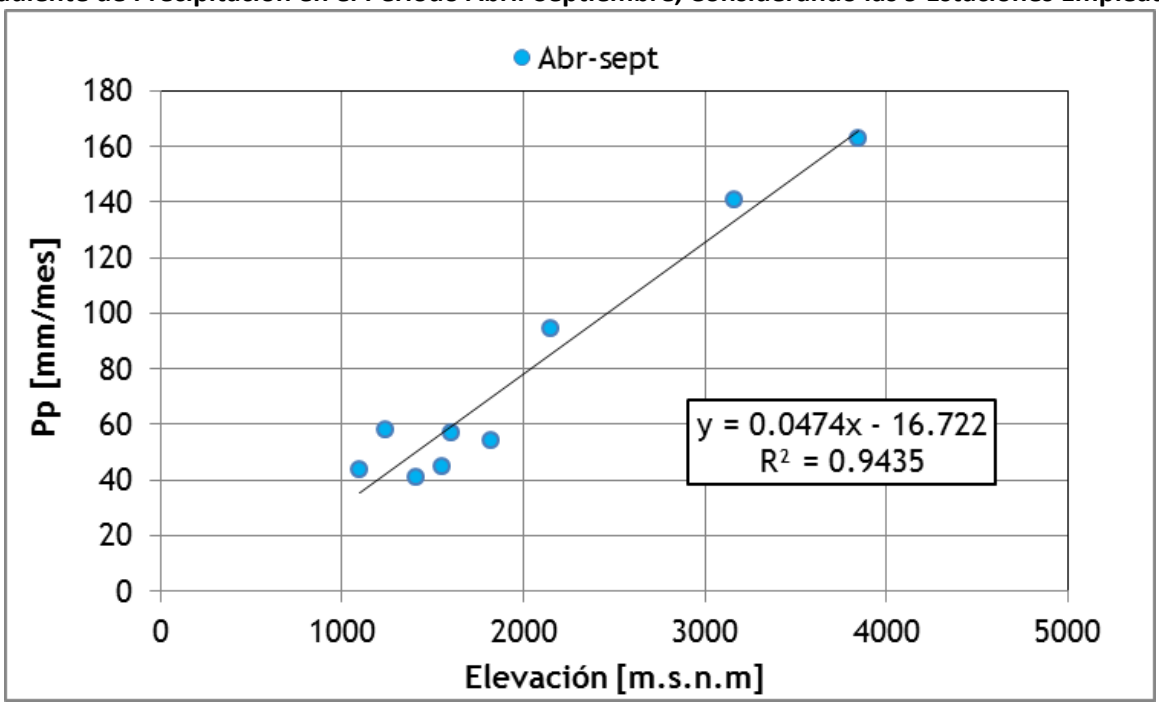
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

$$CRE\ (mes\ i, año\ j) = \frac{Pp_{año\ j}^{mes\ i}}{\sum_{i=1}^{6} Pp_{año\ j}^{mes\ i}} \qquad \textbf{Ec. 6}$$

Finalmente, se utilizó el gradiente estacional para estimar las precipitaciones estacionales a las distintas bandas de elevación calculadas. Una vez estimadas dichas precipitaciones estacionales, se procedió a aplicar el coeficiente de reparto determinado para la **estación base**. Intrínsecamente se está suponiendo que la variabilidad de la precipitación para cada una de las bandas es la misma que la de la **estación base**. Cabe destacar que en la **Tabla 5.4** se indica además el gradiente estacional definido para los períodos abril-septiembre y octubre-marzo (obtenidos a partir de registros medios mensuales). Se incluye también el gradiente anual. En la **Figura 5.4** y **Figura 5.5** se muestran los resultados del cálculo del gradiente estacional.

En la **Figura 5.6** se indica el gradiente anual para todas las estaciones empleadas. Las curvas de ajuste lineal muestran una buena correlación de los valores de precipitación con la altitud, tanto a nivel estacional como anual, con valores de R^2 mayores a 0.8, lo que indica un ajuste adecuado.

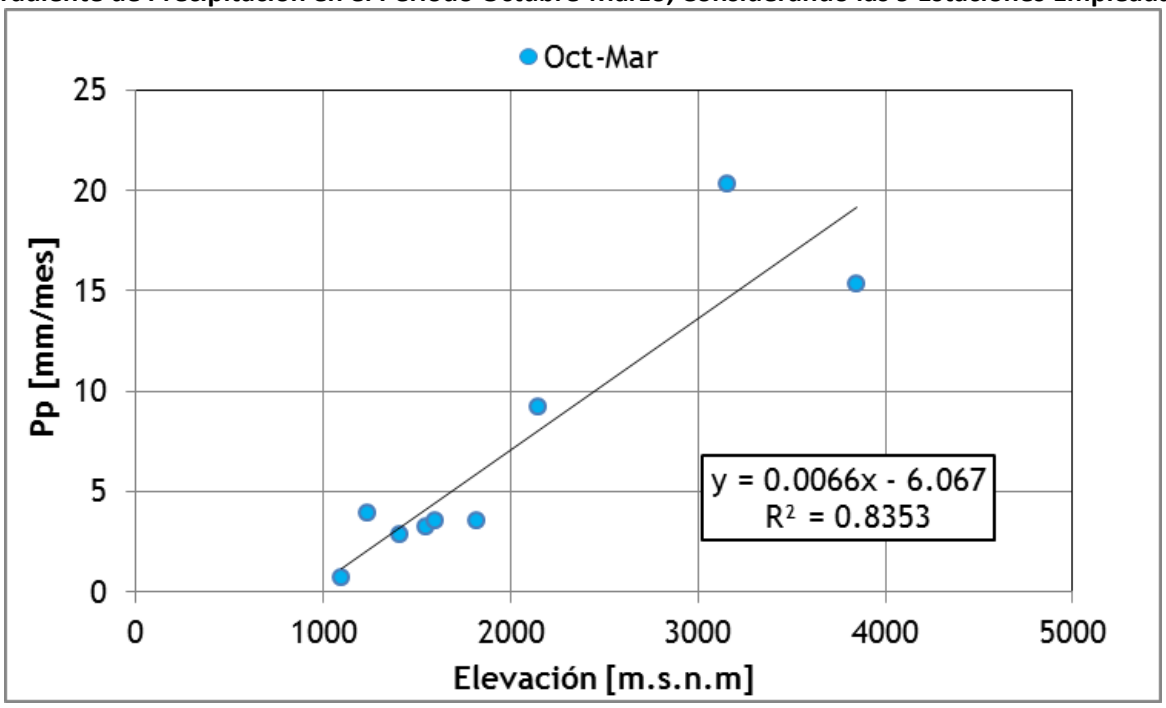
Figura 5.4
Gradiente de Precipitación en el Período Abril-Septiembre, Considerando las 9 Estaciones Empleadas



Fuente: Elaboración Propia

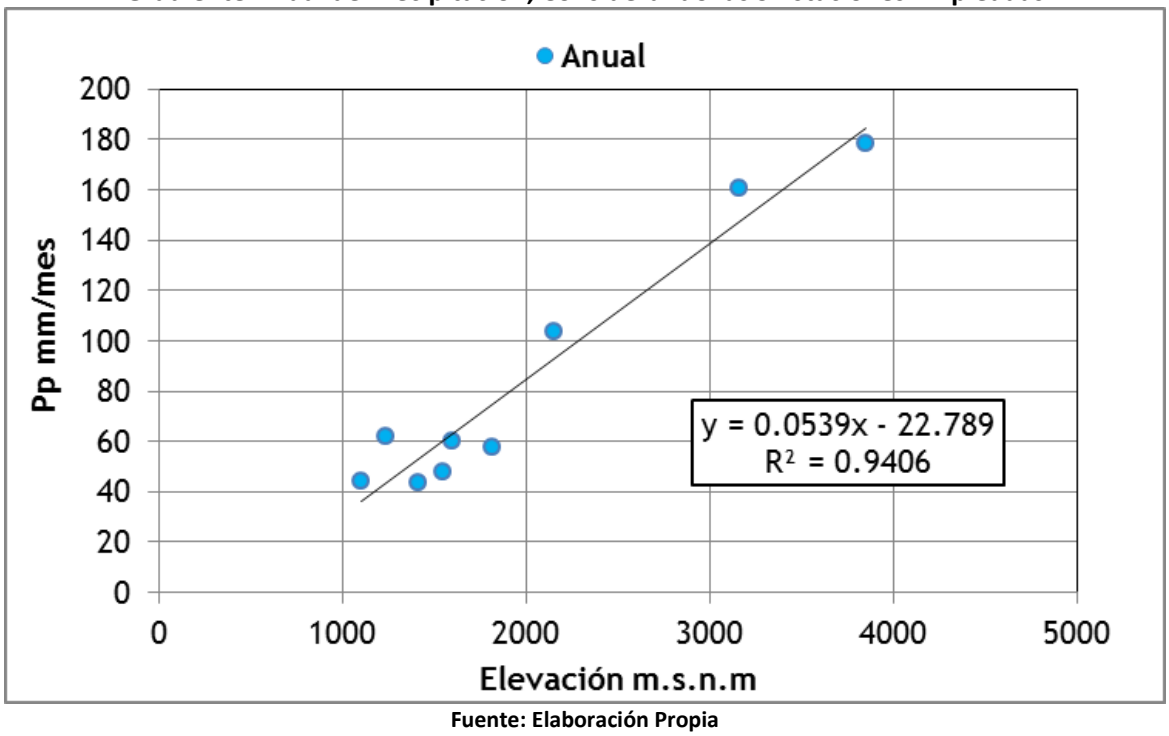
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.5
Gradiente de Precipitación en el Período Octubre-Marzo, Considerando las 9 Estaciones Empleadas



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.6
Gradiente Anual de Precipitación, Considerando las 9 Estaciones Empleadas



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Para efectos de la modelación, el volumen de agua que se ha determinado para las bandas superiores a los 3500 msnm ha sido afectado por un factor de corrección. Este factor de corrección toma valores entre un 80% y un 90%, lo cual se debe a que el conocimiento de la precipitación en altura es limitado y, en general, la precipitación sobre una cota tiende a aumentar siguiendo un comportamiento más "logarítmico" que lineal.

Esto fue ratificado en la visita a terreno que realizó HIDROMAS a los controles fluviométricos y meteorológicos de Barrick - Pascua Lama, donde, en conversación con el Jefe de Meteorología, se mencionó que sobre los 3.500 m s.n.m. el gradiente de precipitación tiende a revertirse. Esta situación se aprecia en aquellos casos en que se detecta precipitación en zonas bajas, mientras que en la parte alta no se replica el fenómeno. Este factor de ajuste, que se define sobre la cota de los 3.500 m s.n.m., es decir, aguas arriba de NE4, intenta considerar este fenómeno.

5.3.2 Temperatura

De igual manera que la precipitación, la temperatura requirió de su propio análisis para poder transponer o completar las series de tiempo para cada una de las bandas generadas. A diferencia de la precipitación, en este caso se determinó un gradiente mensual, el cual tuvo un correcto desempeño en términos de coeficiente de determinación. Las estaciones de temperatura empleadas se indican en la **Tabla 5.5.**

Tabla 5.5
Estaciones de temperatura y coordenadas

N°	Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19		Cota	Periodo de registro
		Este [m]	Norte [m]	[m s.n.m]	
1	Frontera	401.775	6.757.024	4.927	1999-2013
2	Guanaco	401.510	6.753.608	5.317	2008-2012
3	La Olla	398.014	6.758.599	3.975	2008-2013
4	Ortigas 1	398.140	6.749.004	5.209	2008-2012
5	El Toro	392.125	6.754.616	3.735	1999-2013
6	Campamento	396.352	6.761.608	3717	2007-2013
7	Aeropotrerillos	394.146	6.737.834	3.282	2008-2010
8	Cumbre	401.604	6.754.151	5.293	2008-2010
9	Tres Quebradas	390.941	6.753.646	3.583	2008-2010
10	Aerocolorado	369.471	6.762.289	2.618	2008-2010
11	Toro 1	401.085	6.754.794	5.226	2008-2010
12	El Indio	403.973	6.703.538	3.850	2009-2011
13	El Tránsito	374.948	6.805.357	1.100	1993-2011
14	La Laguna Embalse	399.475	6.657.844	3.160	1981-2012
15	Conay en Albaricoque	391.773	6.796.784	1.600	1999-2011

Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

En la **Tabla 5.6** se resumen los gradientes de temperatura a nivel mensual. La gráfica de los gradientes se muestra en la **Figura 5.7** y la **Figura 5.8**. Las curvas de ajuste lineal a nivel mensual poseen coeficientes R^2 que superan los 0.94 (para cada mes), lo cual indica que la temperatura se correlaciona con la altitud de las estaciones analizadas y por ende permite una buena estimación de esta variable para cada altitud. Adicionalmente el gradiente anual de temperatura a nivel anual calculado fue de -0.0069 [°C/m].

La **Figura 5.9** presenta el mapa de ubicación referencial de las estaciones de precipitación y de temperatura, en la cual se muestra de color verde y achurado la cuenca del río Chollay antes junta río Carmen.

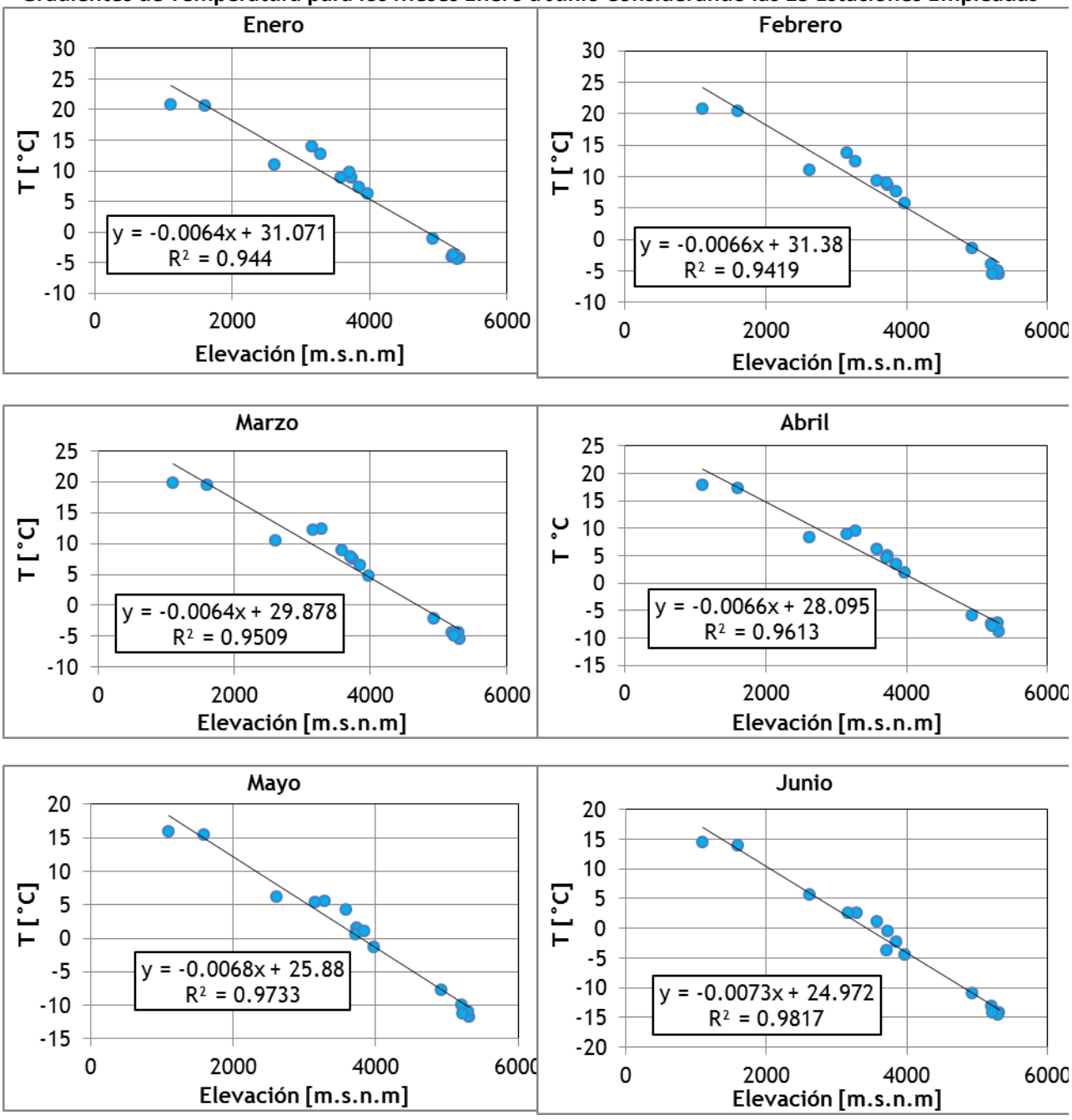
Tabla 5.6
Gradientes de Temperatura para las Estaciones Empleadas.

Período	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Gradiente de temperatura [°C/m]	-0,0064	-0,0066	-0,0064	-0,0066	-0,0068	-0,0073
Período	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Gradiente de temperatura [°C/m]	-0,0075	-0,0074	-0,0075	-0,0074	-0,0069	-0,0066

Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

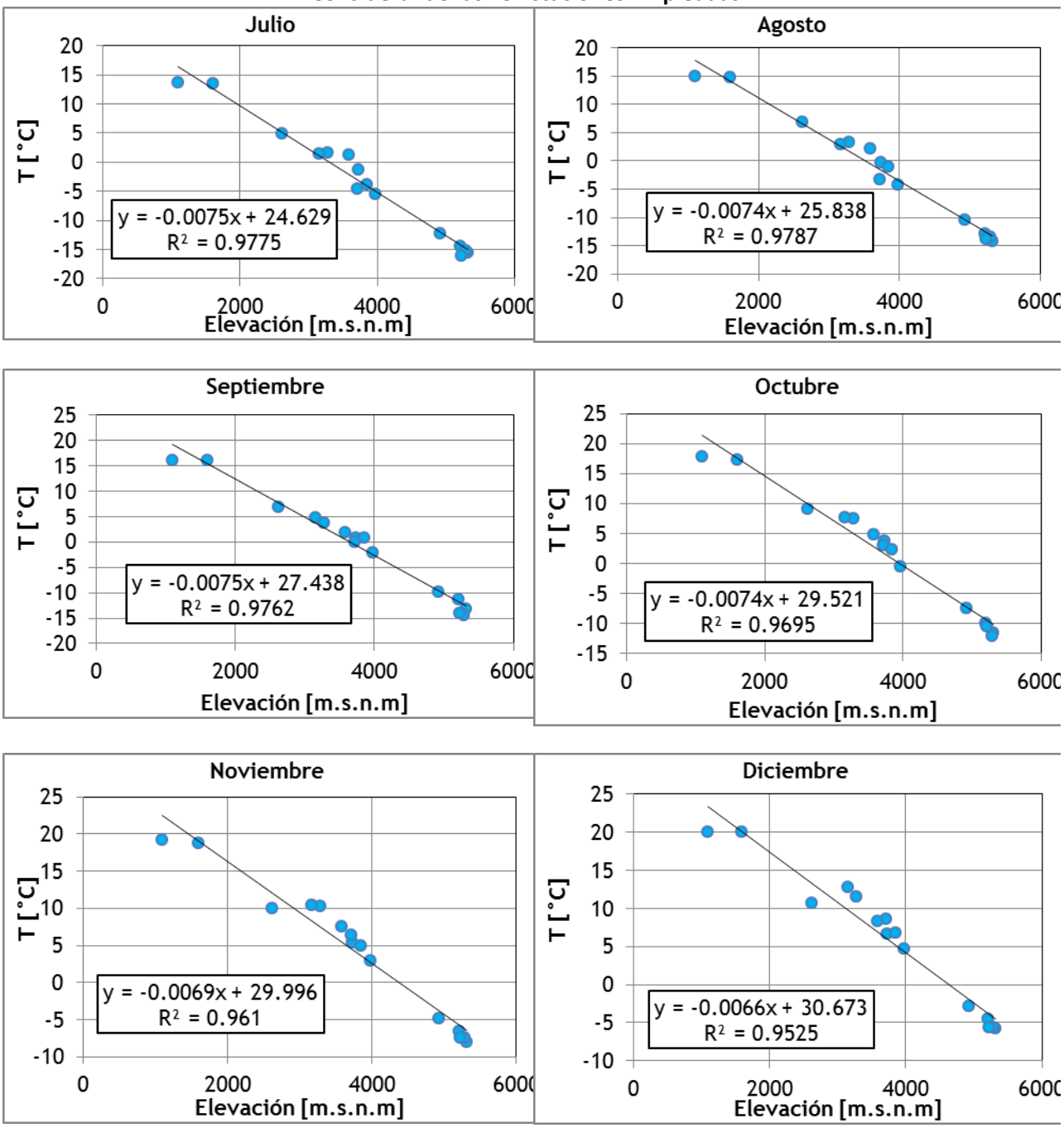
Figura 5.7
Gradientes de Temperatura para los Meses Enero a Junio Considerando las 15 Estaciones Empleadas



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

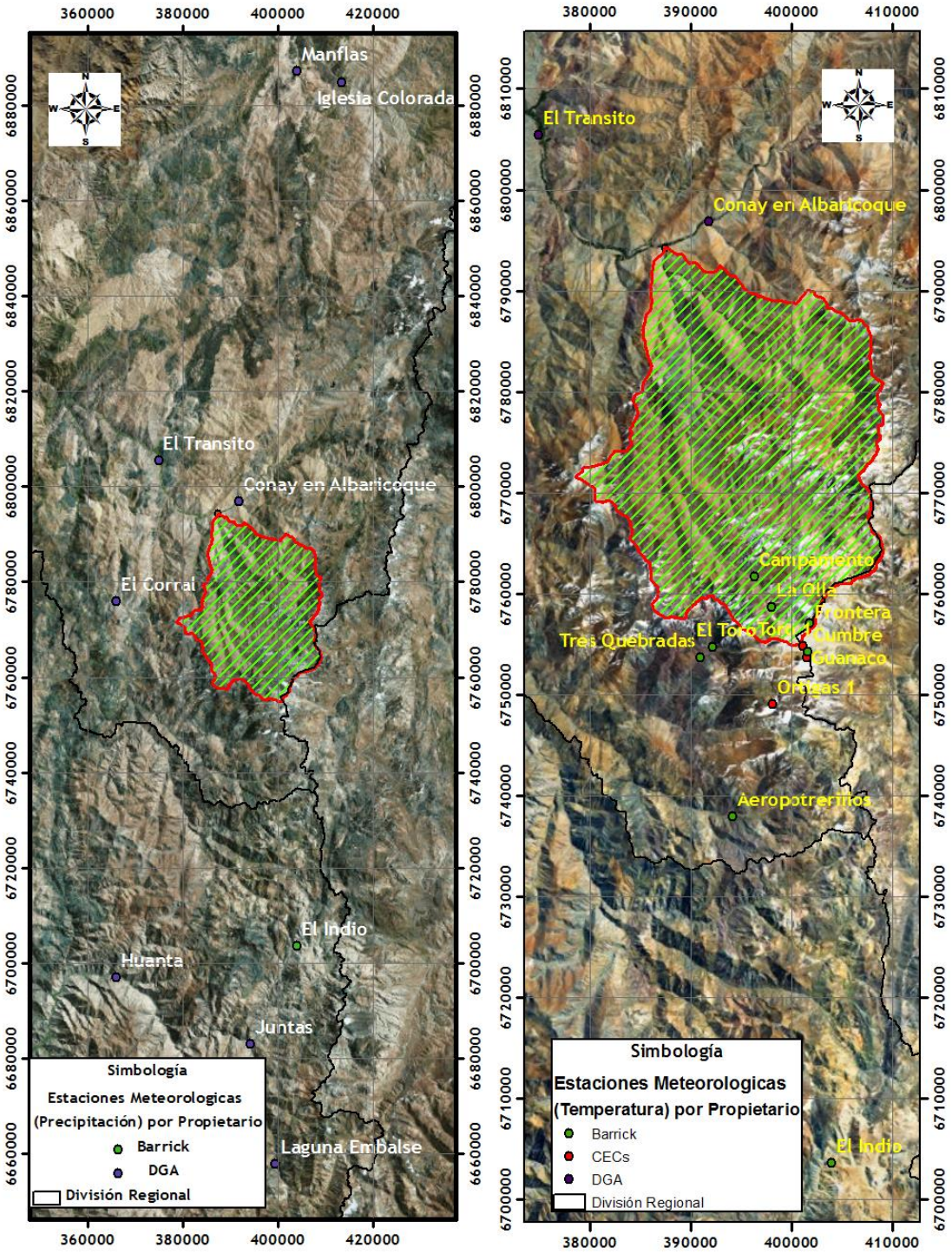
Figura 5.8
Gradientes de Temperatura para los Meses Mayo a Diciembre
Considerando las 15 Estaciones Empleadas



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.9
Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas de Precipitación (izq) y Temperatura (der)
Datum: WGS84-H19



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.3.3 Viento

La velocidad del viento también es una de las variables de entrada al modelo, la cual se ingresa para cada banda de elevación. Las estaciones de viento que fueron procesadas se indican en la **Tabla 5.7**.

Tabla 5.7
Estaciones de Viento Empleadas y Coordenadas

N°	Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19		Cota [m.s.n.m]	Periodo de Registro
		Este [m]	Norte [m]		
1	Frontera	401.775	6.757.024	4.927	2008-2012
2	Guanaco	401.510	6.753.608	5.317	2008-2012
3	La Olla	398.014	6.758.599	3.975	2008-2013
4	Ortigas 1	398.140	6.749.004	5209	2008-2012
5	El Toro	392.125	6.754.616	3.735	2005-2013
7	Aeropotrerillos	394.146	6.737.834	3.282	2008-2010
8	Cumbre	401.604	6.754.151	5.293	2008-2010
9	Tres Quebradas	390.941	6.753.646	3.583	2008-2010
10	Aerocolorado	369.471	6.762.289	2.618	2008-2010
11	Toro 1	401.085	6.754.794	5.226	2010-2012

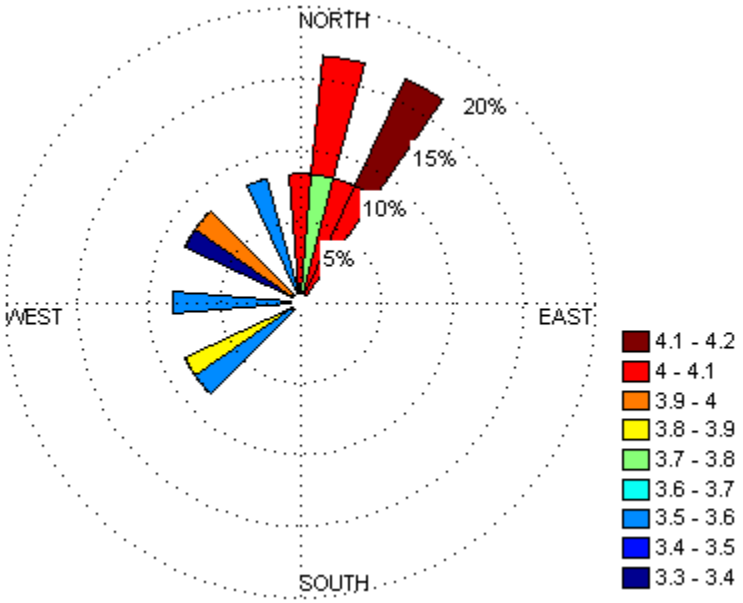
Fuente: Elaboración Propia

Luego de revisar la consistencia y extensión de la información disponible se decidió emplear los registros de las estaciones El Toro y La Olla para generar una estadística observada en base a un año promedio de los registros disponibles. En la **Figura 5.10** se observa que la velocidad predominante en la estación El Toro es noreste, con un valor máximo entre 4,1 m/s y 4,2 m/s. En la **Figura 5.11** se observa que la dirección predominante en la estación La Olla es suroeste, con un valor entre 5,0 m/s y 5,2 m/s.

Si bien la información de la dirección predominante es mostrada en este acápite, el principal criterio de selección fue la ubicación de las estaciones (**Figura 5.15**). Esto definió que la información de la estación La Olla sería utilizada para todos los sistemas cuyo cauce principal fuera el río Estrecho/Chollay, mientras que la información de la estación El Toro sería utilizada para sus afluentes.

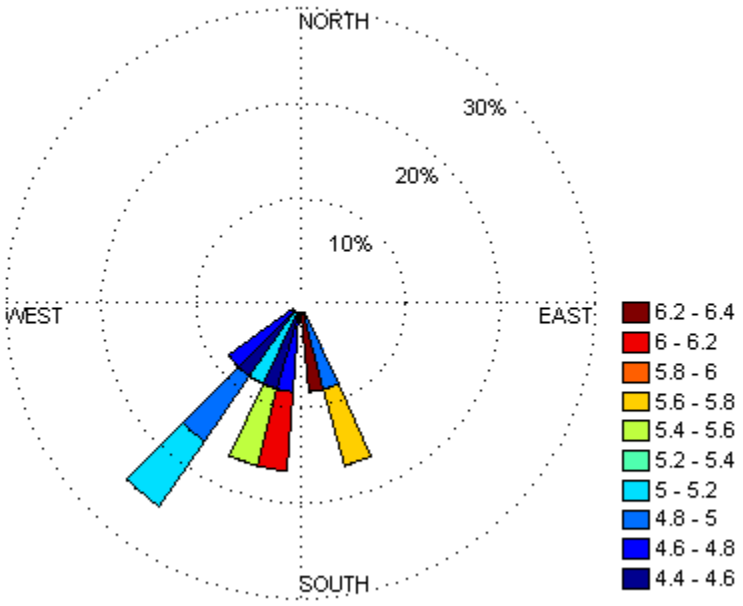
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.10
Rosa de los Vientos para la Información Media Mensual de la Estación El Toro. Velocidad en m/s



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.11
Rosa de los Vientos para la Información Media Mensual de la Estación La Olla. Velocidad en m/s.



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.3.4 Humedad Relativa

Tal como en el caso del viento, se analizaron un set de estaciones, las cuáles se indican en la **Tabla 5.8**.

Tabla 5.8
Estaciones de Humedad Relativa y Coordenadas

N°	Estación	Coordenadas UTM WGS84 H19		Cota	Periodo de Registro
		Este [m]	Norte [m]	[m s.n.m]	
1	Frontera	401.775	6.757.024	4.927	2008-2012
2	La Olla	398.014	6.758.599	3.975	2008-2013
3	El Toro	392.125	6.754.616	3.735	2005-2013
4	Campamento	396.352	6.761.608	3717	2007-2013
5	Aeropotrerillos	394.146	6.737.834	3.282	2008-2011
6	Cumbre	401.604	6.754.151	5.293	2008-2012
7	Tres Quebradas	390.941	6.753.646	3.583	2008-2010
8	Aerocolorado	369.471	6.762.289	2.618	2008-2010

Fuente: Elaboración Propia

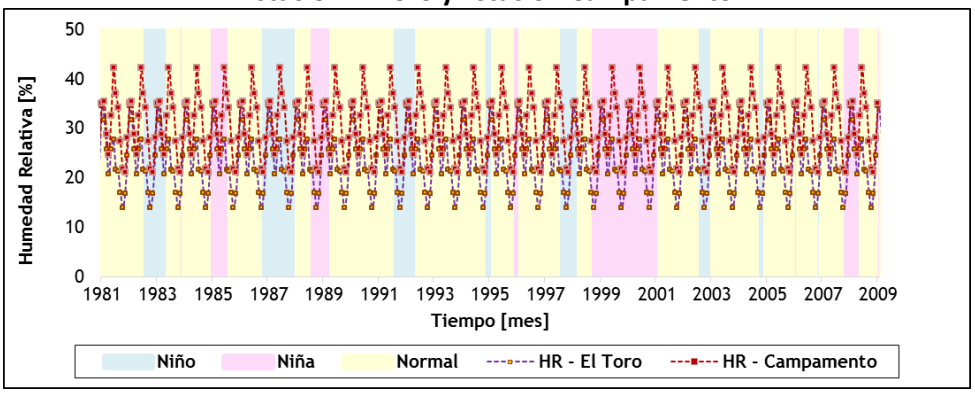
Para conocer la evolución de la humedad relativa, en la **Figura** se comparan las series históricas generadas a partir de un año promedio en las estaciones El Toro y Campamento. Se distingue que ambos registros presentan la variabilidad anual característica de la variable, cuyo mínimo en la estación El Toro ocurre en octubre y es de 13.96%, mientras que en Campamento, el mínimo ocurre en noviembre y llega a 21.15%. Asimismo, el máximo en El Toro ocurre en junio y alcanza el 42.24%, mientras que Campamento tiene su máximo en enero, cuyo valor es de 34.45%.

En la **Figura 5.13** se comparan la serie de viento y humedad relativa para la estación El Toro. Ambas series presentan variabilidad anual, en donde el máximo del viento ocurre en agosto. En la **Figura 5.14** se comparan la serie de viento en la estación La Olla con la serie de humedad relativa en la estación Campamento, donde se observa que ambas series también presentan variabilidad anual, cuyos máximo y mínimos están desplazados.

Luego del análisis de la información, sumado a la ubicación las estaciones y a la morfología aproximada de las cuencas que monitorean (**Figura 5.15**), se adoptó que la información de la estación El Toro fuese utilizada para los cauces afluentes al río Estrecho-Chollay, mientras que la estación Campamento para el cauce principal.

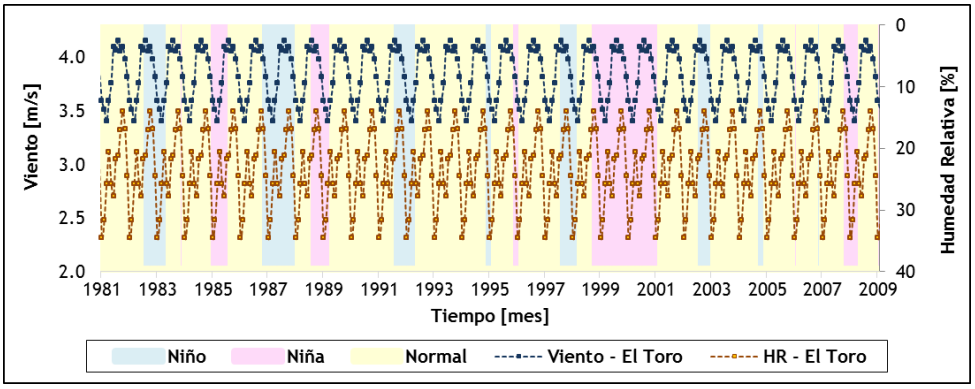
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.12
Comparación de Información de Humedad Relativa Empleada
Estación El Toro y Estación Campamento



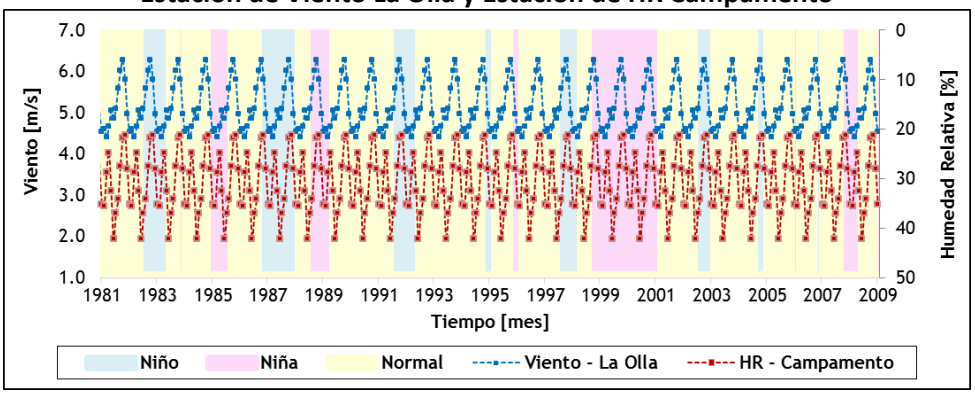
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.13
Comparación de Información de Humedad Relativa y Viento Empleada.
Estación El Toro



Fuente: Elaboración Propia

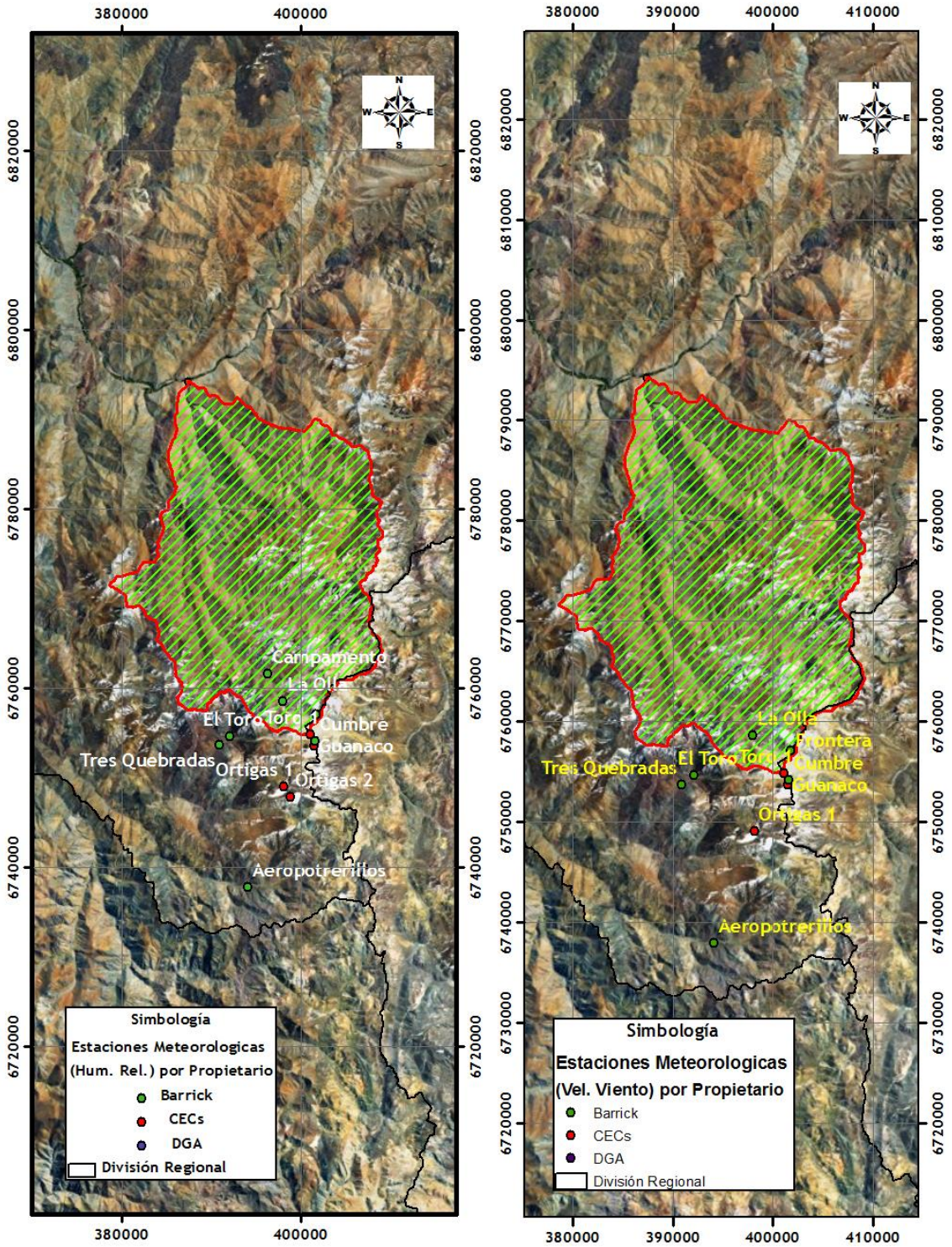
Figura 5.14
Comparación de Información de Humedad Relativa y Viento Empleada
Estación de Viento La Olla y Estación de HR Campamento



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.15
Mapa de Estaciones de Humedad Relativa (izq) y Viento (der). Datum: WGS84-H19



Nota: En color verde y achurado se presenta la cuenca del río Chollay antes junta río Carmen
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4 Información Fluviométrica de Calibración

Las estaciones fluviométricas empleadas en el presente estudio son catorce y se indican en la **Tabla 5.9.**

Tabla 5.9
Estaciones de Control Fluviométrico Empleadas.

CF	Cauce / Río	Tipo	Coordenadas (m) WGS 84	
			Norte	Este
NE5	Del Estrecho	Principal	6.758.150	397.878
NE2A	Del Estrecho	Principal	6.759.928	396.857
NE1A	Qda. Barriales	Afluente	6.761.807	396.724
NE3	Del Estrecho	Principal	6.762.948	394.239
PX1	Qda. Agua de la Falda	Afluente	6.766.319	391.469
NE4	Del Estrecho	Principal	6.769.472	389.489
PX2	Del Estrecho	Principal	6.772.402	387.788
CN2	Del Toro	Afluente	6.772.553	387.727
PX3	Chollay	Principal	6.773.627	387.777
NE7NE7	Blanco	Afluente	6.776.331	389.295
NE8	Chollay	Principal	6.780.525	391.011
CN7	Chollay	Principal	6.791.594	387.848
CN8	Pachuy	Afluente	6.791.741	387.891
NE9	Chollay	Principal	6.794.202	387.516

Fuente: Elaboración Propia

En relación a las estaciones de monitoreo, es importante destacar que en la cordillera, donde existe alta pendiente, los afluentes poseen distintos brazos que están en constante modificación, debido a los deshielos y el aumento repentino de la escorrentía que afecta la morfología. En los puntos siguientes se muestran fotografías del estado actual de las estaciones de monitoreo (a partir de la información de la minuta de terreno de HIDROMAS (2014)), en la que se aprecia la disposición de la sección de aforo y el estado de mantenimiento de la sección. Se distingue que las estaciones NE5, NE2A, NE1A corresponden a sección de aforo tipo canaleta Parshall, mientras que la estación NE3 corresponde a una sección de aforo cuyo diseño es no convencional. La sección de aforo para la estación PX1 corresponde a una alcantarilla, mientras que para la estación NE4 la sección de aforo es próxima a una del tipo canaleta Parshall, con angostamiento a la entrada y a la salida. Aguas abajo de NE4, y por el cauce principal, se mide principalmente mediante secciones de aforos en el río Estrecho (PX2, PX3, CN7), las únicas estaciones tipo vertedero se encuentran en NE8 y NE9. Las 3 cuencas afluentes del cauce principal difieren en su control, CN2 y CN8 son aforadas en el cauce natural, mientras que NE7 posee una estación de control tipo canaleta Parshall. En relación al mantenimiento de las estaciones, estas presentan en general un estado adecuado. Otras observaciones como estimación de caudales máximos y mínimos por diseño se resumen en la **Tabla 5.10**.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 5.10
Resumen Características Estaciones de Control Fluviométrico

Pto	Tipo estación	Q min [m^3/s]	Q max [m^3/s]	Observaciones
NE5	Parshall 26"	0,0119	0,9373	Periodo invernal sin registros por presentar congelamiento del flujo superficial.
NE2A	Parshall 26"	0,0119	0,9373	Dada la alta pendiente, la estación requiere remoción de detritos a nivel mensual.
NE1A	Parshall 26"	0,0119	0,9373	s/o
NE3	No convencional	s/i	s/i	Diseño de estación no adecuado para un sector donde la planicie de inundación es superior a 10 m. Estación con filtraciones laterales, estimadas entre un 5% a 10% (invierno).
PX1	Alcantarilla	s/i	s/i	Sección de aforo limitada a caudal máximo estimado en 0.5 m^3/s.
NE4	Tipo Parshall	s/i	s/i	Sección que encausa bien el flujo. Poca evidencia de nieve o congelamiento.
PX2	Sección de aforo en cauce natural	s/i	s/i	s/o
CN2	Sección de aforo en cauce natural	s/i	s/i	s/o
PX3	Sección de aforo en cauce natural	s/i	s/i	s/o
NE7	Parshall	s/i	s/i	También se afora 200 m. aguas abajo de la sección.
NE8	Vertedero	s/i	s/i	También se afora 10 m. aguas arriba de la sección.
CN7	Sección de aforo en cauce natural	s/i	s/i	Sección ubicada en puente colgante que cruza el Chollay. Corregir señalética.
CN8	Sección de aforo en cauce natural	s/i	s/i	Presenta un tranque de acumulación aguas arriba de la sección de aforo. Omite un brazo de aporte menor.
NE9	Vertedero	s/i	s/i	Vertedero no se encuentra completamente recto en base. Tubo ligeramente inclinado y con acumulación de sedimentos. Requiere mantención.

Fuente: Elaboración Propia a partir de HIDROMAS (2014)

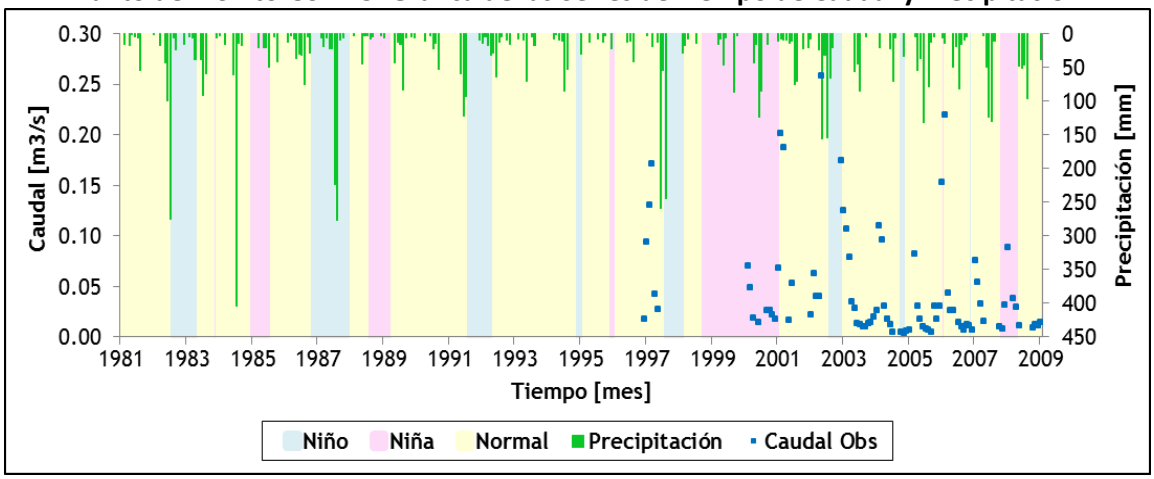
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

A continuación se presentará una descripción de los controles fluviométricos empleados. Aquellos que poseen una información más extensa serán analizados con mayor profundidad. El objetivo de este análisis es proveer de un diagnóstico inicial de la información que permita discutir respecto de la calidad de la información y su interrelación con la información meteorológica. Cabe destacar que tanto la data de precipitación y temperatura utilizada en las figuras siguientes corresponden a las promedio de la subcuenca modelada y no a la cuenca definida por el control fluviométrico respectivo. Del mismo modo, la serie de caudales considerada, corresponde a registros puntuales que se han asumido como representativos de la estadística media mensual a través de correlaciones con datos registrados por sensores de presión. Según se detalla en el Informe técnico de HIDROMAS (2014) esta relación es válida sólo hasta el año 2011.

5.4.1 Estación de Monitoreo NE5

En la **Figura 5.16** se compara la serie de caudales observados y precipitación promedio empleadas para el modelamiento de cuenca definida por el punto de monitoreo NE5. En la **Figura 5.17** se compara la serie de caudales observados y temperatura empleadas para el modelamiento de la cuenca definida por el mismo control fluviométrico (CF) NE5. Los datos de caudales observados son de corta data y consideran menos de cinco años de datos anuales completos, lo cual dificulta la explicación de la precipitación y la temperatura para la generación de la escorrentía. En general los flujos base son bastante pequeños, en parte por el congelamiento de la masa de agua, no sólo en la sección de aforo (cuya capa puede ser destruida para efectuar la medición), sino que el curso de agua hacia aguas arriba. La comparación de registros de temperatura tampoco permite explicar la escorrentía, salvo indicar las bajas temperaturas que permiten grandes acumulaciones y que pueden dar cuenta de altos valores de escorrentía en los deshielos. Los máximos estacionales se encontrarán probablemente en los meses de enero y febrero, donde también se debe considerar el aporte de los glaciares Estrecho y Amarillo.

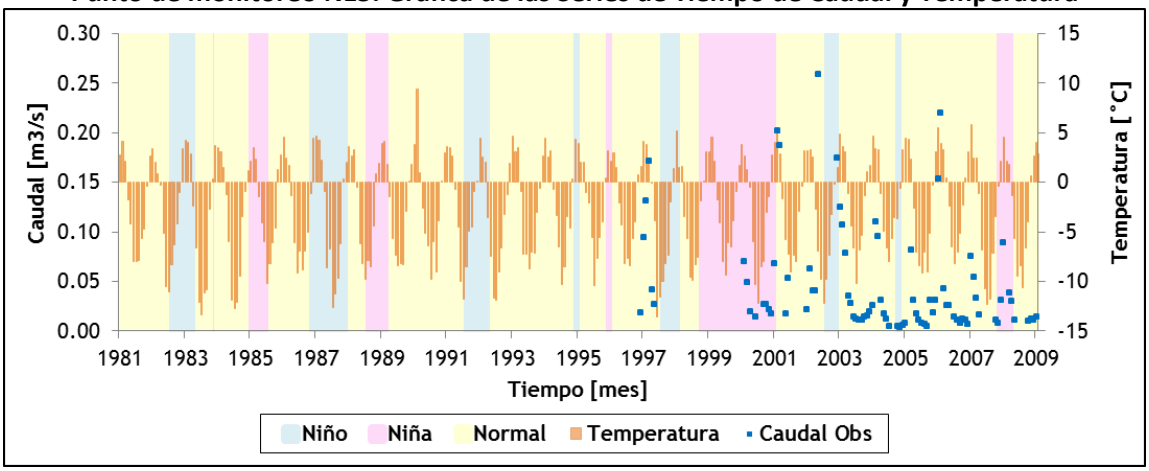
Figura 5.16
Punto de monitoreo NE5. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.17
Punto de monitoreo NE5. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

5.4.2 Estación de Monitoreo NE2A

En la **Figura 5.18** se compara la serie de caudales observados y precipitación empleadas para el modelamiento de cuenca definida por el punto de monitoreo NE2A. En la **Figura 5.19** se compara la serie de caudales observados y temperatura empleadas para el modelamiento de cuenca definida por el mismo control fluviométrico. Los datos de caudales observados poseen períodos sin información en la década de los 80 y los 90. La información de escorrentía permite explicar de forma vaga su generación debido a la precipitación, permitiendo sólo reconocer a los años 2003 y 2006 como años húmedos, en el que la acumulación de precipitación en el invierno dio origen a la escorrentía de deshielo, cuyos "peaks" alcanzaron los 0.4 m^3/s. También se detecta al menos una anomalía en el año 1983 y 1984 respecto del comportamiento de la escorrentía con la precipitación.

El año 1983 se observa un pulso de una magnitud de 250 mm y un caudal observado del orden de 0.3 m^3/s, mientras que para 1984 el pulso alcanzó los 100 mm, sin embargo, el caudal observado fue del orden de 0.45 m^3/s, es decir, un 50% más. Para ambos años la temperatura alcanzó los valores mínimos históricos de la serie, pudiendo significar un almacenamiento importante en el sistema. Los caudales máximos se generan en los meses de temperaturas máximas, lo cual está asociado al máximo derretimiento de nieves y glaciares. Respecto a los flujos base, estos son de baja magnitud, especialmente los asociados a los años anteriores a 1990, detectándose al menos 2 anomalías (valores muy bajos) el año 1983-1984.

5.4.3 Estación de Monitoreo NE1A

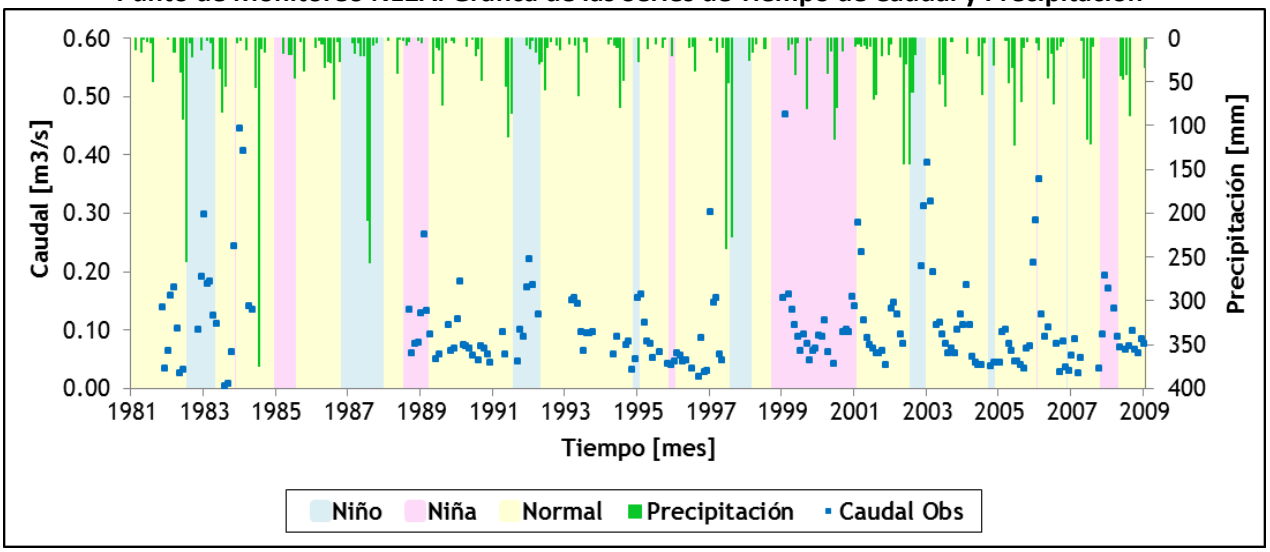
Los registros disponibles para NE1A (

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura **5.20** y **Figura 5.21**) presentan una significativa extensión, y se corresponden de una mejor manera con la estacionalidad del sistema que se está analizando. Si bien los registros no muestran la crecida del evento del niño del 1997-1998, existen otros registros que permiten calibrar crecidas. Además los flujos base permiten reconocer la magnitud de los caudales estacionales de otoño e invierno, por cuanto son registros continuos. En esta estadística también se aprecia la anomalía del año 1983-1984 comentada para el control fluviométrico NE2A.

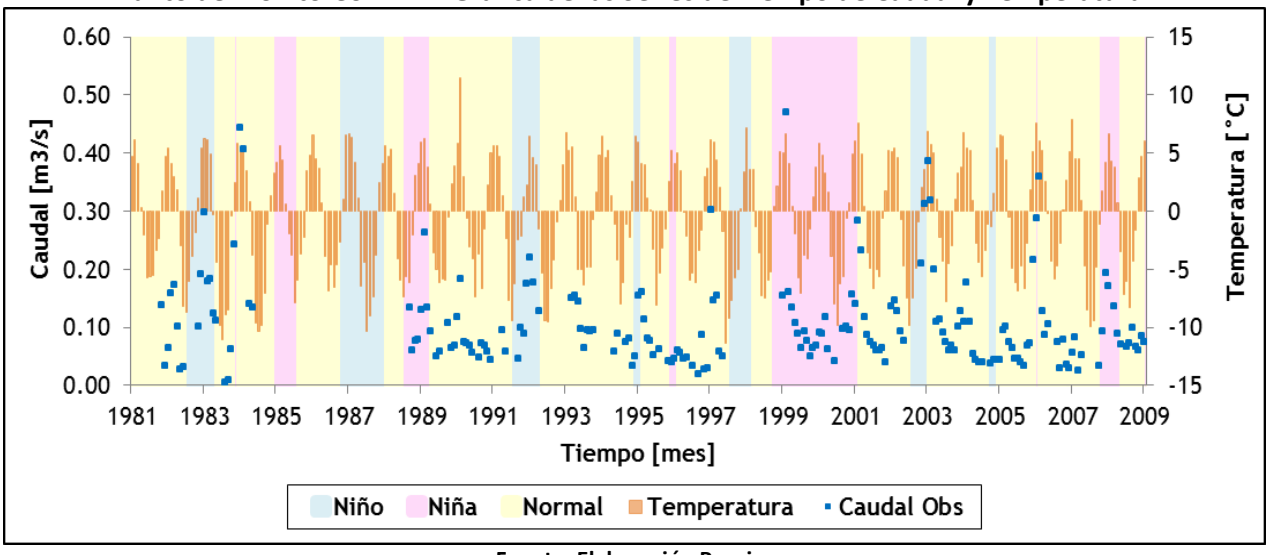
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 5.18
Punto de Monitoreo NE2A. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

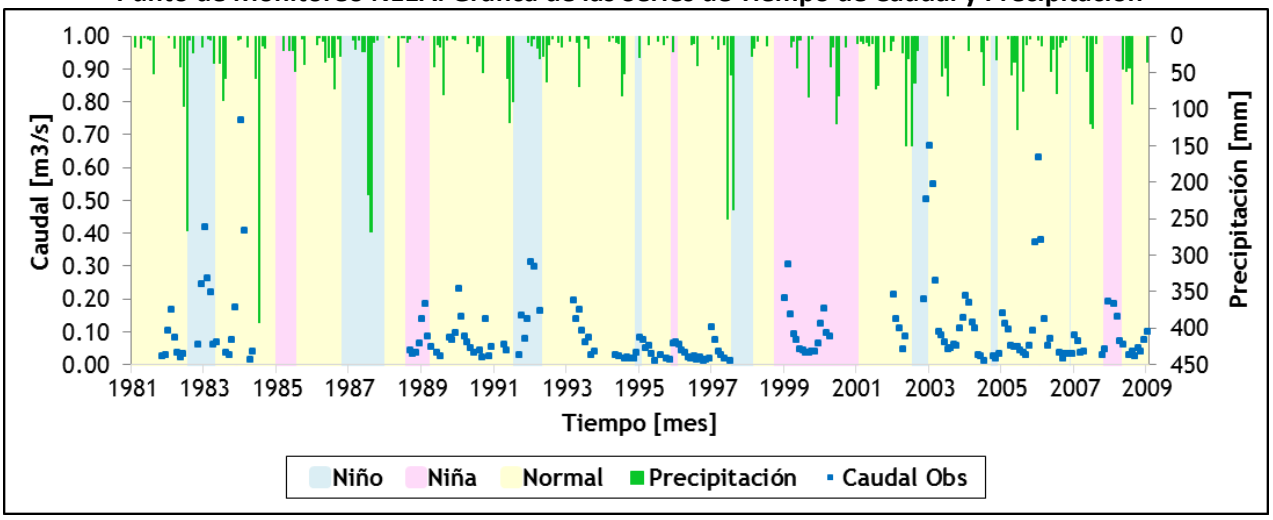
Figura 5.19
Punto de Monitoreo NE2A. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

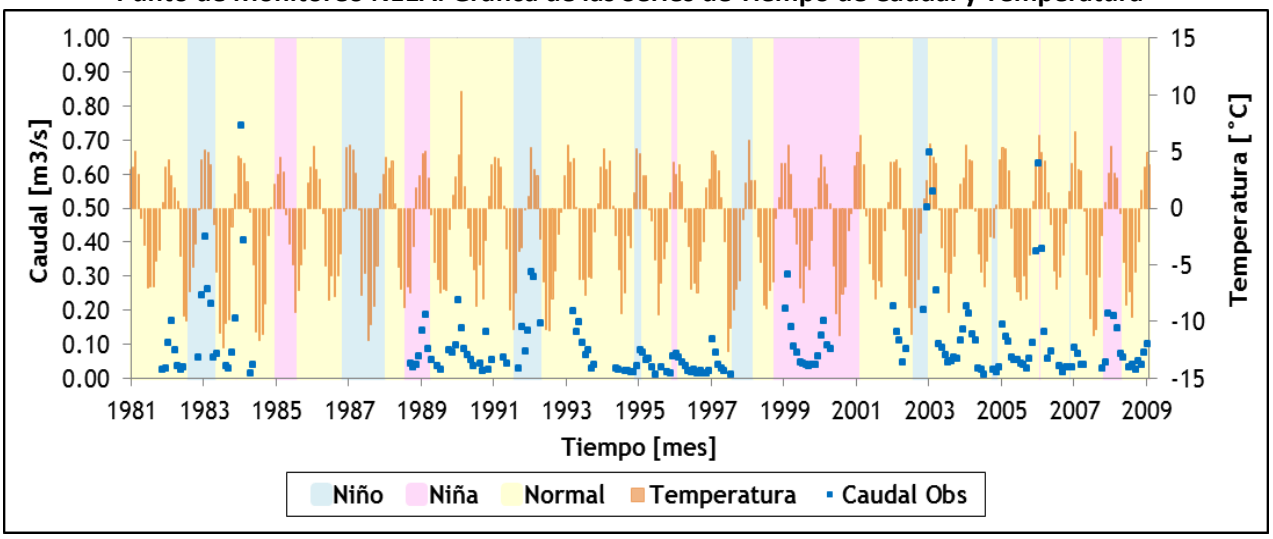
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 5.20
Punto de Monitoreo NE1A. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.21
Punto de Monitoreo NE1A. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

5.4.4 Estación de Monitoreo NE4

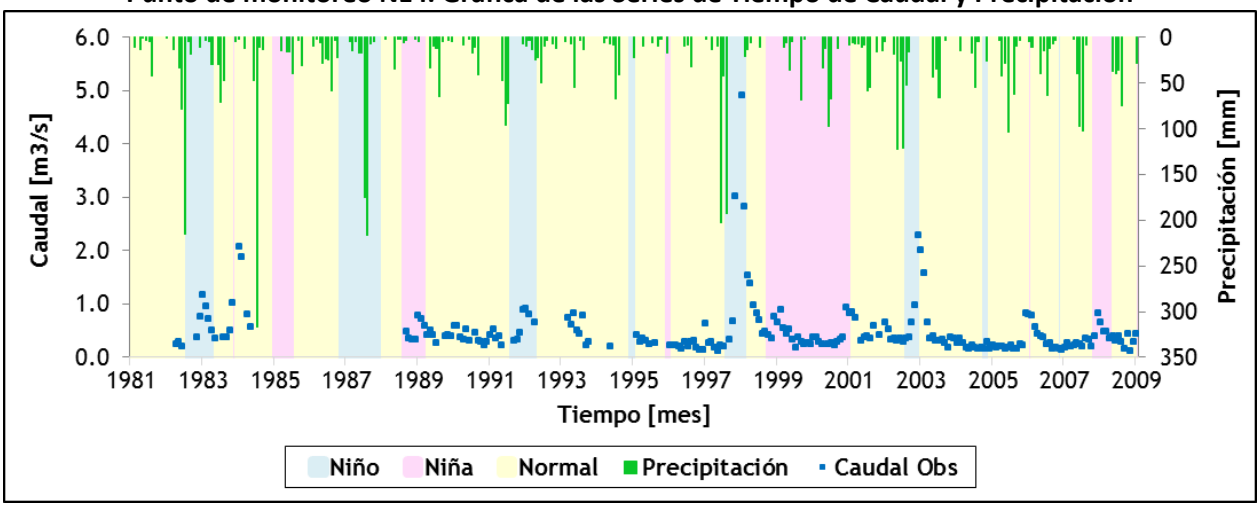
En la **Figura 5.22** se compara la serie de caudales observados y precipitación empleadas para el modelamiento de la subcuenca (SC) definida por el punto de monitoreo NE4. En la **Figura 5.23** se compara la serie de caudales observados y temperatura empleadas para el modelamiento de la subcuenca definida por el mismo control fluviométrico. Los datos de caudales observados poseen períodos sin información en la década de los 80 y algunos años de la década del 90. Se distingue claramente las crecidas máximas en los años 1998 y 2003, los cuales fueron generados por tormentas importantes cuyos montos de precipitación superaron los 100 mm, e incluso los 200 mm (para el año

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

1998) en la subcuenca. Los caudales máximos observados superan los 2 m^3/s. Es posible identificar además como años normales a los años 2001, 2006 y 2008, con montos de precipitación que del orden de los 100 mm. Se pueden clasificar como años secos a los años 1996, 1997, 2000, 2004, 2005, 2007. Los caudales máximos se generan en los meses de temperaturas máximas, lo cual está asociado al máximo derretimiento de nieves y glaciares, componentes de la parte alta de la cuenca de NE4.

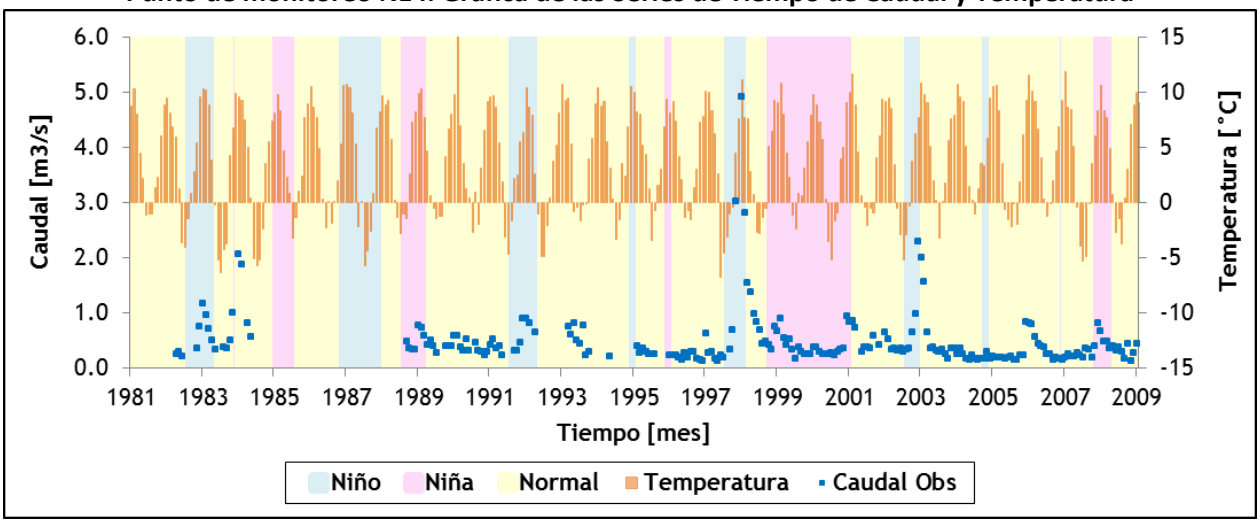
Cabe reiterar que tanto la precipitación y temperatura de ambos gráficos corresponden a la que se observa en la subcuenca CI_NE4 mostrada en la **Figura 3.1** y no corresponden a la cuenca que tiene como punto de salida NE4.

Figura 5.22
Punto de monitoreo NE4. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.23
Punto de monitoreo NE4. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

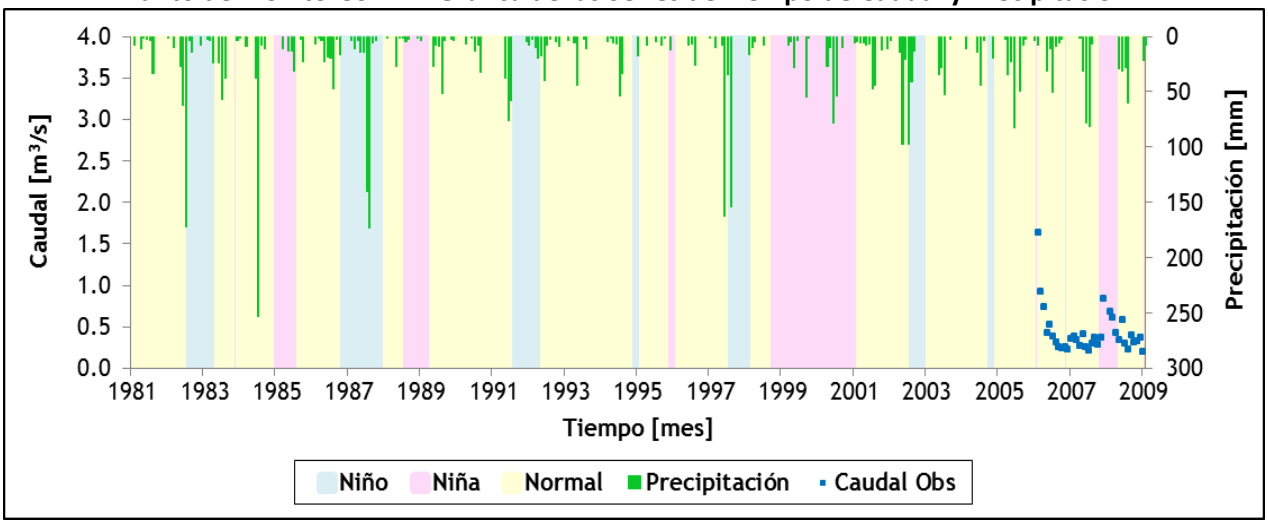
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

5.4.5 Estación de Monitoreo PX2

En la **Figura 5.24** se aprecia que los registros de caudal se inician el año 2006, con lo cual se distinguen las crecidas de deshielos de los años 2007 y 2008

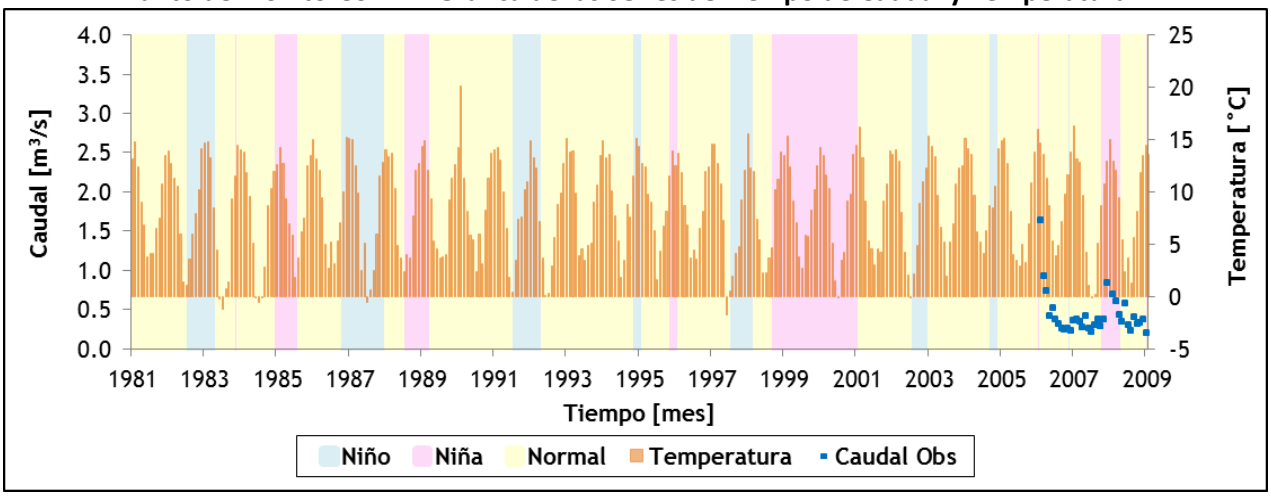
En la **Figura 5.25** se contrasta la temperatura con los caudales observados. Se aprecia que la temperatura apenas posee valores negativos, mientras que los máximos alcanzan los 20°C. Esta condición se explica por la extrapolación de la variable (temperatura) hacia la cuenca intermedia y no a la cuenca completa. Ello conlleva a la delimitación de un área de aporte más baja, que se asocia con temperaturas más altas.

Figura 5.24
Punto de monitoreo PX2. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.25
Punto de monitoreo PX2. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura.



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4.6 Estaciones de Monitoreo CN2-CN2N

La **Figura 5.26** muestra registros de caudales en CN2 durante el período 1994-1997 y 2006-2009, en los que no se aprecian crecidas de magnitud apreciable, sino que caudales bajos asociados a deshielos. En la **Figura 5.27** se comparan los registros de escorrentía con la temperatura, en la que la escorrentía de deshielo se desarrolla en el período de mayor temperatura.

Figura 5.26
Punto de Monitoreo CN2. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación.

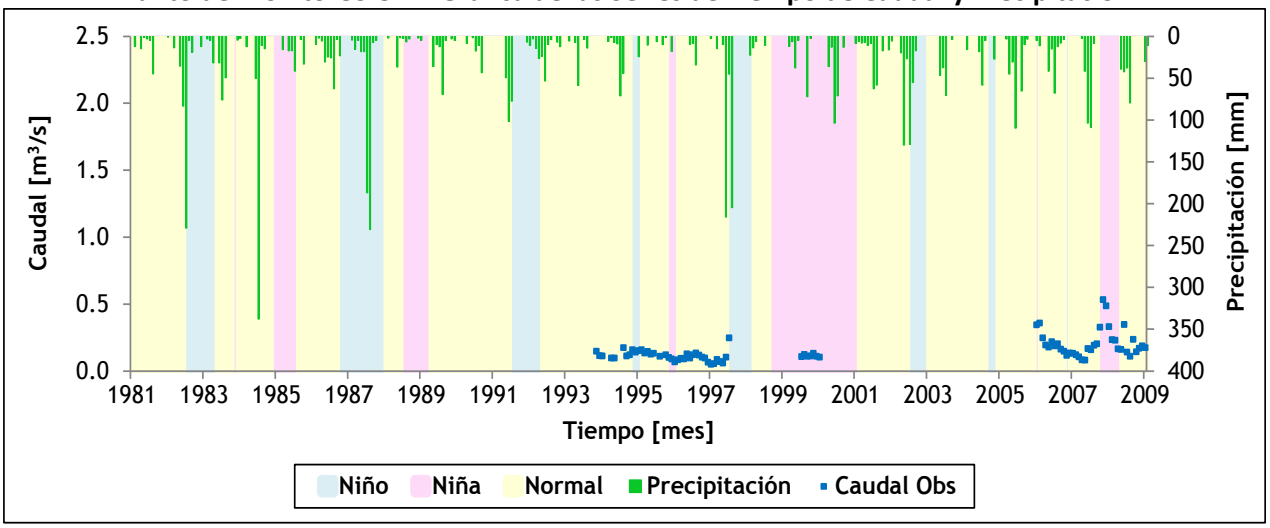
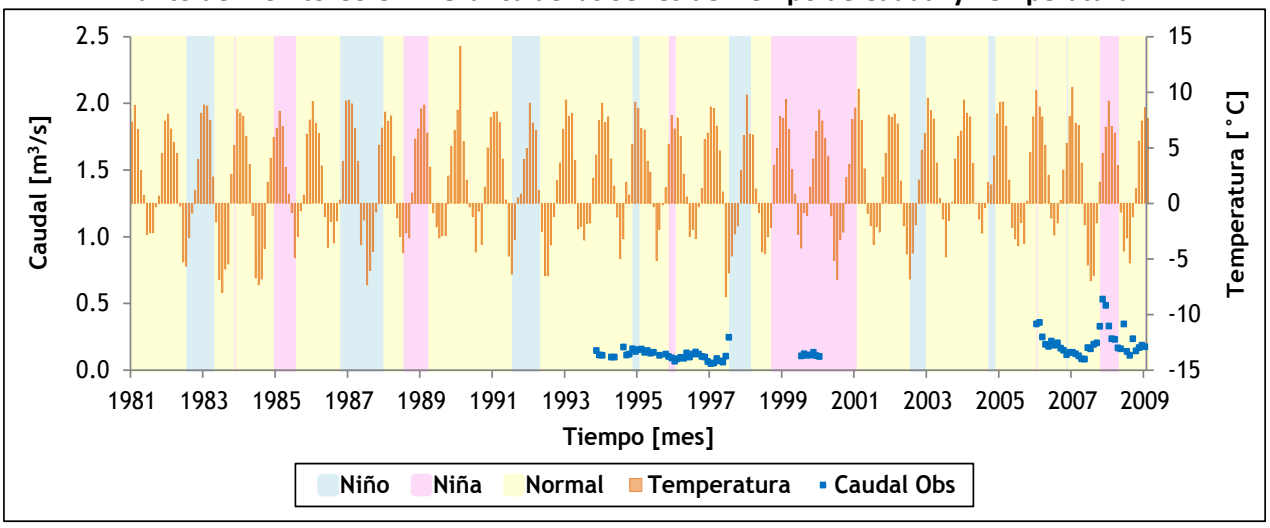


Figura 5.27
Punto de Monitoreo CN2. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura.



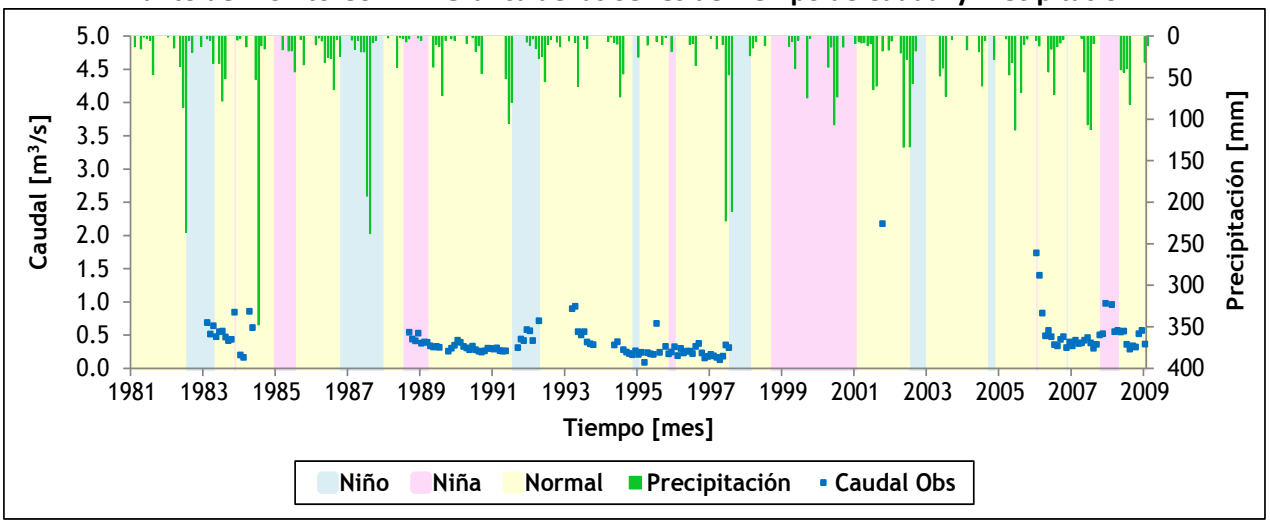
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4.7 Estación de Monitoreo NE7

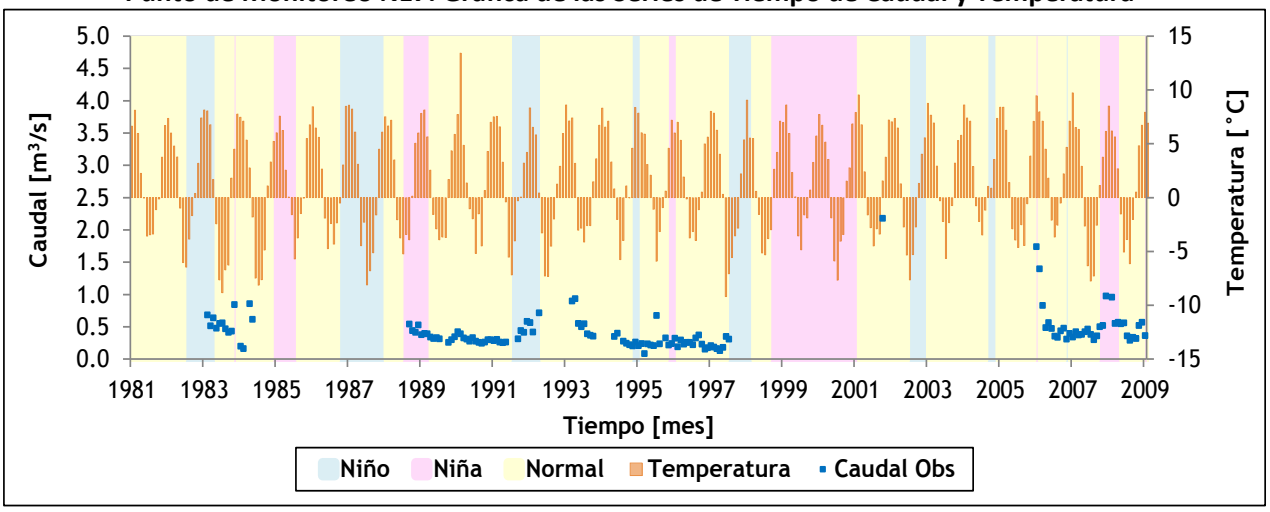
En la **Figura 5.28** se grafica la escorrentía y la precipitación. Se aprecia que los registros de escorrentía no son continuos, sino más bien son puntuales y apenas permiten reconocer su relación con la precipitación. Al comparar los registros de la escorrentía con la temperatura (**Figura 5.29**), tampoco es posible reconocer alguna relación entre las variables.

Figura 5.28
Punto de Monitoreo NE7. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.29
Punto de Monitoreo NE7. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



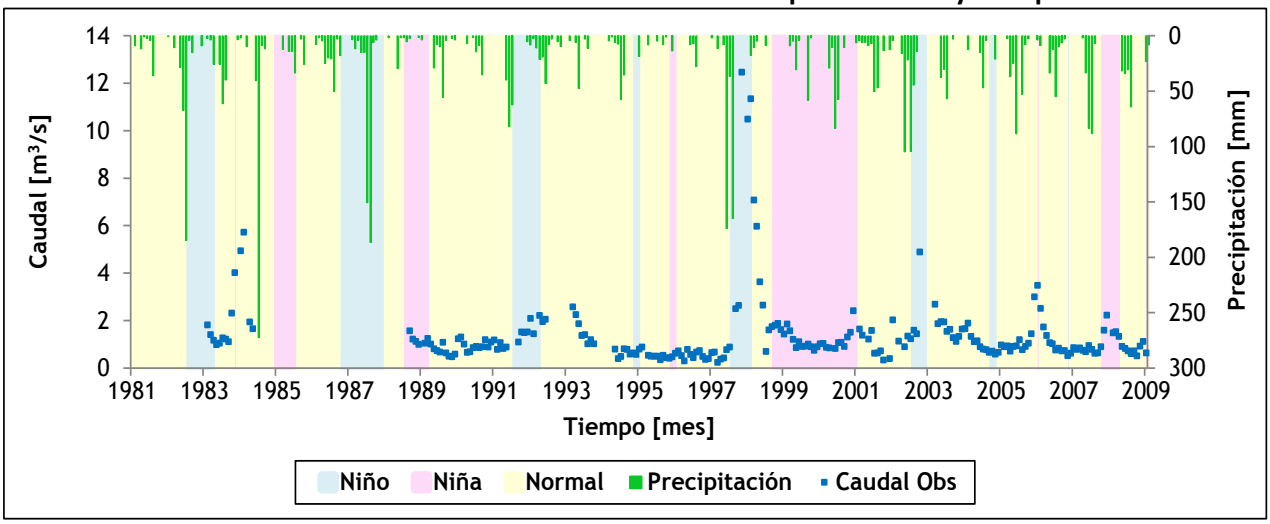
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4.8 Estación de Monitoreo NE8

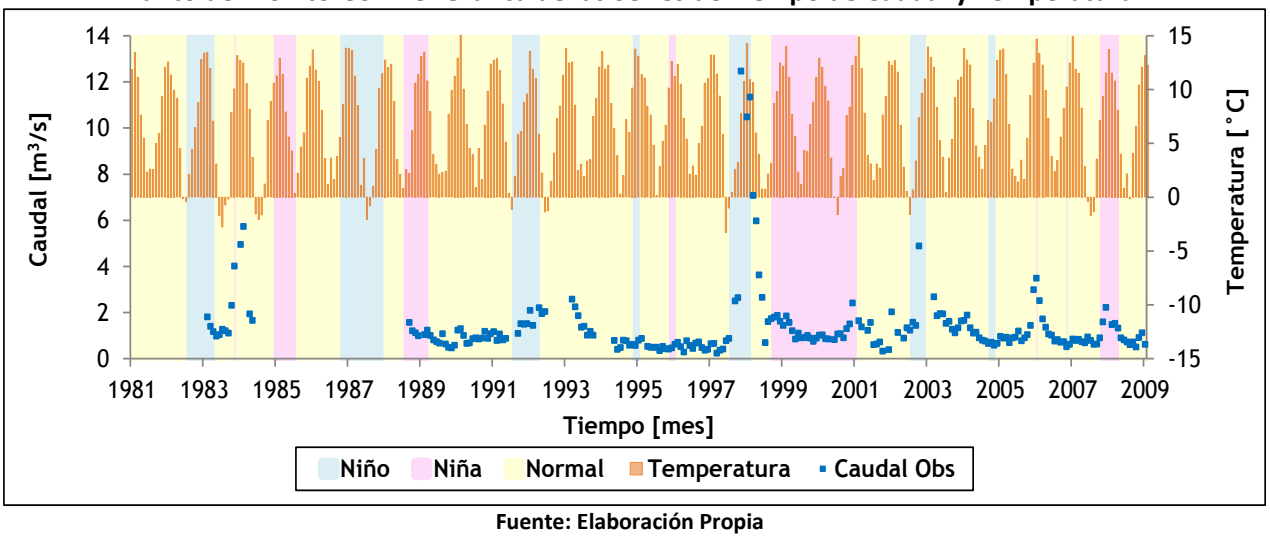
En la **Figura 5.30** se muestran las gráficas de la precipitación y de la escorrentía, donde se distingues crecidas importantes como la de los años 1998, 2003 y 2006. En relación a la temperatura, graficada en la **Figura 5.31**, esta variable está asociada a la cuenca intermedia en la que la altitud media de la cuenca es más baja y por lo tanto las temperaturas máximas son altas y bordean los 15°C mientras que las mínimas son apenas -3°C. Se distingue claramente que la escorrentía se produce durante los períodos de mayor temperatura.

Figura 5.30
Punto de monitoreo NE8. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.31
Punto de Monitoreo NE8. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



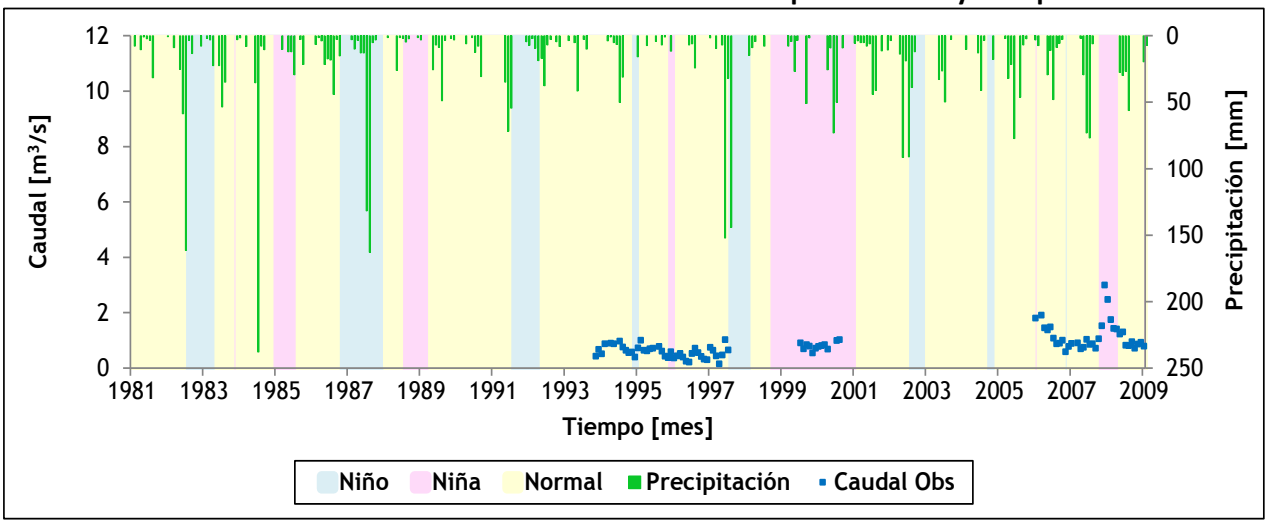
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4.9 Estación de Monitoreo CN7

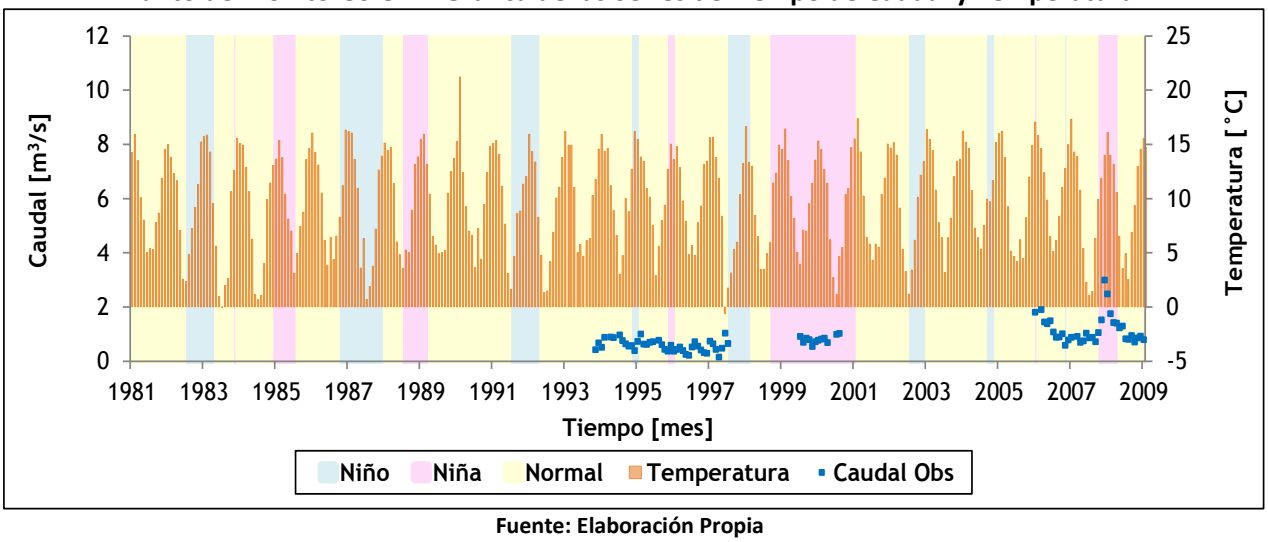
En la **Figura 5.32** se muestran la gráfica de la escorrentía y la precipitación, en la que sólo se aprecia el registro de escorrentía durante los períodos 1992-1997, 1999-2000, y 2006-2009. Los registros de escorrentía no permiten reconocer la relación de las crecidas, salvo la que se genera el año 2008. En la **Figura 5.33** se grafica la escorrentía y la temperatura, donde se distingue que la temperatura máxima supera los 20°C mientras que la mínima es apenas menor a 0°C. Esta condición de altas temperaturas está dada por la cuenca intermedia que representa CN7.

Figura 5.32
Punto de Monitoreo CN7. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.33
Punto de Monitoreo CN7. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



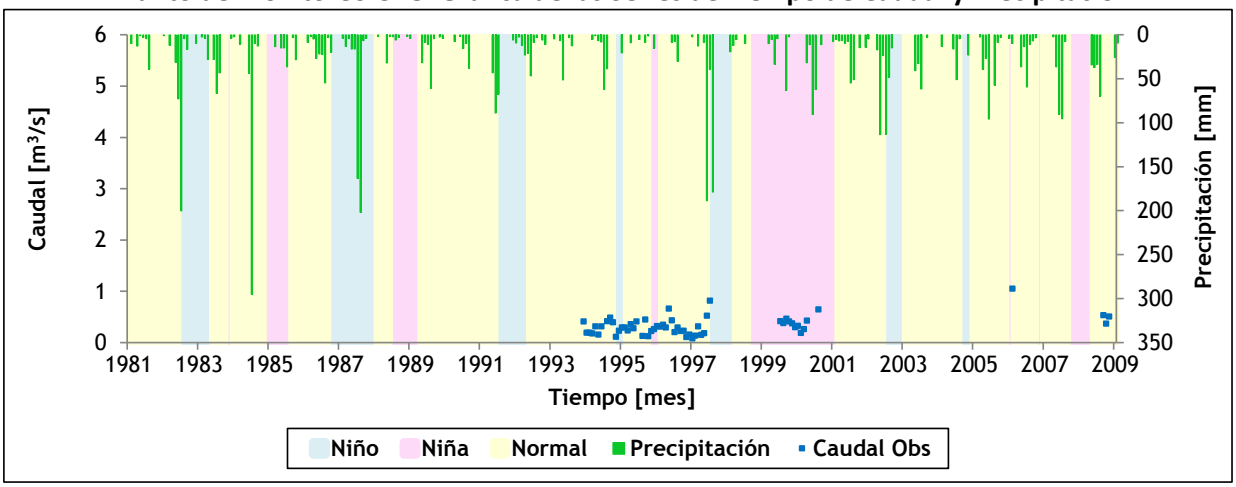
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4.10 Estación de Monitoreo CN8

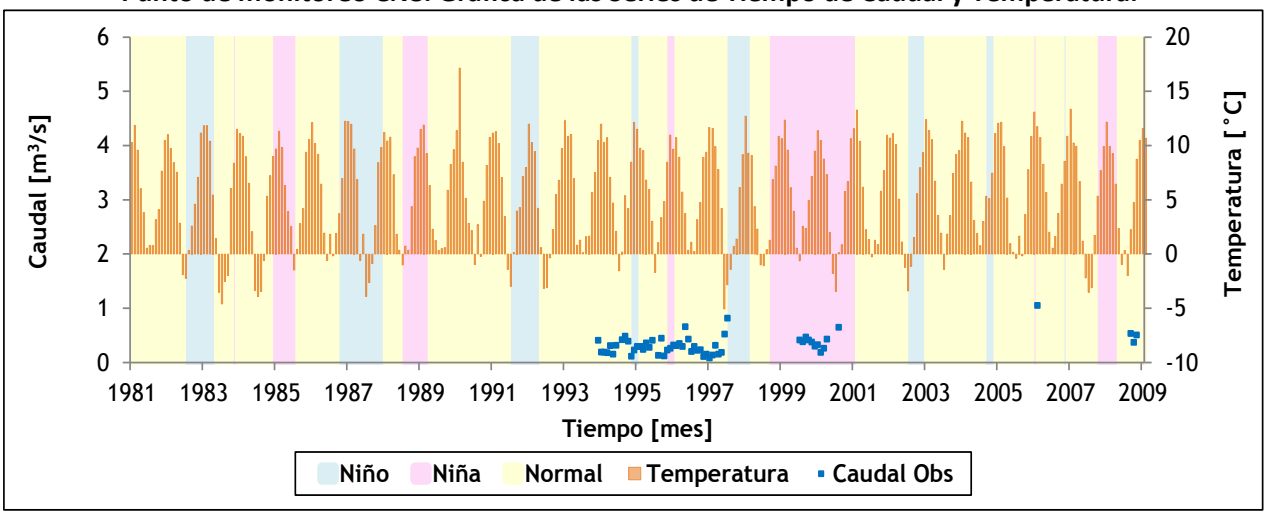
En la **Figura 5.34** se grafican la escorrentía y la precipitación. Se aprecia que los registros de escorrentía no permiten reconocer su relación con la precipitación. Lo mismo ocurre cuando se busca comparar con la temperatura (**Figura 5.35**).

Figura 5.34
Punto de Monitoreo CN8. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.35
Punto de monitoreo CN8. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura.



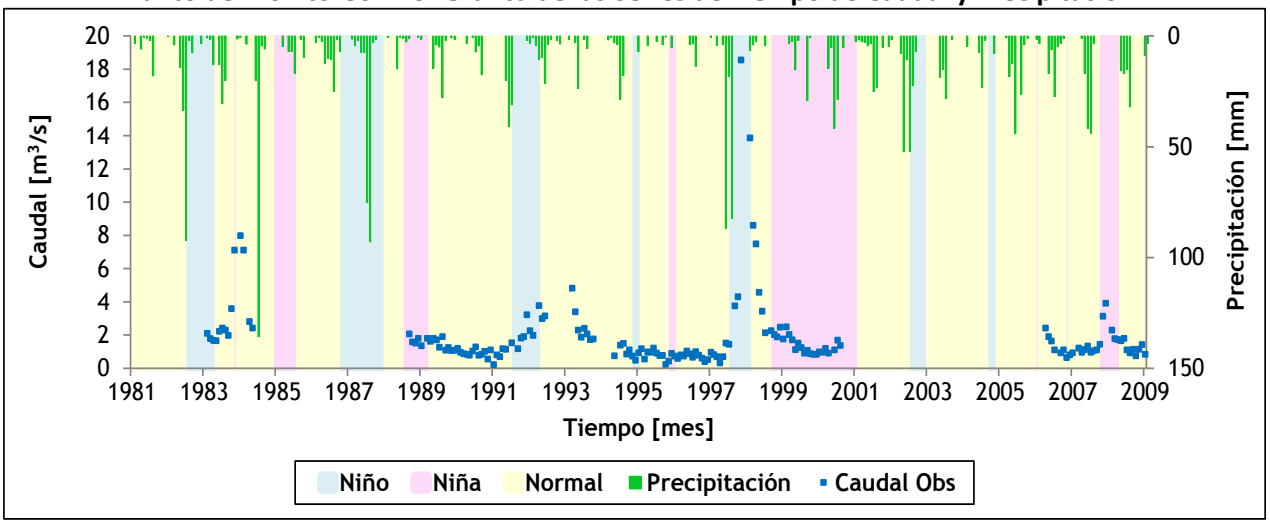
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.4.11 Estación de Monitoreo NE9

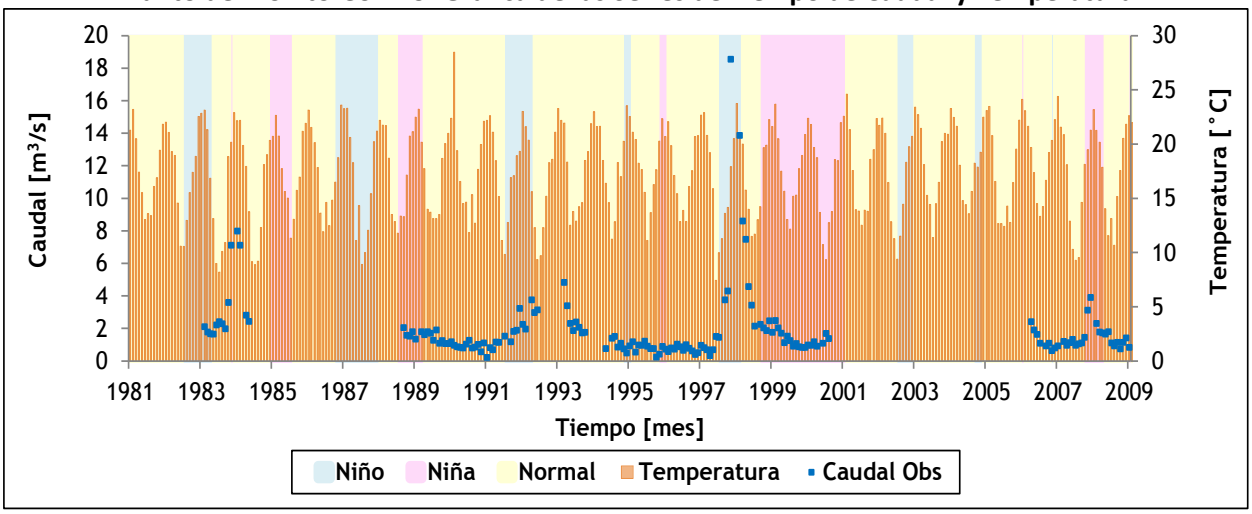
En la **Figura 5.36** se grafican la escorrentía y la precipitación. Se distingue la crecida del año 1998 y 2008, la cuales se asocian a crecidas de deshielos asociadas a años húmedos. En la **Figura 5.37** se distingue que los valores máximos de escorrentía se producen durante los meses de mayores temperaturas. En relación a la temperatura, la serie se asocia a la cuenca intermedia en la que las temperaturas máximas superan los 25°C y las mínimas son superiores a 5°C.

Figura 5.36
Punto de Monitoreo NE9. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.37
Punto de Monitoreo NE9. Gráfica de las Series de Tiempo de Caudal y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

5.5 Parámetros Hidrogeológicos

Tal como se indica en la **Figura 4.1**, WEAP tiene asociado dos parámetros que representan un tipo de conductividad hidráulica: K_1 (conductividad de la zona radicular) y K_2 (conductividad zona profunda). Ambos parámetros requieren ser calibrados en el proceso, por lo que cualquier información respecto del orden de magnitud de las variables es un aporte para que el modelo en sí represente los flujos tanto en las subcuencas modeladas como en áreas intermedias de las mismas.

Para estos efectos, se utilizó un mapa de conductividades hidráulicas para tres estratos que forma parte de un modelo hidrogeológico calibrado hasta el control fluviométrico NE4 (MJ, 2006). Estos mapas poseen información de la conductividad en base a una grilla irregular, que permite identificar la posición de los acuíferos como la influencia o alcance de estos respecto de las bandas de elevación de las subcuencas, mediante la comparación de una imagen georeferenciada de estas conductividades (**Figura 5.38**) con la sectorización presentada en el **Acápite 3.1.1**.

Para efectos de la correcta representación conceptual del modelo, se siguieron 3 criterios principales:

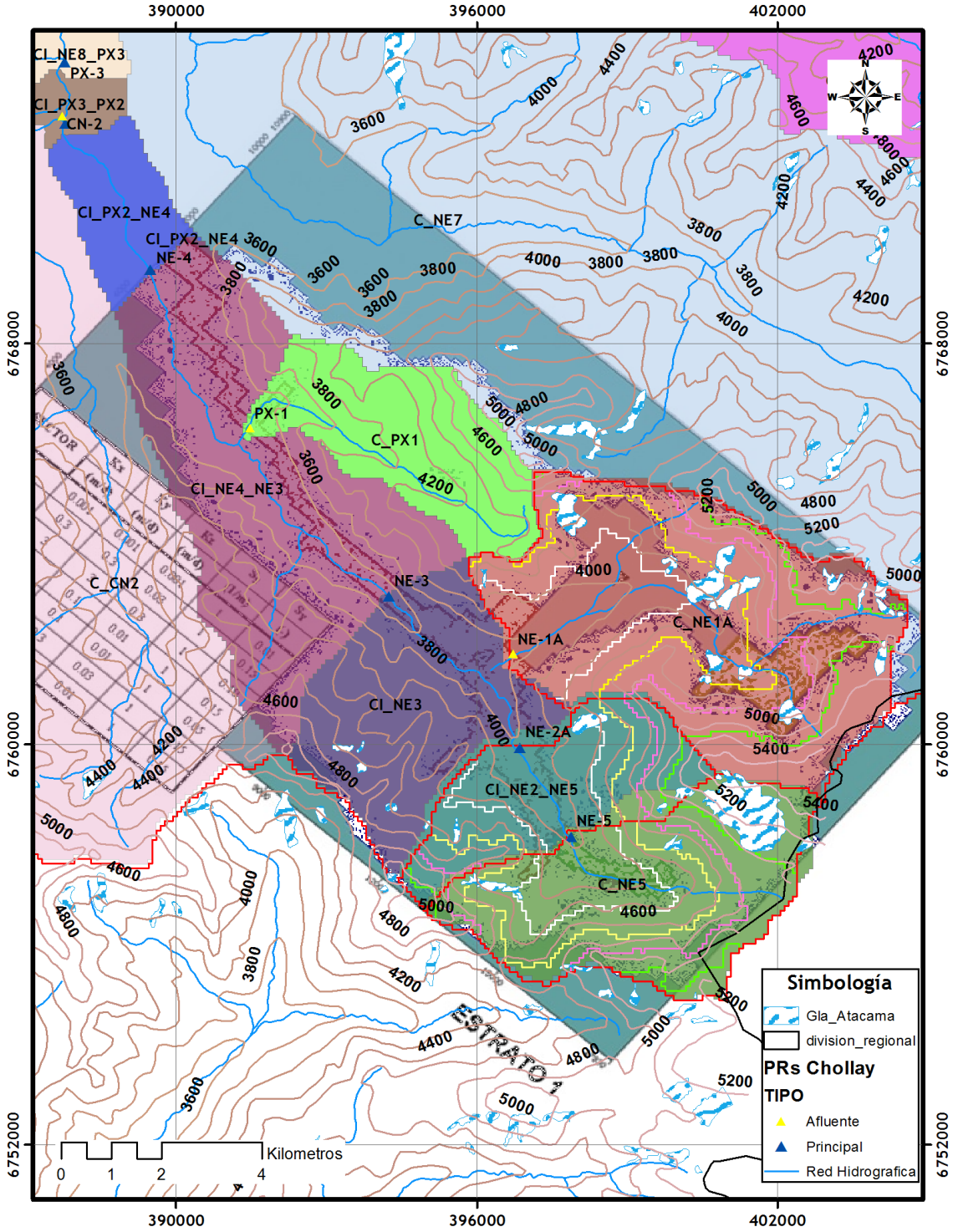
a. A partir del mapa de conductividades y su superposición con la sectorización del estudio, se definió para cada subcuenca (SC) un máximo de conductividad, suponiendo que el primer estrato definido en el modelo hidrogeológico afecta el valor de la conductividad de la zona radicular (K_1) y que el segundo estrato afectará el valor de la conductividad de la zona profunda (K_2). Este máximo será afectado por un factor para calibrar dicha conductividad con los controles fluviométricos.
b. Respetando el modelo conceptual, se supone que en las bandas más altas en donde se tienen los mayores valores de pendiente, debe cumplirse, de acuerdo a la información del modelo hidrogeológico, que las conductividades son bajas (presencia de rocas y características impermeables) y que el tamaño de los estanques del modelo, esto es, el almacenamiento del suelo y almacenamiento profundo (**Tabla 4.1**) son también bajos, dado que éstos deben de desarrollarse en las zonas en donde existe el acuífero. En la **Figura 5.39** SWC representa el estanque de almacenamiento superior, DWC el almacenamiento del estanque inferior. Asimismo RZC es la conductividad de la zona radicular o K_1, mientras que DC es la conductividad profunda o K_2. La línea negra que cruza la cuenca de NE5 representa el perfil transversal que se detalla en la parte inferior de la figura. Los ejes en azul representan altitud versus distancia hacia el valle. El esquema muestra que mientras más alto se encuentre, los valores de los almacenamiento y conductividades serán bajos, mientras que más cerca del valle, donde las pendientes son más bajas, los tamaños de los almacenamientos y las conductividades son más grandes (sentido de la flecha verde y morada respectivamente).
c. Para no generar una sobre definición de parámetros y aprovechar las conductividades calibradas en el modelo hidrogeológico, se definió la conductividad de la zona en donde se desarrolla el acuífero como un ponderador sobre la conductividad de las partes altas. Este ponderador es calculado en base a la razón entre la conductividad media de las bandas altas y la conductividad media de los sectores acuíferos definidos en el modelo hidrogeológico. En este sentido, la zona más compleja al calibrar resulta ser NE5, en donde se combinan celdas con 3 valores de conductividad, especialmente cerca de la zona del muro cortafuga.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

d. Si bien no es un parámetro hidrogeológico, el factor de resistencia al escurrimiento, siguiendo el modelo conceptual empleado, ha sido definido (para luego ser calibrado) de tal manera que facilite el escurrimiento en las bandas altas, donde no se desarrollan acuíferos, debido a que las altas pendientes favorecen el escurrimiento; y que permita la infiltración en las bandas bajas, donde se definen los acuíferos, debido a que las pendientes son más bajas y el flujo tiene un tiempo mayor para poder infiltrarse. En la **Figura 5.40** se muestra el perfil longitudinal (lila) sobre el valle. En este sentido en las bandas altas, se debiese privilegiar el escurrimiento, mientras que en las bandas bajas, debido a la disminución de pendiente, el flujo es más lento y tiene más tiempo para infiltrar. En este sentido, WEAP, define que mientras mayor es valor de RRF (factor de resistencia al flujo) menor es el caudal pasante, de ahí que las flechas azules vayan disminuyendo en magnitud en la medida que se acerca al punto de salida de la subcuenca y que RRF (flecha negra) crece.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

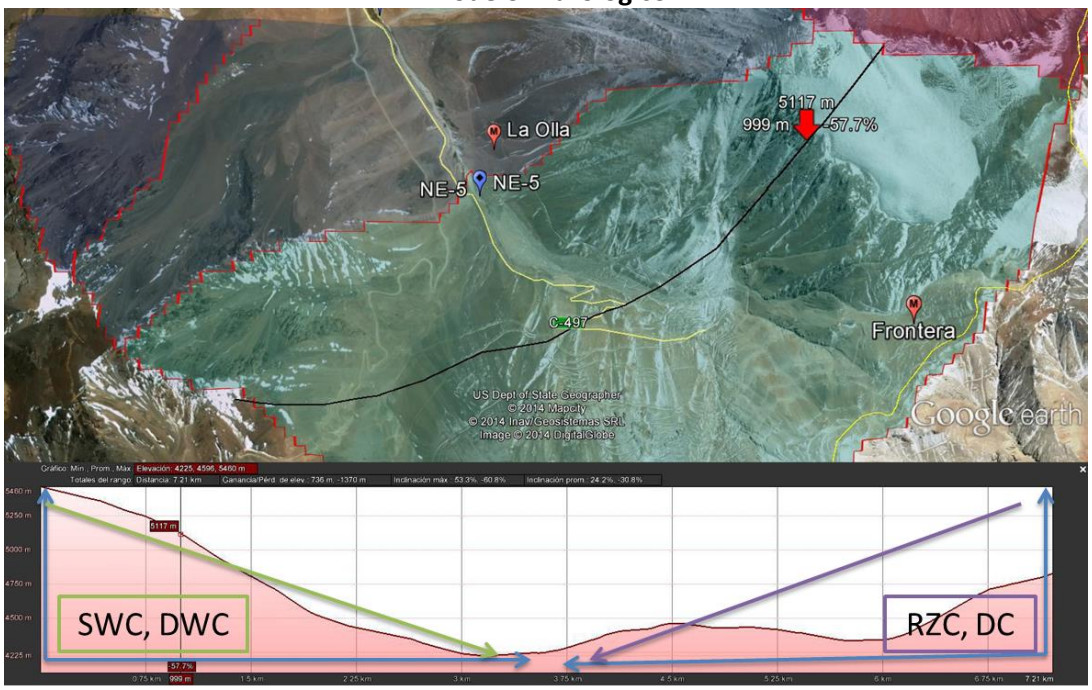
Figura 5.38
Mapa de Conductividades para el Estrato Superior



Nota: Se aprecian las curvas de nivel sobre los sectores para poder definir las conductividades por bandas de elevación
Fuente: Elaboración Propia

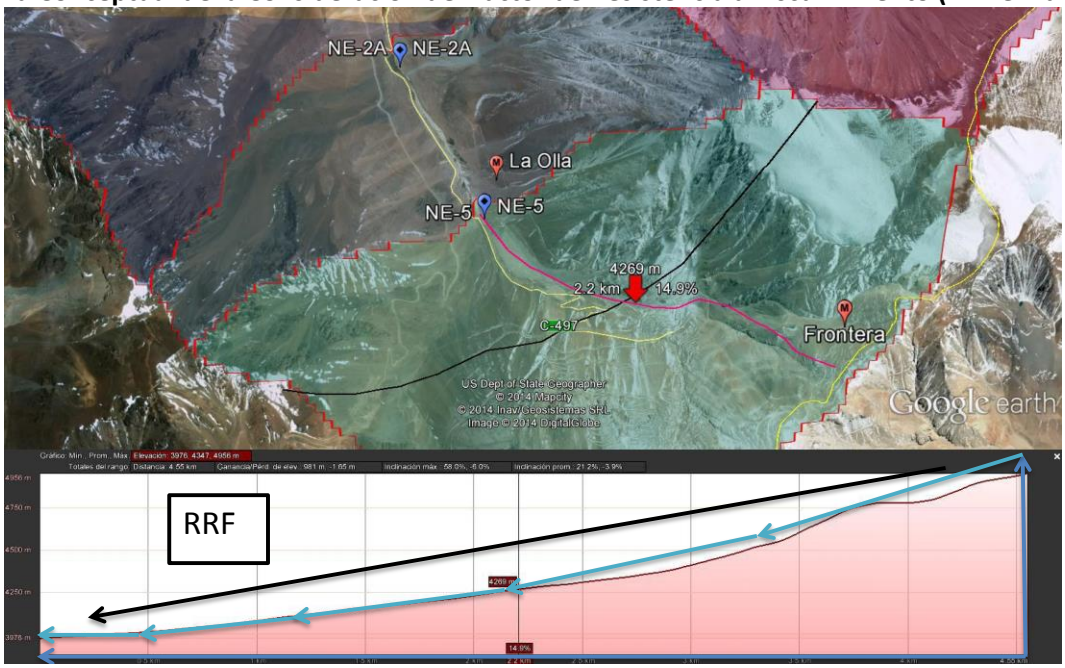
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 5.39
Esquema Conceptual de la Definición de Conductividades y Tamaño de los Estanques en el Modelo Hidrológico



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.40
Esquema Conceptual de la Consideración del Factor de Resistencia al Escurrimiento (RRF en la figura)



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

6.- CONSIDERACIONES TÉCNICAS

6.1 Caudal de Aporte Glacial

Una de las consideraciones técnicas más relevantes para esta etapa del estudio es que el aporte de los glaciares Estrecho y Amarillo, para la subcuenca C_NE5 (CF NE5), sea considerado como un aporte aparte del sistema, dado que existen estudios realizados por Barrick – Pascua Lama que han estimado dicho aporte en función de un modelo de derretimiento de nieve y glaciar, considerando para ello una estimación del proceso de sublimación. Dicho modelo fue desarrollado por Jones (2005) y ha sido considerado como un aporte externo, parte del flujo de cabecera del río Estrecho. Esto trae una disminución del área de la banda de elevación más alta de la subcuenca (SC) NE5 en 2 [km^2], lo que corresponde al área de los glaciares en cuestión.

Es importante destacar que dicho caudal calculado por Jones considera una serie de supuestos, entre ellos, utiliza la estación "El Indio" como estación base de transposición, y, además, un factor de transposición del orden de 3 a 4 veces la precipitación de "El Indio". Además la serie de caudales es una serie promedio, esto es, no posee variabilidad ni para años húmedos ni secos.

Producto de que se definió para este estudio un factor de corrección de la precipitación, esto se replicó para el caso de la consideración de este caudal, afectándose por un factor de disminución del orden del 20 a 30%. Aun así este caudal podría encontrarse sobreestimado y en este sentido una de las mejoras significativas que se le puede hacer a este modelo, en una etapa posterior, corresponde a la incorporación de los resultados de una modelación glaciar más acabada, con una base física, basado por ejemplo, en modelos de balances de energía. En este sentido WEAP permite acoplar los resultados de cualquier modelo, por lo que no es necesario efectuar acoples obligatorios con otros modelos, sino que tomar directamente el caudal simulado por ellos e ingresarlos a este modelo hidrológico como dato de entrada, lo que facilita la creación del modelo de operación.

6.2 Datos Observados

Es clave destacar que los valores que aquí se están empleando como datos observados corresponden a aforos manuales. La instalación de estaciones de medición continua fue posterior al año 1998. La implicancia directa de esta situación es que, dependiendo de la estación o sección de aforo que se esté registrando, ésta siempre o casi siempre presentará segmentos o tramos de río o sección bajo el efecto del congelamiento del curso de agua o en sus inmediaciones en aquellas estaciones localizadas en la parte alta. Esto trae como consecuencia que, independiente de que los operadores destruyan las superficies congeladas en el momento del registro, éstos siempre serán una observación del caudal pasante, mas no de la disponibilidad hídrica real de la subcuenca en ese momento, valor que sí está tratando de simular WEAP. Entonces para todos los efectos, se debe tener en cuenta que los datos observados considerados presentan una dispersión o sesgo negativo a juicio de este consultor, al menos para aquellas cuencas o subcuencas más altas.

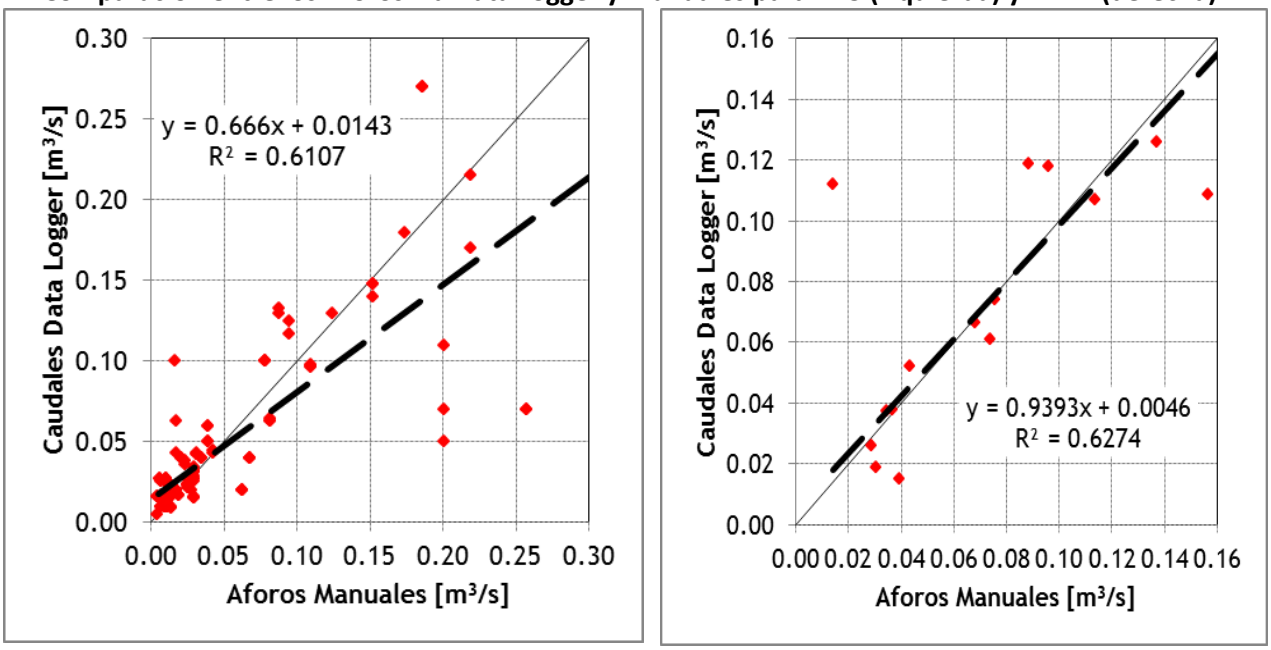
Además de esta situación, las mediciones efectuadas en la década de los 90´s, en la mayoría de los casos, representan órdenes de magnitud de los flujos pero carecen de una estacionalidad clara. Esto ha significado que siempre se deben filtrar aquellos años que sí presenten una estacionalidad

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

(representación hidrológica de una año promedio para una cuenca de régimen hidrológico glacial-nival, nival o nival-pluvial según sea el caso) para poder calibrar una respuesta consistente y con sentido físico.

Para destacar estos efectos se ha procedido a efectuar una comparación entre los flujos que han sido aforados manualmente comparados con los medidos en la estación de control e informados por un "Data Logger (DL)". La **Figura 6.1** muestra esta comparación para los controles fluviométricos más altos del sistema: NE5 y NE2 (NE2A) en el período disponible de registro. En ella es posible apreciar que para NE5 existe una subestimación de los caudales registrados por los DL del orden de un 30%, e incluso, para un aforo manual de 0.2 [m^3/s] le corresponden 3 valores distintos de caudal en DL: 0.05, 0.07 y 0.11 [m^3/s] lo que habla de problemas de registro o compatibilidad entre lo que informa la estación y el caudal aforado manualmente, el cual se entiende, debiese ser de mejor calidad. En cuanto a NE2A, salvo el punto asociado a un aforo manual de 0.015 [m^3/s] (aprox.), los caudales tienden a tener una menor dispersión de la observada para NE5, pero con un sesgo negativo en los caudales bajos.

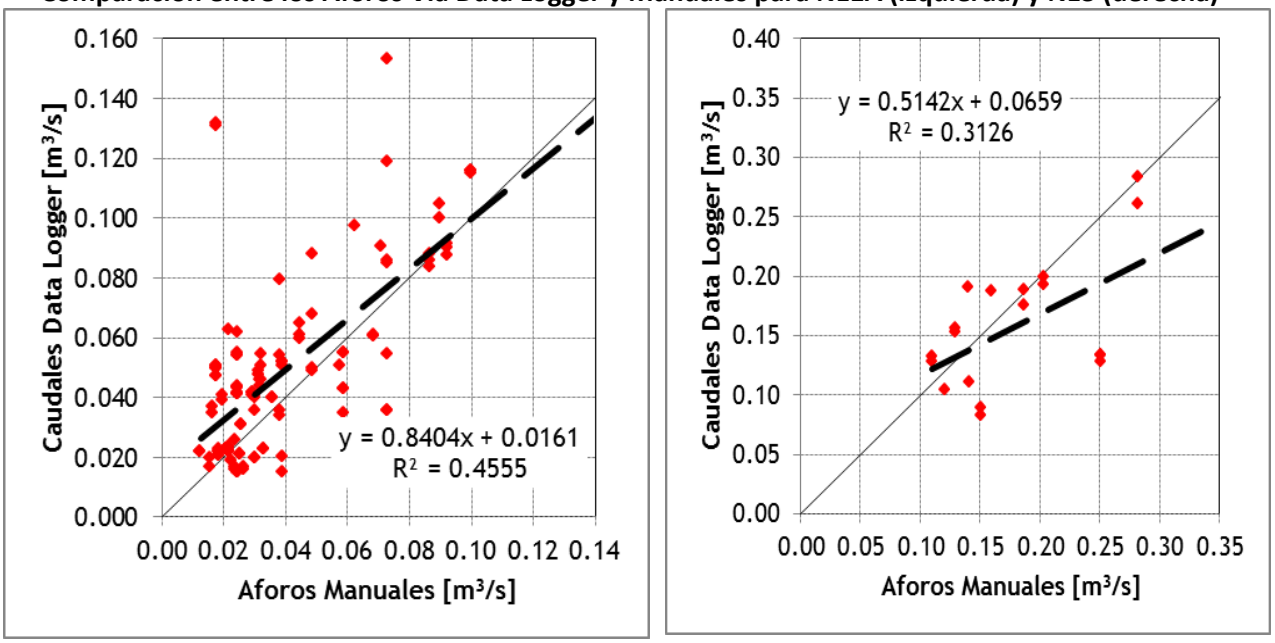
Figura 6.1
Comparación entre los Aforos via Data Logger y Manuales para NE5 (izquierda) y NE2A (derecha)



Fuente: Elaboración Propia

La **Figura 6.2** muestra la misma comparación para NE1A (izquierda) y para NE3 (derecha). En el caso de NE1A, que corresponde a la Quebrada Barriales, existe una evidente anomalía para un aforo manual del orden de 0.04, 0.06 y 0.07 [m^3/s] a los cuales les corresponden 6, 5 y 6 valores diferente en el DL, por lo que la sección de control no puede identificar con precisión los caudales bajos, produciéndose una evidente sobrestimación de los caudales debido a la acumulación de puntos sobre la recta sólida que representa la función "identidad". En el caso de NE3, la cantidad de datos no permite un comentario o análisis muy profundo, en general hay una tendencia a la subestimación de los caudales, con sesgos negativos importantes en los 0.15 y 0.25 [m^3/s].

Figura 6.2
Comparación entre los Aforos Via Data Logger y Manuales para NE1A (izquierda) y NE3 (derecha)



Fuente: Elaboración Propia

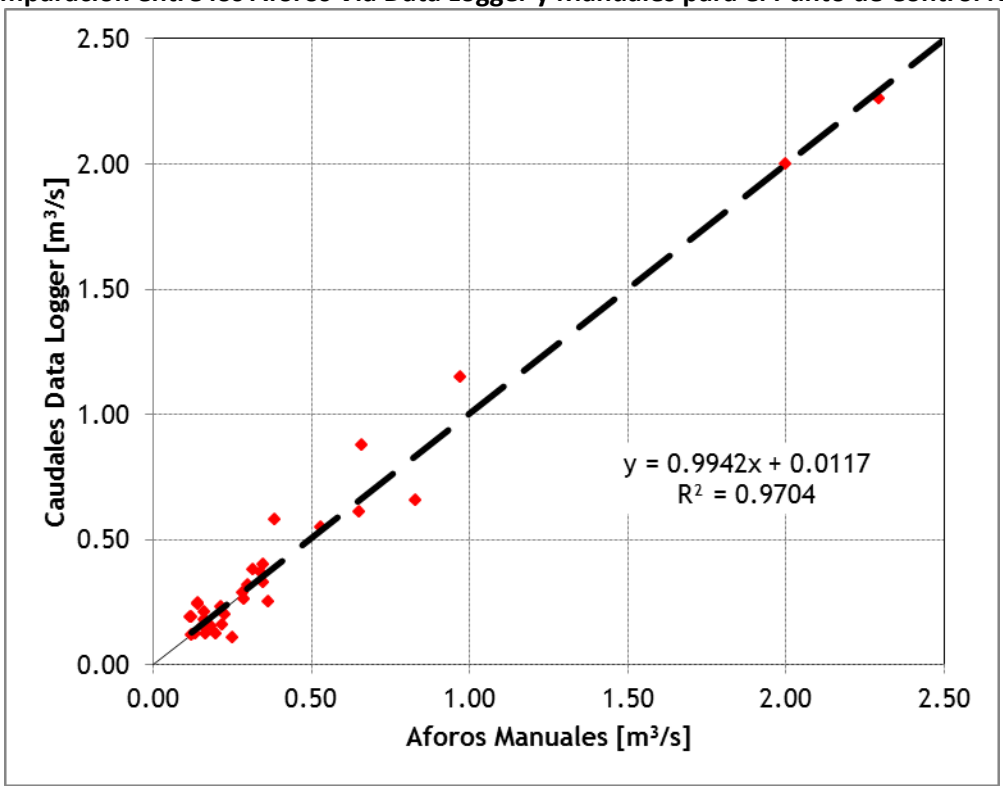
Sin embargo, para el sistema NE4, que cierra la calibración de la parte alta, la comparación que se presenta en la **Figura 6.3**, informa que existe una buena correlación entre ambos valores, por lo que para los efectos de este control fluviométrico (CF NE4) los datos observados por la estación corresponden a una buena estimación de la disponibilidad hídrica del sistema.

Respecto del orden de magnitud entre los aforos manuales y su correspondencia, la **Figura 6.4** muestra una comparación de todos los registros disponibles en los controles fluviométricos utilizados. En el panel superior se puede observar que en todo el registro disponible sólo hay registro de 2 crecidas apreciables asociadas al año 1984 y 1998, la segunda conocida ampliamente por el efecto que el Niño causó en esa época. Se evidencia que existe un vacío general de la información entre 1985 y 1988, además de la carencia de una estacionalidad clara en los datos medidos en la década de los 90´s.

El panel inferior, que muestra la misma comparación pero en escala logarítmica, permite hacer el énfasis sobre los caudales base. En general, si bien hay valores muy bajos asociados a la cuenca de NE5 y NE2A, se observa que el orden de magnitud de los caudales es proporcional a las cuencas y al sentido de escurrimiento que se observa en el sistema. NE9, CN7 y NE8 presentan los mayores valores de caudal, pero preservan que NE9 es el máximo registro. NE4, CN8 y NE7 tienden a presentar caudales de similares órdenes de magnitud, lo que se entiende debido a la magnitud de sus áreas y similares regímenes hidrológicos.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

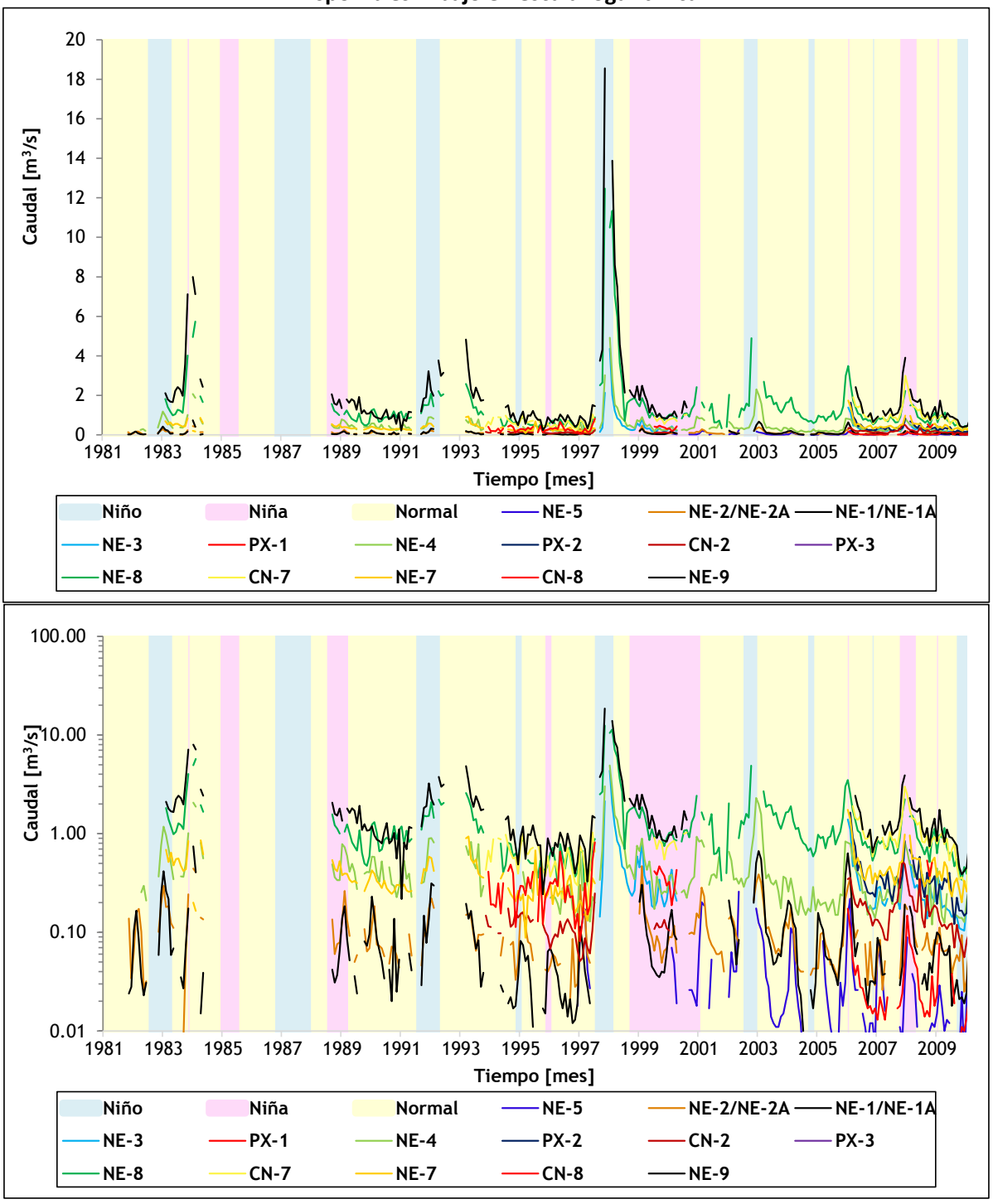
Figura 6.3
Comparación entre los Aforos Via Data Logger y Manuales para el Punto de Control NE4



Fuente: Elaboración Propia

Esto permite concluir que en general, las estaciones presentan importantes discrepancias en los registros, la comparación de una serie de aforos manuales con los registros medidos por las estaciones permite detectar deficiencias en los registros de los data logger. Sin embargo, existen estaciones como NE4 que permiten un adecuado cierre en el sistema, y el nivel encontrado de relación para las cuencas altas es aceptable, entendiendo las dificultades de monitorear cauces que se encuentran congelados. La estación de Barriales (NE1A) no es confiable a luz de la comparación. Dependiendo del número de aforos (periodicidad), una calibración con estos valores puede ser confiable, pero para algunas estaciones no garantiza que en el futuro se pueda independizar la metodología de aforo, debiéndose complementar el caudal registrado en la estación con aforos periódicos.

Figura 6.4
Caudales Observados Provenientes de Aforos manuales para Cada Uno de los Controles Fluviométricos Disponibles. Abajo en escala logarítmica



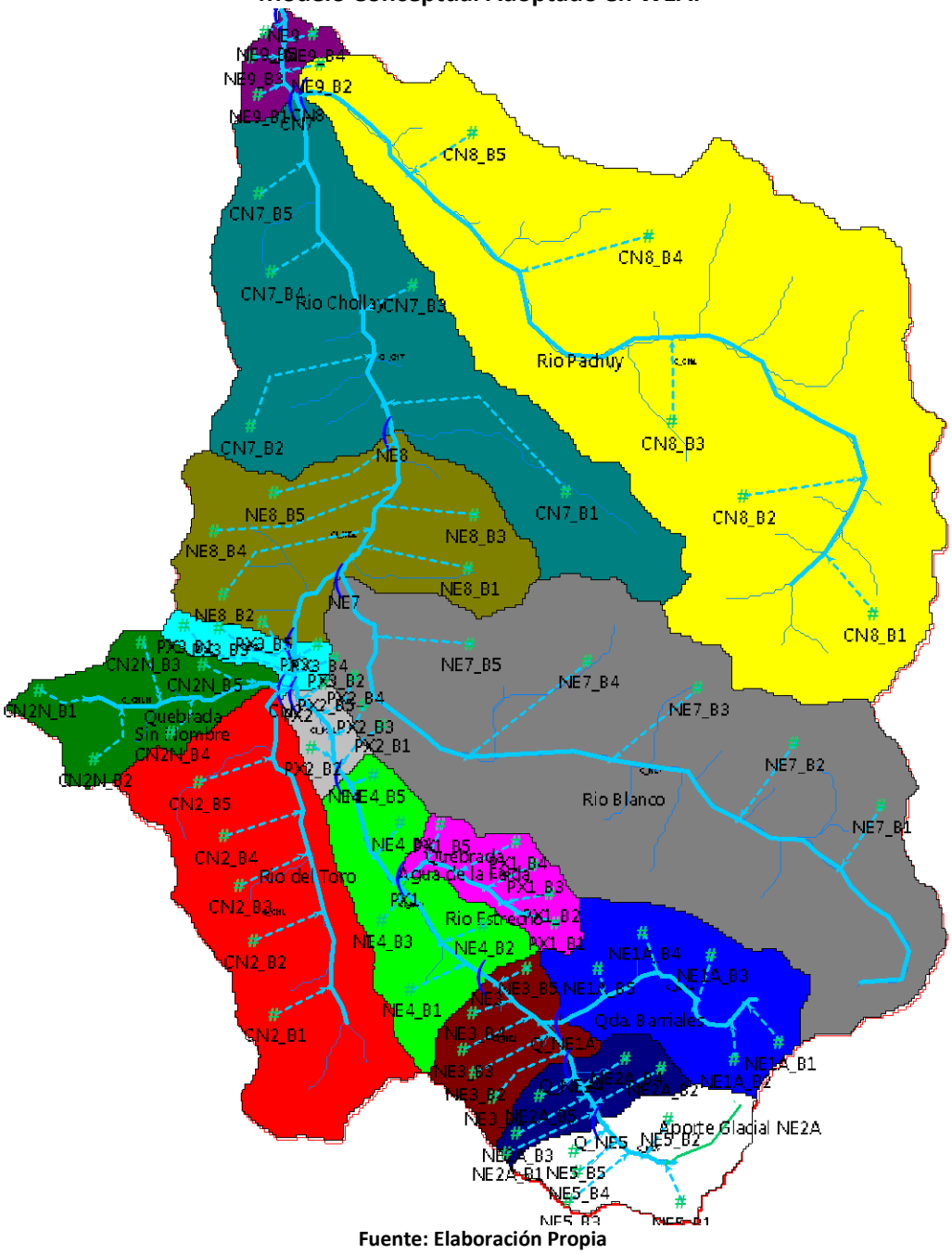
Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

6.3 Modelo WEAP Adoptado

Incorporando todas las consideraciones de ese capítulo se construyó el modelo WEAP presentado en la **Figura 6.5**. En ella es posible diferenciar cada subcuenca con sus cinco bandas de elevación (catchments), además del aporte glacial a la cuenca de NE5.

Figura 6.5
Modelo Conceptual Adoptado en WEAP

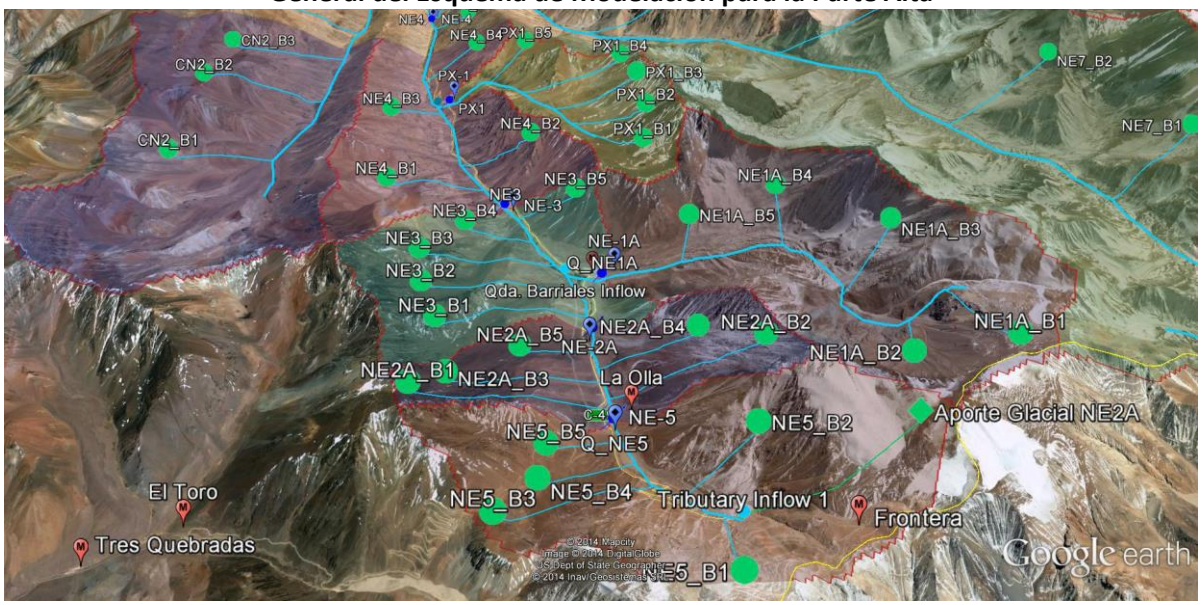


Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

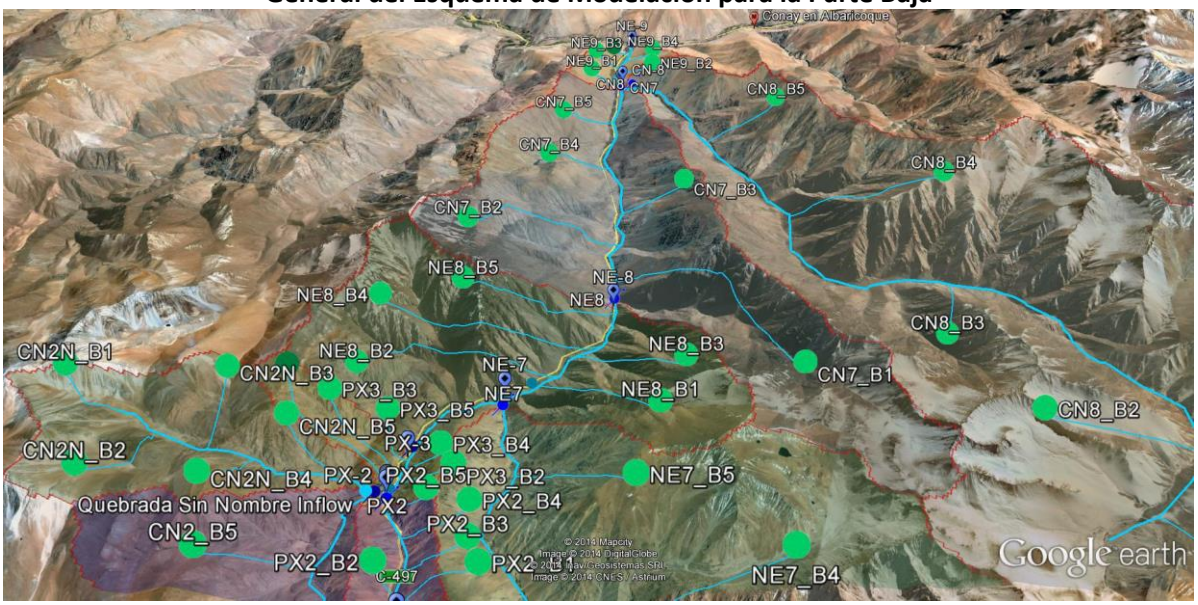
Adicionalmente, para ver este modelo conceptual aplicado a la región representada o zona de estudio, se presentan la **Figura 6.6** y **Figura 6.7** que muestran un replanteo de la ubicación de los elementos de la modelación en WEAP en Google Earth para la parte alta y baja del sistema definido por NE9. En ambas figuras se puede apreciar la buena correspondencia de los sectores simulados con los sectores "reales" y da una muestra de la complejidad misma de la modelación.

Figura 6.6
General del Esquema de Modelación para la Parte Alta



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.7
General del Esquema de Modelación para la Parte Baja



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

7.- CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

7.1 Consideraciones Generales

El proceso de calibración fue recursivo. Se inició en las cuencas de mayor elevación, en particular, NE1A, NE2 y NE5, pues presentan un mayor registro y debido que constituían una prioridad para el cliente. Esto hizo que NE1A y NE2 fuesen los primeros controles en calibrarse. El procedimiento fue iterativo. Cada sistema presenta el mismo set de parámetros que se detalla en la **Tabla 4.1**, los cuáles se van ajustando de tal manera de hacer coincidir el caudal simulado con el caudal observado.

Para mostrar los resultados del proceso de calibración se construyen 6 gráficos por cada subcuenca modelada:

1. Gráfica de caudal observado y simulado con la precipitación sobre la subcuenca modelada: gráfico que permite apreciar las correspondencias de los caudales según los pulsos de precipitación (ocurrencia y orden de magnitud) como también la influencia de estos caudales con los fenómenos de Niño y Niña registrados.
2. Gráfica de caudal observado y simulado con la temperatura sobre la subcuenca modelada: gráfico que permite apreciar las correspondencias de los caudales según las magnitudes de la temperatura (ocurrencia, acumulación y comienzo del deshielo) como también la influencia de estos caudales con los fenómenos de Niño y Niña registrados. Este gráfico se usa como complemento del anterior.
3. Serie de tiempo de caudales medios mensuales observados y simulados en escala logarítmica: Gráfico que complementa los 2 anteriores, pues, al estar en escala logarítmica, permite concluir sobre el rendimiento del modelo para caudales base.
4. Estacionalidad del año promedio: Gráfico que se realiza una vez filtrados los años que **sí** presentan una estacionalidad y que por ende permiten calibrar la ocurrencia y magnitud de los caudales peak y flujos base.
5. Caudales anuales: Gráfico que incorpora el mismo filtro de años del anterior y permite evaluar el desempeño del modelo en términos de cantidad de agua simulada para cada año. Cabe destacar que los datos observados presentan muchos vacíos en el mes de diciembre y en general no hay años completos con registro, por lo que en general los caudales observados se encuentran “subestimados”.
6. Caudal observado versus caudal simulado: Gráfico que compara en escala logarítmica los caudales medios mensuales observados y simulados. En este sentido, y debido a los grandes vacíos de información, este gráfico es la forma más práctica de evaluar el desempeño de las calibraciones. Permite no sólo valorizar el coeficiente de determinación, sino que identificar y ratificar las fortalezas y debilidades de la simulación que debiesen explicarse o detectarse en los gráficos anteriores.

En este sentido no se ha escogido la determinación de un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, debido a los vacíos de la información y a la falta de representación estacional de los caudales aforados. De esta forma, se estima que los gráficos y coeficiente de determinación anteriores son suficientes para evaluar el desempeño del modelo.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

7.2 Resultados Proceso de Calibración

El proceso de calibración ha considerado el empleo de varios indicadores que permitan suplir los vacíos de información en las series observadas de caudales. Por una parte, es posible verificar que las diferencias entre los caudales observados (Qobs) y simulados (Qsim) sean consecuentes con las forzantes climáticas más sensibles (precipitación y temperatura) y, por otro lado, se correlacionan Qsim y Qobs con el fin de determinar las diferencias globales obtenidas durante la calibración.

Adicionalmente, este procedimiento permite identificar posibles discrepancias entre las fuentes de información observadas, lo que puede aportar a la adopción de medidas futuras que mejoren los sistemas de control.

A continuación se presentan los resultados de las calibraciones y los análisis señalados previamente.

7.2.1 NE5: Río Estrecho en Zona Alta o Superior

La **Figura 7.1** presenta dos gráficos para analizar la correspondencia de los caudales observados y simulados con la precipitación y la temperatura empleada en la modelación. Por una parte, se aprecia que el Qsim es correspondiente con la precipitación, respecto a los caudales de crecida, sin embargo, los Qobs presentan al menos dos crecidas (1997 y 2002) que no se pueden atribuir a la precipitación empleada.

El análisis de la temperatura permite identificar que la crecida observada el 2002 se midió durante el período de acumulación de nieve (temperaturas bajo cero), siendo la única crecida de estas características, observada en NE5.

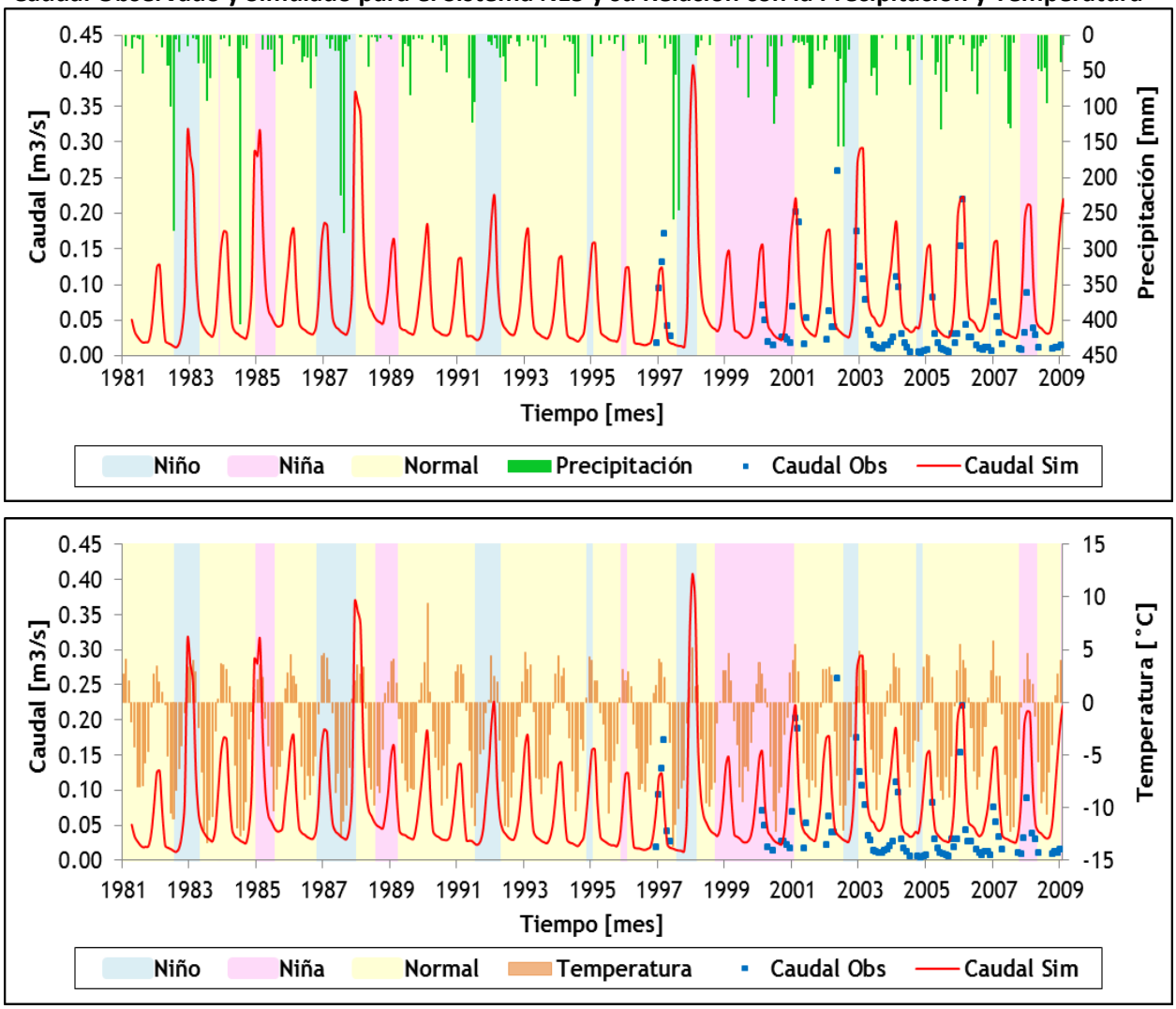
Aunque el Qsim logra representar la estacionalidad observada, relacionada a las forzantes de precipitación y temperatura, así como la magnitud de los caudales de crecida, la simulación del estiaje presenta un flujo base mayor al observado en todos los años de registro. La **Figura 7.2** indica que las diferencias en el estiaje pueden llegar a un orden de magnitud. Por otro lado, la señal de los caudales medios y “peak” observados puede ser reproducida por el modelo en los años 2001 y 2006, pero en general, el modelo sobreestima los caudales observados, reproduciendo la estacionalidad de los caudales medios mensuales, como se aprecia en la **Figura 7.3**.

Aceptando la precipitación como la información más completa disponible, se considera que el modelo permite estimar la disponibilidad hídrica de los meses de estiaje, sin embargo, existe una incertidumbre considerable en los caudales medidos debido a: i) los flujos observados presentan vacíos en el tiempo; ii) los datos disponibles corresponden a aforos manuales con una frecuencia aproximada de entre 1 y 3 mediciones mensuales; y iii) durante el período de estiaje se produce el congelamiento del río. De esta forma, esta sobreestimación también se extiende al balance anual indicado en la **Figura 7.4**.

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.5,** indica que la simulación no permite reproducir los Qobs, por los factores anteriormente señalados. Esto se ve reflejado en la mayor concentración de puntos que se observan bajo la recta de correlación, producto de la simulación de los caudales de estiaje por sobre los observados.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

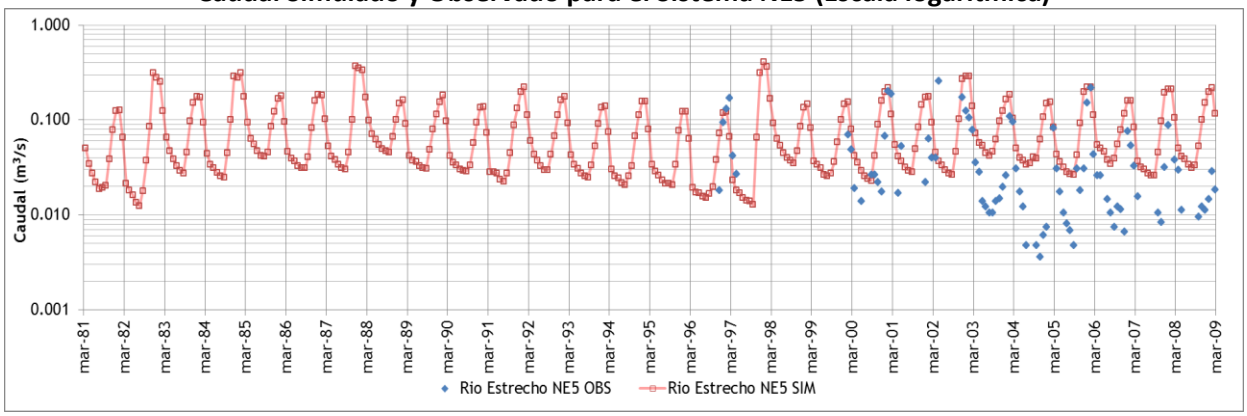
Figura 7.1
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE5 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

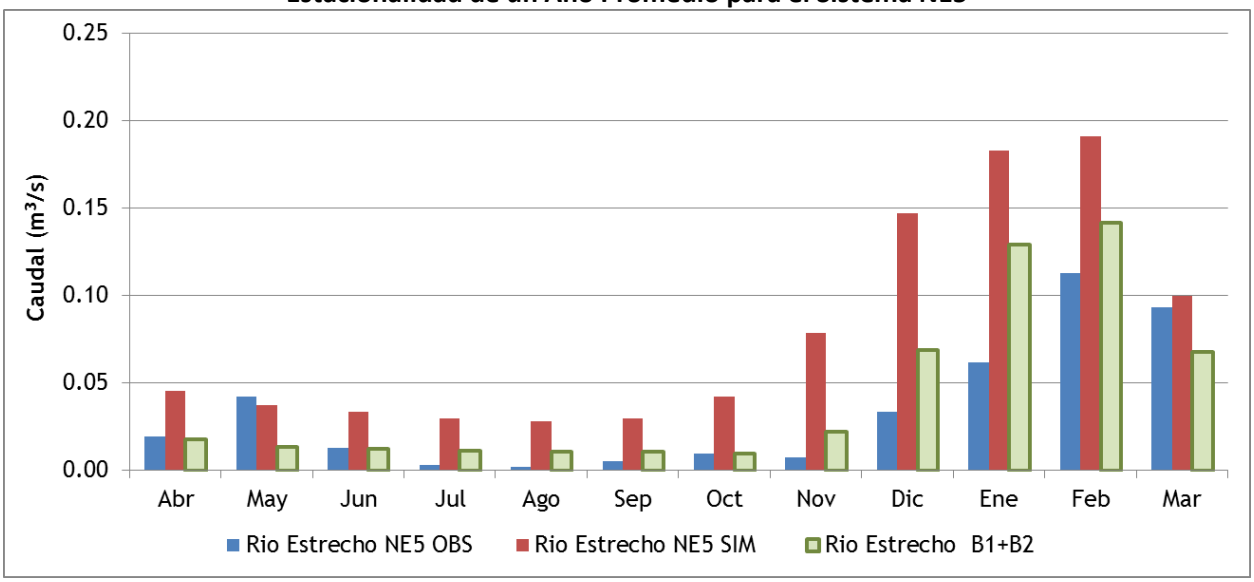
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.2
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE5 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

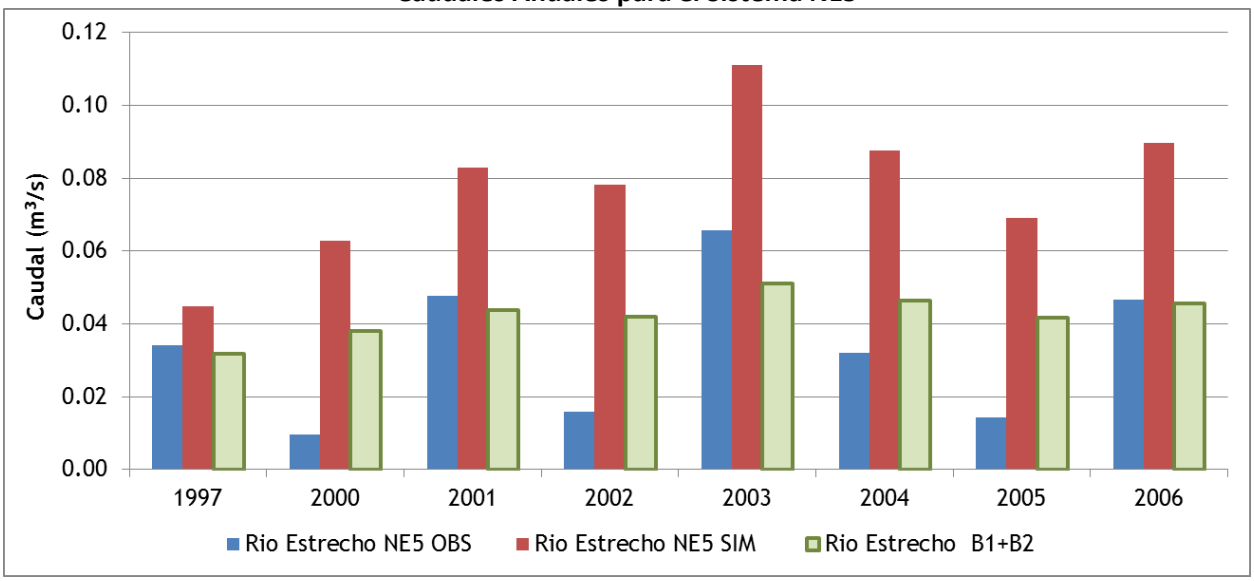
Figura 7.3
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE5



Fuente: Elaboración Propia

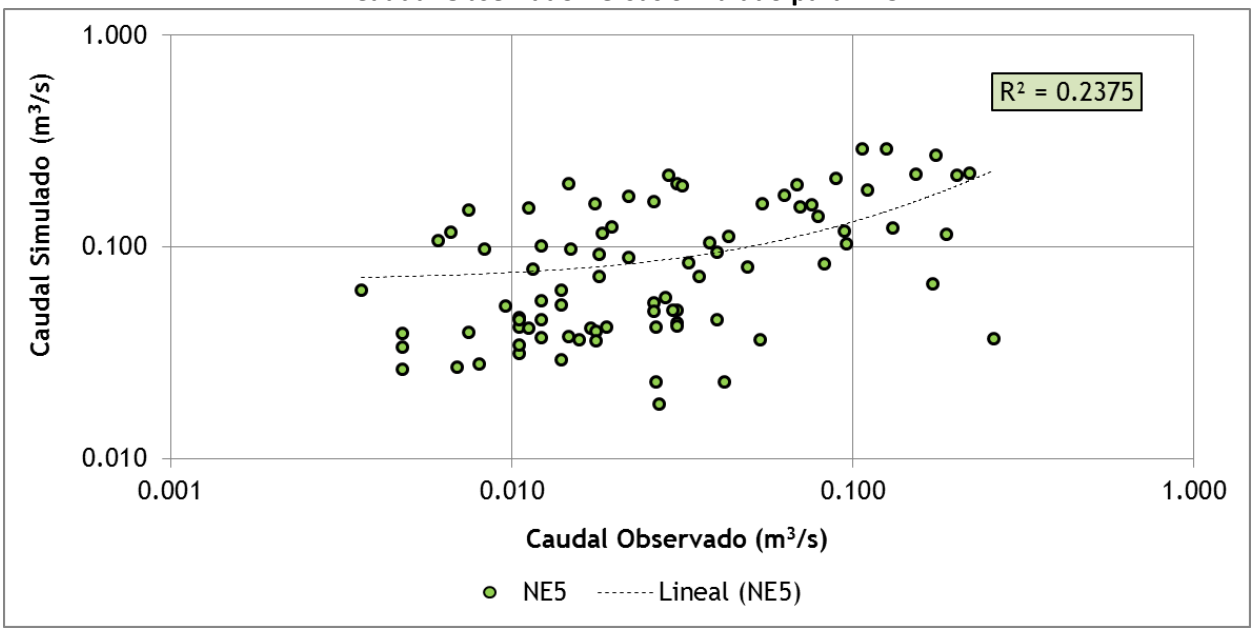
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.4
Caudales Anuales para el Sistema NE5



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.5
Caudal Observado Versus Simulado para NE5



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.2 NE2A: Río Estrecho antes de junta con Barriales

Con una serie observada de caudales más completa que la existente para NE5, los resultados indicados en la **Figura 7.6** no muestran discrepancias con la estacionalidad asociada a las forzantes de precipitación y temperatura.

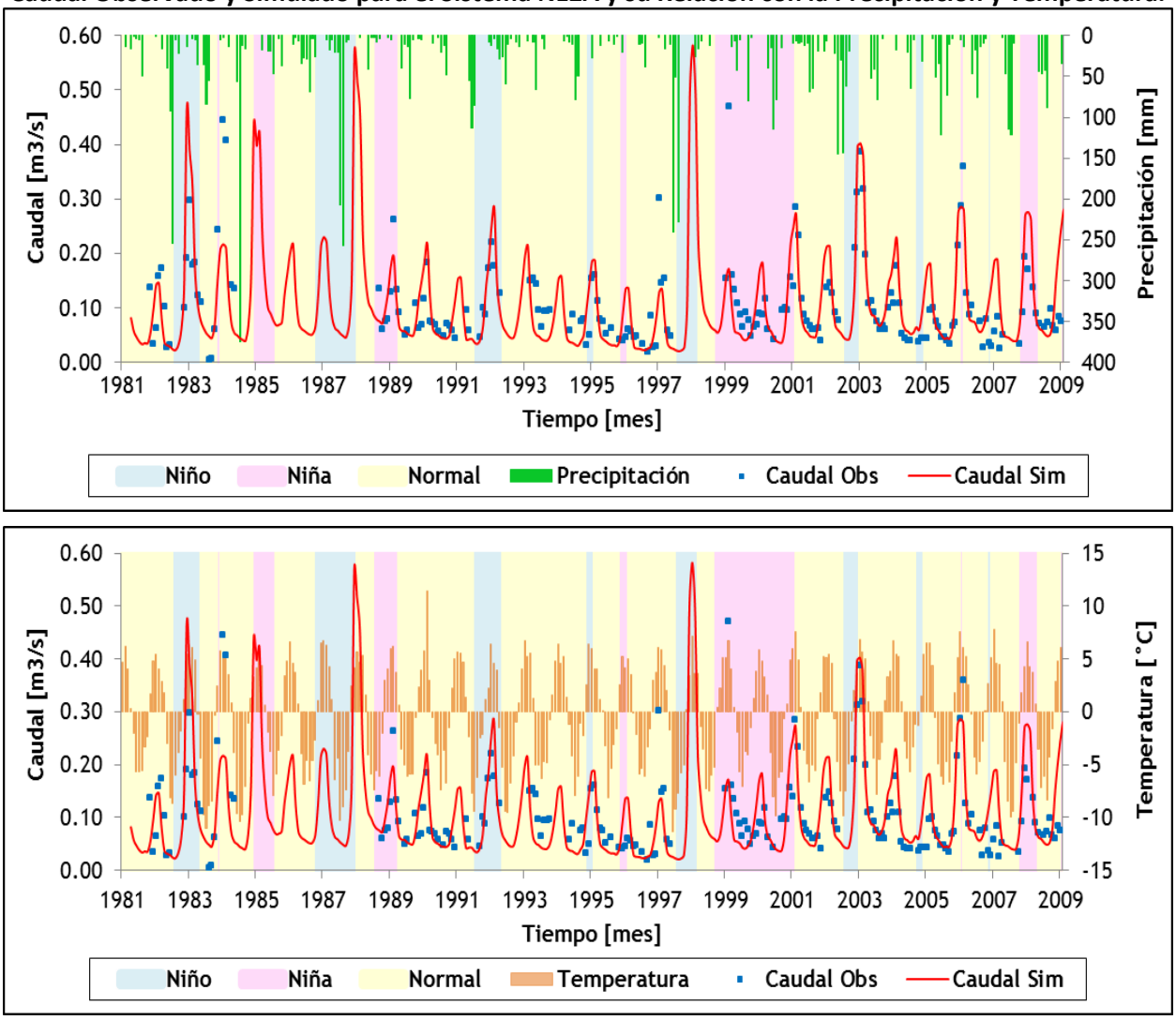
La **Figura 7.7** indica que el Qsim representa la señal observada de los Qobs, tanto en el periodo de crecidas como durante la época de estiaje. Pese a lo anterior, a lo largo de la serie observada se aprecia un desempeño variable del modelo, además de la presencia de observaciones que escapan a la tendencia general de la mayoría de los caudales observados. Este desempeño variable podría indicar la existencia de problemas en las mediciones de los caudales, especialmente en la segunda mitad de los 90's y los últimos 3 años del período de registro. Particular es el caso del año 1984 en los que figuran caudales muy bajos y muy altos que no se condicen con los pulsos de precipitación. Para 1984, la temperatura alcanzó uno de sus mínimos, lo que habría permitido acumular un volumen de nieve que luego actúa como deshielo, pero con este monto se cree no es posible lograr un "peak" de la magnitud registrada, y, aún más, comparando con lo registrado en 1983.

En general, el modelo representa la estacionalidad de las observaciones, con tendencia a la sobrestimación de los caudales promedio mensuales, como se aprecia en la **Figura 7.8**. Respecto al balance anual, hay correspondencia en las variaciones observadas, pero con tendencia a la sobrestimación de los totales anuales (ver **Figura 7.9**).

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.10**, no alcanza un valor aceptable desde el punto de vista de una simulación robusta, pero representa una mejora respecto a los resultados obtenidos en NE5, lo cual se atribuye a una mayor densidad de registros, los que permiten subsanar los posibles problemas de registro en ciertos períodos del monitoreo. La mayor densidad de puntos se encuentra bajo la recta, con al menos tres puntos atípicos (1984,1999 y 2007), lo cual se debe a que la mayoría de los registros de caudales se encuentran en las temporadas de estiaje.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

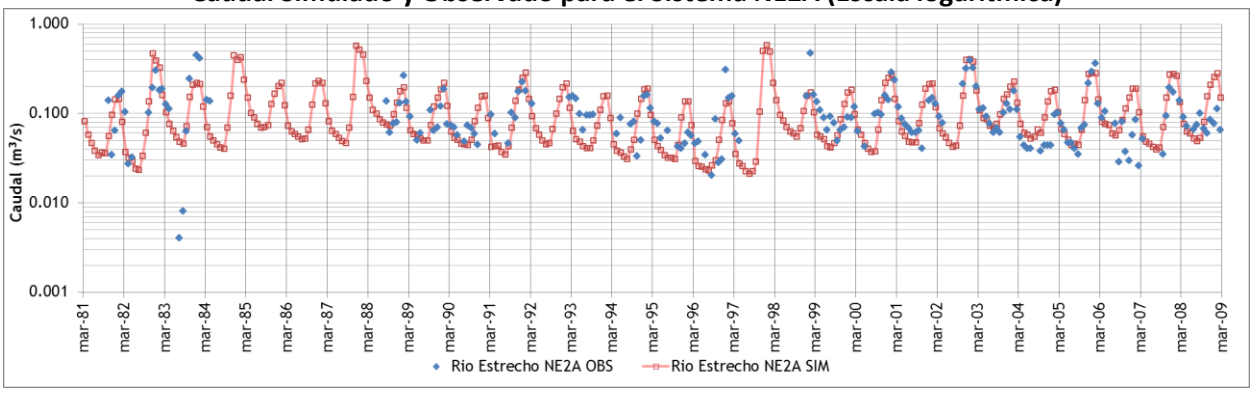
Figura 7.6
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE2A y su Relación con la Precipitación y Temperatura.



Fuente: Elaboración Propia

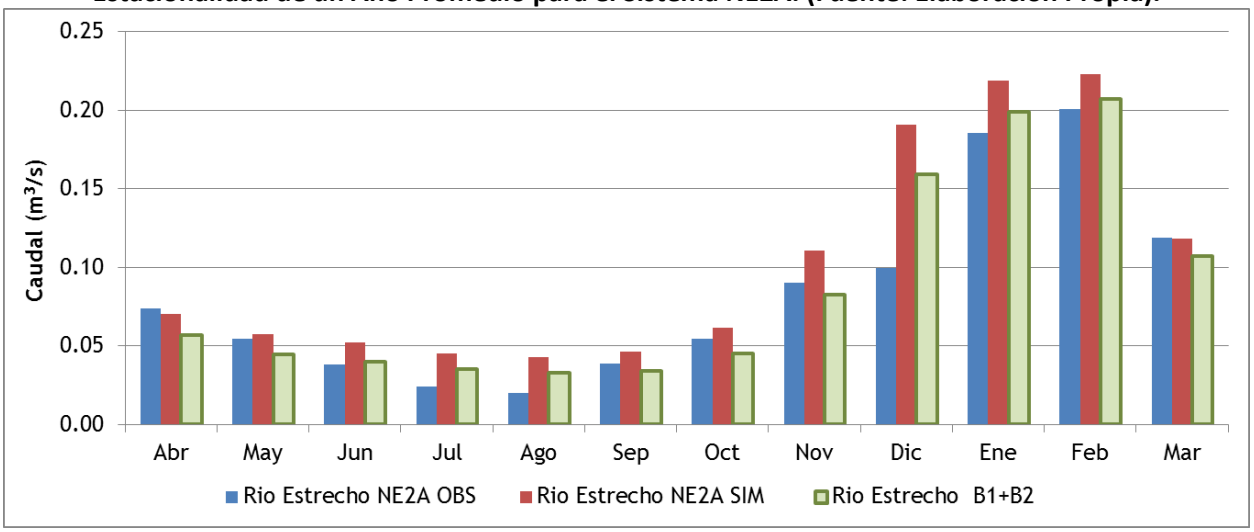
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.7
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE2A (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

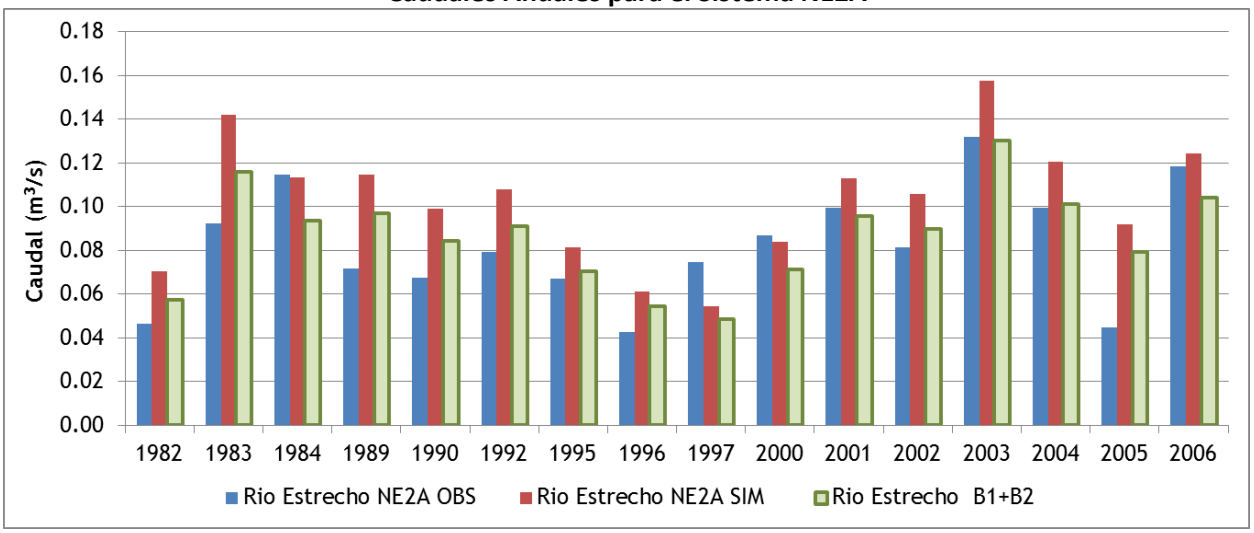
Figura 7.8
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE2A. (Fuente: Elaboración Propia).



Fuente: Elaboración Propia

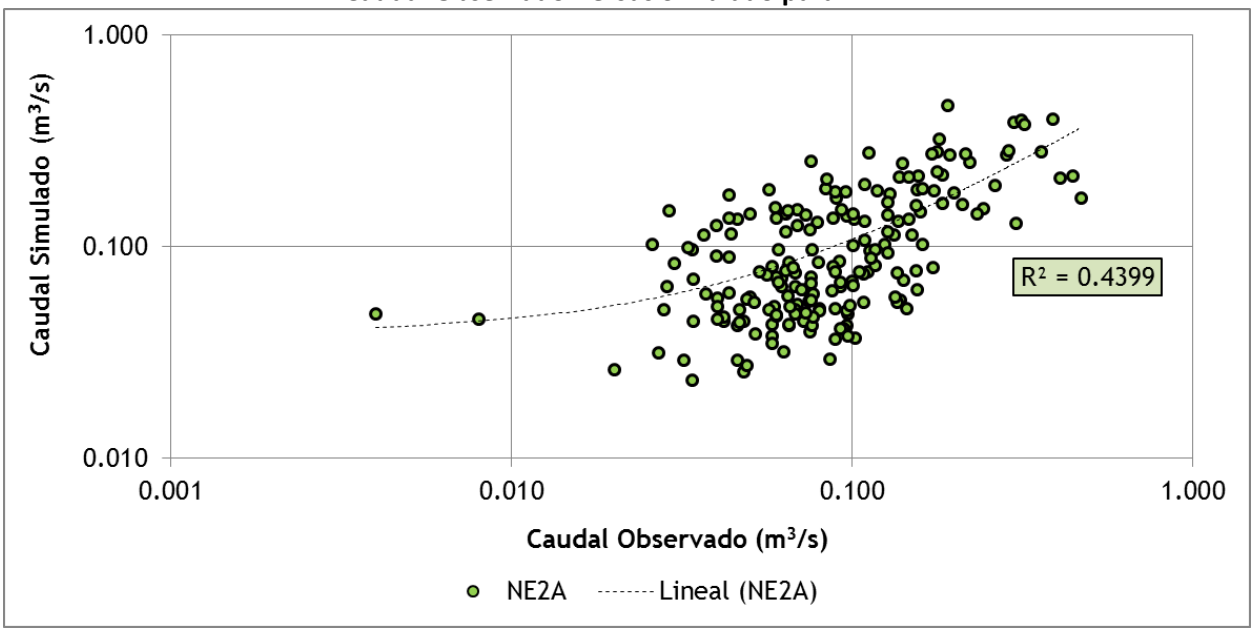
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.9
Caudales Anuales para el Sistema NE2A



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.10
Caudal Observado Versus Simulado para NE2A



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.3 NE1A: Quebrada Barriales

La comparación entre la simulación y los caudales observados, junto con las forzantes de precipitación y temperatura, presentada en la **Figura 7.11** indica que el modelo reproduce la señal del sistema. Además, es posible apreciar algunas discrepancias entre la precipitación y los caudales observados en los años 1984 y 1999, junto con una crecida simulada menor a lo esperado en el año 2006. Desde el punto de vista de la temperatura es posible detectar al menos un registro atípico el año 1991, durante el período de acumulación (temperaturas bajo cero), que escapa a la tendencia de los registros previos y posteriores. De igual modo, y debido a las características propias de elevación de este sistema, se tiene un marcado régimen nival, y los datos observados pueden presentar las mismas dificultades de muestreo comentadas en el caso de NE5.

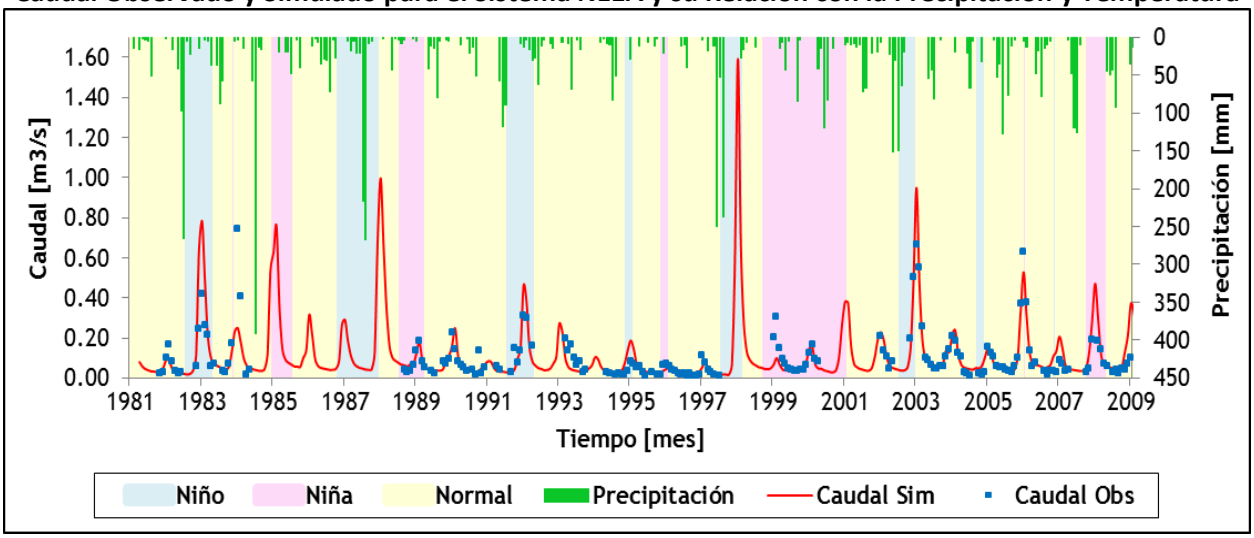
La **Figura 7.12** permite apreciar que la simulación representa mejor las temporadas de crecidas que las de estiaje, donde el modelo tiende a sobreestimar los caudales mínimos. Las mayores discrepancias se observan en la segunda mitad de los 90's y en los últimos años de registro, pero no son exclusivas a estos dos períodos.

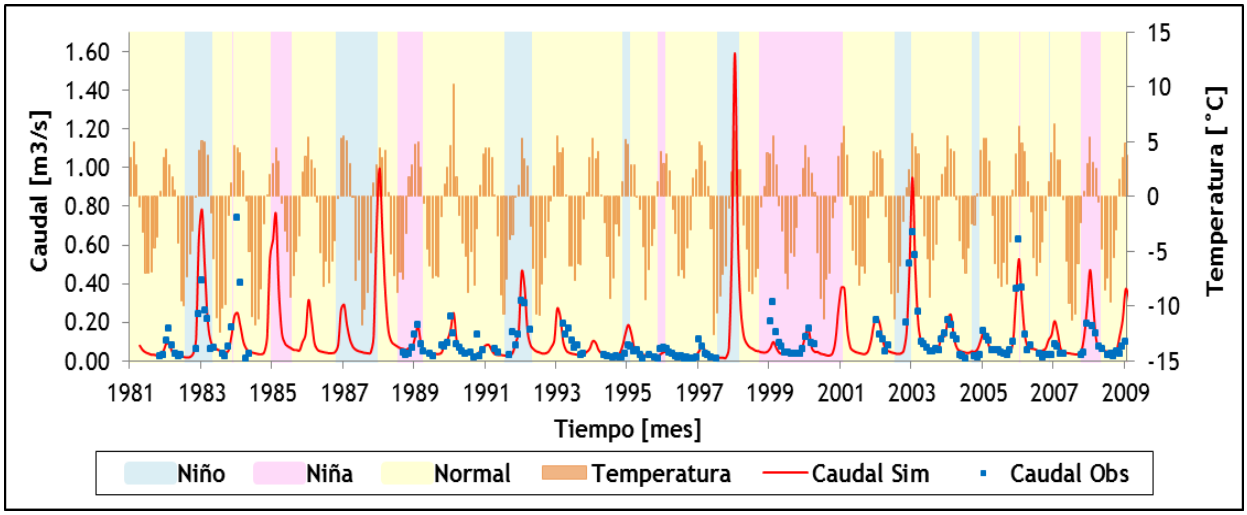
Tal como se aprecia en la **Figura 7.12**, el análisis de los caudales promedio mensuales presentado en la **Figura 7.13** confirma una simulación más cercana a los caudales observados durante la época de crecidas, mientras que el estiaje se encuentra sobreestimado por el modelo. A nivel anual, la **Figura 7.14** muestra que la simulación logra reproducir la variabilidad del sistema, pero con una tendencia general a sobre estimar el caudal medio anual observado. Se debe hacer hincapié que muchos datos observados no están completos para cada año comparado, por lo que las diferencias pueden estar sobrestimadas.

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.15** se considera aceptable, considerando la densidad de datos observados disponibles y las discrepancias en el estiaje. La simulación de la variabilidad del sistema junto con la magnitud de las crecidas explicaría la mayor parte de la correlación obtenida, así como también el hecho de contar los datos observados que si reproducen la estacionalidad del sistema a modelar.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.11
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE1A y su Relación con la Precipitación y Temperatura

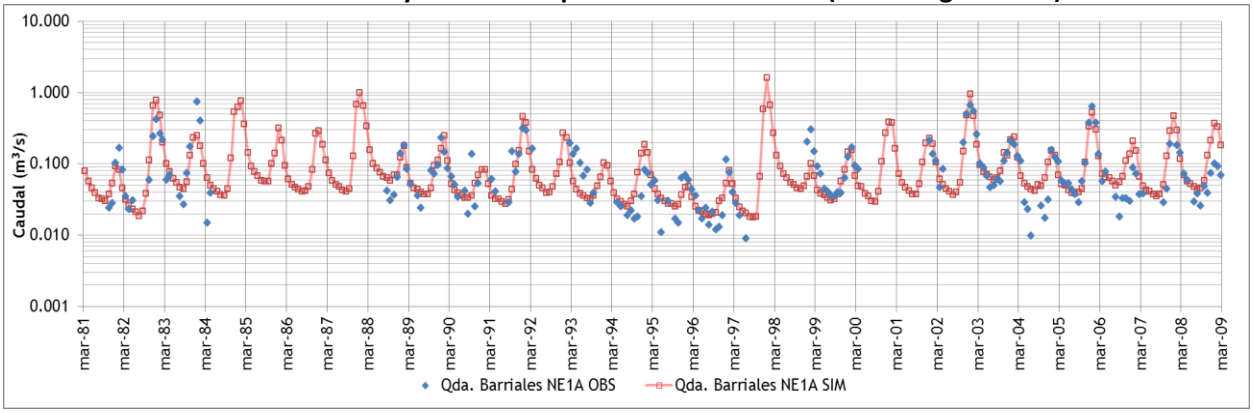




Fuente: Elaboración Propia

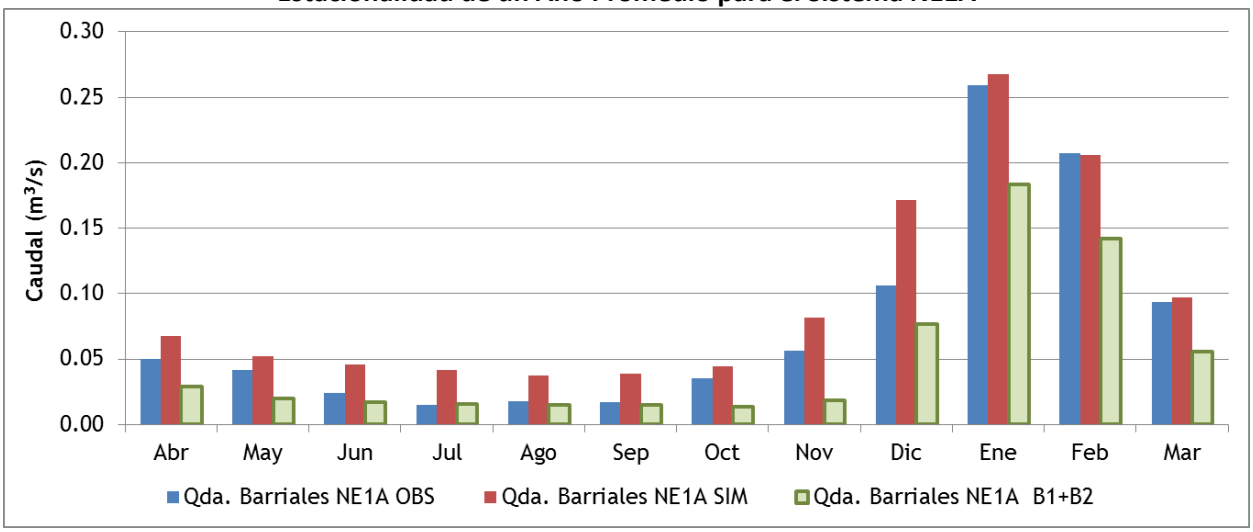
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.12
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE1A (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

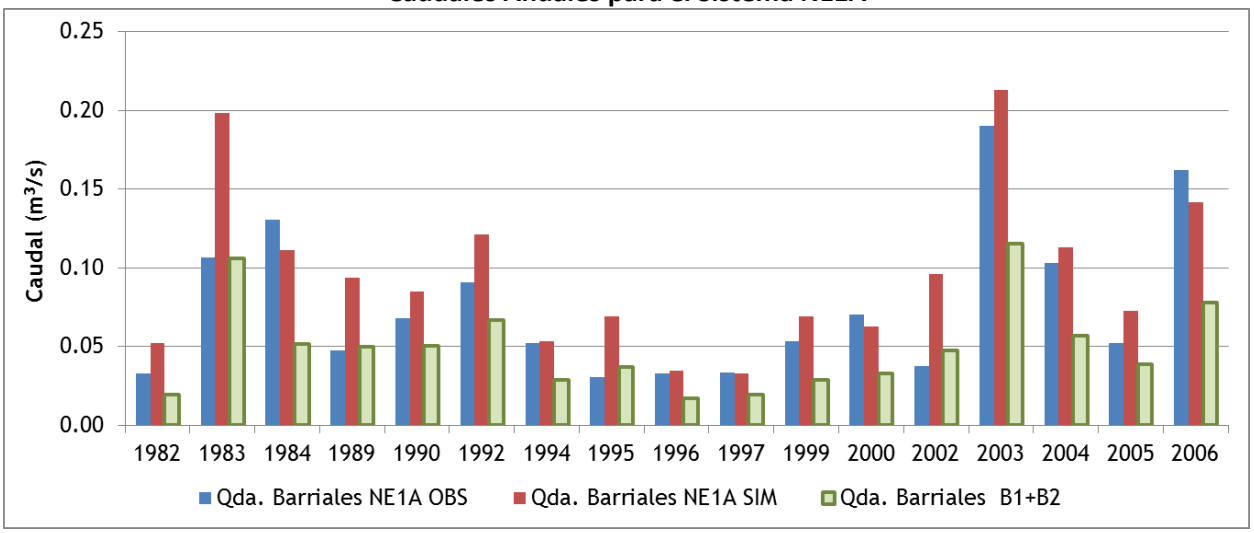
Figura 7.13
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE1A



Fuente: Elaboración Propia

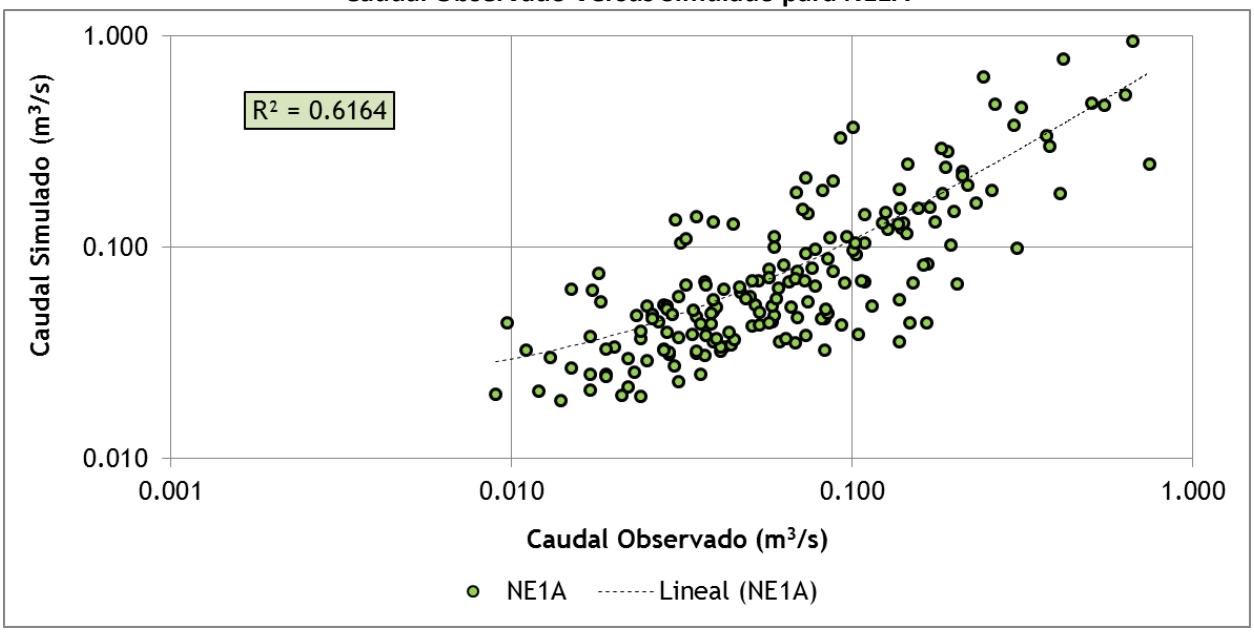
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.14
Caudales Anuales para el Sistema NE1A



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.15
Caudal Observado Versus Simulado para NE1A



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.4 NE3: Río Estrecho después de junta con Barriales

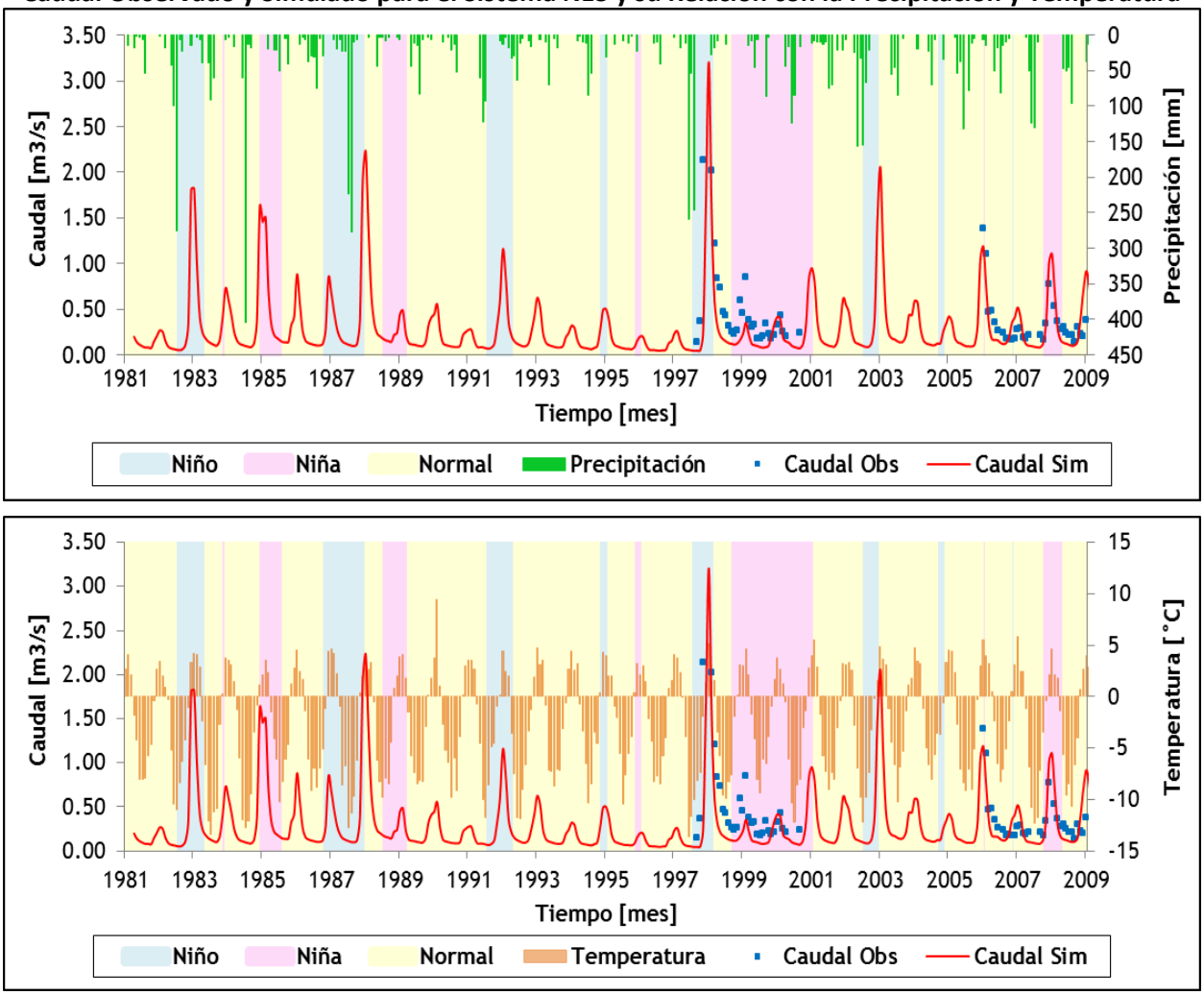
La comparación entre la simulación y los caudales observados presentada en **Figura 7.16**, junto con las forzantes de precipitación y temperatura, indica que existen discrepancias al menos los años 2000 y 2007. En ambos casos las crecidas observadas no se corresponden con el pulso de precipitación respectivo. Respecto a la temperatura, el año 2000 presenta un aumento atípico del caudal observado, durante la temporada de acumulación (temperaturas bajo cero).

En general, los datos observados no son suficientes para asegurar la calidad de la calibración, pero se aprecia correspondencia entre la variabilidad observada y simulada. La **Figura 7.17** muestra que las recesiones simuladas son más bajas, pero que la señal del caudal es reproducible en el período de simulación. Debido a esta subestimación de la recesión, la **Figura 7.18** muestra que la estacionalidad del año promedio se encuentra subestimada, pero que se respeta la ocurrencia de los caudales "peak". En términos de monto, los caudales anuales muestran un comportamiento variable, en general del orden del valor observado, salvo para 1999 (**Figura 7.19**).

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.20** se considera bueno, considerando la densidad de datos observados disponibles y las discrepancias en el estiaje. La simulación de la variabilidad del sistema junto con la magnitud de las crecidas explicaría la mayor parte de la correlación obtenida, así como también el hecho de contar los datos observados que si reproducen la estacionalidad del sistema a modelar, pero que requieren de revisión.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

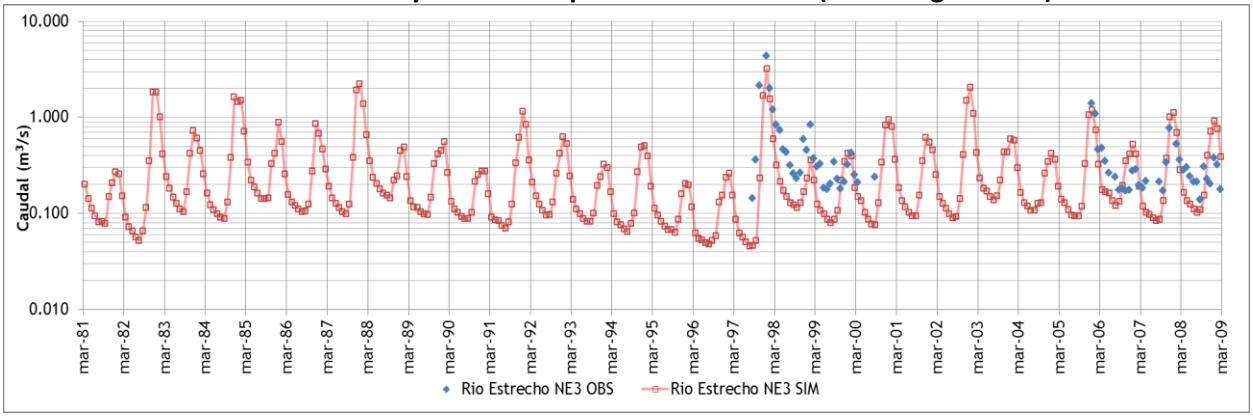
Figura 7.16
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE3 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

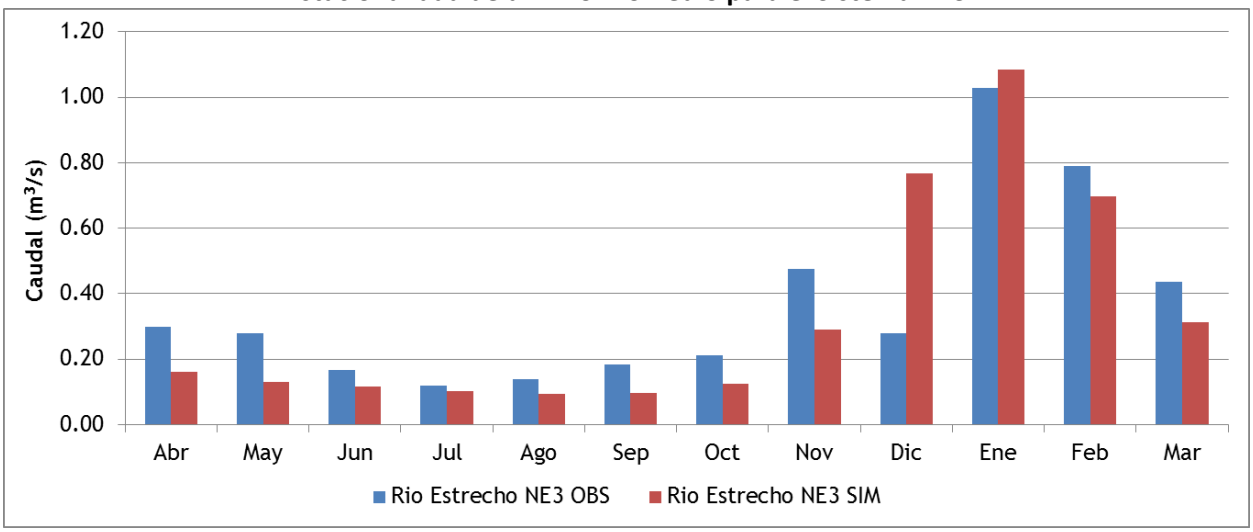
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.17
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE3 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

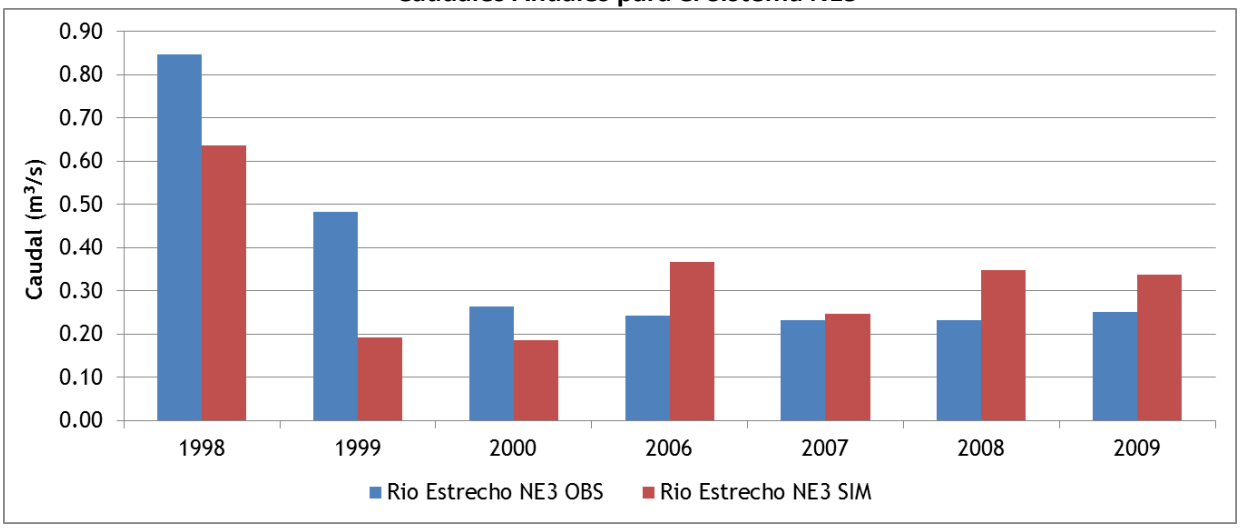
Figura 7.18
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE3



Fuente: Elaboración Propia

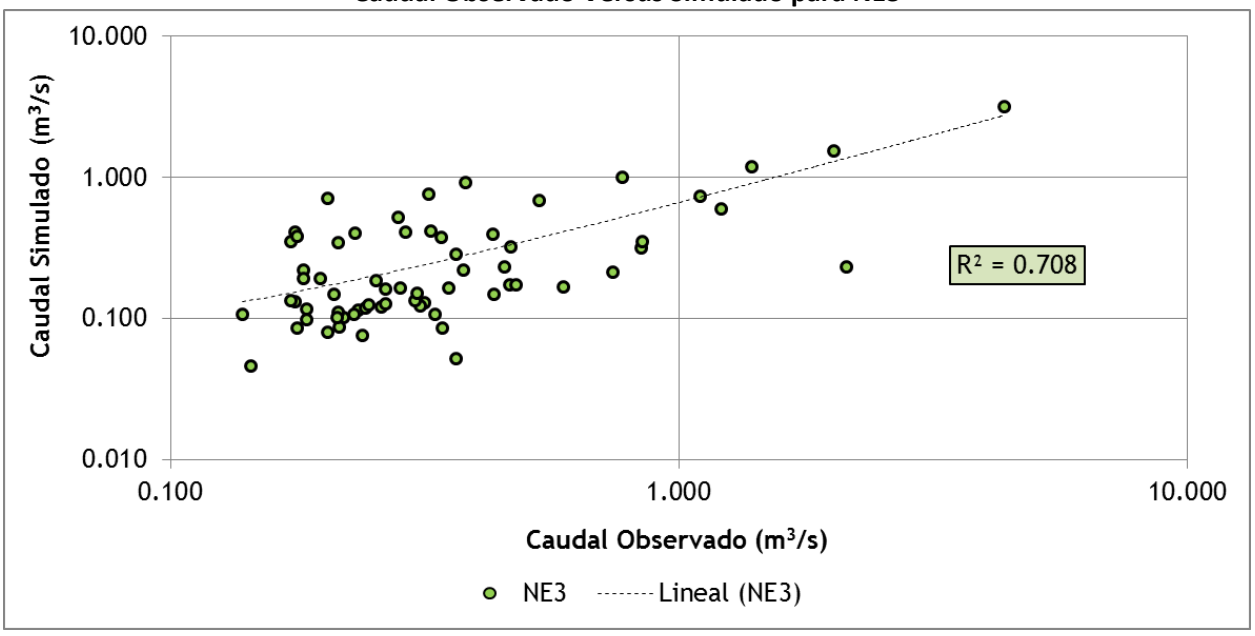
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.19
Caudales Anuales para el Sistema NE3



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.20
Caudal Observado Versus Simulado para NE3



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

7.2.5 PX1: Quebrada agua de la Falda

Como se aprecia en la **Figura 7.21**, la información de Qobs abarca tres temporadas de crecidas, de las cuales una presenta discrepancias con el pulso de precipitación correspondiente (año 2007), mientras que en las otras dos temporadas el modelo logra reproducir los Qobs, tanto en tiempo como en magnitud.

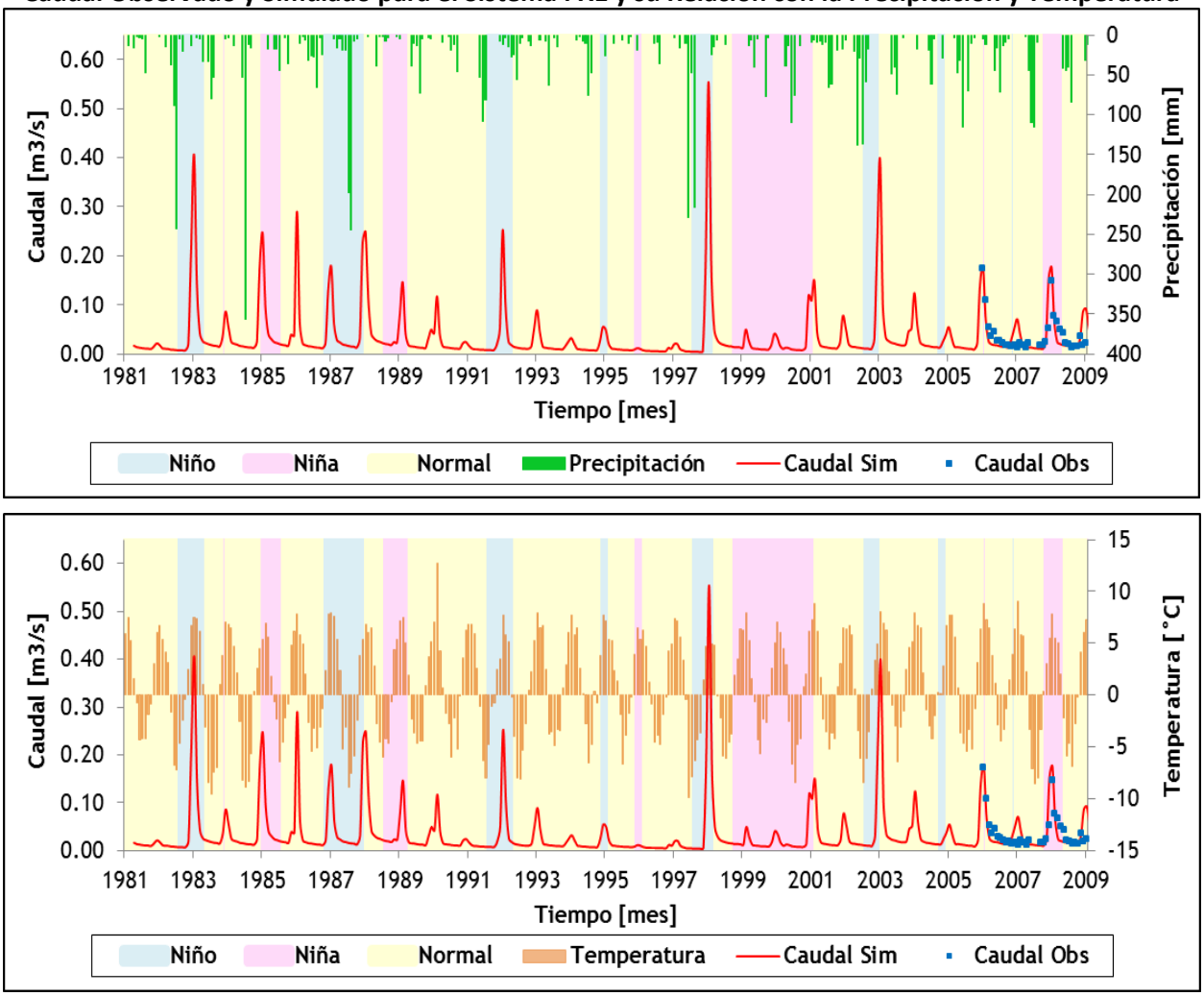
La **Figura 7.22** muestra que si bien la señal de los caudales observados es representada, la recesión para el año 2006 está subestimada, mientras que para el año 2007 no se aprecian cambios estacionales en los datos observados, por lo que difícilmente éstos representan la estacionalidad anual. Pese a esto la estacionalidad del año promedio (**Figura 7.23**) está correctamente representada, haciendo la salvedad que faltan datos observados para el mes de diciembre, y que el año 2007 no representa una señal hidrológicamente válida.

Respecto del caudal medio anual, en la **Figura 7.24**, cabe destacar que la mayoría de los datos observados se encuentran completos para los años 2008 y 2009, donde el ajuste es mejor, mientras que para el año 2006, hay vacíos en la curva de concentración lo que hace que se observe una sobrestimación muy superior a la "real".

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.25** se considera insuficiente. Si bien los puntos se encuentran dispersos equidistantemente de la curva, el problema radica en que en la comparación igualmente se están dejando los datos observados del año 2007, lo que empeora significativamente el índice. Lo importante a destacar en este modelo es que es capaz de reproducir una señal estacional adecuada para un pulso de precipitación, que puede representar los caudales" peak" y el orden de magnitud de los flujos base observados.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

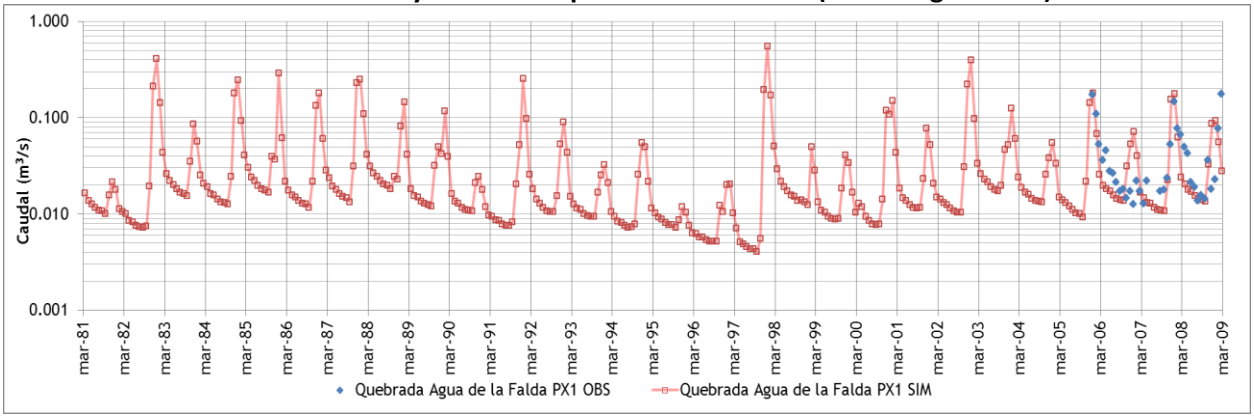
Figura 7.21
Caudal Observado y Simulado para el Sistema PX1 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

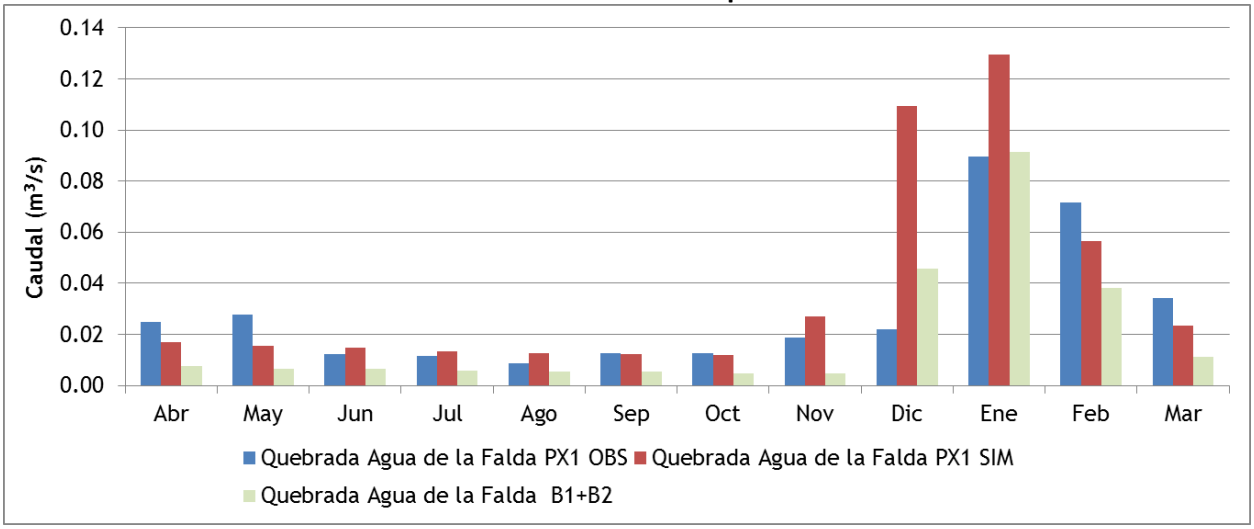
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.22
Caudal Simulado y Observado para el Sistema PX1 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

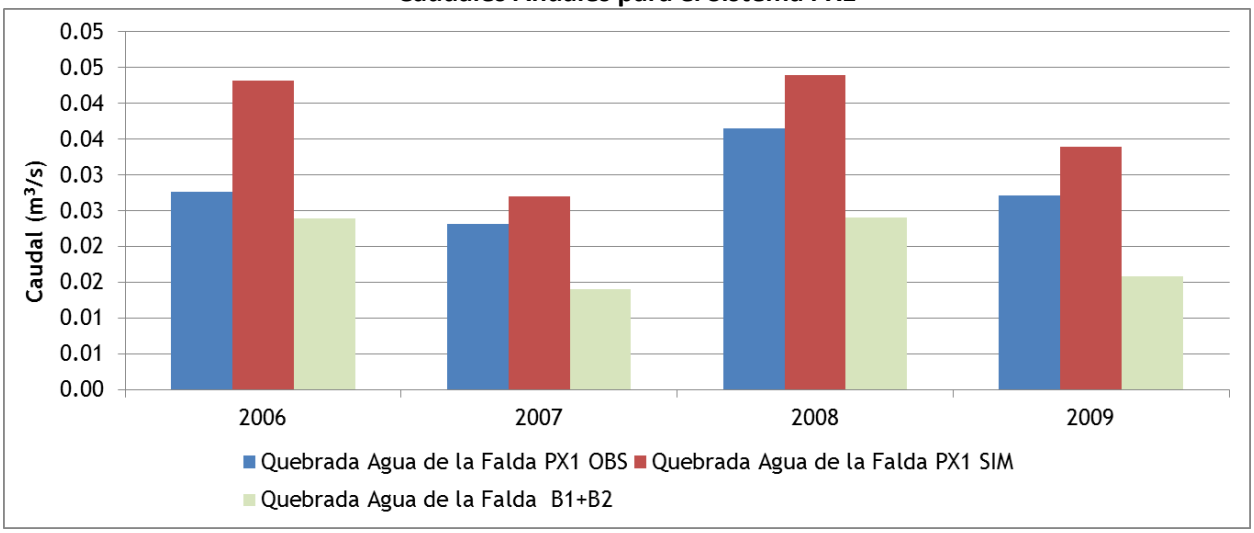
Figura 7.23
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema PX1



Fuente: Elaboración Propia

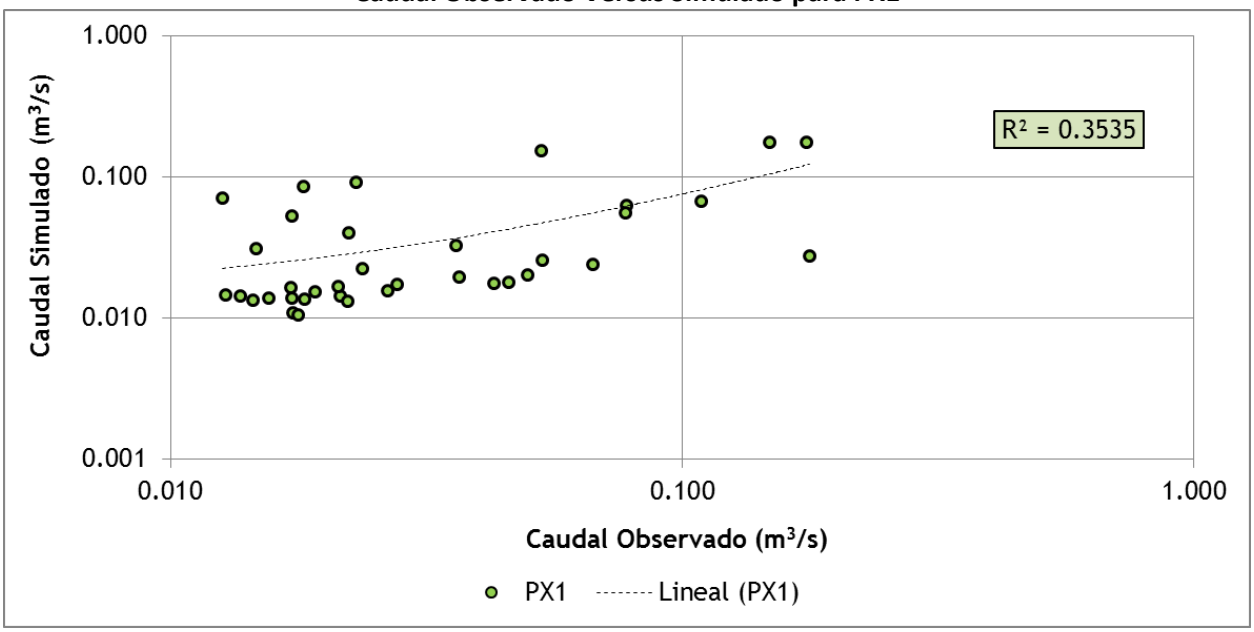
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.24
Caudales Anuales para el Sistema PX1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.25
Caudal Observado Versus Simulado para PX1



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.6 NE4: Río Estrecho después de junta con agua de la Falda

En general, el modelo es capaz de reproducir la señal de los caudales observados, como se aprecia en la **Figura 7.26**. Sin embargo, en el período comprendido entre los años 1989 y 1997 los datos observados de caudales presentan discrepancias con la simulación, así como con algunos pulsos de precipitación, situación que se repite a partir del año 2004. Los problemas se aprecian tanto en las crecidas como en el estiaje. Si bien aportan información respecto del orden de magnitud, no siguen una estacionalidad, lo que dificulta el proceso general de calibración. Las temperaturas indican que la subcuenca seleccionada posee escasa capacidad de almacenamiento sólido del agua, debido a que la mayor parte del año se tiene temperaturas mayores que cero. Por lo tanto, los aumentos de caudal en temporadas que podrían ser de acumulación (temperaturas bajo cero), se explican por el comportamiento de las subcuencas aguas arriba de NE4, posiblemente NE2 y NE1. Sin embargo, para validar este último comentario, se requiere de un análisis de rendimiento para fechas concurrentes, y ver si efectivamente hay una ganancia de caudal o no, y explicarlo por aportes de la parte alta y/o también de la subcuenca en cuestión. Esto escapa de los alcances de este estudio.

Este comportamiento se puede apreciar de mejor manera en la **Figura 7.27**. Entre el período de simulación de 1989 a 1997 los caudales simulados se encuentran subestimados, y se observa que la mayoría de los registros se asemejan a los caudales “peak” simulados en el período. A partir de 1998 la señal de los caudales puede ser reproducida de mejor manera, manteniéndose los problemas de registros para los caudales observados “bajos” que no presentan estacionalidad.

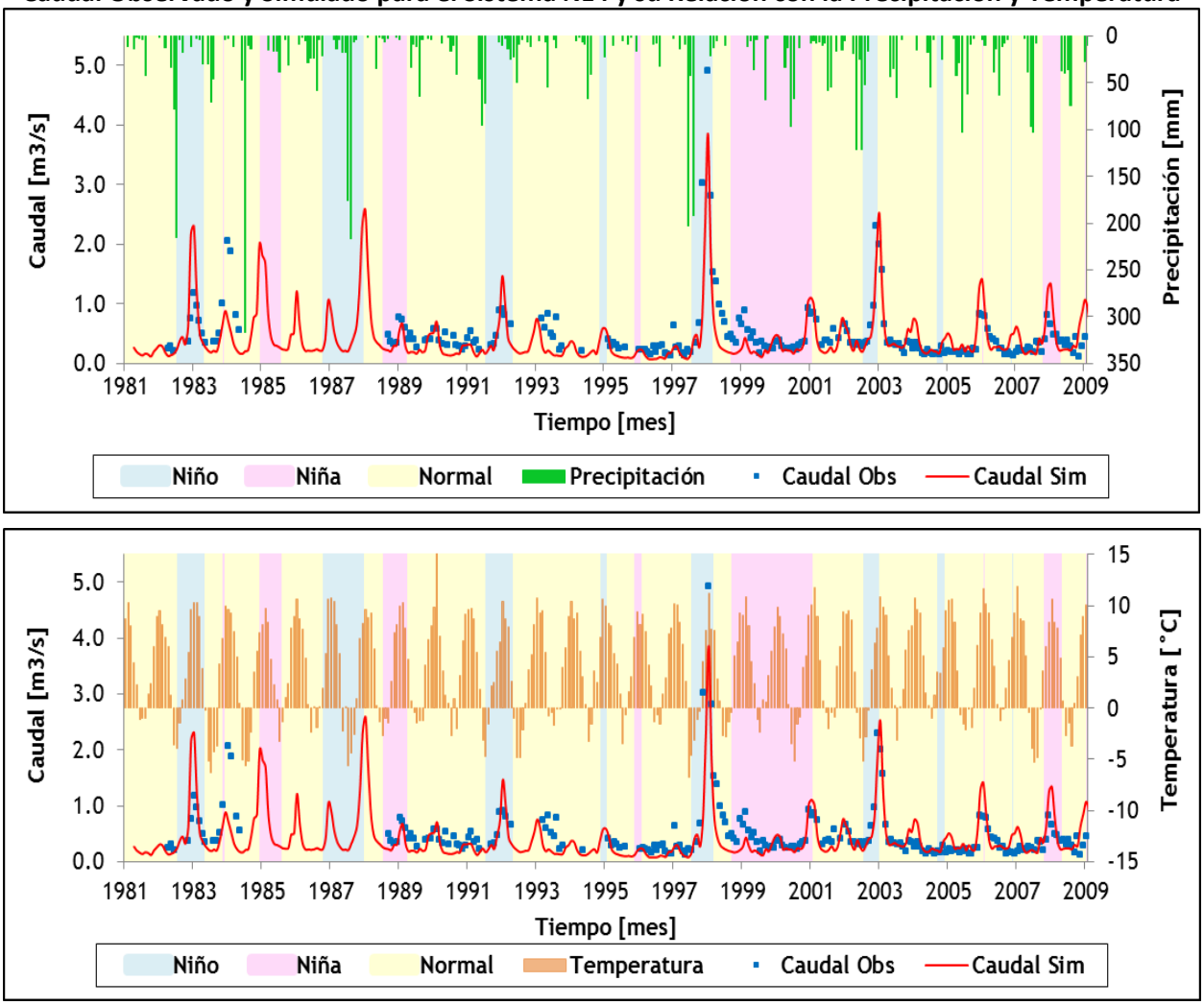
Pese a lo anterior, la estacionalidad del año promedio (**Figura 7.28**) se encuentra bien representada, y la discrepancia observada para el mes de diciembre corresponde al error sistemático de la falta de registros en ese mes.

En términos de montos anuales (**Figura 7.29**), y teniendo en cuenta que en todos los años graficados existen meses sin información, los caudales simulados son capaces de reproducir el volumen anual de escorrentía, manteniendo un orden de magnitud adecuado para la evaluación de algún escenario futuro.

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.30,** se considera adecuado pero perfectible. Existe una ligera acumulación de los puntos bajo la recta debido principalmente a las discrepancias con los caudales de estiaje. Pese a esto, esta cuenca fue la que se calibró con mayor cantidad de información (19 años), por lo que sus parámetros servirán de referencia para todos los sistemas aguas abajo del mismo. En general, hasta este punto, el modelo es capaz de reproducir una señal estacional adecuada para un pulso de precipitación, que puede representar los caudales “peak” y el orden de magnitud de los flujos base observados.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

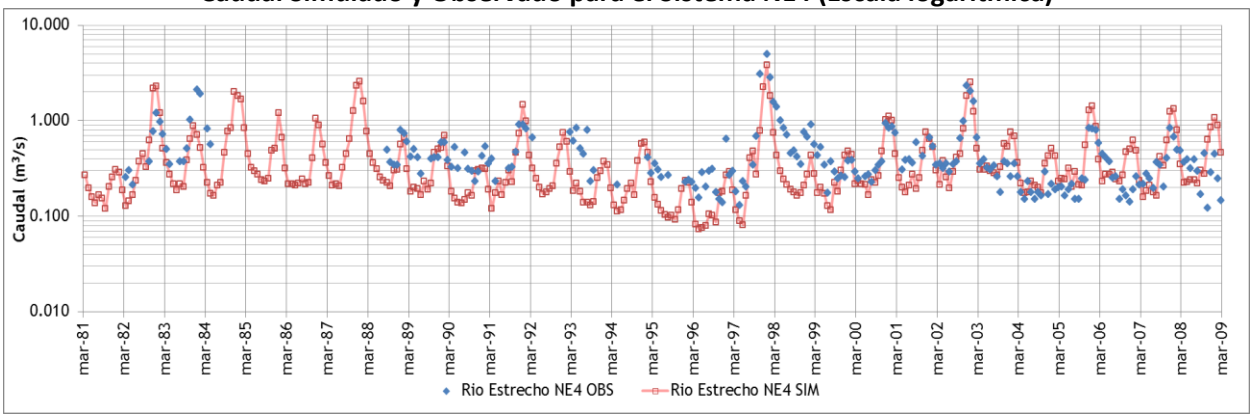
Figura 7.26
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE4 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

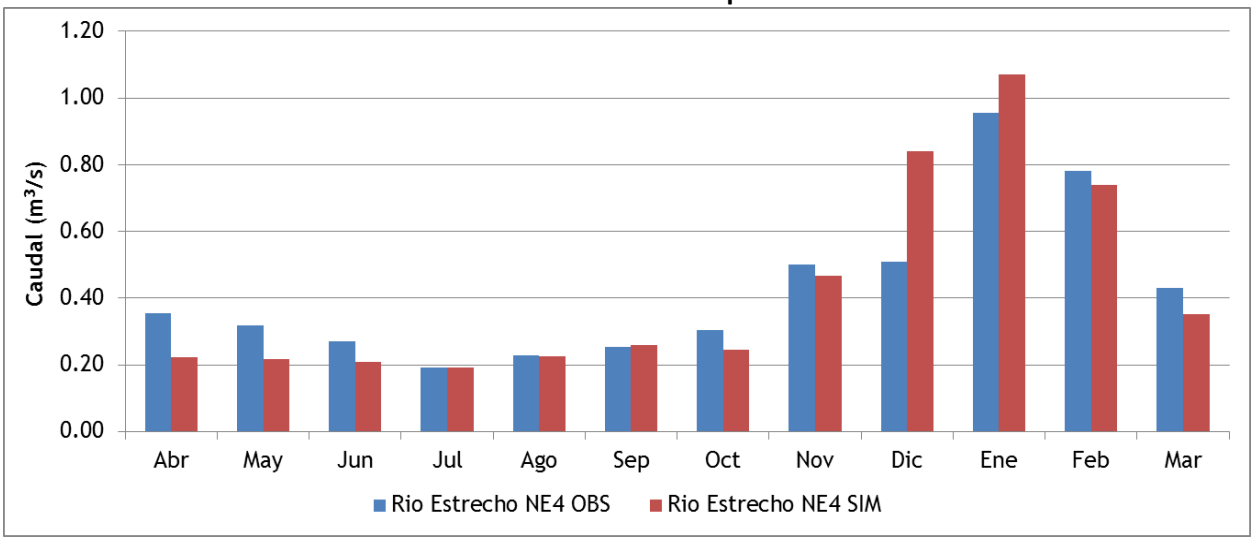
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.27
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE4 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

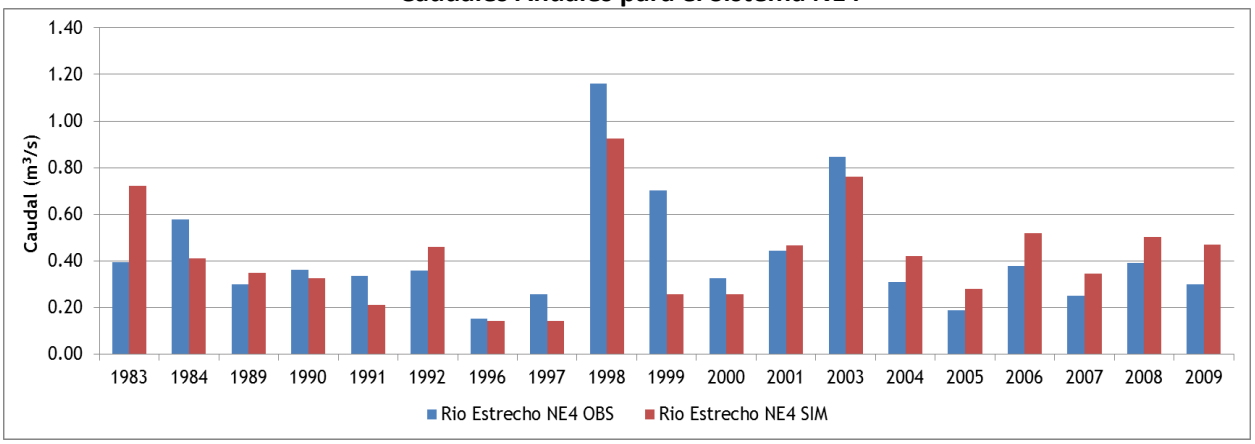
Figura 7.28
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE4



Fuente: Elaboración Propia

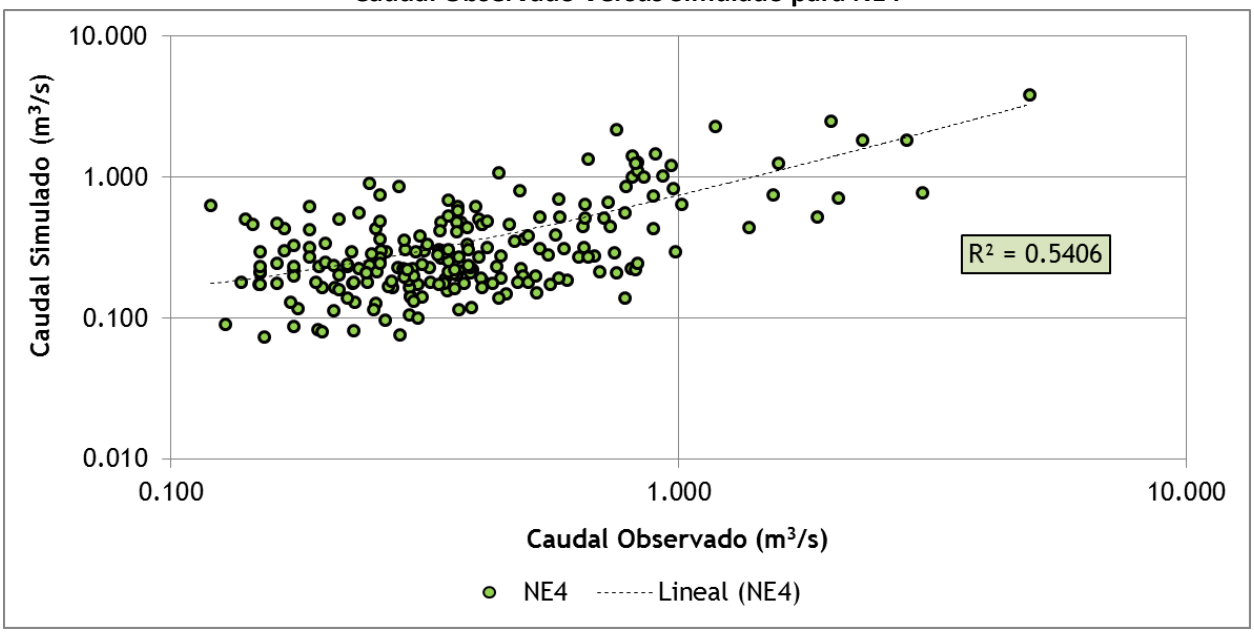
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.29
Caudales Anuales para el Sistema NE4



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.30
Caudal Observado Versus Simulado para NE4



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.7 PX2: Río Estrecho antes de junta con río Toro

La información disponible de caudales observados en la cuenca es insuficiente para realizar una calibración de los parámetros de PX2. Sin embargo, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración, el cual mostró una baja respuesta de la escorrentía total y la estacionalidad simulada en el cierre de la cuenca, producto de que esta subcuenca es muy pequeña en área, y el caudal pasante está dominado por los sistemas aguas arriba de este punto. Por lo tanto, se han empleado los mismos parámetros obtenidos en NE4, única subcuenca (SC) aportante a PX2.

De la **Figura 7.31** es posible apreciar que los caudales simulados responden a los pulsos de precipitación correspondientes. Se mantiene el hecho de que la crecida del año 1997-98 es la más importante en el registro, y en el desempeño para los años 2006 a 2009, el modelo reproduce una estacionalidad que los datos observados no reportan, en particular para el año 2008 y 2009. Si se analiza con más cuidado, se puede observar que los años 2008 y 2009 presentan similares pulsos de precipitación pero un comportamiento muy diferente en términos de la escorrentía registrada. Además, como se está analizando la subcuenca modelada asociada a este control fluviométrico, esto es, CI_PX2 de la **Tabla 3.1,** las temperaturas que dominan esta subcuenca son muy altas, por lo que el aporte en recurso que hace el sistema ocurre en el período de deshielo.

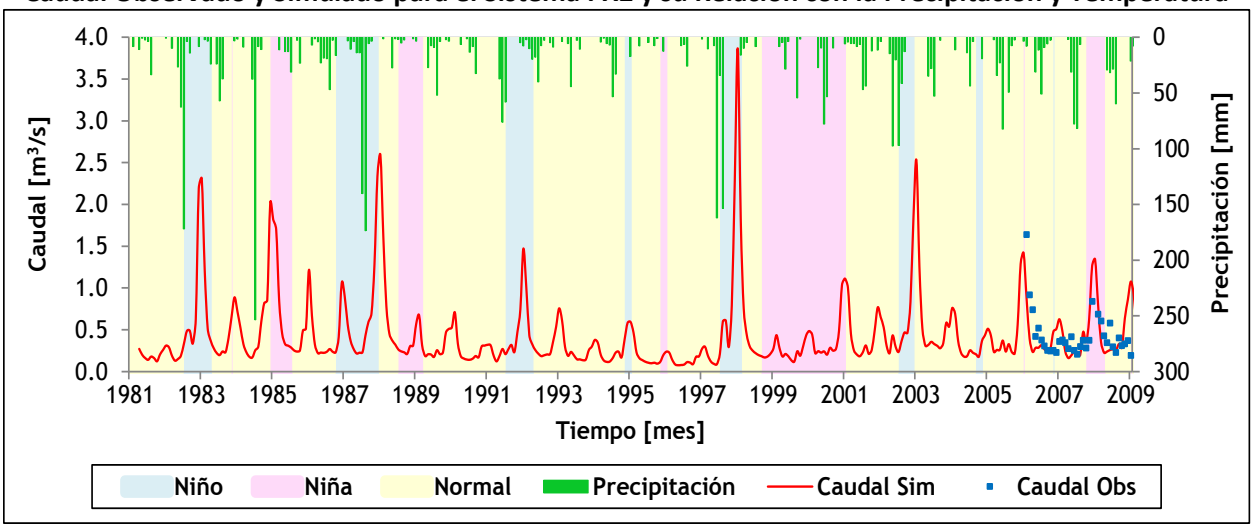
En la **Figura 7.32** se aprecia un buen ajuste de la simulación en los 3 años con observaciones, salvo en el último año de registro, donde los caudales medidos no dan cuenta de la crecida simulada. También se aprecian algunos caudales observados fuera de la tendencia, durante la temporada de estiaje. La falta de registros durante la temporada de crecidas produce que los caudales medios mensuales observados no den cuenta de la estacionalidad esperada en la zona y explica la discrepancia observada en la **Figura 7.33**, respecto a la estacionalidad simulada en los años con registros.

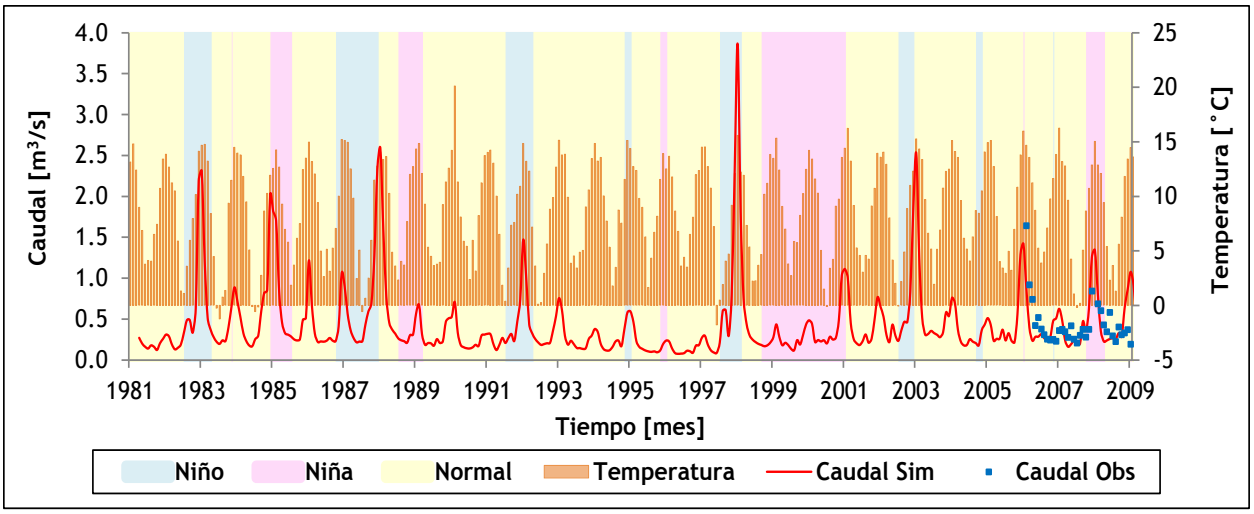
En cuanto a los totales anuales indicados en la **Figura 7.34**, la mayor diferencia se produce el año 2006 y se debe a un registro incompleto de los caudales de ese año.

En la **Figura 7.35** se presenta el coeficiente de determinación R^2, de bajo valor, donde se aprecia que las mayores diferencias se producen en los caudales de estiaje.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.31
Caudal Observado y Simulado para el Sistema PX2 y su Relación con la Precipitación y Temperatura

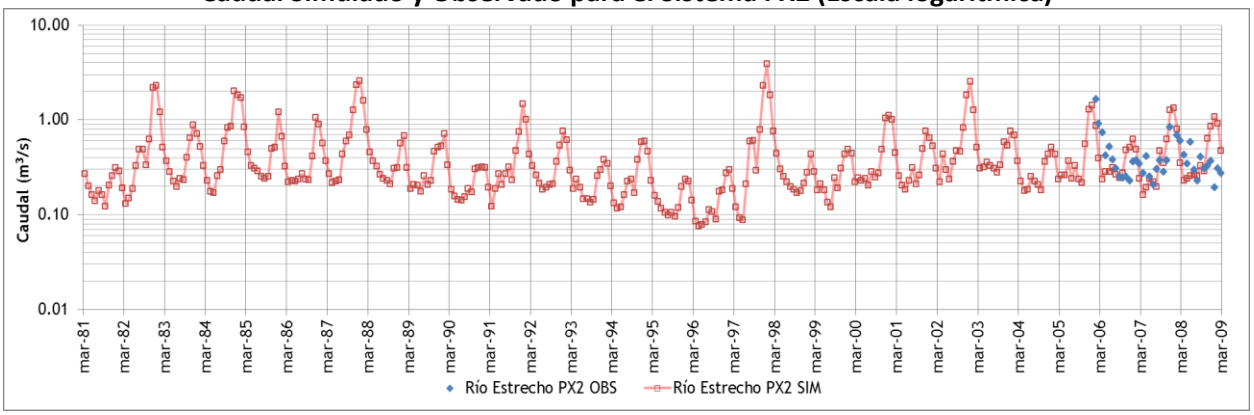




Fuente: Elaboración Propia

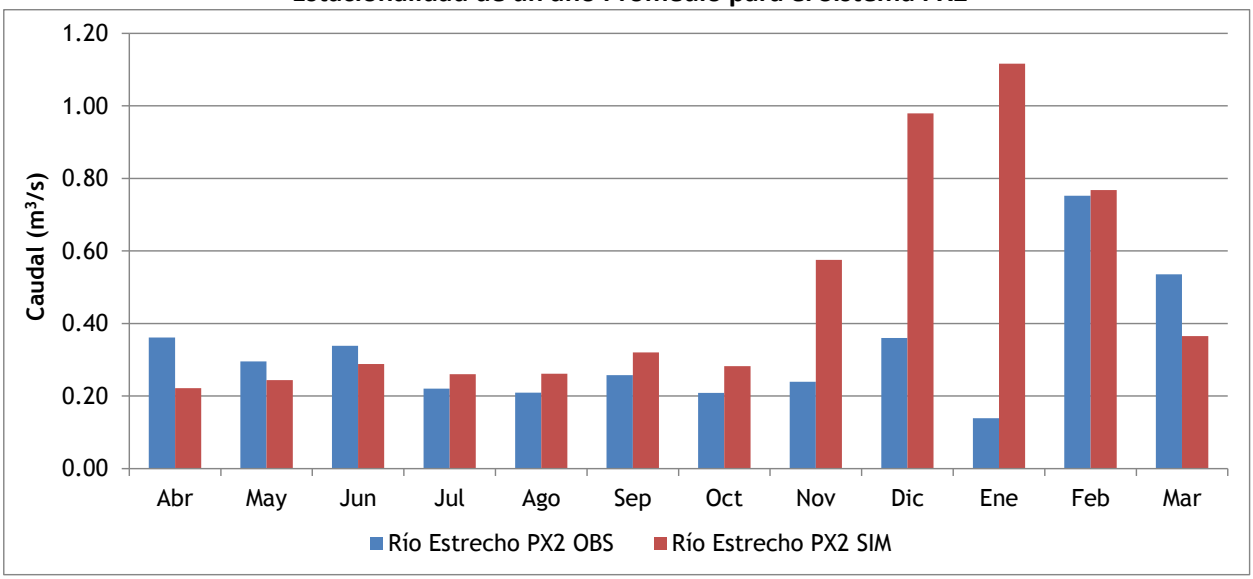
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.32
Caudal Simulado y Observado para el Sistema PX2 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

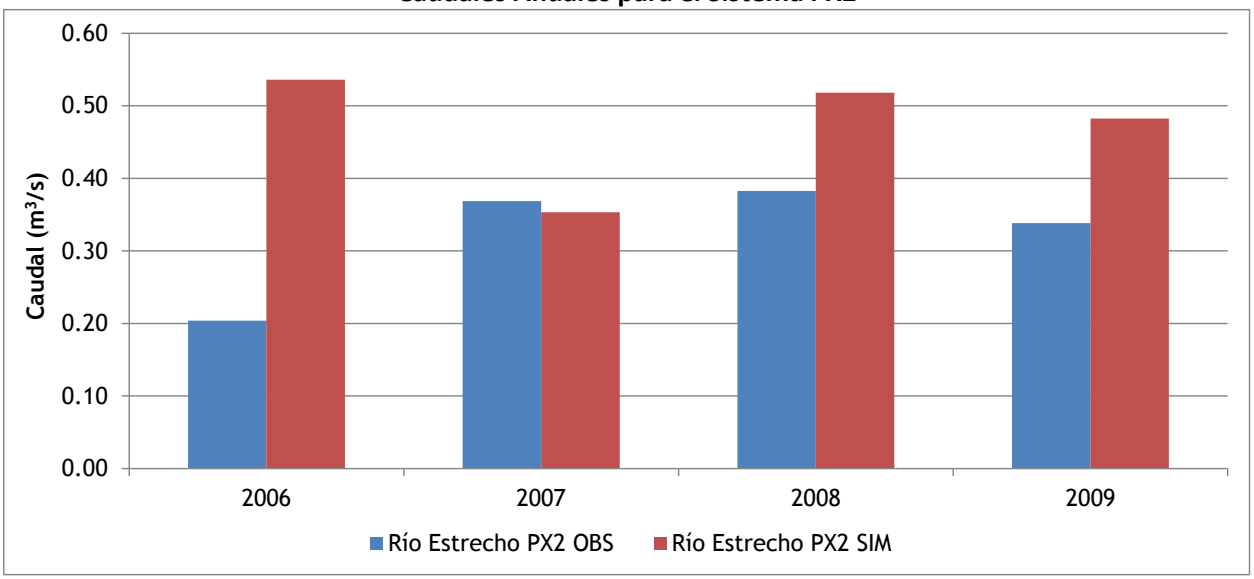
Figura 7.33
Estacionalidad de un año Promedio para el Sistema PX2



Fuente: Elaboración Propia

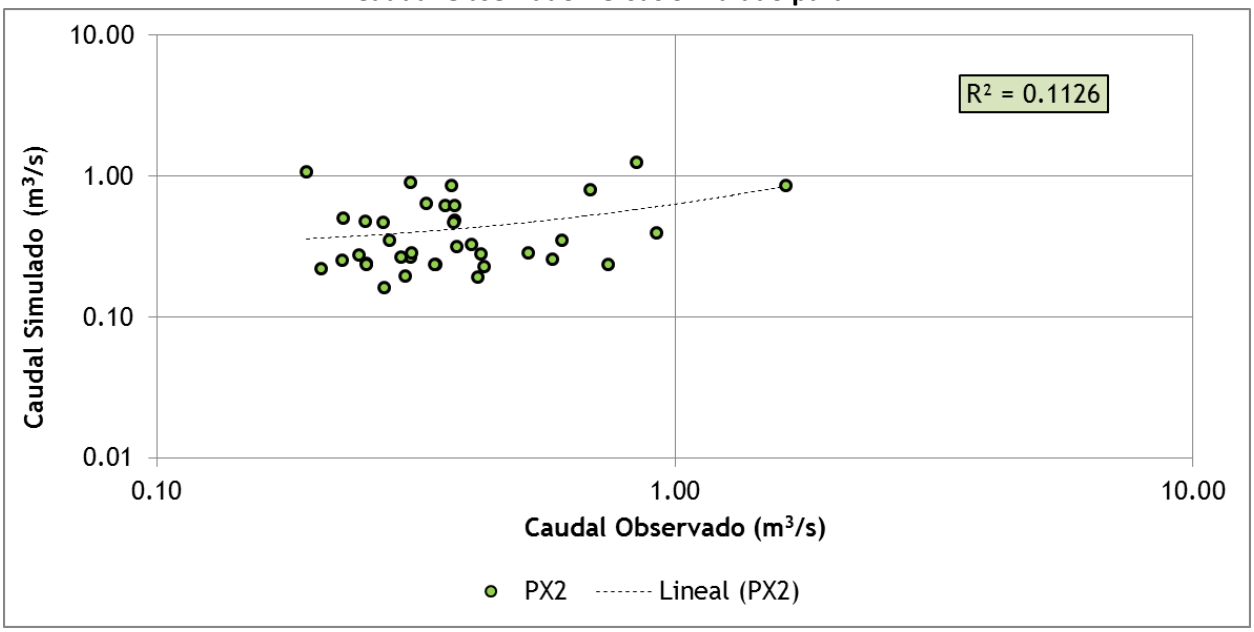
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.34
Caudales Anuales para el Sistema PX2



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.35
Caudal Observado Versus Simulado para PX2



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.8 CN2-CN2N: Río Toro en junta con quebrada Sin Nombre

Considerando la importancia relativa entre CN2 y CN2N, respecto a los aportes totales esperados en la estación de aforo CN2, se ajustaron principalmente los parámetros de CN2, mientras que los parámetros de CN2N tomaron la base de otras cuencas laterales aportantes previamente calibrados. Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros de CN2N para reproducir el hecho de que esta cuenca tiene una orientación este-oeste, y al estar ubicada geográficamente más al norte que CN2, la cobertura nival debiese derretirse antes, por lo que debiese reproducirse un caudal "peak" con un mes de desfase respecto del registrado en CN2. Esto es lo que se muestra en la **Figura 7.36,** en donde se concentra el análisis para los años 2005-2009, y puede observarse que los caudales peak de CN2N ocurren en promedio un mes antes que los simulados para CN2. Aun así, el tamaño de la subcuenca CN2N respecto de CN2 es pequeño, por lo que un ajuste de parámetros en este sistema no controla el volumen de la escorrentía a calibrar en el control fluviométrico CN2.

Complementando este análisis, también es posible observar que la correspondencia de los pulsos de precipitación y los caudales simulados es adecuada. Por ejemplo, el pulso de precipitación del año 2007 tiende a corresponderse con un caudal "peak" simulado del orden de 0.5 m^3/s, mientras que el 2008, el pulso es menor, y se reproduce un caudal "peak" del orden de 0.4 m^3/s. Este último difiere del año 2006, dado que, pese a que ambos años tienen similares pulsos de precipitación, la temperatura mínima del año 2006 tiene una magnitud bastante más baja que la del año 2008, por lo que ese año no se acumuló la suficiente nieve para reproducir un "peak" como el que se observó el 2008. El comportamiento de la serie completa, en donde el caudal simulado es la suma de lo que se genera en CN2N y CN2 puede observarse en la **Figura 7.37**.

Si bien la mayoría de los caudales "peak" tienen su explicación por la temperatura en el período de acumulación y por la magnitud del "peak" de precipitación, el ajuste de parámetros encontrado no pudo reproducir que la crecida más importante del sistema ocurriese el año 1997-98, sino que ocurre el año 1988, pero presenta un pulso del mismo orden de magnitud que el año 1988. Aun así la temperatura del año 1997-98 fue más baja, por lo que debiese haber acumulado más. Una segunda iteración de ajuste de estos parámetros es posible en una segunda etapa de revisión.

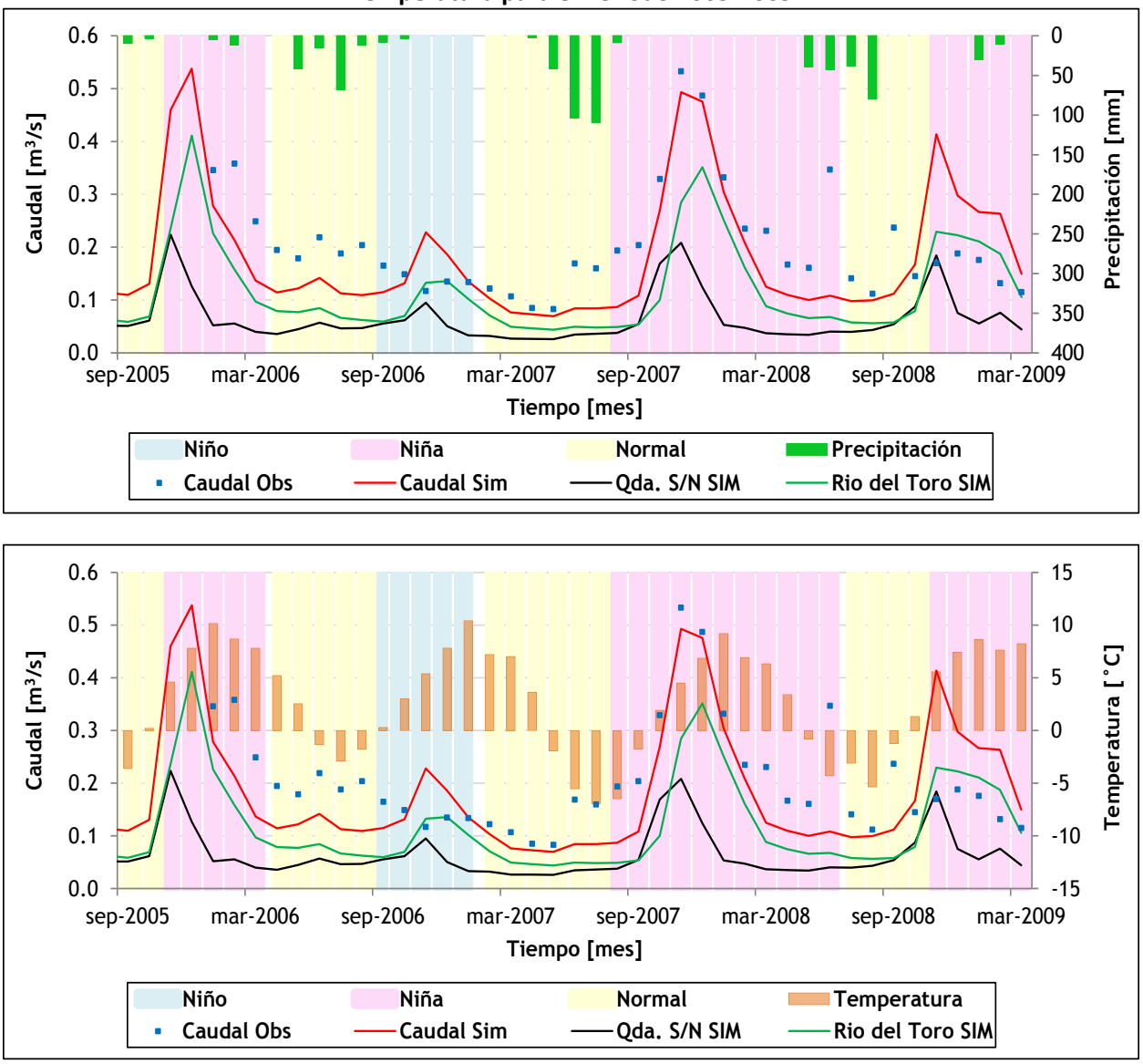
En la **Figura 7.38** se observan diferencias considerables entre la simulación y los registros realizados entre 1993 y 1997, lo cual impacta en los caudales medios simulados (**Figura 7.39**), especialmente durante la temporada de estiaje

Se buscó obtener un buen ajuste de los caudales máximos, pero no fue posible reducir el caudal base simulado durante el estiaje, lo cual explica los resultados obtenidos en los caudales anuales de los últimos tres años de registro, indicados en la **Figura 7.40**.

Pese a las diferencias estacionales y anuales, el impacto en el coeficiente de determinación R^2 es aceptable (**Figura 7.41**), pero se presentan discrepancias en los caudales bajos, en años con escasa precipitación.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

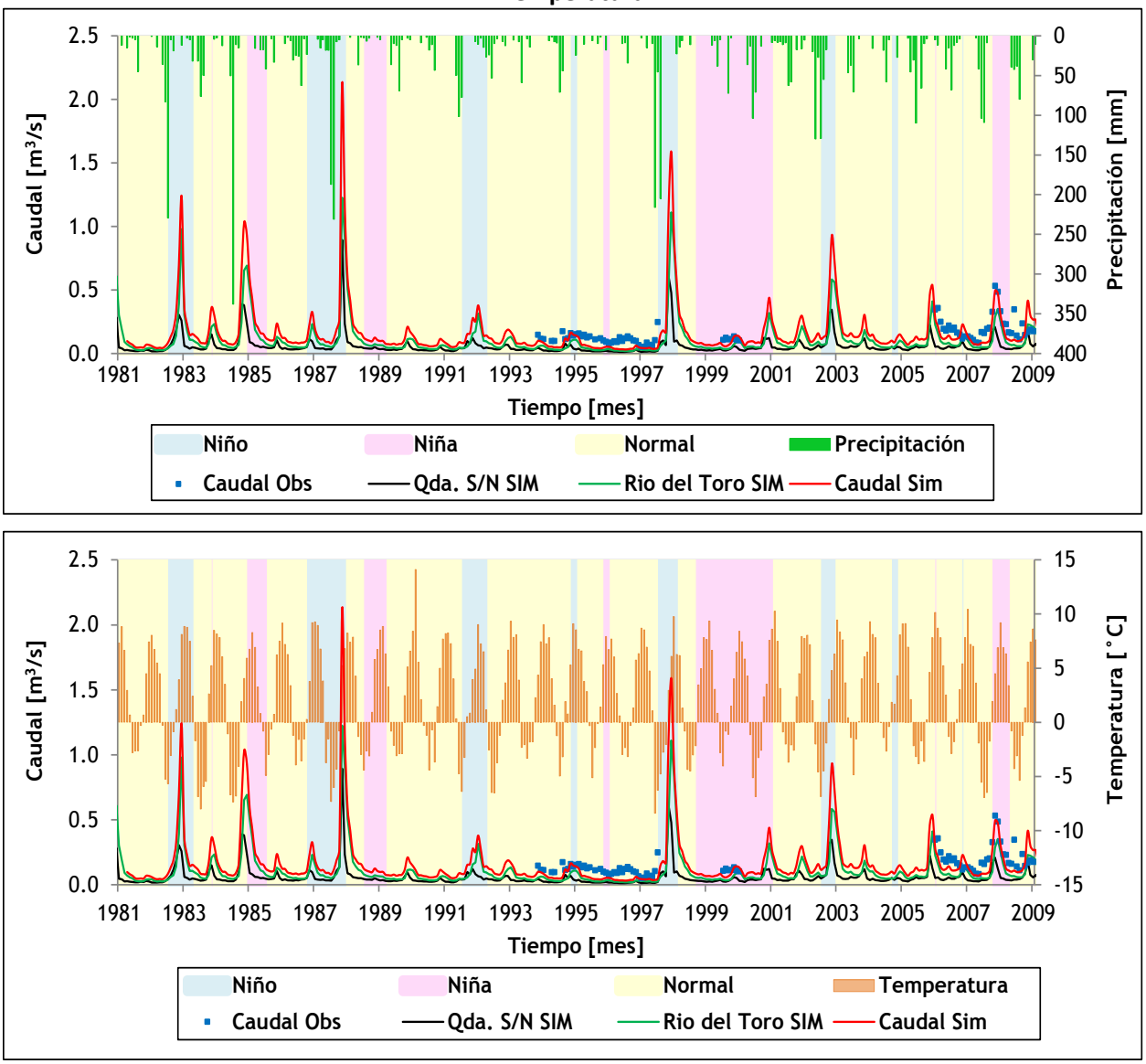
Figura 7.36
Caudal Observado y Simulado para el Sistema CN2-CN2N y su Relación con la Precipitación y Temperatura para el Período 2005-2009



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

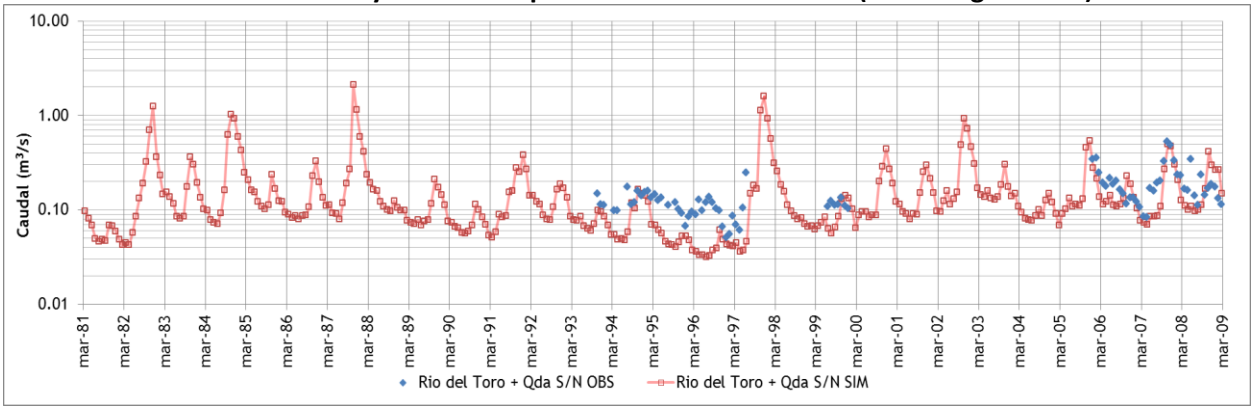
Figura 7.37
Caudal Observado y Simulado para el Sistema CN2-CN2N y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

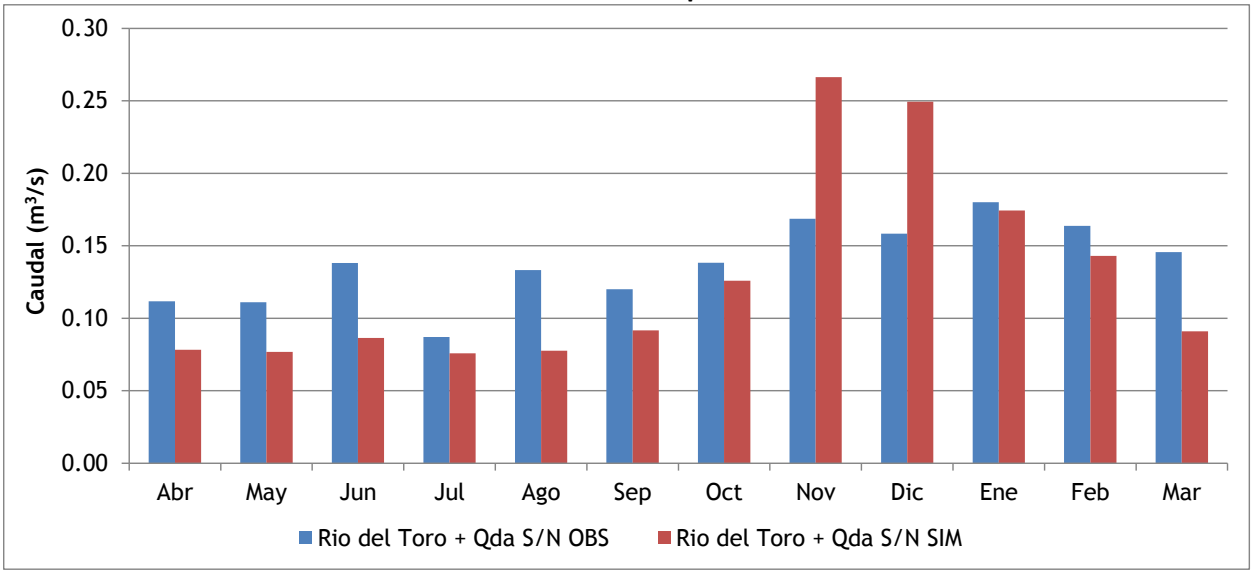
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.38
Caudal Simulado y Observado para el Sistema CN2-CN2N (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

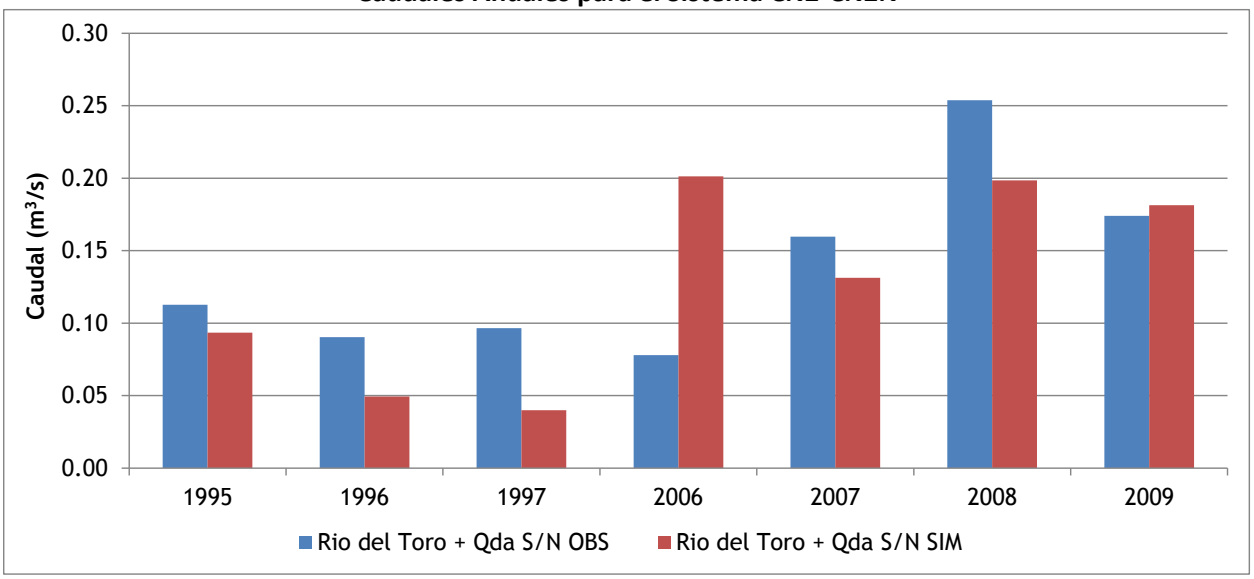
Figura 7.39
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema CN2-CN2N



Fuente: Elaboración Propia

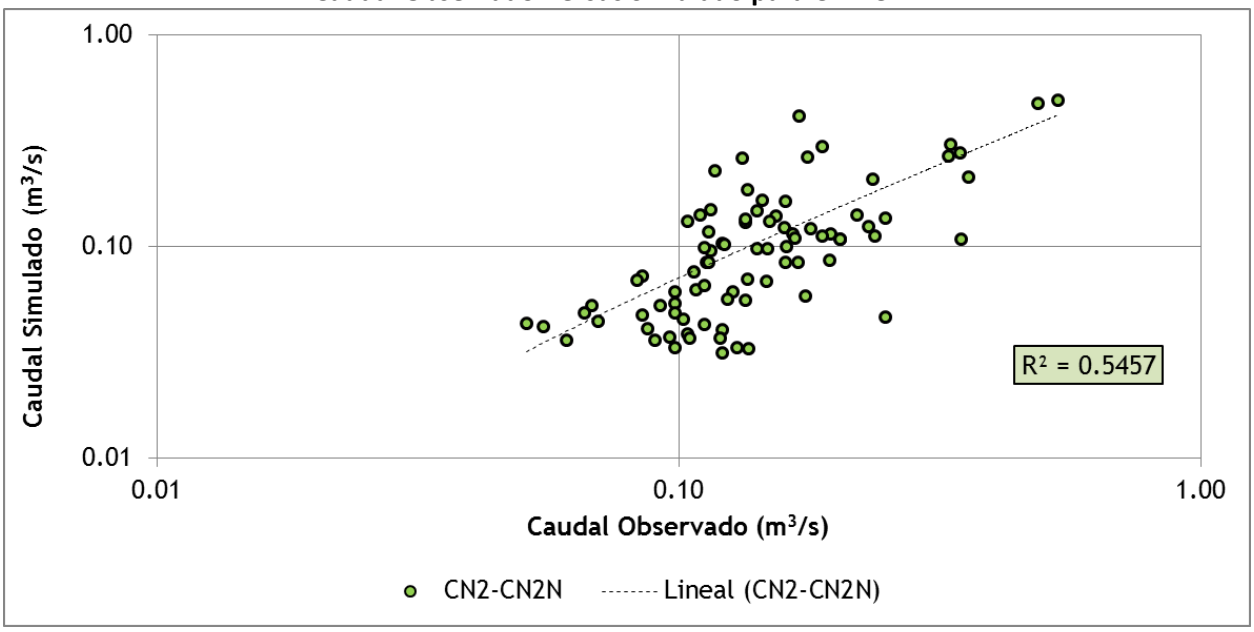
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.40
Caudales Anuales para el Sistema CN2-CN2N



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.41
Caudal Observado Versus Simulado para CN2-CN2N



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.9 PX3: Río Estrecho después de junta con Toro

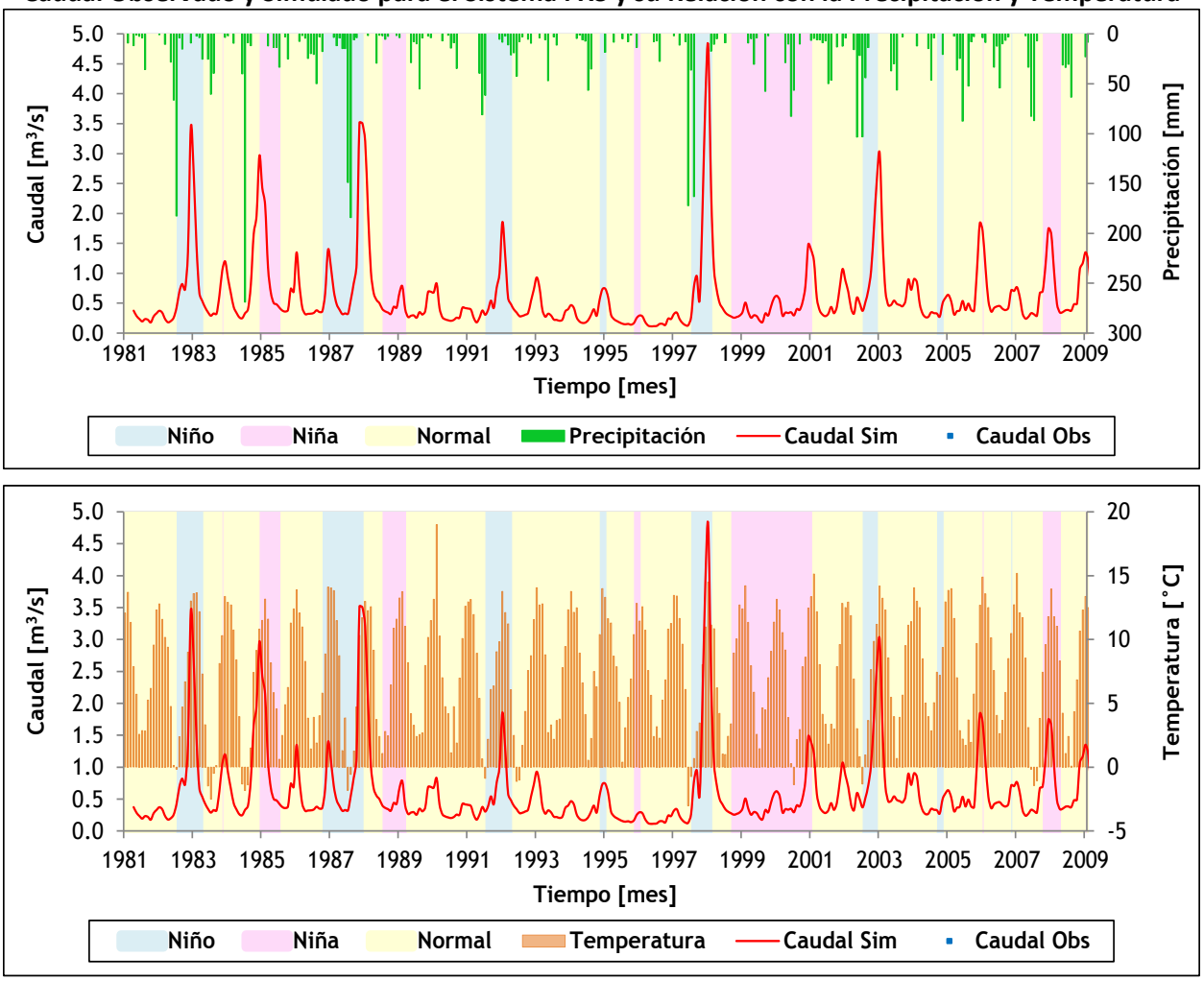
El sistema PX3 no posee información de caudales observados en el periodo de modelación, por lo cual se emplearon los parámetros utilizados en NE4 y replicados en PX2. En las siguientes figuras se presenta el comportamiento histórico de los caudales en el sistema (**Figura 7.42** y **Figura 7.43**), la estacionalidad (**Figura 7.44**) y los totales anuales simulados (**Figura 7.45**).

La Figura muestra que todas las crecidas simuladas se corresponden por la ocurrencia de los pulsos de precipitación respectivos. La máxima crecida está reportada para el episodio del niño en 1997-98. Esta subcuenca fue una de las que sufrieron modificaciones respecto de las consideraciones iniciales de la ubicación de los controles fluviométricos, puesto que dicho control mide un aporte esporádico de una quebrada lateral que antes no estaba considerada. El tamaño de esta subcuenca también es pequeño y sus parámetros sólo influencian el comportamiento de este sistema en el deshielo, siendo los sistemas aguas arriba de PX2 los que controlan el volumen de escorrentía y estacionalidad.

Por otra parte, la estacionalidad da cuenta de un comportamiento consecuente con lo esperado, ya que el máximo caudal presente en enero en PX2, se adelanta ligeramente en PX3 hacia diciembre-enero. Además, los caudales anuales reflejan las magnitudes relativas de la precipitación empleada y de los resultados generados en los sistemas ubicados aguas arriba de PX3.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

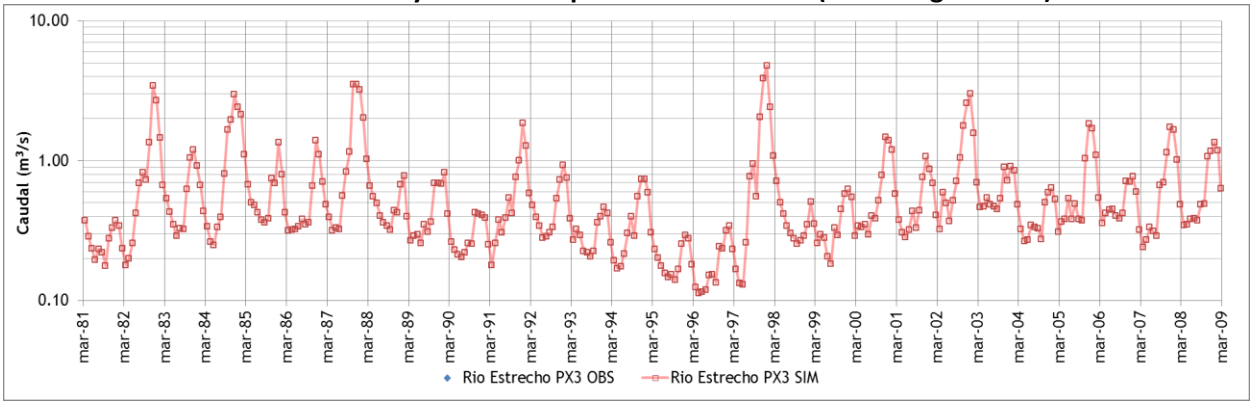
Figura 7.42
Caudal Observado y Simulado para el Sistema PX3 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

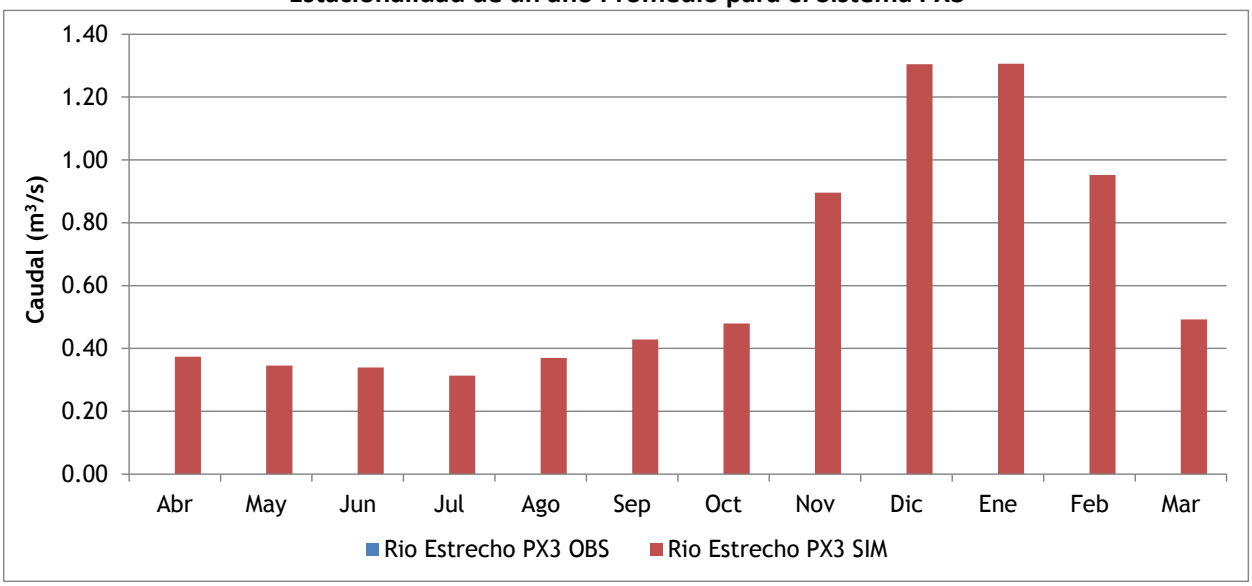
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.43
Caudal Simulado y Observado para el Sistema PX3 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

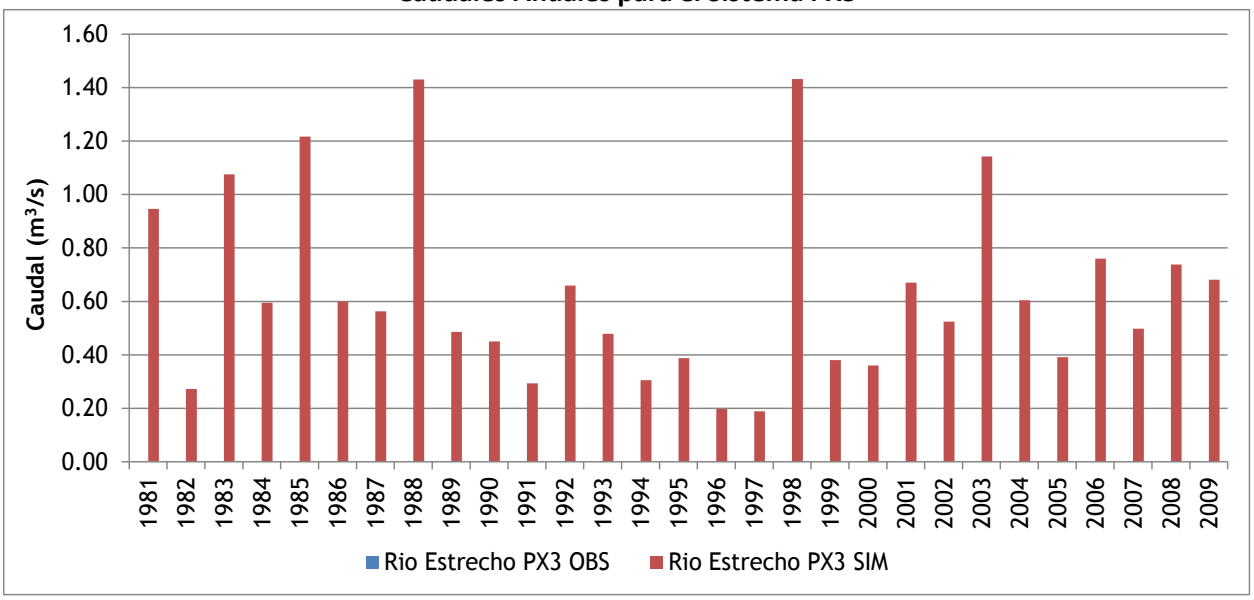
Figura 7.44
Estacionalidad de un año Promedio para el Sistema PX3



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.45
Caudales Anuales para el Sistema PX3



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.10 NE7: Río Blanco

Para este caso, la SC asociada al control fluviométrico NE7 sí representa la totalidad de la cuenca del río Blanco antes de la junta con el río Estrecho, lo que después se traduce en el nacimiento del río Chollay.

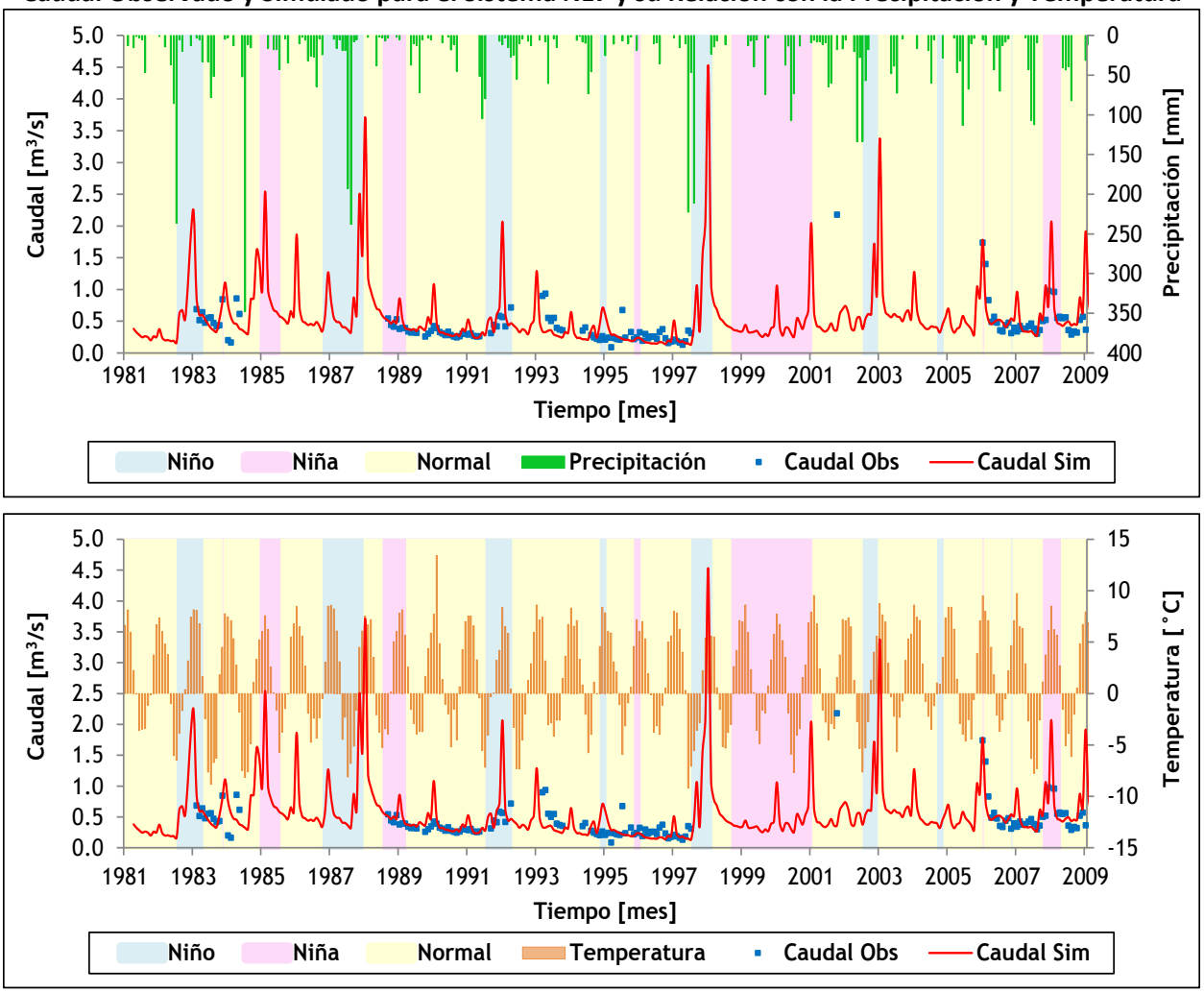
La **Figura 7.46** muestra que los flujos base simulados presentan una estacionalidad adecuada, pero que no se corresponde en general con la información observada. Las mayores crecidas están asociadas a los mayores pulsos de precipitación sumada a la presencia de grandes volúmenes de acumulación debido a temperaturas frías extremas en el período de invierno.

En general, en la **Figura 7.47** se aprecia un ajuste aceptable de los caudales de estiaje simulados, respecto a los caudales observados. Sin embargo, no existe información suficiente en los periodos de crecidas, además de posibles errores de monitoreo, como ocurre con los caudales de enero y febrero de 1984, marzo de 1995, octubre de 2001, entre otros. En la **Figura 7.48** se muestra que las mayores diferencias se encuentran en la temporada de mayores caudales (primavera-verano). A nivel anual, esto implica que los caudales simulados tienden a ser mayores que los observados, como se aprecia en la **Figura 7.49**.

En términos de la evaluación del desempeño del modelo, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.50** indica que la simulación no da cuenta de los caudales medidos en la zona, los flujo base son simulados en magnitud, pero no se tiene información estacional para un mejor ajuste. Además, de acuerdo a la minuta técnica de HIDROMAS, existe una extracción del recurso aguas arriba de la sección de aforo manual, por lo que los caudales aforados tampoco son representativos del régimen natural. Lo que se ha privilegiado aquí es ajustar los parámetros de NE7 para que sean consistentes con los pulsos de precipitación que han dado origen a importantes crecidas en los años 1983, 1987/88 y 1997/98, y que el aporte de esta subcuenca mejore la calibración del control fluviométrico NE8 debido al gran aporte en términos de área que significa este sistema.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

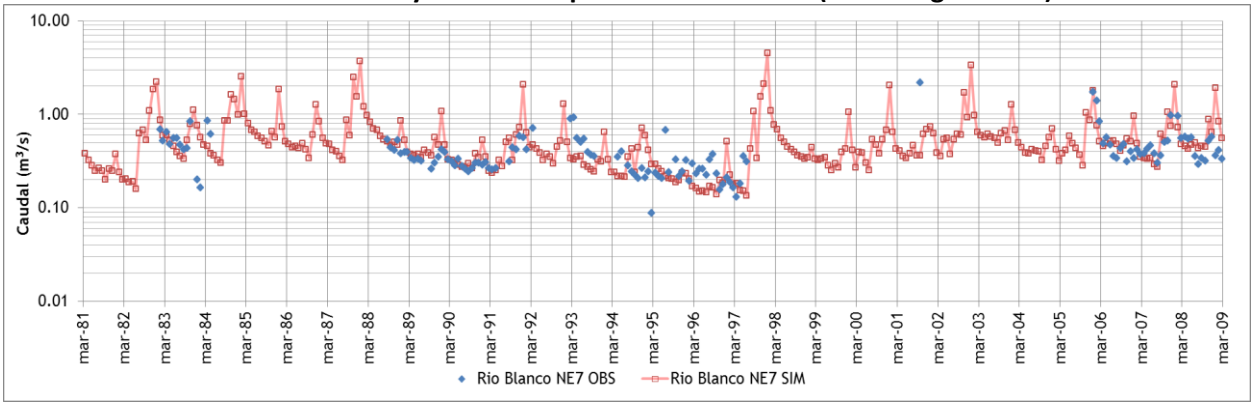
Figura 7.46
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE7 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

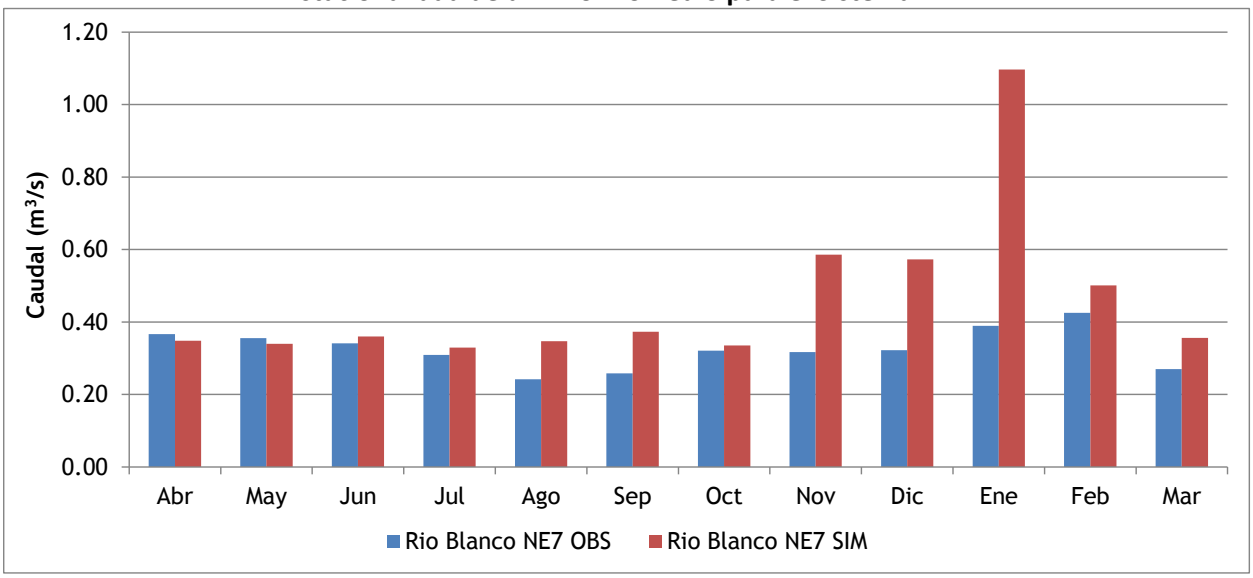
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.47
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE7 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

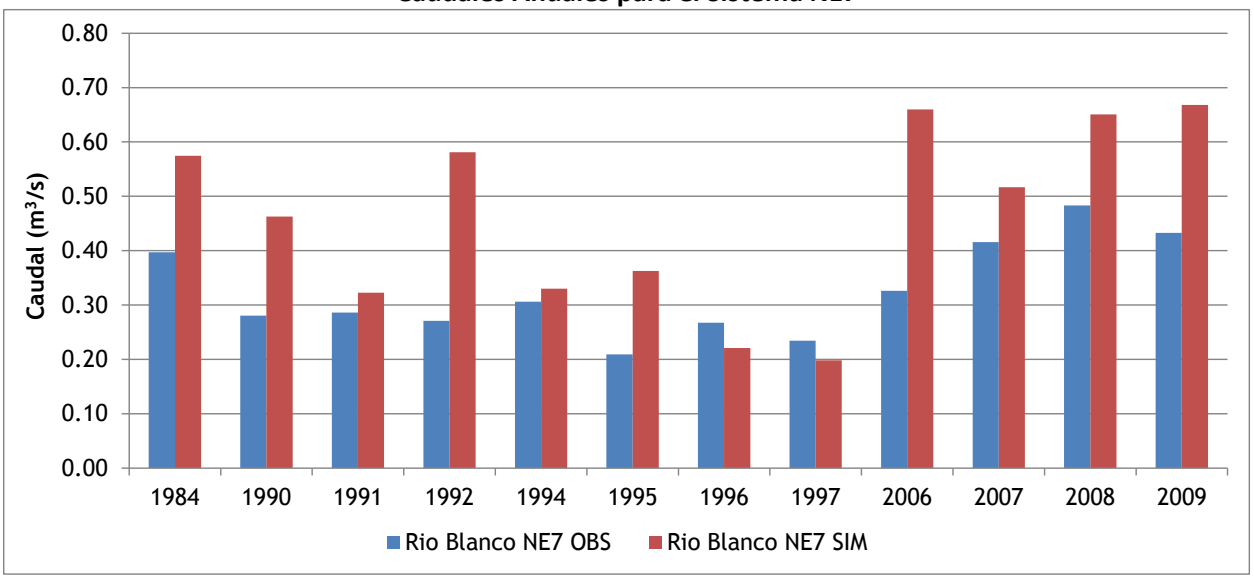
Figura 7.48
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE7



Fuente: Elaboración Propia

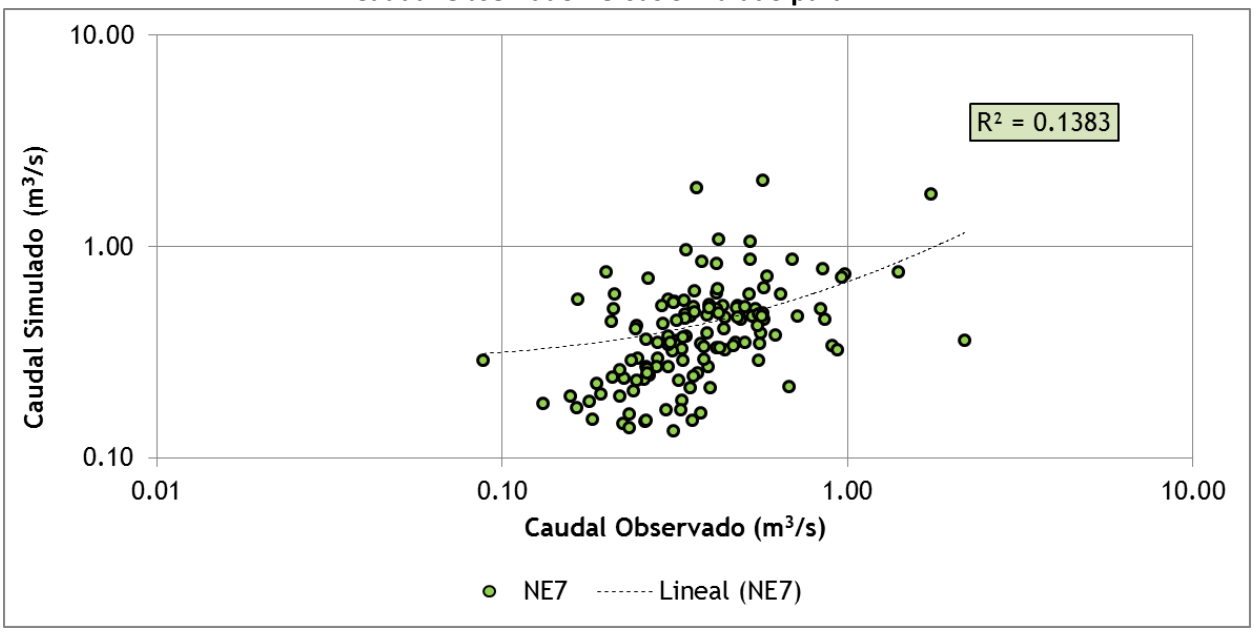
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.49
Caudales Anuales para el Sistema NE7



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.50
Caudal Observado Versus Simulado para NE7



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

7.2.11 NE8: Río Chollay después de junta con Blanco

El sistema NE8 posee un registro de caudales mayor al promedio de las estaciones disponibles, sin embargo, su área de aporte es relativamente pequeña y un análisis de sensibilidad de sus parámetros de calibración indicó que los caudales simulados no muestran una respuesta significativa a cambios en dichos parámetros.

Durante el proceso de ajuste y sensibilización, se observó que NE8 responde significativamente ante cambios en los parámetros de NE7 y CN2, por lo cual se recalibraron dichas cuencas para permitir un mejor ajuste de los totales anuales y de la estacionalidad en el punto de salida de NE8, respetando los volúmenes de escorrentía para cada una de las subcuencas con sus correspondientes registros y su estacionalidad.

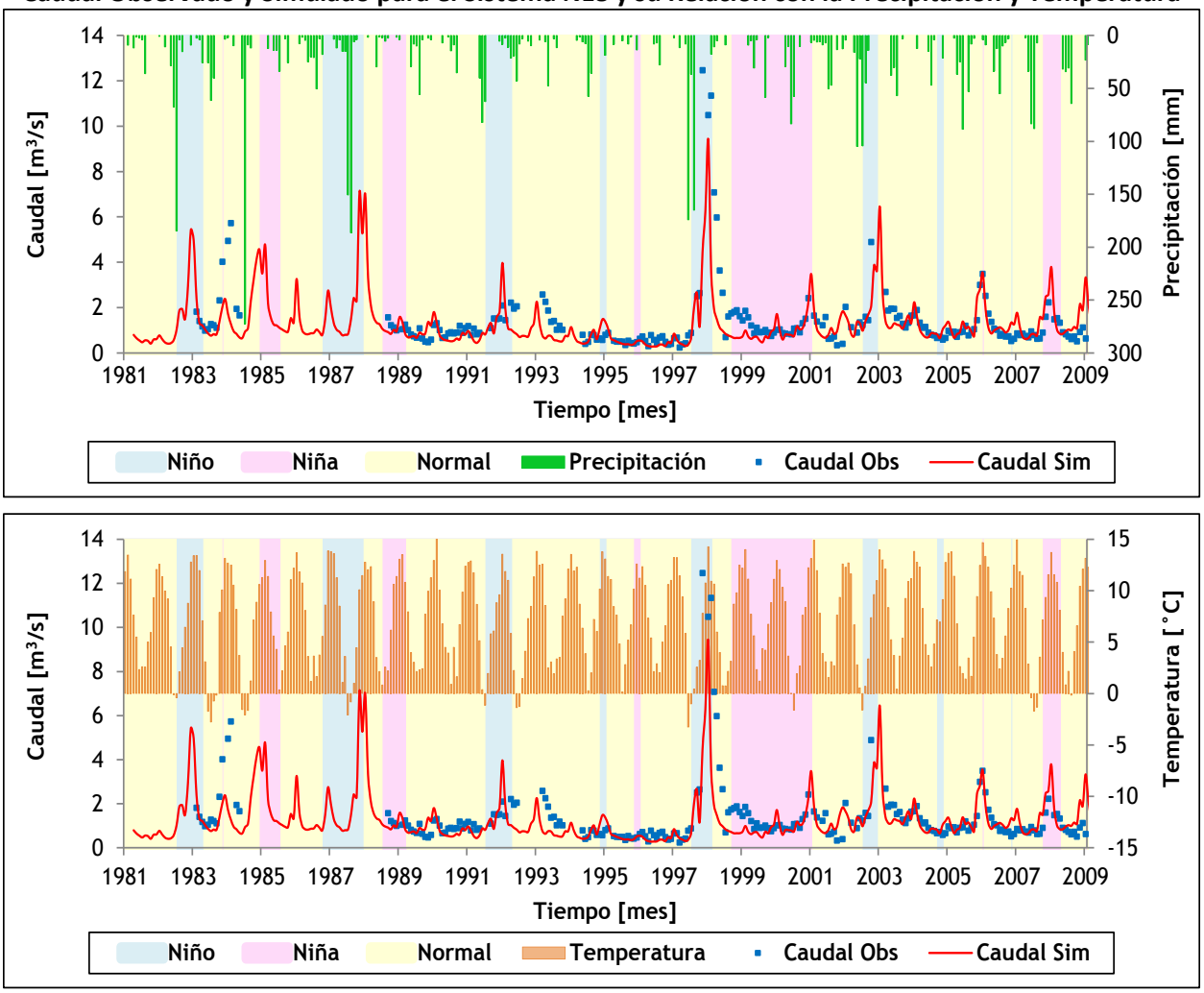
La **Figura 7.51** muestra que la señal de los caudales simulados se puede corresponder con los pulsos de precipitación en ocurrencia, pero que la magnitud de las crecidas observadas, por ejemplo en el año 1997-98 no puede ser alcanzada en el modelo. Adicionalmente el año 1984 presenta valores observados que no se justifican por los pulsos de precipitación o la existencia de un volumen acumulado que permita dicha escorrentía. La temperatura es representativa del sistema simulado (CI_NE8), por lo que los parámetros de ajuste no permiten influir en los volúmenes de acumulación, sino en los de deshielo.

La **Figura 7.52** muestra que existe un buen ajuste de los caudales de estiaje, lo cual se puede confirmar mediante los promedios mensuales de otoño-invierno indicados en la **Figura 7.53**. Pese a esto, también es posible observar una dispersión significativa de los caudales observados en el período 1993-1997 y en los últimos años de modelación, lo cual estaría impactando en la estacionalidad de los caudales observados, con un “peak” en noviembre y otro en febrero, lo cual no es consecuente con lo observado en los sistemas ubicados aguas arriba.

En la **Figura 7.54** no se aprecia una tendencia a sobreestimar o subestimar los caudales anuales, independiente de la pluviosidad del año simulado. Esta “oscilación” de la simulación en torno a los caudales observados podría explicar el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.55**, mayor a la mayoría de los obtenidos en otros sistemas, aunque aún no pueda ser considerado aceptable.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

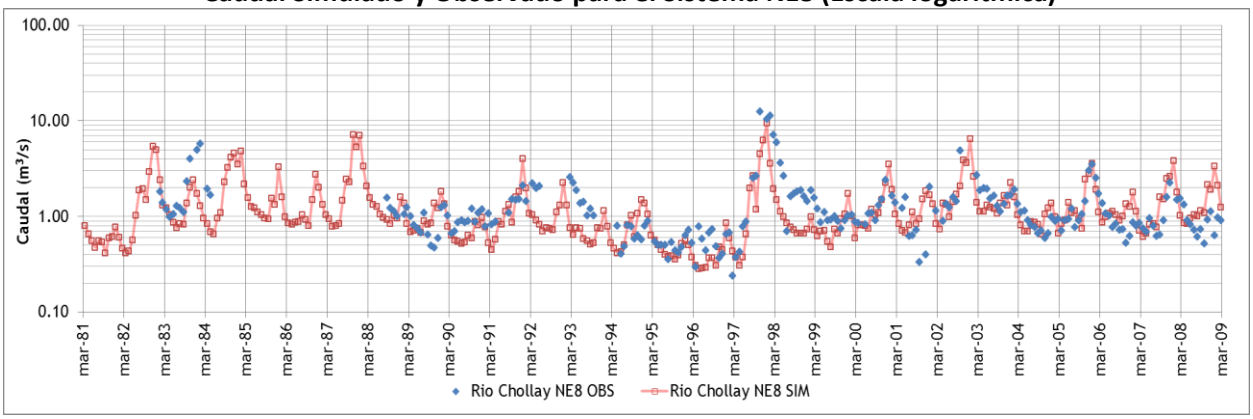
Figura 7.51
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE8 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

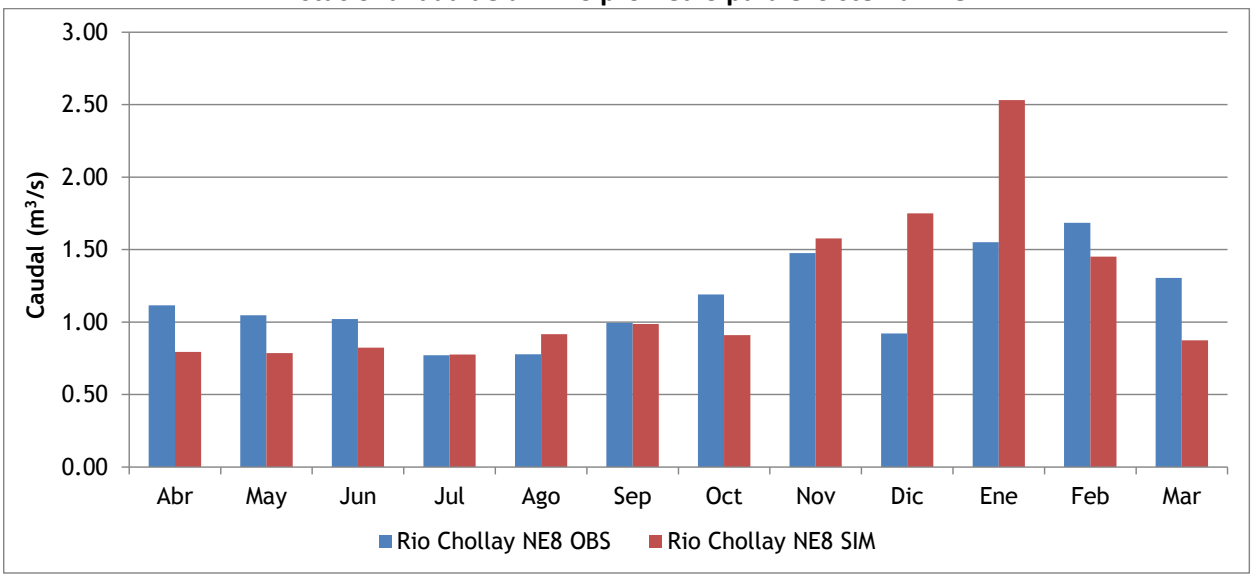
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.52
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE8 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

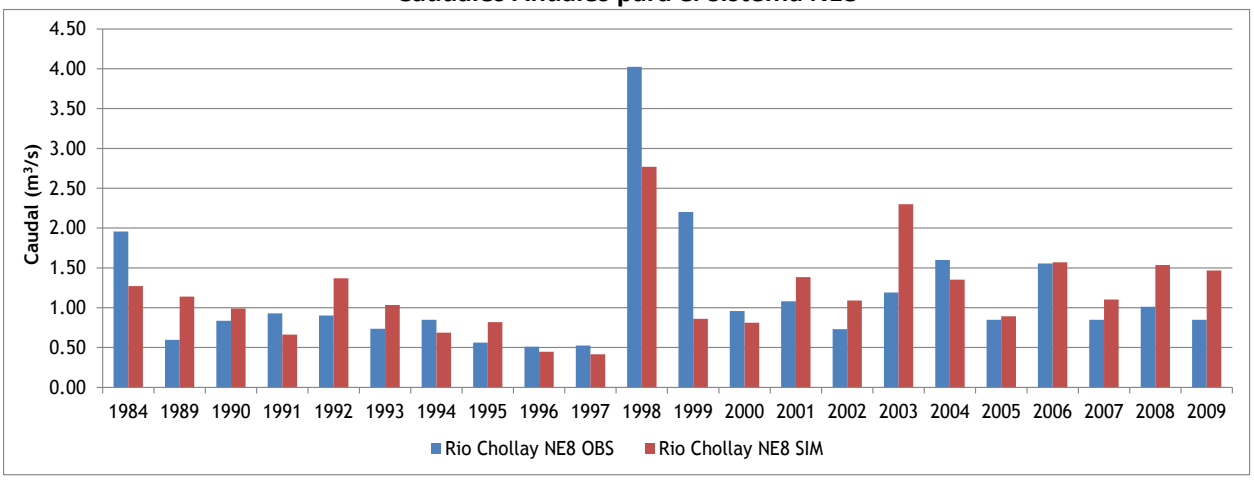
Figura 7.53
Estacionalidad de un Año promedio para el Sistema NE8



Fuente: Elaboración Propia

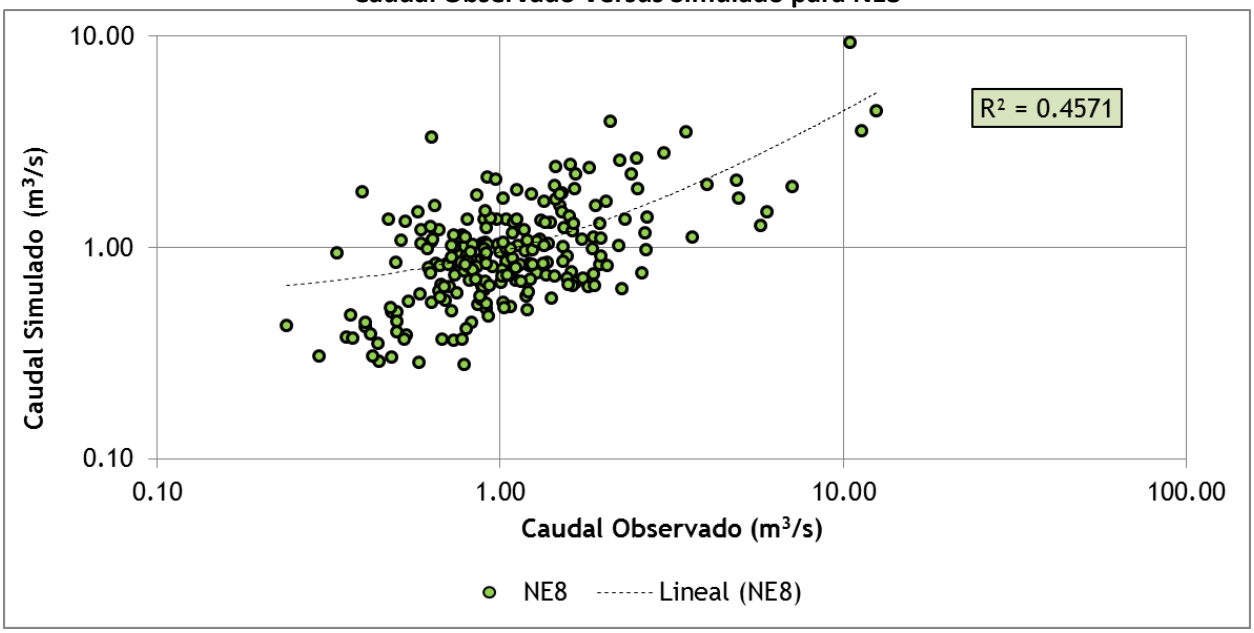
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.54
Caudales Anuales para el Sistema NE8



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.55
Caudal Observado Versus Simulado para NE8



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.12 CN7: Río Chollay antes de junta con Pachuy

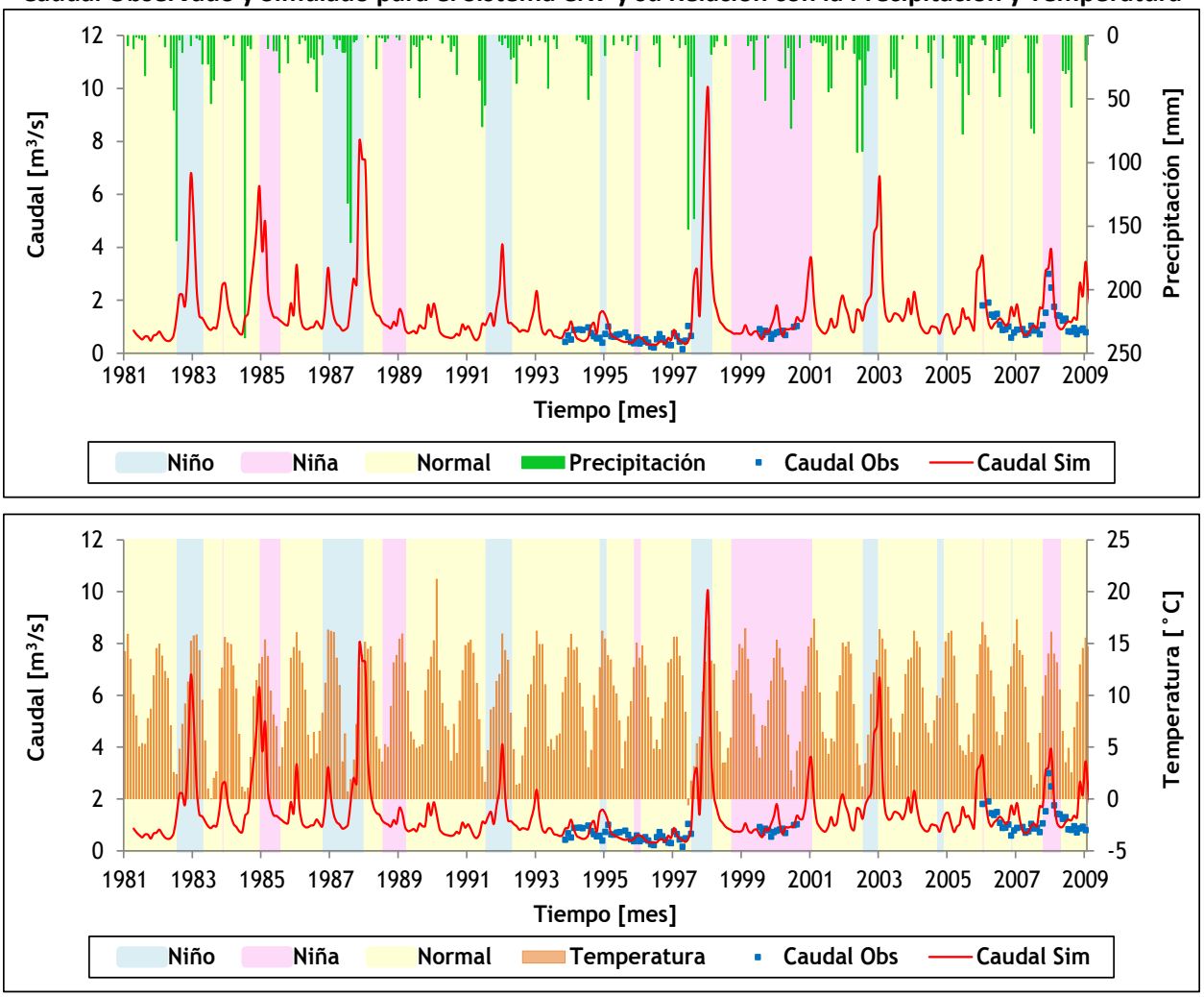
La información para la calibración del sistema CN7 es claramente insuficiente. Se tienen registros por 4 años, y la mayoría corresponde a valores de flujo base sin estacionalidad. El único año que presenta una estacionalidad es el 2008. La **Figura 7.56** permite observar que el comportamiento simulado en este punto proviene del ajuste efectuado para NE8. Asimismo, la temperatura informa que esta SC sólo controla la escorrentía en la temporada de deshielo, por sus altos valores. El ajuste del sistema no puede ser mejorado, pues no hay mucha información al respecto, por lo que se privilegia ocupar los parámetros de NE8, con un ajuste local, y manteniendo el comportamiento de las crecidas y su ocurrencia con los pulsos de precipitación y ciclos de acumulación.

La **Figura 7.57** muestra que los caudales simulados siguen la tendencia de los caudales observados, sin embargo, se aprecian discrepancias en los meses en los cuales se producen los máximos y mínimos observados. En particular, la **Figura 7.58** indica una buena representación de los caudales promedio de estiaje, pero también se evidencia la falta de información observada en el periodo de crecidas o errores respecto a lo simulado, por ejemplo, en los años 1999, 2006 y 2008-2009.

A nivel anual, la **Figura 7.59** muestra una buena respuesta del modelo, lo cual podría explicar el valor relativamente alto del coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.60**.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

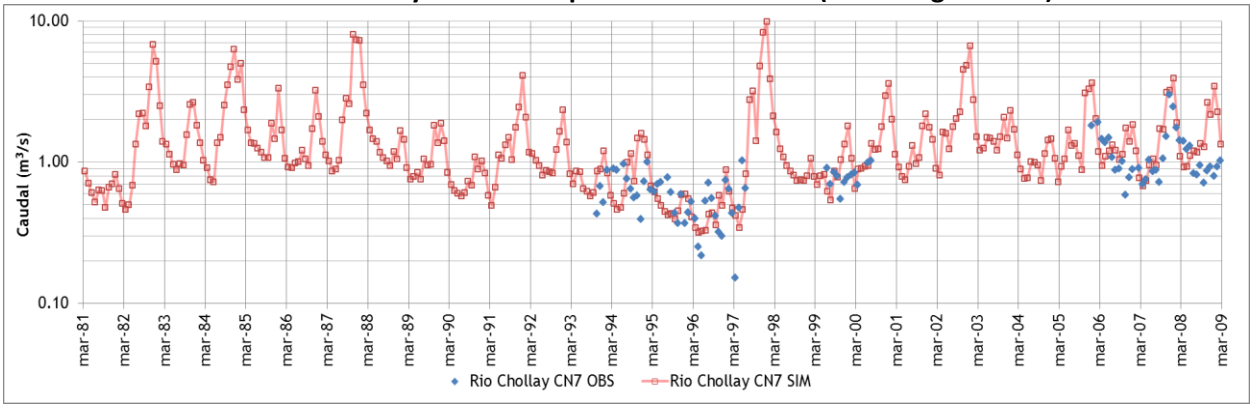
Figura 7.56
Caudal Observado y Simulado para el Sistema CN7 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

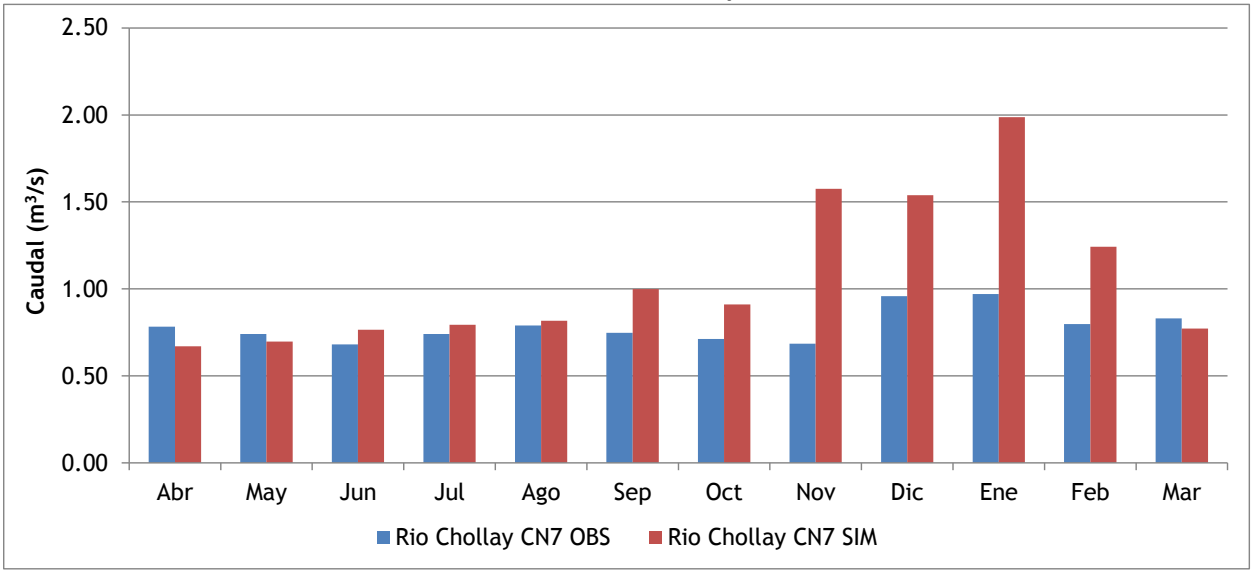
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.57
Caudal Simulado y Observado para el Sistema CN7 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

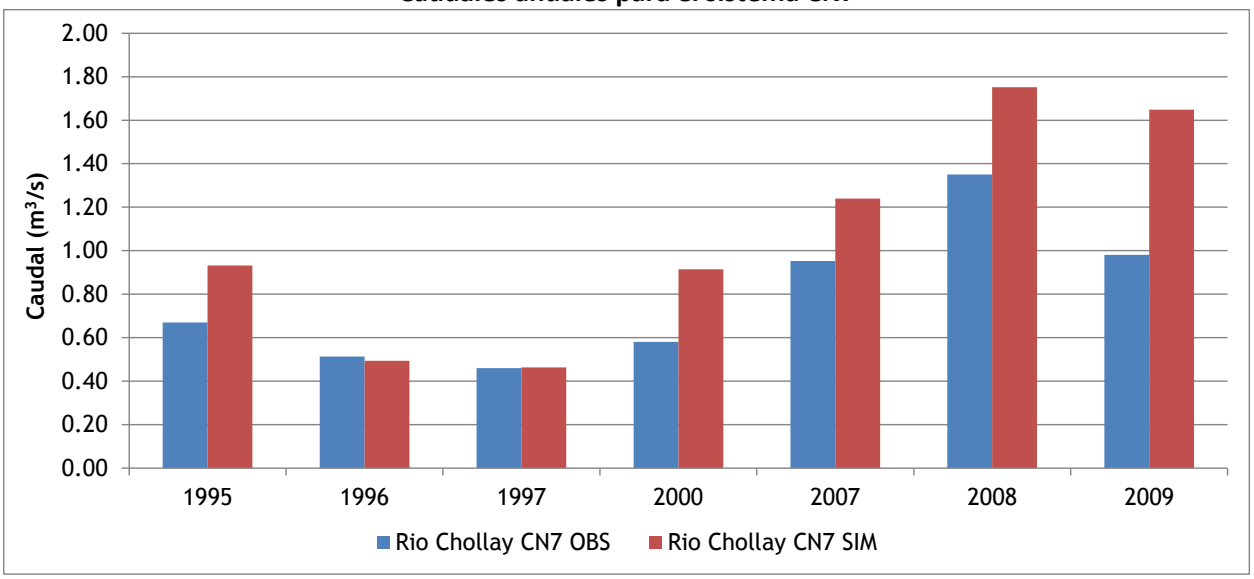
Figura 7.58
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema CN7



Fuente: Elaboración Propia

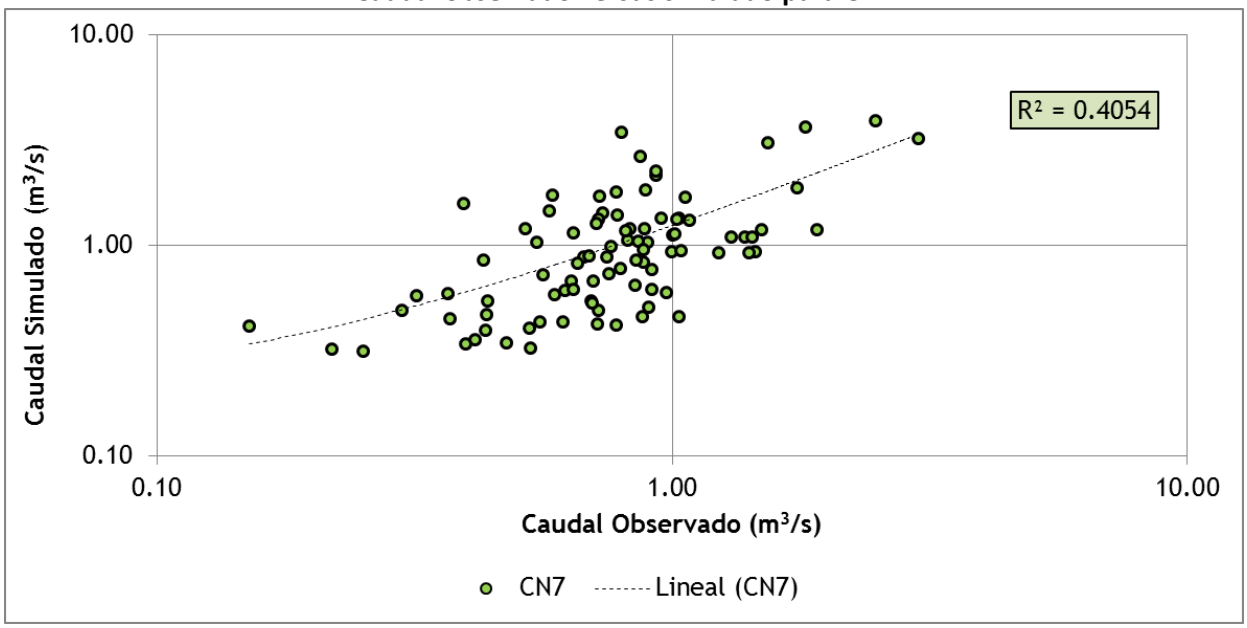
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.59
Caudales anuales para el sistema CN7



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.60
Caudal observado versus simulado para CN7



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

7.2.13 CN8: Río Pachuy

CN8 es otro de los sistemas que sí representa la totalidad de la cuenca aportante del río Pachuy antes de la junta con el Chollay. Es uno de los sistemas que también carecen de información observada, pese a que esta cuenca representa una parte importante en términos de área para el control fluviométrico de NE9.

La **Figura 7.61** muestra la escasez de información para la calibración de algún flujo o caudal "peak" del sistema en general. Sólo existe información para ajustar la magnitud de los flujos base. El comportamiento con la precipitación y temperatura es similar al obtenido con otras cuencas de aporte lateral del sistema, la diferencia fundamental es que CN8 tiene menores elevaciones en general, y su temperatura mínima oscila entre los -1 a – 5 °C, a diferencia de otros sistemas como NE1A. Producto de este comportamiento es que la cuenca es más "sensible" a los pulsos de precipitación y puede presentar un régimen mixto.

Producto de que NE9, ubicado aguas abajo, posee un mayor número de datos observados de caudal, se realizaron ajustes en los parámetros de CN8 para mejorar la calibración en dicho punto.

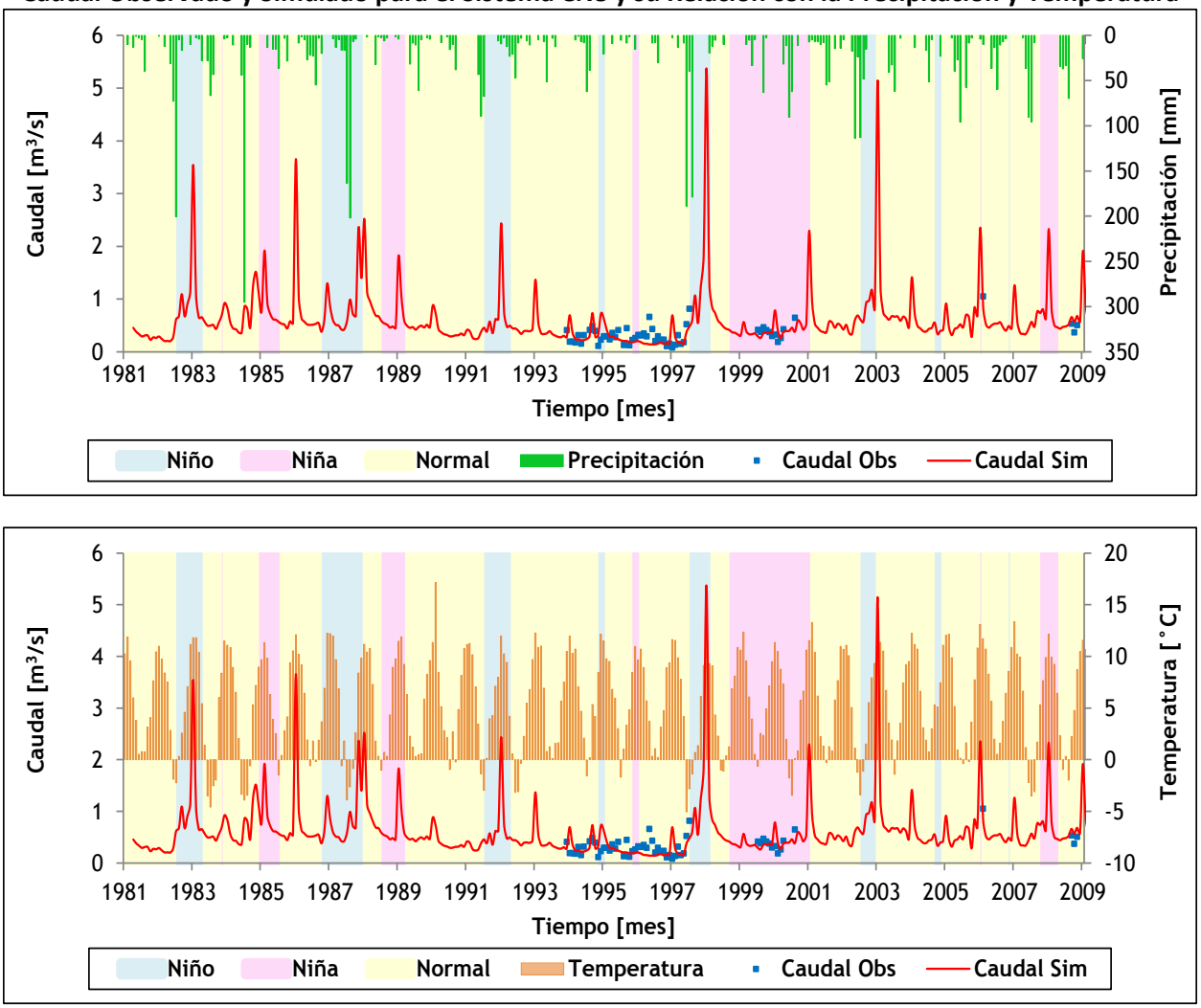
También se puede observar en la **Figura 7.62** que los caudales observados y simulados no presentan un ajuste desde el punto de vista estacional, lo cual se confirma en los resultados de los caudales medios mensuales presentados en la **Figura 7.63**, especialmente durante la temporada de estiaje y las crecidas de verano. Esto es en parte por la gran cantidad de vacíos en la información para comparar, especialmente en los meses de verano, en donde el caudal simulado se muestra muy sobrestimado.

Los totales anuales indicados en la **Figura 7.64** también presentan diferencias significativas en dos de los tres años disponibles para realizar una comparación.

Debido a lo anterior, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.65** sería consecuente con los datos disponibles para realizar la calibración.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

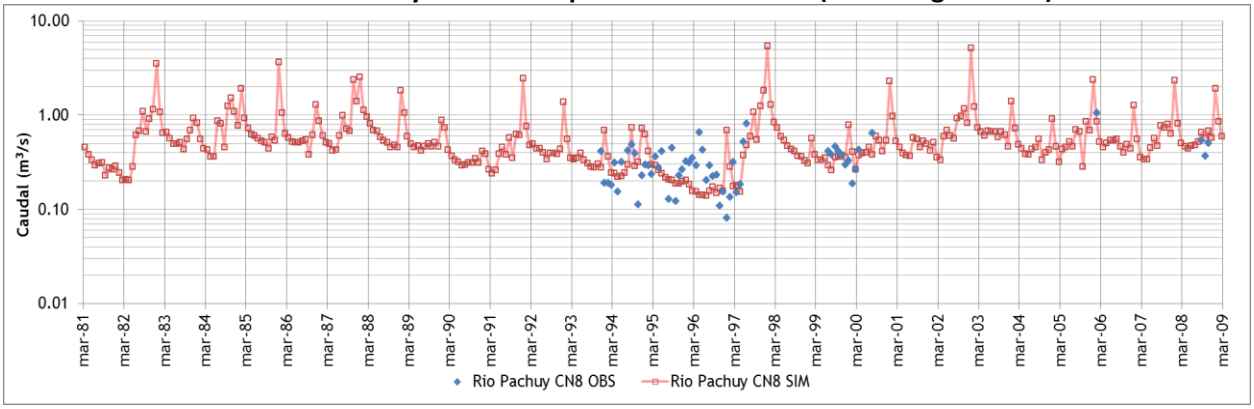
Figura 7.61
Caudal Observado y Simulado para el Sistema CN8 y su Relación con la Precipitación y Temperatura



Fuente: Elaboración Propia

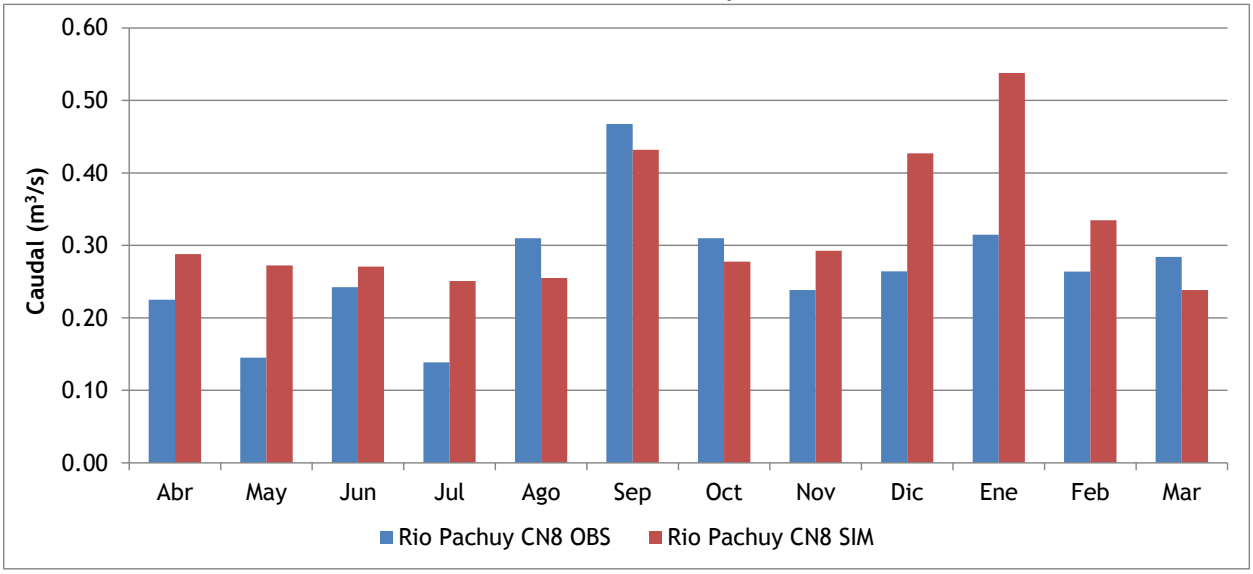
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.62
Caudal Simulado y Observado para el Sistema CN8 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

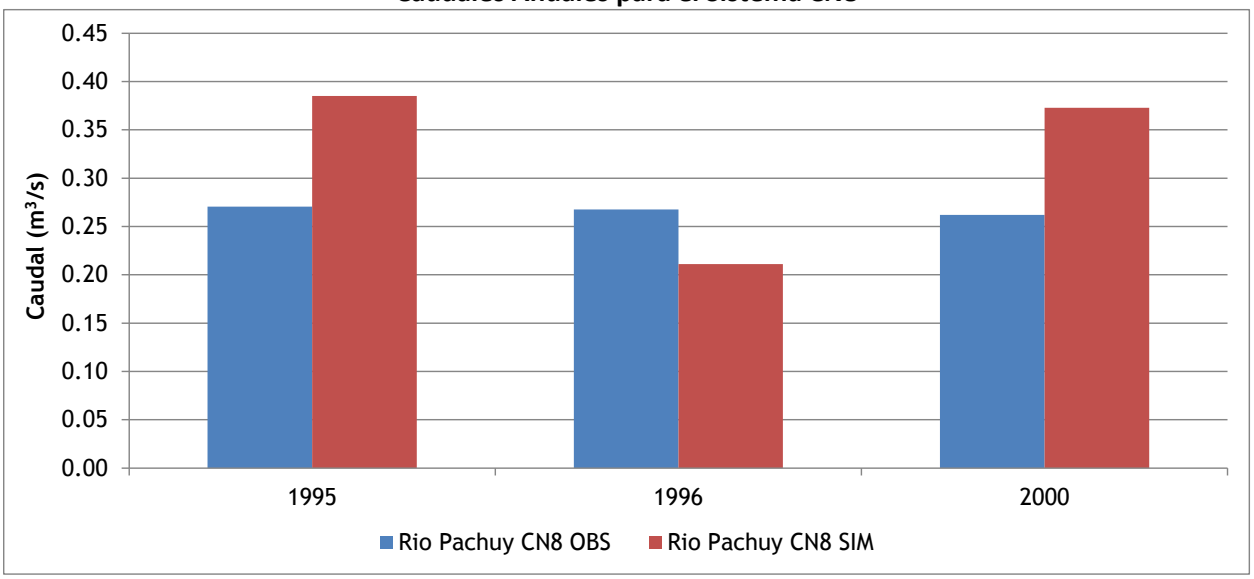
Figura 7.63
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema CN8



Fuente: Elaboración Propia

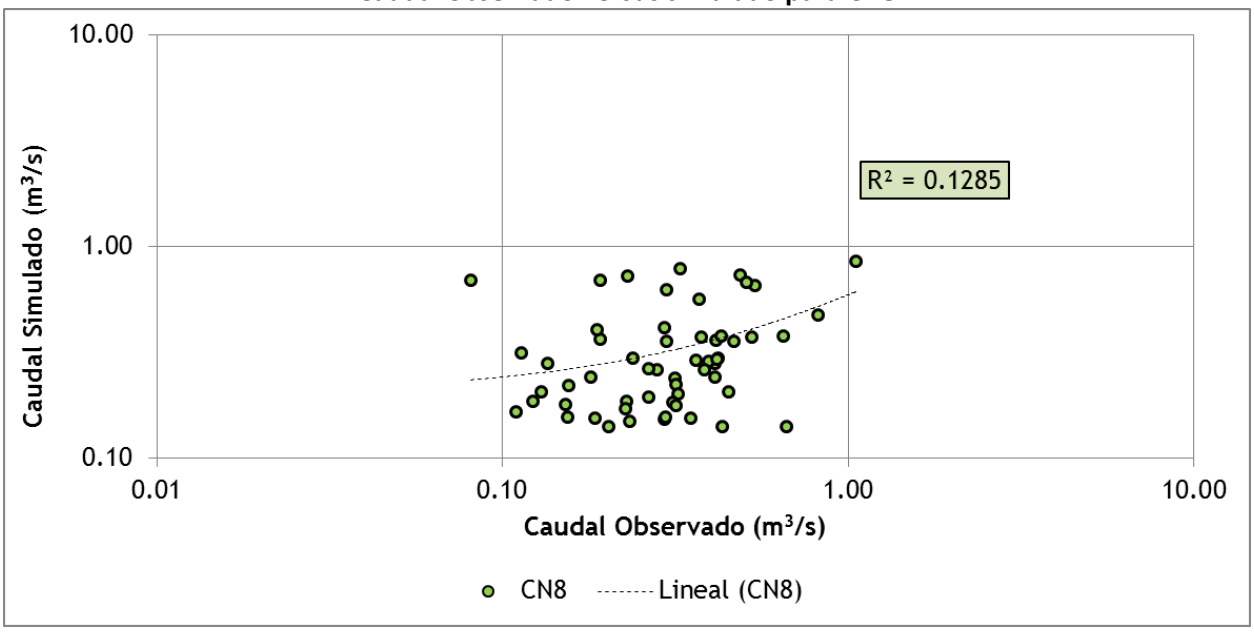
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.64
Caudales Anuales para el Sistema CN8



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.65
Caudal observado versus simulado para CN8



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.2.14 NE9: Río Chollay antes de junta con el río Conay

NE9 es una de las SC, junto a PX2 y PX3, más pequeñas en términos de superficie que fueron modeladas en este estudio. El impacto de la modificación de sus parámetros no es relevante como lo es la modificación de otros tales como CN7, CN8 y NE8. Por lo mismo, el ajuste involucra un ajuste de la misma SC y los aportes de los otros sistemas aguas arriba.

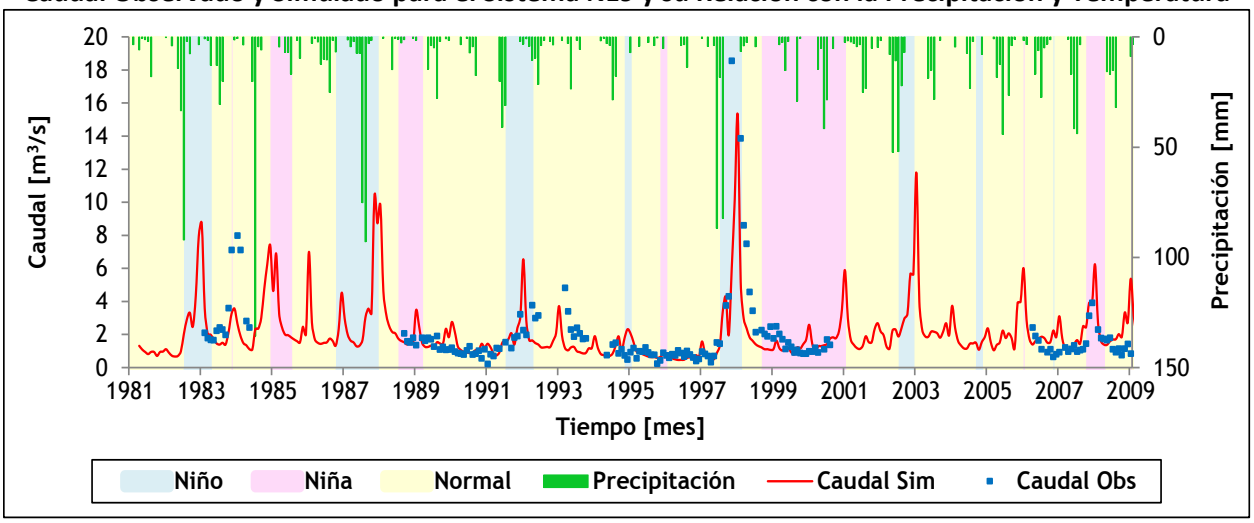
Respecto de la **Figura 7.66**, los caudales simulados, si bien siguen la señal de los pulsos de precipitación, no pueden alcanzar algunas crecidas observadas, como el año 1984. La temperatura para este sistema es completamente positiva, por lo que el ajuste de sus parámetros sólo podría influir en algún retardo de los deshielos y algún ajuste de magnitud menor. La crecida asociada al evento del Niño del año 1997-98 queda subestimada, pese a que es la de mayor magnitud en el período. La mayoría de los registros informan respecto de los flujos base, los que en general se pueden estimar de buena manera, pero existiendo registros muy bajos que el modelo no puede reproducir.

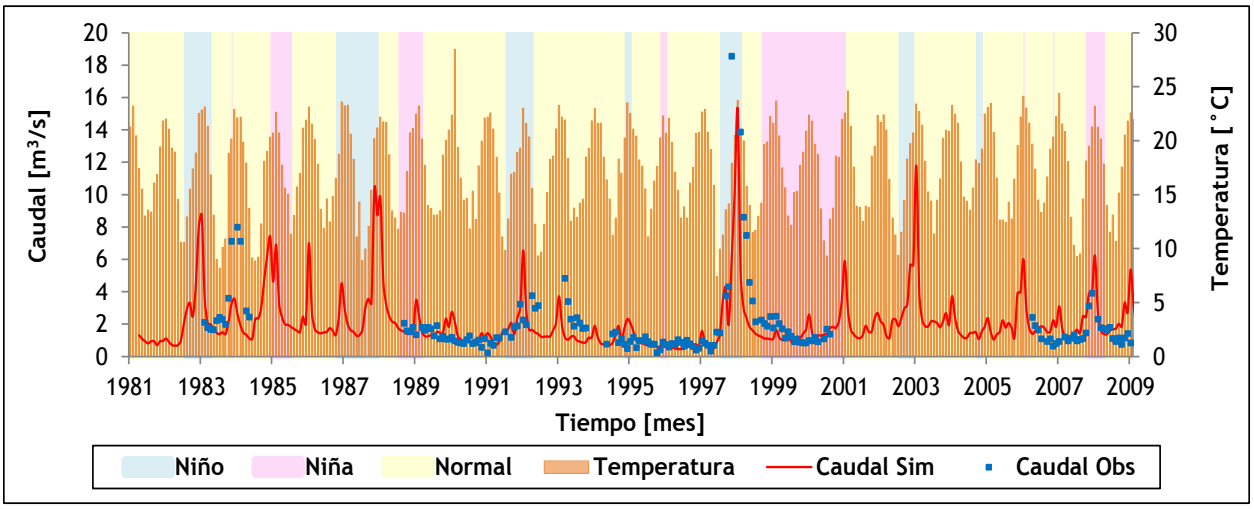
La **Figura 7.67** indica que la simulación sigue la tendencia de los caudales observados, sin embargo, esto últimos muestran importantes diferencias en las temporadas de crecidas, lo cual se reafirma a partir de los caudales medios mensuales presentados en la **Figura 7.68**, sin embargo el régimen hidrológico simulado es nival, lo que es consecuente con la cuenca estudiada. En varias crecidas simuladas, los datos observados no dan cuenta del aumento de caudal esperado, lo cual impacta en la sobreestimación de los totales anuales simulados que se indican en la **Figura 7.69**.

Debido a lo anterior, el coeficiente de determinación R^2 presentado en la **Figura 7.70** da cuenta de estas diferencias locales y netas.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.66
Caudal Observado y Simulado para el Sistema NE9 y su Relación con la Precipitación y Temperatura

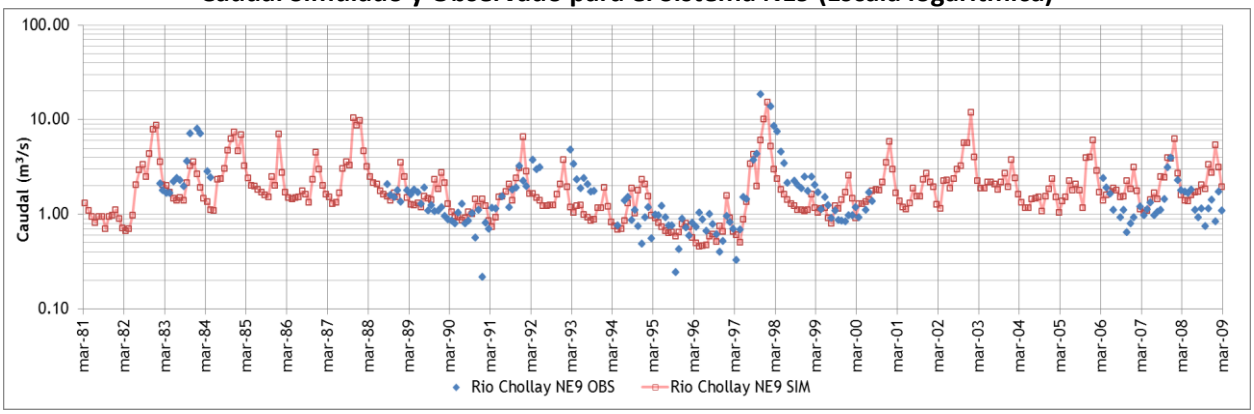




Fuente: Elaboración Propia

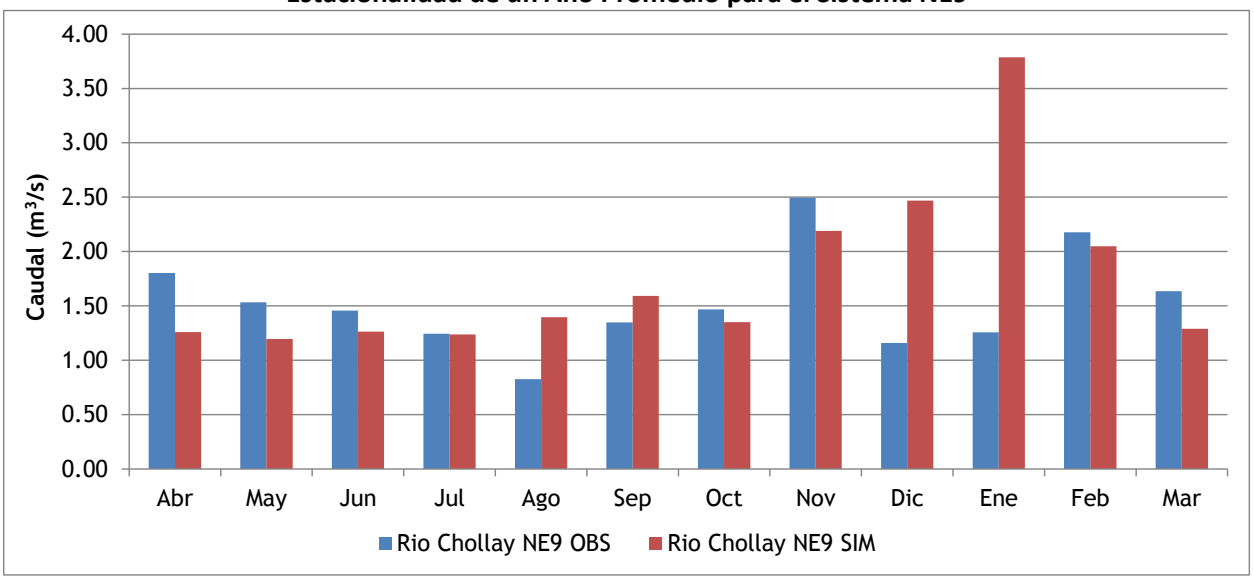
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 7.67
Caudal Simulado y Observado para el Sistema NE9 (Escala logarítmica)



Fuente: Elaboración Propia

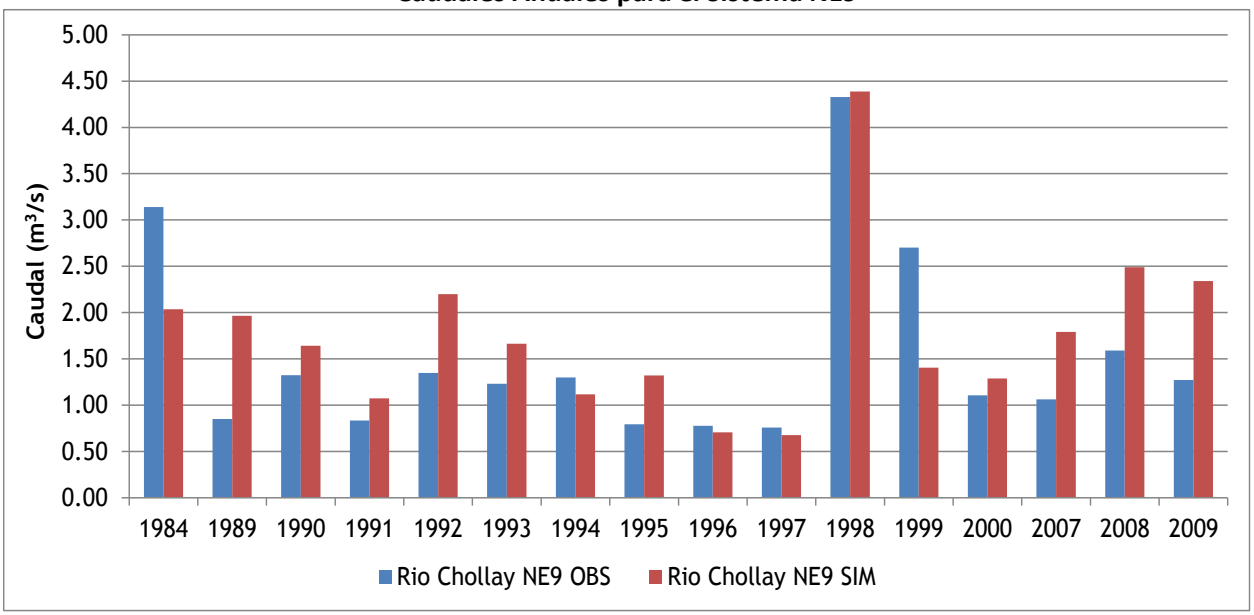
Figura 7.68
Estacionalidad de un Año Promedio para el Sistema NE9



Fuente: Elaboración Propia

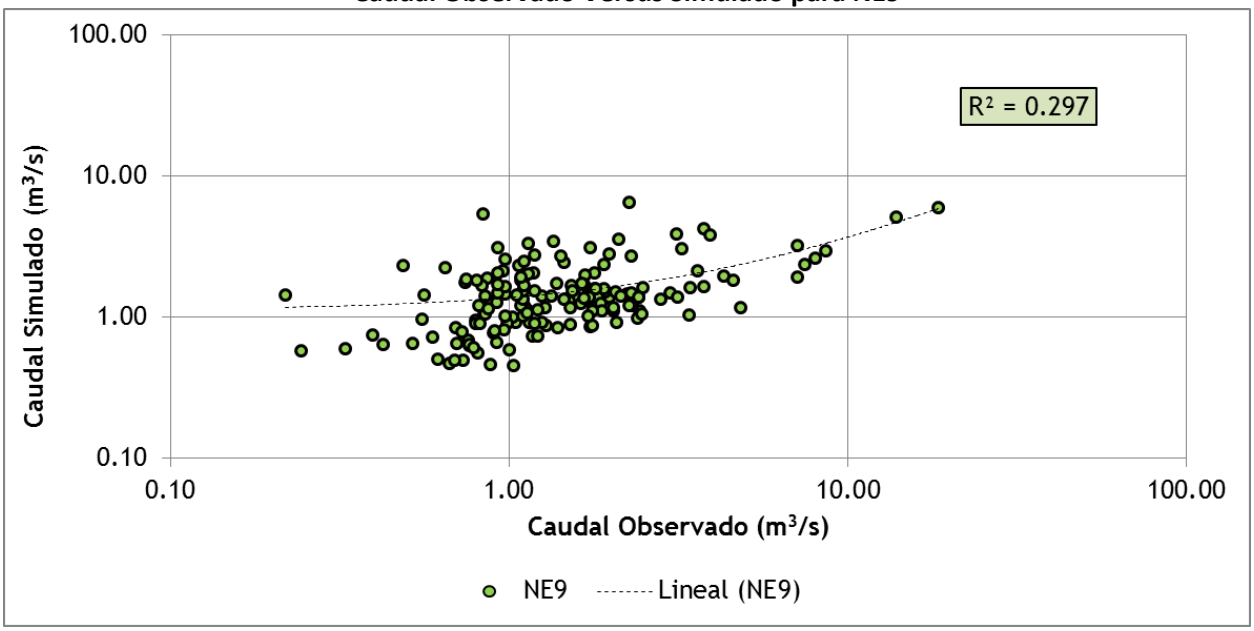
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.69
Caudales Anuales para el Sistema NE9



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7.70
Caudal Observado Versus Simulado para NE9



Fuente: Elaboración Propia

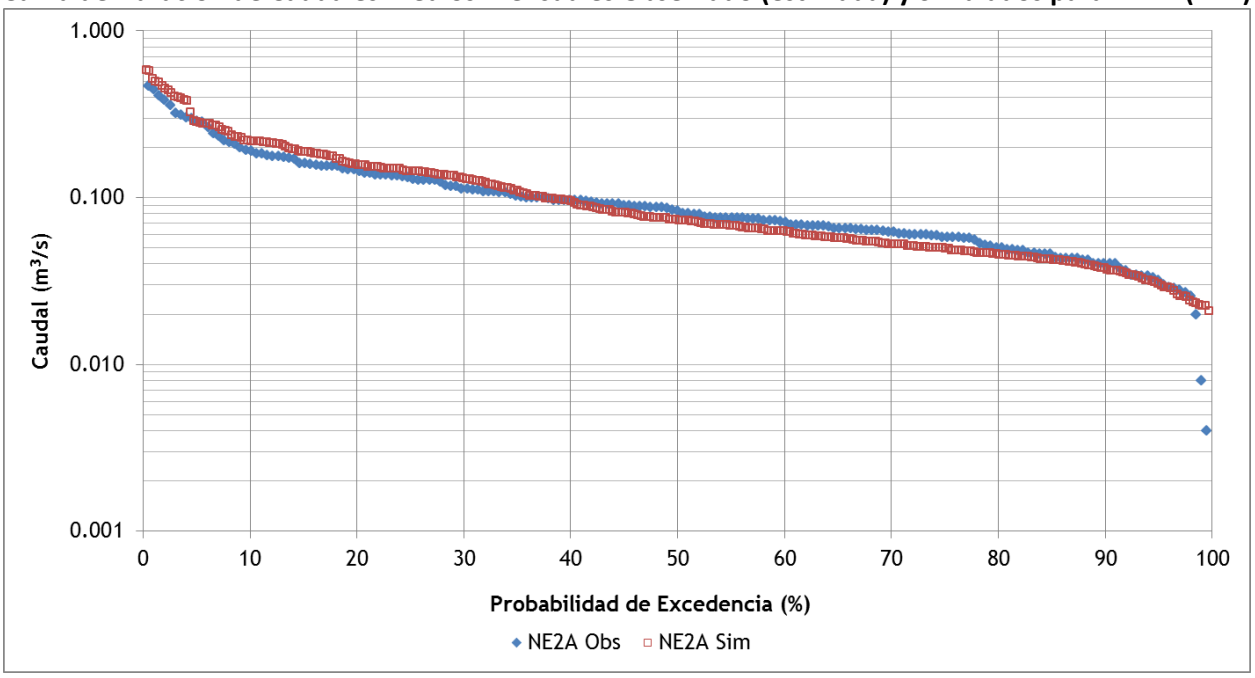
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

7.3 Cierre del Sistema

A modo de complementar los resultados expuestos en el capítulo anterior se determinaron las curvas de duración de los caudales medios mensuales simulados y observados para los sistemas NE1A, NE2A, NE4, NE8 y NE9.

La **Figura 7.71** presenta la comparación para NE2A entre la curva de duración de los caudales medios mensuales observados estimada sólo considerando la información disponible versus la simulada (que no tiene vacíos de información). Si bien, técnicamente la curva de duración sólo se construye con la totalidad de la información de los caudales medios mensuales, esto es, sin vacíos y con datos debidamente consistentes, este gráfico permite complementar el desempeño del modelo para dicha subcuenca. En general se observan al menos 2 datos anómalos asociados a probabilidades de excedencia altas (flujos bajos), mientras que para probabilidades entre un 40 y 80% el modelo tiende a subestimar los caudales. Lo contrario ocurre para las probabilidades entre 1 y 35%, en donde el caudal simulado tiende a sobrestimarse.

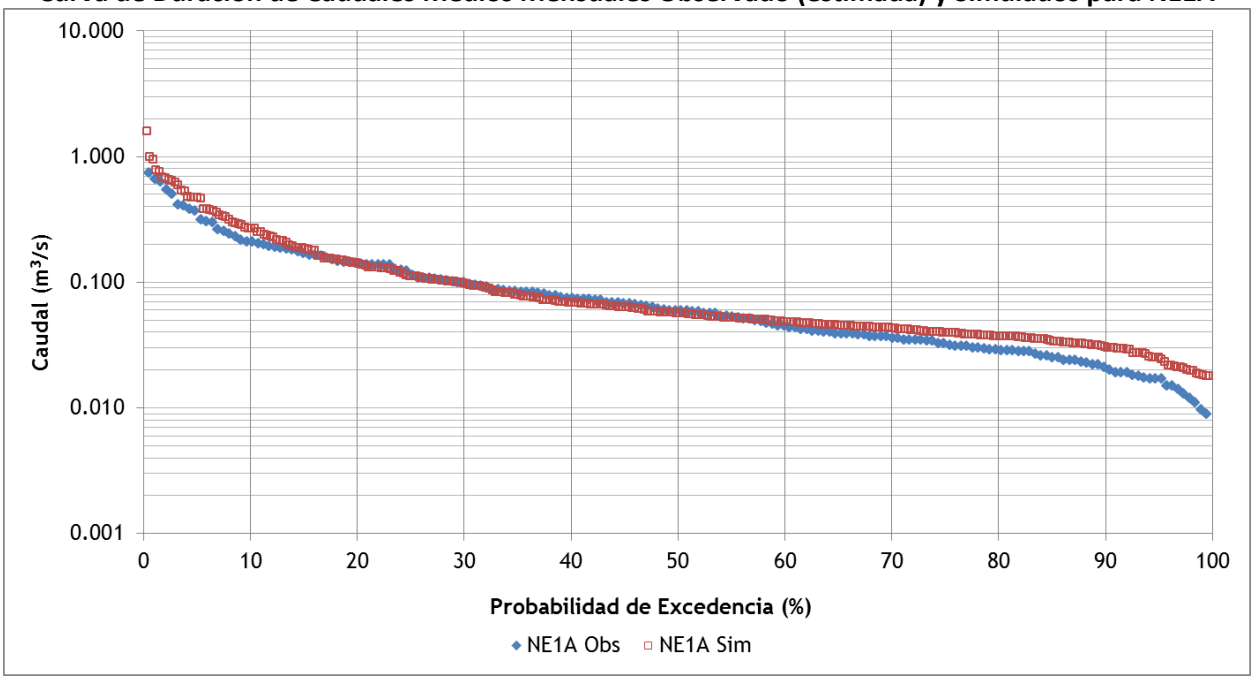
Figura 7.71
Curva de Duración de Caudales Medios Mensuales Observado (estimada) y Simulados para NE2A (NE2)



Fuente: Elaboración Propia

Del mismo modo, la **Figura 7.72** muestra para NE1A que existe una sobrestimación de los caudales base para probabilidades de excedencia entre un 70 a 99%. Es importante notar el gran cambio respecto de NE2 (NE2A) de la calidad de la información, puesto que la curva de duración de caudales medios mensuales observados estimada presenta una mejor forma, sin puntos anómalos. El modelo reproduce bastante bien los caudales medios mensuales para probabilidades entre un 15 a 70%, y en general, sobrestima para probabilidades menores al 15%.

Figura 7.72
Curva de Duración de Caudales Medios Mensuales Observado (estimada) y Simulados para NE1A



Fuente: Elaboración Propia

Lo que reportan ambas figuras es que los parámetros calibrados para la parte alta del sistema permiten tener una estimación de los flujos, y permiten hacer estimaciones de indicadores basados en probabilidades de excedencia, usados en su mayoría para evaluar caudales de dilución y diseño.

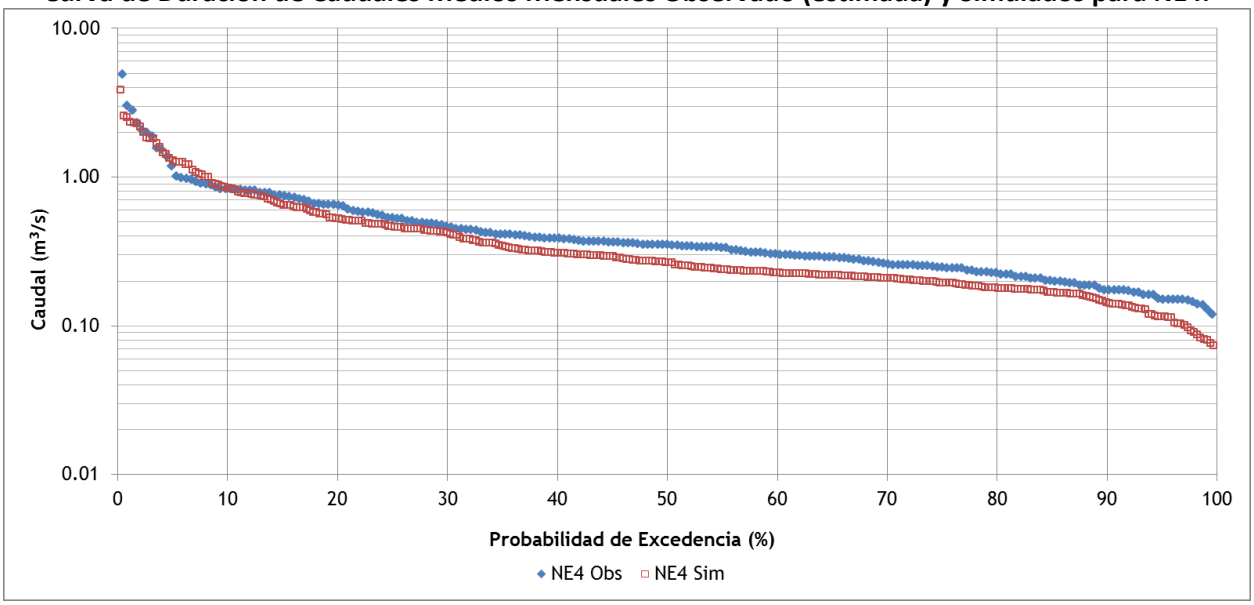
Finalmente la **Figura 7.73**, que presenta el desempeño para NE4, muestra que en general los caudales simulados se encuentran subestimados para probabilidades entre un 10% y un 99%. Esta sub estimación es un poco mayor para probabilidades entre un 40% y 70%. Para probabilidades menores a un 30% la estimación tiende a reproducir el comportamiento observado.

En el caso de los sistemas (o SC) localizados aguas abajo de NE4, la calidad de información presenta los mismos problemas, siendo sólo los sistemas NE8 y NE9 en aquellos donde se puede construir una curva de duración aproximada de los datos observados.

En este caso, la **Figura 7.74**, muestra que los caudales simulados para NE8 son en general adecuados para probabilidades de excedencias entre el 15 y 85%. Para valores menores al 15% el comportamiento es más errático probablemente por el mismo comportamiento de los datos observados que informan de un cambio de pendiente en torno al 5% de probabilidad de excedencia.

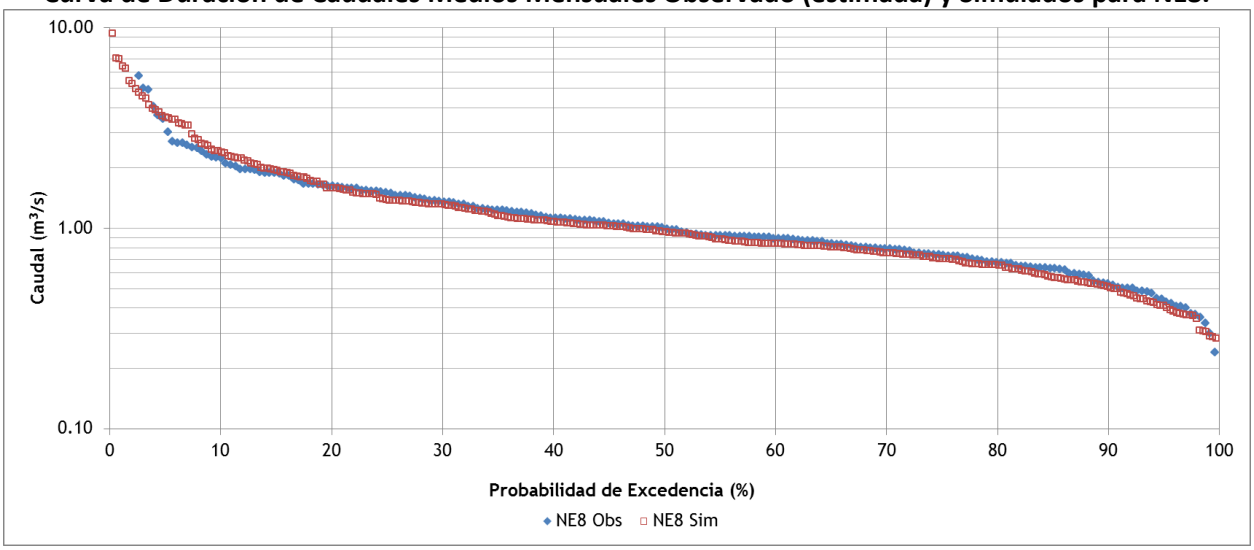
En el caso de NE9 (**Figura 7.75**) los caudales entre el 7 y 95% de probabilidad de excedencia se encuentran ligeramente sobrestimados, siendo peor el ajuste a los caudales con probabilidad de excedencia mayor al 95% debido a algunos datos registrados muy bajos. Sin embargo se considera que la estimación de la serie en su conjunto es aceptable dada la información disponible para todo el proceso de calibración.

Figura 7.73
Curva de Duración de Caudales Medios Mensuales Observado (estimada) y Simulados para NE4.



Fuente: Elaboración Propia

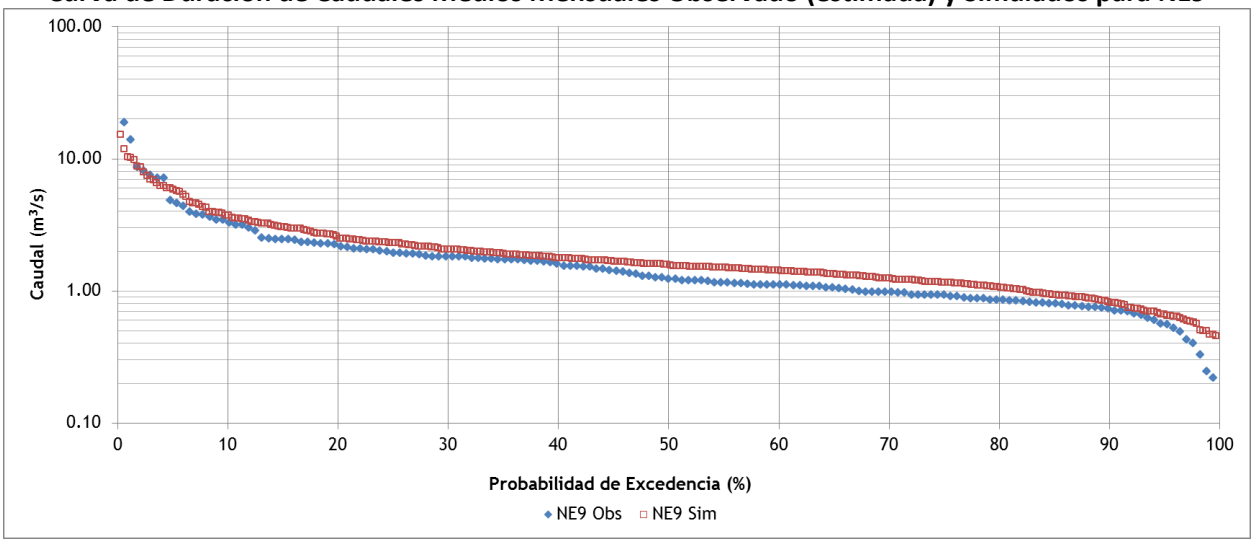
Figura 7.1
Curva de Duración de Caudales Medios Mensuales Observado (estimada) y Simulados para NE8.



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Figura 7.2
Curva de Duración de Caudales Medios Mensuales Observado (estimada) y Simulados para NE9



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

8.- ANÁLISIS HIDROLÓGICO SECTOR DE AGUAS DE CONTACTO

8.1 Aspectos Generales

Parte de la operación futura del proyecto Pascua-Lama (PL) de Barrick requiere de una evaluación de los recursos hídricos para obras de conducción y tratamiento de aguas que ya sea se encuentran localizadas en la cuenca aportante a NE5 u obtienen sus aguas de dicha zona.

El modelo hidrológico calibrado (WEAP) considera una serie de subcuencas aportantes, calibradas independientemente, entre ellas, NE5. Dicho modelo representa el orden de magnitud y estacionalidad de la mayoría de los caudales máximos para el total de las subcuencas. Respecto al flujo base, la estimación mejora para los sectores cercanos a NE4, principalmente porque las cuencas altas poseen flujos cubiertos de una capa de hielo que tiende a sub-estimar los caudales observados del sistema, siendo los flujos simulados más representativo de la disponibilidad hídrica que del flujo observado mismo, además de la adición de un caudal glacial constante y de gran magnitud (Jones, 2005).

Es en este contexto que Barrick ha solicitado una evaluación más precisa de la subcuenca NE5, de tal manera de subdividir la misma en función de las obras actuales que presenta el proyecto y las áreas restantes que simbolizan las aguas de ser captadas por futuras implementaciones de obras (Figura 8.1). Dicha estimación no incluye en esta etapa una actualización del modelo WEAP con dicha discretización, sino que la estimación de los caudales en función de las áreas de aporte y las bandas de elevación consideradas para la construcción del modelo hidrológico en NE5.

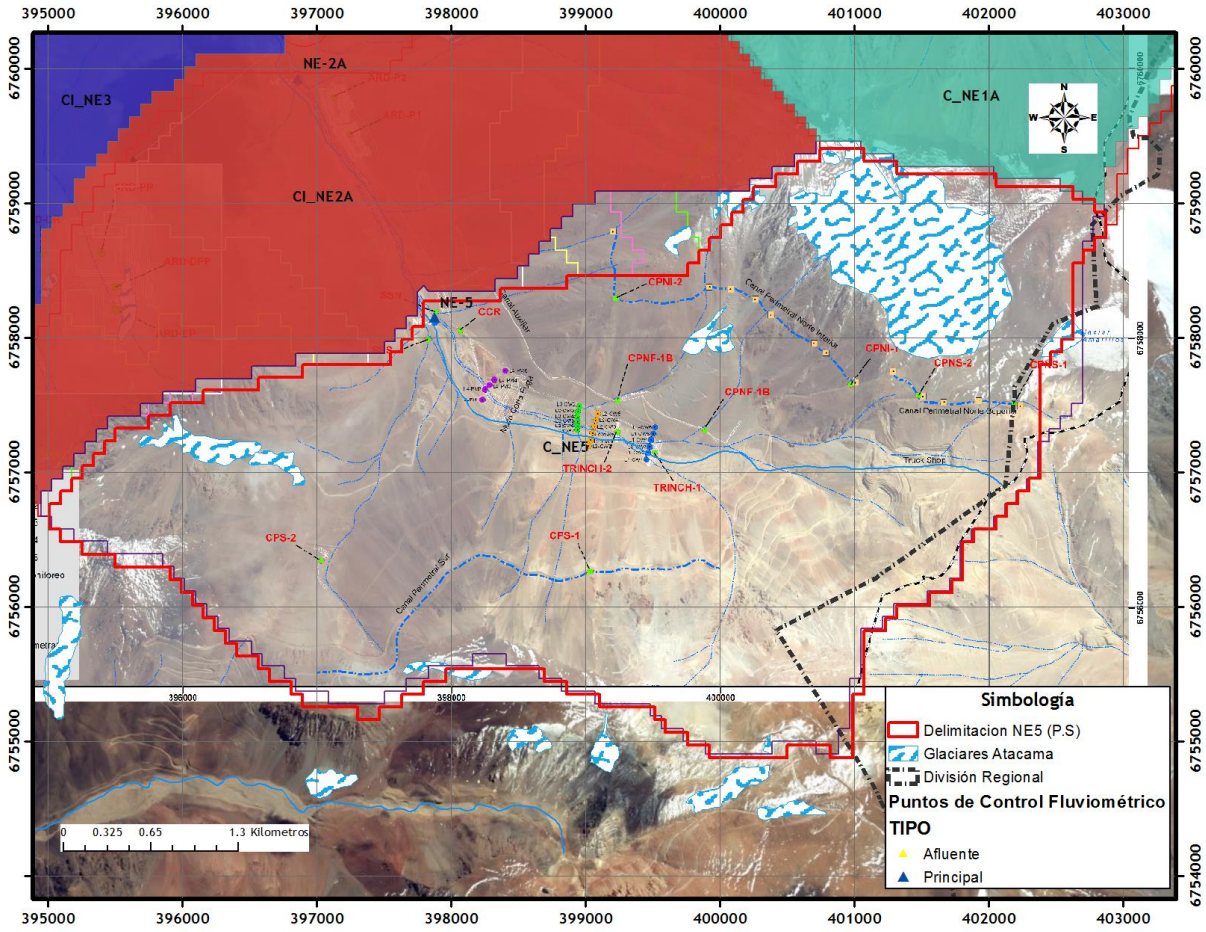
8.2 Modelo Hidrológico para NE5

Actualmente el modelo hidrológico contempla 5 bandas de elevación cada una con un área equivalente a 4,3 Km^2. Sin embargo la banda de elevación 1, asociada al mayor intervalo de altura, posee un descuento de 2 Km^2 debido a que dicha área representa el aporte de los glaciares “Estrecho” y “Amarillos”. Este aporte es considerado como un flujo adicional al modelo y equivale al caudal glacial estimado por Jones (2005). Los resultados de la calibración se reflejan en la **Figuras 8.2** a la **Figura 8.4**.

En la **Figura 8.2** es posible apreciar que el modelo reproduce en parte la señal de caudal para los caudales medios y altos. Sin embargo, para los caudales base, asociados a los meses de estiaje, se evidencia una clara sobrestimación. Esto se produce en parte a que los valores observados en esas fechas no representan la disponibilidad hídrica del sistema, puesto que la mayoría del río se encuentra congelado. En cambio, los caudales “peak”, asociados a los deshielos y aporte glacial, pueden ser representados en la serie simulada.

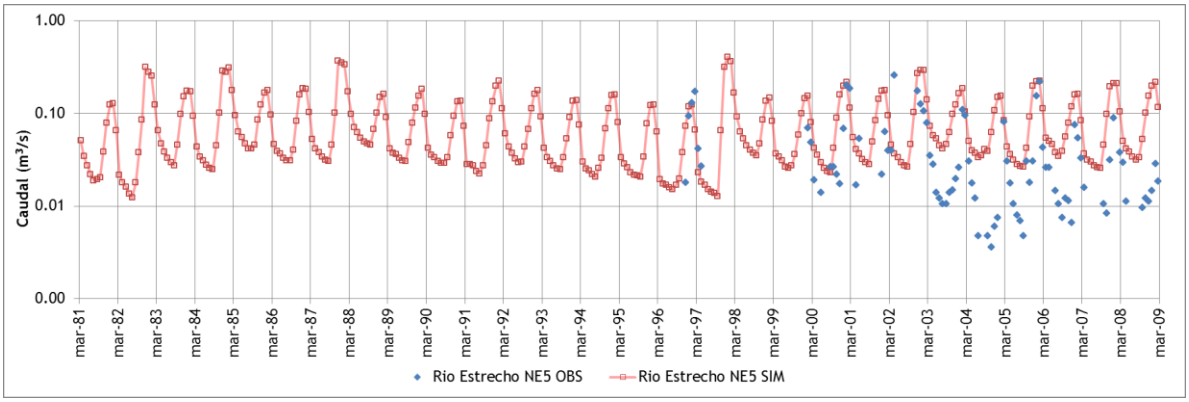
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.1
Detalle de la Cuenca Definida por NE5



Fuente: Elaboración Propia

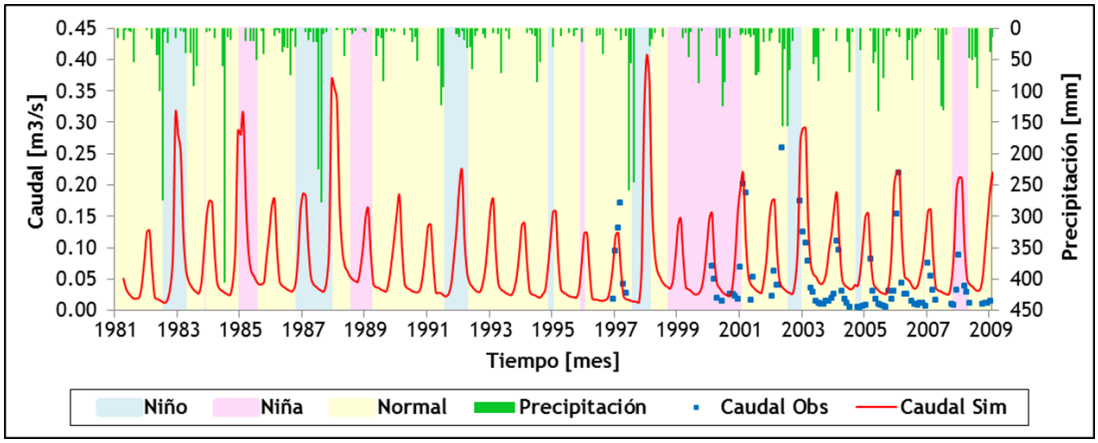
Figura 8.2
Caudal Simulado para el Sistema NE5



Fuente: Elaboración Propia

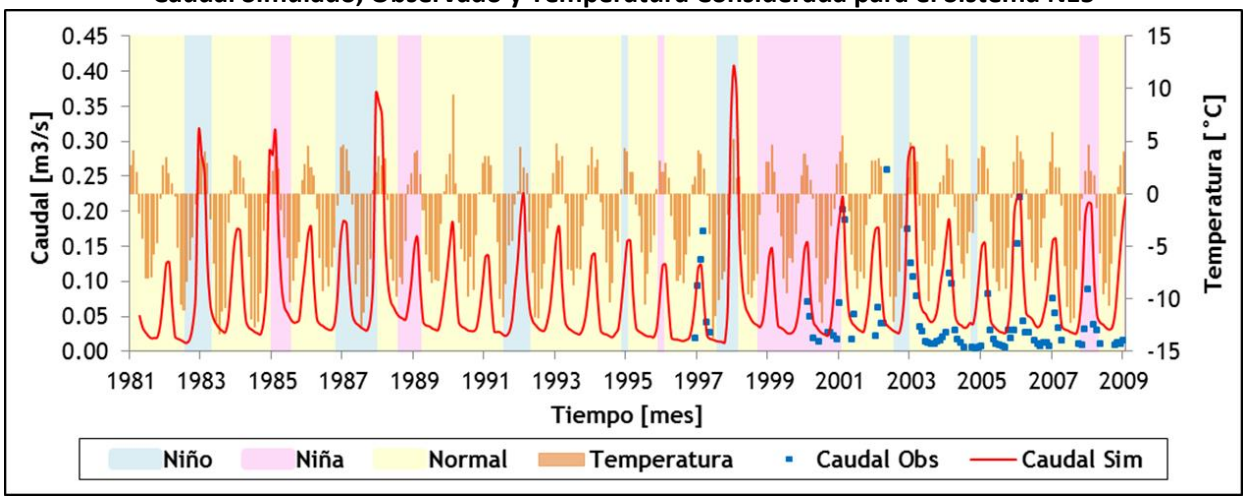
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.3
Caudal Simulado, Observado y Precipitación Considerada para el Sistema NE5



Fuente: Elaboración Propia

Figura 8.4
Caudal Simulado, Observado y Temperatura Considerada para el Sistema NE5



Fuente: Elaboración Propia

Complementando este análisis, la **Figura 8.3** establece la relación del caudal simulado y el pulso de precipitación asociado. Como se puede apreciar la mayoría de las crecidas simuladas se corresponden con la precipitación registrada, similares pulsos producen caudales de crecida del mismo orden de magnitud, pero existen años en que la magnitud de los caudales de crecida observados (1997, 2002, 2008) no se corresponden con la magnitud de los pulsos de precipitación ni reflejan los comportamientos antes vistos. Esto puede deberse a que los puntos son aforos manuales, que si bien en determinados casos pueden representar una escorrentía promedio, también pueden representar una condición más seca o más húmeda asociada al mismo mes, por lo que existe una dispersión (incertidumbre) inherente en la información. Cuando se complementa el gráfico anterior con la serie de temperatura asociada (**Figura 8.4**) es posible observar que los caudales base tienen asociadas temperaturas del orden de -10°C. Producto de la evidente componente nival-glacial del sistema, se debe

entender que la relación entre los pulsos de precipitación y caudal podría no ser siempre regular en magnitud, en el sentido en que si ese año es particularmente más frío, se acumulará más nieve en la banda superior, pudiendo reservar parte de esta para un siguiente ciclo. A esta condición se le añade que cuando se está en la presencia de un fenómeno de niño (1983, 1987-88, 1997-98) los pulsos de precipitación pueden producir crecidas mayores que similares (o menores) pulsos pero en años catalogados como “normales”, como los años 2006-07 versus 1986-87.

8.3 Sectorización

Para efectos de la sectorización, se procedió a construir las capas de información geográficas de las obras detalladas por la imagen georeferenciada y que a su vez corresponden al mapa de obras actuales informadas por Barrick (**Figura 8.5**).

Las obras y sectores analizados corresponden a las siguientes:

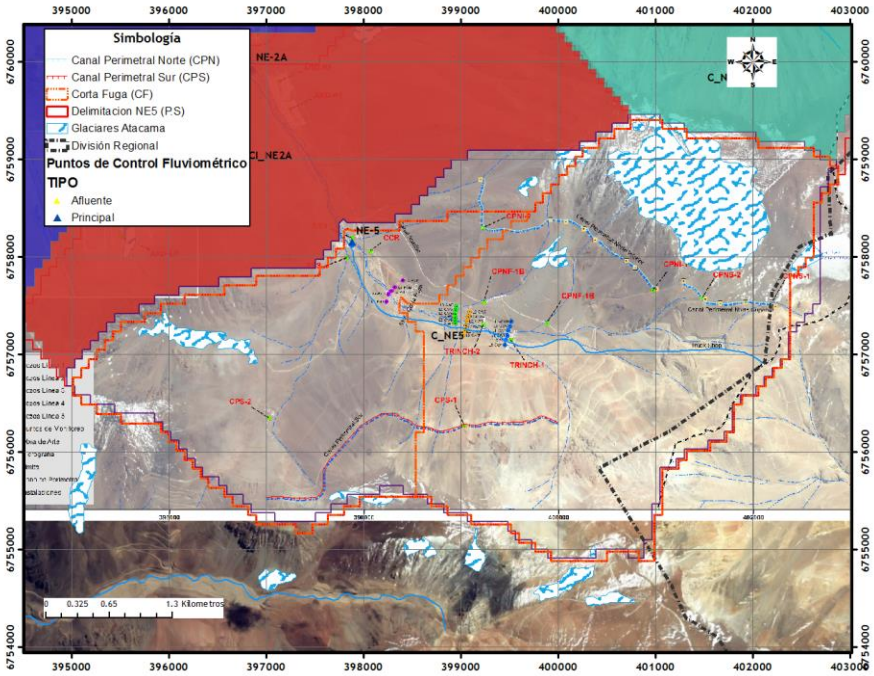
i. Canal Perimetral Norte (CPN): Canal dividido en dos tramos el cual, para los efectos de esta minuta, captura el total del caudal glacial.
ii. Canal Perimetral Sur (CPS).
iii. Muro Corta Fuga (CF): Corresponde a la batería de pozos en donde se encuentra el Corta Fuga. Las aguas capturadas (aguas de contacto) por esta obra serán derivadas a una planta de tratamiento (en proyección).
iv. Sector Aguas Abajo del Corta Fuga (AgAbCG): Corresponde al área aguas abajo del CF, no incluyendo las aguas susceptibles de ser capturadas por CPS y el CPN.
v. Sector Aguas Arriba del Corta Fuga (AgArrCF): Corresponde al área aguas arriba del CF, sin considerar las aguas susceptibles de ser capturadas por el CPN y el CPS. Corresponden a las aguas de contacto que debiesen ser tratadas.

Al efectuar una delimitación más cuidadosa del sector se puede notar que tanto la división regional oficial, como la delimitación realizada por GRASS de la subcuenca, no incorporan al glaciar Amarillos, el cuál si aparece como incorporado en los planos de Barrick e incluso en la propia delimitación limítrofe de la imagen georeferenciada. Para una segunda etapa de revisión esto puede corregirse de manera de mejorar el modelo en su parte alta, incluyendo esta área.

El detalle de las obras levantadas se presenta en la **Figura 8.6**, mientras que las zonas a considerar en esta sectorización se presentan en la **Figura 8.7**.

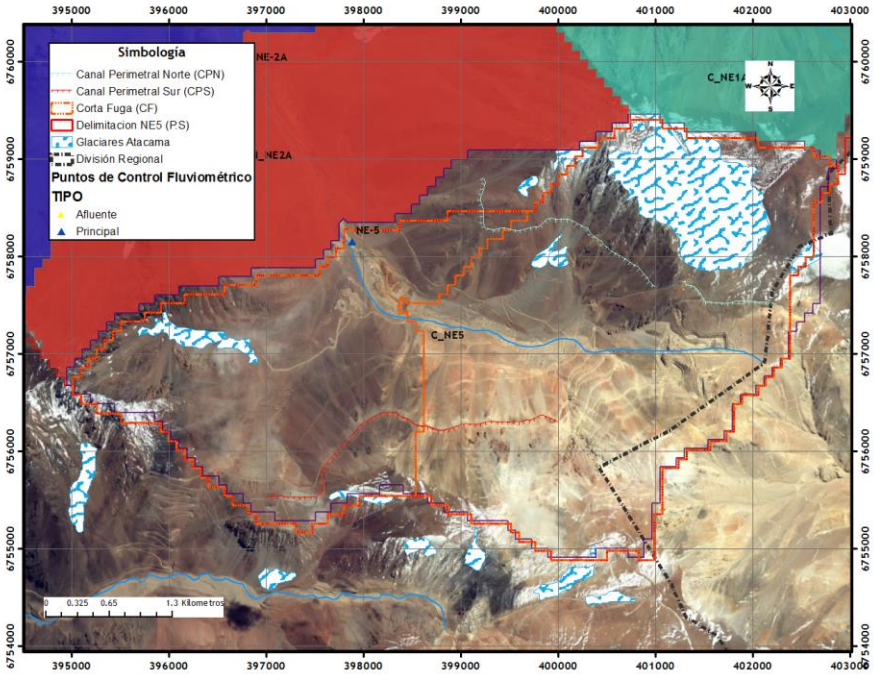
HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.5
Detalle de las Obras en el Sector NE5



Fuente: Elaboración Propia

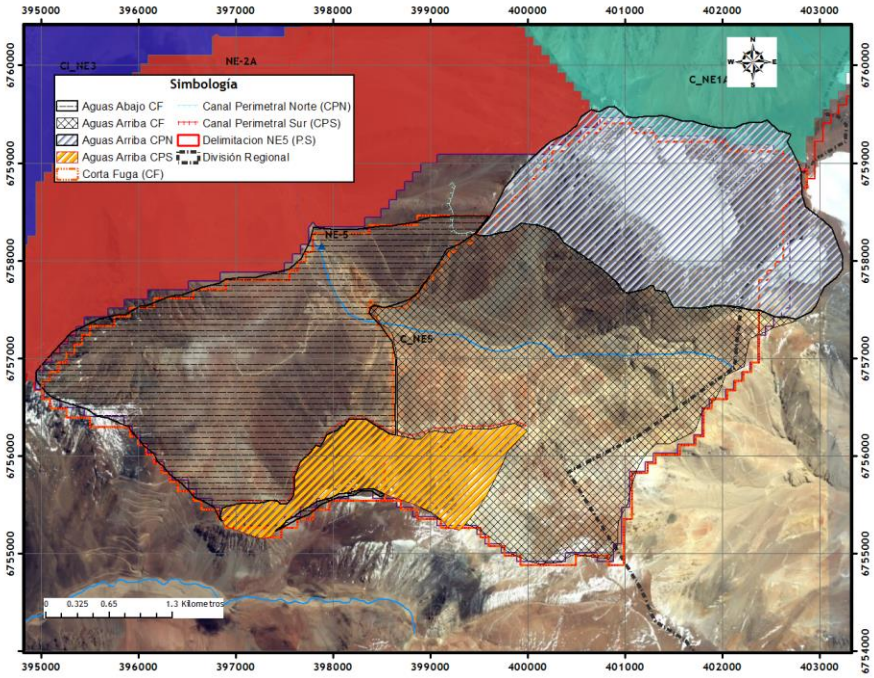
Figura 8.6
Capas de Información Construidas para la Representación de las Obras



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.7
Sectorización de acuerdo a las Obras Presentes en la Cuenca NE5



Fuente: Elaboración Propia

8.4 Metodologías de Estimación del Caudal por Sector

8.4.1 Factores de Aporte por Banda de elevación y Obra (Sector)

El modelo conceptual escogido para esta modelación corresponde a uno basado en bandas de elevación. Por tanto, la estimación de los caudales asociados a cada zona de interés requiere del cálculo o descomposición de estas áreas según las bandas de elevación consideradas para el sector de NE5, tal como se muestra en la **Figura 8.8**. Las áreas calculadas se presentan en la **Tabla 8.1**.

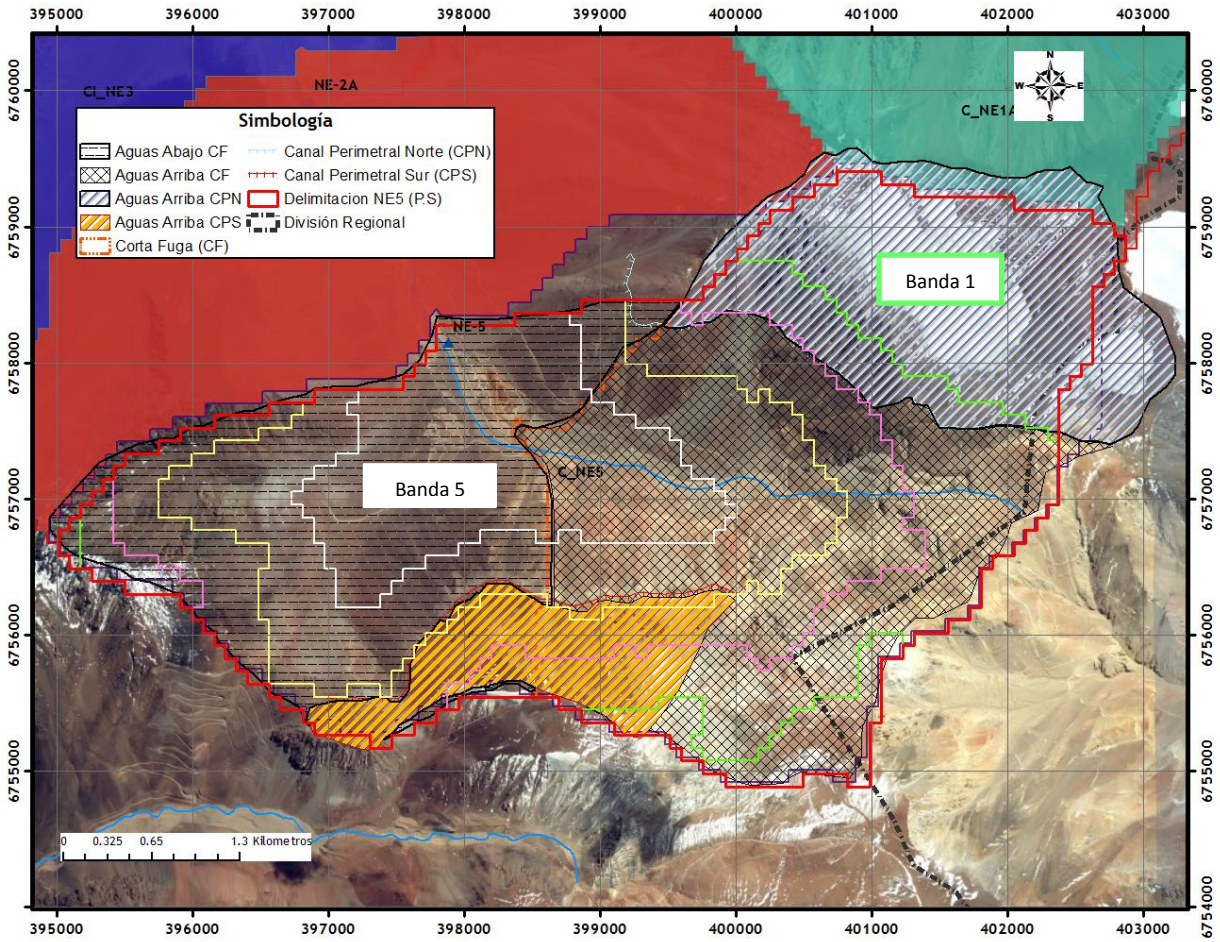
Tabla 8.1
Cálculo de las Áreas de Aporte de Cada Banda por Sector de Interés

		Área por Banda de Elevación [km^2]				
Obra / Área de Interés	**Área [km^2]**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**
Canal Perimetral Norte (CPN)	5.133	4.277	0.856			
Canal Perimetral Sur (CPS)	1.781	0.068	0.553	1.160		
Aguas Abajo Corta Fuga (AgAbCF) sin CPS-CPN	6.811	0.260	0.261	1.201	2.436	2.653
Aguas Arriba Corta Fuga sin CPS ni CPN (AgArrCF)	7.706	0.670	2.204	1.791	1.986	1.056
Área NE-5 (y bandas) post Sectorización	21.431	5.275	3.874	4.152	4.422	3.709

Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.8
Sectorización por Banda de Elevación para NE5



Fuente: Elaboración Propia

Con esta información se define el factor de aporte (F.A) porcentaje de aporte de cada banda a cada obra como:

F.A (Banda i, Obra j) = Área Banda (i,j)/Área Total Banda (i).

Dichos Factores de Aporte se presentan en la **Tabla 8.2**.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Tabla 8.2
Factores de Aporte por Banda para Cada Sector de Interés

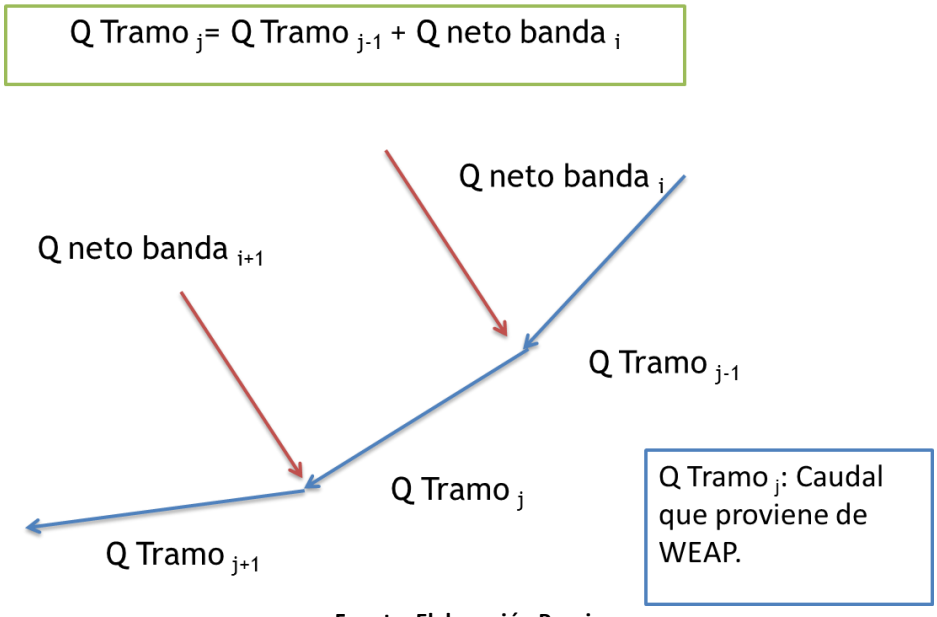
Obra / Área de Interés	Área [km^2]	B1	B2	B3	B4	B5
Canal Perimetral Norte (CPN)	5.133	0.811	0.221	0.000	0.000	0.000
Canal Perimetral Sur (CPS)	1.781	0.013	0.143	0.279	0.000	0.000
Aguas Abajo Corta Fuga (AgAbCF) sin CPS ni CPN	6.811	0.049	0.067	0.289	0.551	0.715
Aguas Arriba Corta Fuga sin CPS ni CPN (AgArrCF)	7.706	0.127	0.569	0.431	0.449	0.285
Area NE-5 (y bandas) post Sectorización	21.431	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

8.4.2 Caudales Netos por Banda de Elevación

Dentro del esquema conceptual adoptado, la banda de elevación de mayor altura incorpora un flujo glacial que viene de la estimación efectuada por Mike Jones. Para determinar el caudal de aporte que tiene cada banda de elevación se hace necesario restar dicho caudal de la banda superior.

Además de esto WEAP reporta los caudales que se producen por tramos de ríos, por lo que para obtener lo que produce cada banda, se deben hacer las respectivas restas entre ellas. El esquema conceptual se presenta a continuación en la **Figura 8.9**.

Figura 8.9
Esquema Conceptual de la Obtención del Caudal Neto por Banda



Fuente: Elaboración Propia

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia

Además, se debe verificar que:

$$Q_{sim}^{NE5} = \sum_{i=1}^{5} Q_{neto\ banda\ i} + Q_{Jones}^{glacial}$$

Donde:

Q_{sim}^{NE5} corresponde al caudal simulado por WEAP en NE5.

En este caso esto ha sido verificado. Finalmente el caudal para cada obra o sector "j" ($Q_{Obra\ j}$) se calcula como:

$$Q_{Obra\ j} = \sum_{i=1}^{5} F.A_{(i,j)} * Q_{neto\ banda\ i}$$

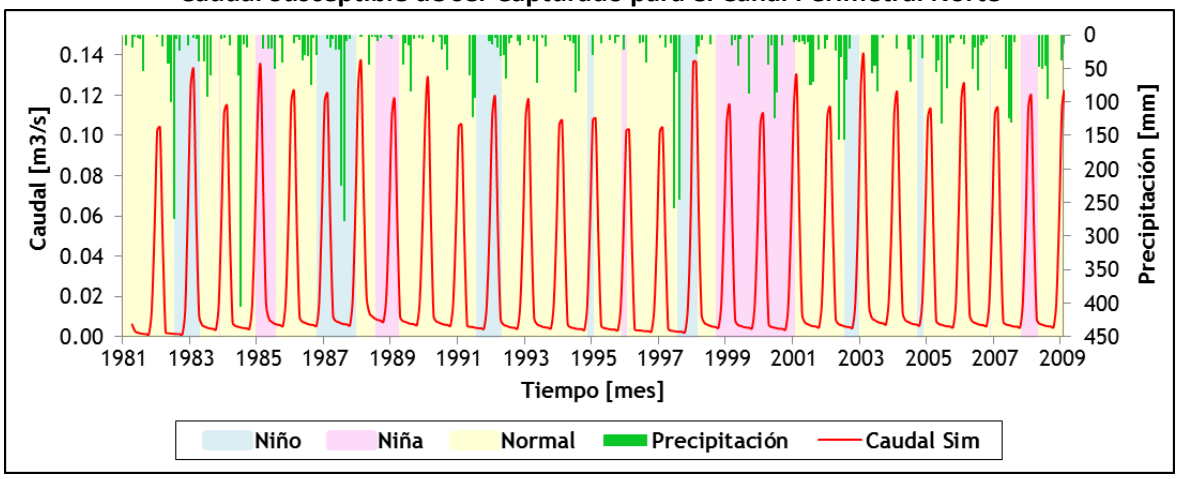
El cálculo de estos caudales se adjunta en anexo digital.

8.5 Resultados por Sector

8.5.1 Canal Perimetral Norte (CPN)

Este caudal equivale a la suma ponderada entre los factores de aporte por banda 1 y 2 con los caudales netos de dichas bandas. Se le adiciona además el caudal glacial de Jones afectado por un factor de ponderación que fue parte de la calibración del modelo.

Figura 8.10
Caudal Susceptible de ser Capturado para el Canal Perimetral Norte



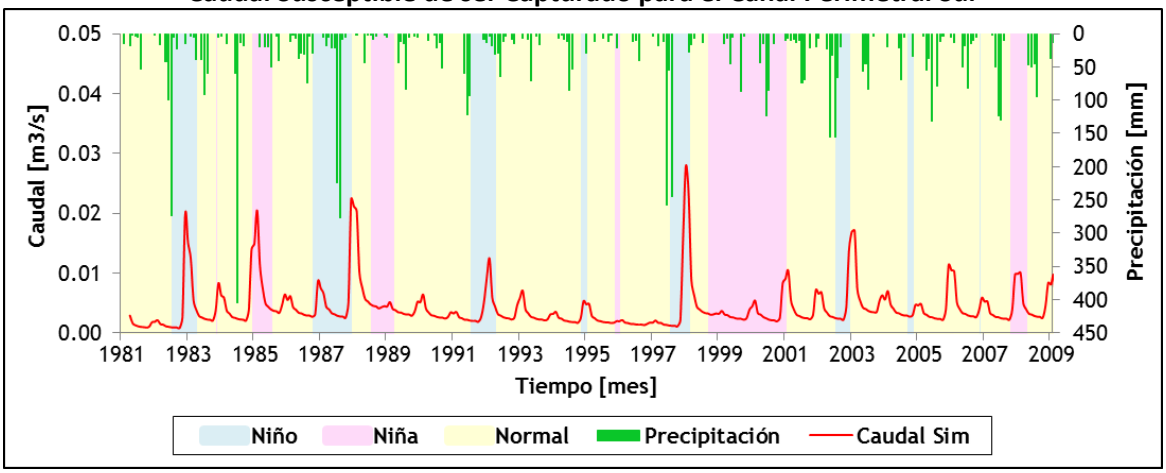
Fuente: Elaboración Propia

8.5.2 Canal Perimetral Sur (CPS)

Este caudal equivale a la suma ponderada entre los factores de aporte por banda 1,2 y 3 con los caudales netos de dichas bandas. No se le adiciona ningún aporte glacial.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.11
Caudal Susceptible de ser Capturado para el Canal Perimetral Sur

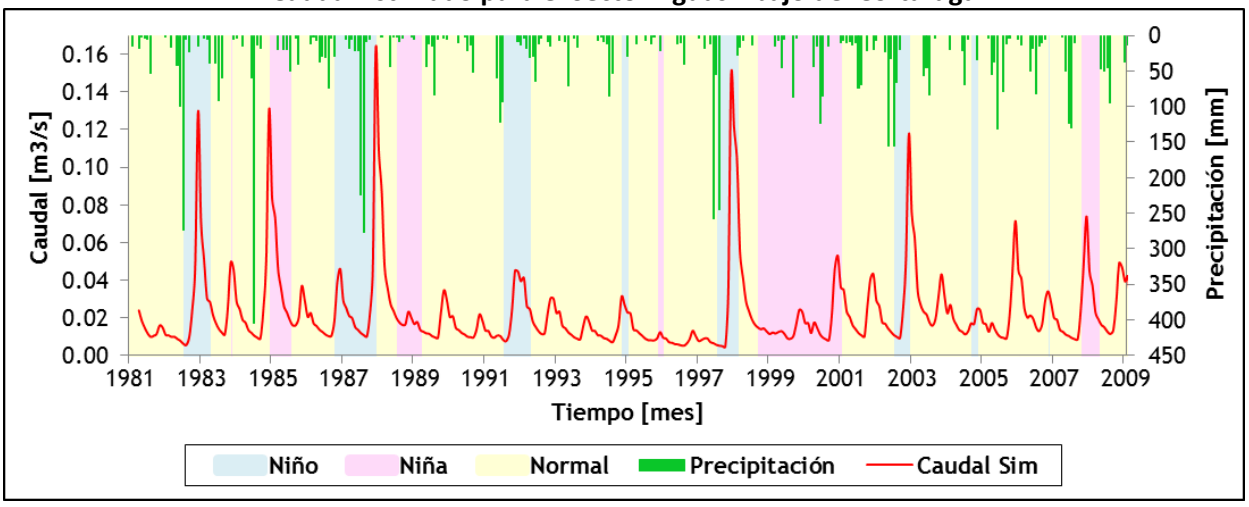


Fuente: Elaboración Propia

8.5.3 Sector Aguas Abajo del Cortafuga (AgAbCF)

Este caudal equivale a la suma ponderada entre los factores de aporte de las 5 bandas con los caudales netos de dichas bandas. No se le adiciona ningún aporte glacial.

Figura 8.12
Caudal Estimado para el Sector Aguas Abajo del Cortafuga



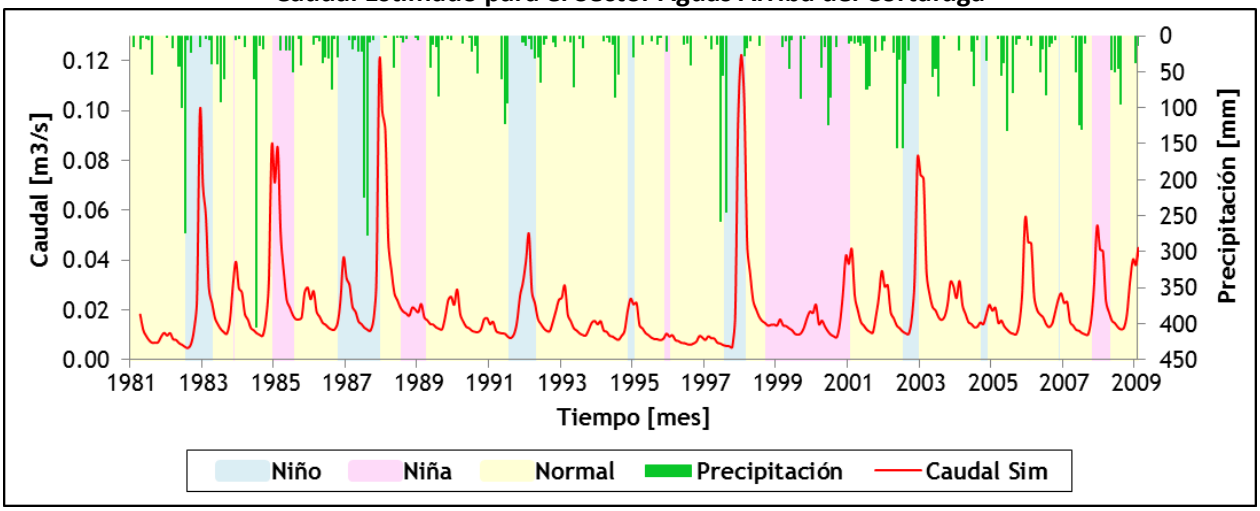
Fuente: Elaboración Propia

8.5.4 Sector Aguas Arriba del Cortafuga (AgArrCF)

Este caudal equivale a la suma ponderada entre los factores de aporte de las 5 bandas con los caudales netos de dichas bandas. No se le adiciona ningún aporte glacial.

HIDROMAS Ltda.
Av Suecia 211, Oficina 1301-B,
Providencia
www.hidromas.cl

Figura 8.13
Caudal Estimado para el Sector Aguas Arriba del Cortafuga



Fuente: Elaboración Propia

Luego de estimar el caudal para las 4 zonas o sectores, se ha verificado que la suma de las 4 series de caudales corresponde al caudal simulado en NE5, verificando entonces el proceso de cálculo.

8.5.5 Resumen Estadístico

Como resumen, en la **Tabla 8.3** se presentan los principales estadísticos de las series de caudales calculadas en los puntos anteriores.

Tabla 8.3
Resumen de Parámetros Estadísticos para las 4 Series de Caudales Calculadas

Estadístico	Q CPN	Q CPS	Q AgABCF	Q Ag Arr CF
Promedio	0,033	0,004	0,023	0,021
Mínimo	0,001	0,001	0,004	0,005
Máximo	0,139	0,028	0,163	0,122
Desv Est.	0,041	0,004	0,022	0,018
CV	1,246	0,894	0,951	0,858

Fuente: Elaboración Propia

En particular, se destaca el caudal máximo del sector aguas arriba del CF, el que representa la estimación del caudal máximo de las aguas de contacto a ser tratadas por Barrick.

8.6 Comentarios Generales

Esta etapa ha dado lugar a un refinamiento de NE5 que puede ser incorporado al modelo WEAP vía la descomposición de la parte alta en 3 zonas de aporte, considerando esta nueva hipsometría. Las diferencias entre las áreas modeladas en el proceso de calibración en comparación con las actuales, que se encuentran mejor delimitadas, es del orden de 0,5 km^2, es decir, una diferencia del 4%.

9.- CONCLUSIONES

9.1 Información Base

Este informe presenta detalladamente toda la información base utilizada para la construcción del modelo hidrológico y las series de entrada al mismo, consolidando las referencias bibliográficas que especifican la fuente de información que se han utilizado y las que debiesen servir para formar una base consolidada para estudios futuros que se deseen desarrollar.

A grandes rasgos, se ha adoptado un modelo conceptual hidrológico en base a bandas de elevación, lo que permite discretizar las subcuencas por "bandas aportantes" que pueden presentar distintas propiedades hidrológicas e hidrogeológicas, reflejadas en las consideraciones sobre los parámetros de calibración de cada sistema. Respecto de la hipsometría, ésta proviene de un análisis global utilizando modelos de elevación digital, cuya resolución máxima es de 30 metros.

La elección de este modelo conceptual sumado a la necesidad de determinar series de tiempo, en especial meteorológicas, para las bandas ha requerido utilizar métodos de estimación basados en el empleo de gradientes altitudinales de precipitación y temperatura, sumados a análisis espaciales de la humedad relativa y el viento. Se ha procurado incluir efectos locales, mediante la incorporación de parámetros (factor de corrección de precipitación) de regulación que han permitido mejorar el proceso de calibración.

Respecto de los parámetros hidrogeológicos, el trabajo efectuado por HIDROMAS ha permitido la definición de rangos de movilidad de los valores de las conductividades y almacenamientos, lo que significa un valor agregado a la modelación por cuanto se intenta calibrar la comunicación de los estanques superior e inferior del modelo dentro de un rango de variación que viene previamente definido y validado por un modelo hidrogeológico calibrado. Adicionalmente, se ha calculado la percolación ocupada por WEAP para cada subcuenca analizada.

Dentro de este estudio, se han incorporado diversas fuentes de información que provienen de estudios efectuados por Barrick y que han permitido completar el proceso de calibración.

9.2 Resultados del proceso de calibración

Un proceso de calibración en general puede ser tan exitoso como lo es la información con la que se cuenta para efectuar este proceso. En este sentido, es importante destacar que la información, tanto en cantidad como en calidad es variable para cada una de las subcuencas, por lo que no todas ellas pueden ser calibradas con la misma certeza o calidad.

Además, debe considerarse que se está tratando de simular un sistema cuyo régimen hidrológico es glacial-nival, lo que trae especiales dificultades en la calibración de las magnitudes de los caudales "peaks", además de una banda de confianza en donde éstos pueden ocurrir. En este caso se han modelado todas las subcuencas de tal manera que para los sistemas aguas arriba de NE3, puedan acumular nieve que permita reproducir un caudal "peak" asociado al derretimiento de esta banda. En general, y sólo en un par de años, se ha permitido que la banda más alta mantenga una reserva de nieve

que se traspasa de un año a otro. Para todos los demás años, el proceso de derretimiento es completo para cada ciclo estacional.

Se han diseñado 6 gráficos distintos que permiten evaluar el grado de ajuste del modelo. Los gráficos que relacionan los caudales observados y simulados con la precipitación y temperatura permiten evaluar la calidad del proceso de derretimiento y congelamiento de las subcuencas. Del mismo modo, la serie de tiempo simulada y observada en escala logarítmica permite evaluar las diferencias que existen para los flujos base, en donde existe una mayor discrepancia por todos los factores anteriormente ya mencionados en este informe.

Del mismo modo, se puede evaluar la estacionalidad y los montos anuales de agua que simula cada subcuenca, privilegiando una consistencia con el comportamiento físico del sistema y evaluando su desempeño en términos de monto o disponibilidad anual, la que aparece en la mayoría de los casos sobrestimada, pero que se debe recordar que dicha disponibilidad es comparada con años que no siempre están completos y que, más aún, no informan el caudal “peak” del mismo año, puesto que existe un vacío general de la información en los meses de Diciembre y Enero.

El último gráfico presentado en el proceso de calibración permite evaluar el desempeño del modelo en términos de la reproducción de los caudales medios mensuales, teniendo en cuenta todas las limitaciones comentadas anteriormente. Además reporta un coeficiente de determinación.

En general es posible indicar que hasta NE4 el modelo puede reproducir la señal de los caudales, manteniendo un flujo base acorde con las observaciones. En general los sistemas con mejor desempeño fueron NE1A, NE3 y NE4. Las estaciones de monitoreo NE5 y NE2 presentan la dificultad de modelar un sistema con una fuerte componente glacial en donde, a juicio del consultor, los puntos observados subestiman la disponibilidad hídrica por efecto del congelamiento del curso de agua y sus inmediaciones.

En general la información para los sistemas aguas abajo de NE4 es incompleta. Dicha información en muchos casos no permite calibrar bien una estacionalidad o una magnitud de crecida, por lo que los ajustes logrados para estos sistemas fueron de menor calidad que los encontrados en la parte alta. Para controles fluviométricos de mejor información como NE8 y NE9 fue posible encontrar un ajuste global que permitió representar de mejor manera el comportamiento de la cuenca, siendo NE8 el punto de mejor calidad. Existe mucha incertidumbre de aportes laterales como CN8, CN2, NE7 que representan un buen aporte en términos de superficie, pero en los cuales se carece de mejor información para mejorar sus calibraciones individuales, por lo que sus parámetros fueron también utilizados para mejorar el ajuste de NE8 y NE9.

A pesar de eso, en el **Acápite 4.3** se observa que, en general, hasta NE8, se logra reproducir el orden de magnitud de los montos observados y que la estimación de los caudales, en un escenario desfavorable, corresponde a una estimación más conservadora para efectos de estimación de caudales de dilución (asociados a caudales con probabilidades de excedencia altas).

10.- BIBLIOGRAFÍA

- Ayala, A (2011). Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico de la laguna Laja. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile.
- Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009".
- Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2008-2009".
- BGC (2012). BGC Ingeniería Ltda. "Informe meteorológico de glaciares Pascua Lama año 2010-2011".
- CECs (2012). Centro de Estudios Científicos. "Informe Anual de Condiciones Meteorológicas Observadas Sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama, Año Hidrológico 2011-2012".
- CECs (2013). Centro de Estudios Científicos. "Meteorología Abril 2012-Marzo 2013 en la zona del proyecto Pascua-Lama".
- Registros pluviométricos de estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA).
- Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick.
- Registros meteorológicos de estaciones del Centro de Estudios Científicos (CECs).
- CONIC-BF (2014). Conic-BF Ingenieros Consultores. "Estimación de Volúmenes Anuales Afluentes a Cámara de Captación y Restitución (CCR)".
- Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año hidrológico 2008-2009".
- Barrick. "Meteorología Proyecto Pascua-Lama Estadística Año Meteorológico 2008-2009".
- CEAZA (2008). Laboratorio de Glaciología Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. "Mediciones Meteorológicas Sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama Verano 2007-2008".
- CEAZA (2008). Laboratorio de Glaciología Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. "Mediciones Meteorológicas Sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama Verano 2007-2008".
- CECs (2012). Centro de Estudios Científicos. "Informe Anual de Condiciones Meteorológicas Observadas Sobre Cuerpos de Hielo en las cercanías del Proyecto Pascua-Lama, Año Hidrológico 2011-2012".
- CECs (2013). Centro de Estudios Científicos. "Meteorología Abril 2012-Marzo 2013 en la zona del proyecto Pascua-Lama".
- HIDROMAS (2014). Minuta técnica: "Reconocimiento en terreno de puntos de monitoreo de agua superficial y proyecto Pascua Lama". Preparada por René Figueroa L. y Sergio Duarte M.
- HIDROMAS (2014). Informe técnico: "Validación Aforos Manuales en Puntos del Río del Estrecho".
- HIDROMAS (2014). Informe técnico: "Resumen Modelo Hidrológico Hidrogeológico Conceptual y Numérico Río del Estrecho".
- LLamas, J. (1993). "Hidrología general: Principios y aplicaciones". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

- Proust Consultores, (2013). Informe programa de monitoreo de aguas julio 2012-junio 2013 proyecto Pascua Lama.
- Registros pluviométricos de estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA).
- Registros hidrometeorológicos de estaciones pertenecientes a Compañía Minera Nevada-Barrick.
- Registros meteorológicos de estaciones del Centro de Estudios Científicos (CECs).
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee, 2005. WEAP21 –A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model Part 1: Model Characteristics. Water International 30:487500.
- Young, Charles A., Marisa I. Escobar-Arias, Martha Fernandes, Brian Joyce, Michael Kiparsky, Jeffrey, F.Mount, Vishal K. Mehta, David Purkey, Joshua H. Viers, and David Yates, 2009. Modeling the Hydrology of Climate Change in California's Sierra Nevada for Subwatershed Scale Adaptation. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 45(6):1409-1423. DOI: 10.1111 / j.1752-1688.2009.00375.