

INFORME

“SISTEMA DE PRONÓSTICO DE CAUDALES (SPC)”

ETAPA 1

GERENCIA DE OPERACIÓN
GERENCIA DE TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

SEPTIEMBRE 2018



Índice

1. RESUMEN EJECUTIVO	2
2. MOTIVACIÓN	3
3. OBJETIVO Y ALCANCE DEL SPC	6
4. DESARROLLO DEL SPC PARA REGIMEN OPERACIONAL	6
4.1. HITOS DEL SPC.....	6
4.2. CALIBRACIÓN DEL SPC.....	8
5. EVALUACIÓN MARCHA BLANCA	9
6. IMPACTO DEL SPC EN LA OPERACIÓN DEL SEN	10
6.1. SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN	10
7. USO DEL SPC EN LA PROGRAMACIÓN DEL SEN	17
8. COMENTARIOS FINALES	18
Anexo A: Implementación y evaluación del Sistema de Pronóstico de Caudales (Informe preparado por Meteodata para el Coordinador).....	20
Anexo B: Metodología actual de pronóstico de caudales y tratamiento de incertidumbre hidrológica	44
Anexo C: Indicadores de desempeño	45
Anexo D: Resultados de la simulación de la operación del SEN	46

1. RESUMEN EJECUTIVO

En el marco de las iniciativas realizadas por el Coordinador conducentes al desarrollo de nuevos modelos y herramientas para la coordinación del Sistema Eléctrico Nacional, en adelante SEN, el presente informe describe un nuevo Sistema de Pronóstico de Caudales, (en adelante SPC) para centrales hidroeléctricas, el cual comenzará su aplicación en el proceso de programación de la operación del SEN una vez aprobado por la Comisión Nacional de Energía. Cabe señalar que dicho servicio será provisto por la empresa Meteodata Ltda, en adelante el Proveedor, quien a solicitud del Coordinador diseñó una metodología de pronósticos *ad hoc* al fenómeno hidrometeorológico nacional.

Con relación a la metodología de pronósticos, el SPC es un sistema basado en un modelo hidrológico físico de las cuencas, modelos de pronósticos meteorológicos (temperatura y precipitaciones) e información meteorológica reciente (fuente DGA), el cual permite caracterizar la topología de cada cuenca y representar la incertidumbre meteorológica. La metodología elaborada por el Proveedor fue aplicada el año 2016 a las cuencas de Rapel, Maule/Invernada, Laja, Biobío y Chapo, Aconcagua, Colorado, Cachapoal, Tinguiririca y Duqueco, obteniendo resultados satisfactorios. Cabe señalar que modelos físicos de caracterización de cuencas han sido utilizados por los Operadores de Brasil y Colombia, países donde la componente hidroeléctrica en la matriz energética es relevante.

Para el presente año, el Proveedor determinará diariamente pronósticos de caudales para 41 puntos de control, correspondientes a las cuencas asociadas a las principales centrales hidroeléctricas, que representan alrededor de 6.000 MW de capacidad instalada. El SPC será implementado en dos etapas:

- Etapa 1: considera 20 puntos de control correspondiente a las cuencas de los ríos Rapel, Maule, Laja, Biobío y Chapo, que representan alrededor de 4.700 MW de capacidad instalada. En estas cuencas se encuentran emplazados los principales embalses del SEN, los cuales proveen al sistema capacidad de regulación y flexibilidad operacional.
- Etapa 2: considera 17 puntos de control correspondiente a las cuencas de los ríos Aconcagua, Colorado (Aconcagua), Olivares, Colorado (Maipo), Cachapoal, Tinguiririca, Huanehue, Pilmaiquén y Duqueco, que representan alrededor de 1.300 MW de capacidad instalada del SEN.

Durante la marcha blanca de la Etapa 1, comprendida entre mayo y julio de 2018, las evaluaciones de desempeño de los pronósticos de la primera semana muestran que, para el 100% de los puntos de control evaluables, el SPC tiene un error absoluto (indicador MAPE) igual o inferior al error obtenido con la metodología actualmente utilizada por el Coordinador. Respecto a los pronósticos de la segunda semana, para el 85% de los puntos de control evaluables el SPC tiene un error absoluto (indicador MAPE) inferior respecto al error obtenido con la metodología actual. Sin perjuicio de lo anterior y considerando la variabilidad e incertidumbre del comportamiento de los caudales, a solicitud del Coordinador, el Proveedor tendrá destinado especialistas permanentes para realizar funciones de mejoramiento continuo a efecto de mantener la mejor calibración posible, para cada punto de control, en el SPC.

Adicionalmente, el presente informe describe el mecanismo sobre cómo los pronósticos del SPC serán utilizados para la programación de mediano y corto plazo del SEN. A partir de dicho mecanismo, el Coordinador realizó simulaciones del proceso de programación del SEN considerando los pronósticos del SPC de la Etapa 1.

Como resultado de la evaluación de la marcha blanca, y considerando lo señalado en el artículo 48 del DS 291, una vez que la CNE apruebe este algoritmo predictivo se utilizarán en la programación de la operación del SEN sólo pronósticos de los primeros 14 días del SPC. La metodología para los pronósticos desde la tercera semana requiere un tiempo mayor de evaluación y se prevé se encuentre validado para el comienzo del año hidrológico 2019-2020.

El SPC nace de la necesidad de mejorar el desempeño de los pronósticos de caudales considerando las restricciones de la metodología actual de pronósticos utilizada por el Coordinador, basada en métodos estadísticos. La metodología actual reproduce los caudales históricos y no permite que se optimice la operación de los embalses de acuerdo con caudales esperados. De esta manera, cuando los caudales de los últimos días han sido altos y no se prevén precipitaciones en las cuencas de interés para los próximos días, los modelos de operación sobre estiman la generación que deben entregar las centrales de embalse. Lo contrario ocurre cuando se han presentado caudales bajos en los días anteriores y se esperan caudales mayores en los próximos días. En este sentido, el SPC permitirá gestionar de forma eficiente los recursos de agua embalsada, adecuando la operación de los embalses a los caudales esperados. Si consideramos además que la programación se elabora todos los días hábiles, los errores de pronóstico se pueden ir corrigiendo con nuevas predicciones actualizando además las condiciones iniciales cada vez que el proceso se vuelve a ejecutar. Además, la baja disponibilidad de recursos de generación hidráulica presentes en el SEN en los últimos 7 años hace que sea necesario utilizar estimaciones de mediano plazo del recurso hídrico, junto con estimaciones más realistas de la incertidumbre para lo que resta del año hidrológico simulado. Asimismo, considerando el cambio de la matriz energética nacional producto de la rápida incorporación de centrales ERNC, se requiere una gestión más eficiente de los embalses asociados a las centrales hidroeléctricas para que puedan contribuir a la flexibilidad que necesita el sistema, reduciendo la incertidumbre en la energía disponible para contribuir a dicha flexibilidad.

Conforme a lo anterior, la aplicación del SPC es un paso más del Coordinador para contribuir en una operación más segura y económica del SEN, así como un mejor aprovechamiento de las características de las centrales hidroeléctricas para contribuir en la flexibilidad operativa requerida para gestionar la mayor variabilidad actual y futura del SEN.

2. MOTIVACIÓN

Los principales embalses del SEN tienen capacidades de regulación que van desde un día hasta varios meses. Lo anterior permite que este tipo de centrales puedan reemplazar generación térmica en épocas de menores afluentes, con agua embalsada en períodos de mayores precipitaciones o épocas de deshielo. De esta manera, una reducción de la incertidumbre en los caudales afluentes esperados permite optimizar el abastecimiento de la demanda de energía del sistema. La optimización del uso del recurso hídrico se puede presentar a nivel diario, moviendo energía desde la madrugada hacia el resto del día, a nivel semanal, moviendo energía desde los fines de semana hacia los días de trabajo, o a nivel estacional, moviendo energía dentro del año.

Junto a lo anterior se debe considerar que la matriz de generación del SEN ha experimentado un cambio relevante en los últimos años producto de la rápida inserción de energía solar y eólica, situación que se prevé se profundice en los próximos años cuando entren en operación los proyectos ERNC adjudicados en las dos últimas licitaciones de suministro de clientes regulados. Dichos cambios en la matriz del SEN sumado a cambios regulatorios tales como el nuevo régimen de SSCC e inserción de nuevas tecnologías como el almacenamiento, introducirán nuevas dinámicas y prácticas operativas en el SEN, principalmente para dar respuesta a los requerimientos de flexibilidad de manera eficiente. Conforme a lo anterior, el Coordinador ha definido un plan de trabajo que considera la evaluación y adaptación de las herramientas y modelos requeridos para garantizar una coordinación segura y eficiente del SEN, considerando los desafíos actuales, así como los previstos en el

mediano plazo. Dentro del plan de trabajo antes señalado, se considera el mejoramiento de los modelos y metodologías de pronóstico, considerando que un pronóstico de mejor calidad es una de las medidas operacionales de mayor impacto para garantizar una operación segura y eficiente del SEN, a través de la disminución de las desviaciones de la generación programada del parque generador, un mejor dimensionamiento de las reservas operativas, entre otros beneficios.

Los pronósticos son esencialmente datos de entrada a los procesos del Coordinador para facilitar la toma de decisiones, junto con otra información disponible y proporcionada por las empresas Coordinadas. En particular el Proceso de la Programación de la Operación del SEN tiene diferentes insumos y datos de entrada, y uno de ellos es el pronóstico de caudales relacionados con las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas de embalse, junto a las centrales de pasada (mayores a 5 MW), suman del orden de 6.000 MW de capacidad instalada, que representa el 20% de la capacidad instalada del SEN. Adicionalmente, este tipo de centrales de generación están distribuidas en distintas cuencas hidrográficas en la zona centro-sur de Chile y, producto de la capacidad de almacenamiento o regulación de dichas centrales, su operación tiene un impacto en la operación futura del SEN. Asimismo, la tecnología de las centrales hidroeléctricas de embalse hace que estas sean idóneas para proveer flexibilidad al SEN en términos de rampas, inercia, entre otros atributos. Conforme a lo anterior, con un mejoramiento del desempeño de los pronósticos de caudales de las centrales hidroeléctricas se prevé beneficios en términos de seguridad y eficiencia para la operación del SEN, junto con una gestión óptima de los recursos embalsados en el mediano plazo.

Durante los años 2015 y 2016, a requerimiento del CDEC SIC, el Proveedor realizó un estudio, en adelante el Estudio Meteodata, para evaluar el desempeño de la metodología actual de pronósticos de caudales. Además, el estudio incluyó una propuesta y evaluación del uso de un modelo hidrológico físico en el pronóstico de caudales para puntos de control de cuencas con embalses relevantes, tales como: Rapel, Maule/Invernada, Laja, Biobío y Chapo, así como los puntos de control de las cuencas de las centrales de pasada relevantes: Aconcagua, Colorado (Aconcagua), Olivares, Colorado (Maipo), Cachapoal, Huanehue, Tinguiririca y Duqueco.

El Estudio Meteodata determinó lo siguiente respecto de la metodología actual de pronóstico de caudales:

- El pronóstico de la primera semana logra capturar la variabilidad temporal de la serie hidrológica, pero con un desfase de una semana debido a que solo considera los caudales diarios de los últimos siete días.
- El pronóstico de la primera semana no considera datos de pronósticos de precipitaciones ni temperaturas, por lo tanto, no permite responder a eventos de aumento/disminución de caudales diarios por variaciones de precipitaciones y temperatura.
- La metodología depende del momento del pronóstico en tanto que los caudales obedecen a fenómenos continuos.
- La metodología (excepto pronóstico de deshielo) no distingue las particularidades de las diferentes cuencas (topología y clima).

Lo anterior, se puede apreciar en la Figura 1, donde se presenta la comparación entre el pronóstico de caudal asociado a la metodología actual (verde) y los caudales observados (línea roja) para la primera semana en la cuenca de Ralco (periodo 2009 a 2014). El error medio del pronóstico es mostrado con un área gris, el promedio de la estadística de caudales es mostrado en naranja.

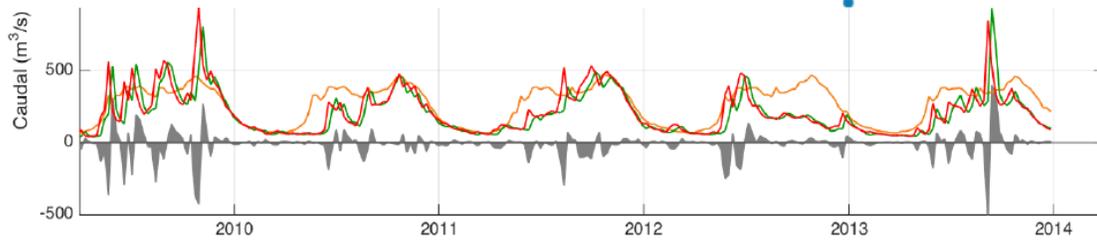


Figura 1: Comparación del pronóstico de caudal (metodología actual) y caudal observado en la cuenca de Ralco.

A su vez, el Estudio Meteodata consideró la implementación y evaluación de un modelo de pronóstico ad hoc a la realidad nacional, el que contó con las siguientes características:

- Basado en un modelo hidrológico físico internacional (Variable Infiltration Capacity Model) que permite internalizar la topología de las cuencas.
- Uso de un modelo de pronóstico del tiempo (temperatura y precipitaciones) para anticipar crecidas.
- Generación de escenarios para modelar incertidumbre del tiempo (temperatura y precipitaciones).
- Pronósticos con frecuencia y resolución diaria para facilitar internalizar el estado de las cuencas y la proyección de caudales en la operación del SEN.
- Metodología continua, es decir, no cambia durante el año.

En la Figura 2 se presentan los resultados del modelo propuesto (línea azul) y se puede observar que la diferencia entre el pronóstico de caudal y los caudales observados (línea roja) disminuyen significativamente. El error medio del pronóstico es mostrado con un área gris, el promedio de la estadística de caudales es mostrado en naranja.

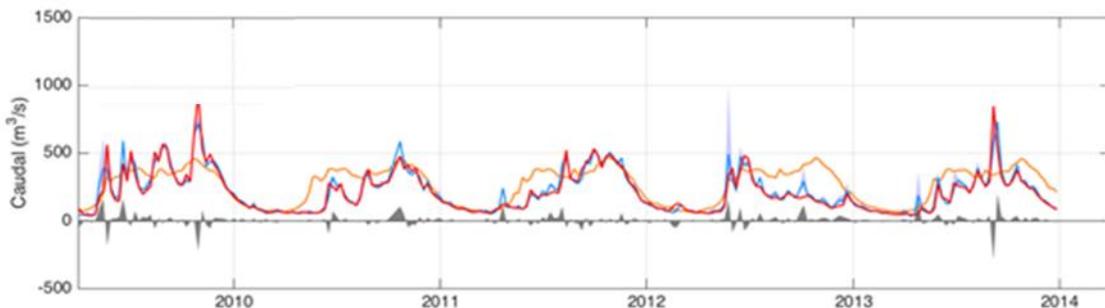


Figura 2: Comparación del pronóstico de caudal (propuesta Meteodata) y caudal observado en la cuenca de Ralco.

Conforme a los resultados antes señalados, el Coordinador definió el año 2017 la implementación de una nueva metodología de pronóstico de caudales, basado en modelos físicos y meteorológicos para su implementación el año 2018, considerando los siguientes aspectos:

- **Particularidades del fenómeno hidro-meteorológico:** debido a que las principales cuencas están ubicadas en la alta cordillera, los caudales son de tipo nival y/o pluvial, que tienen una incertidumbre asociada a la conversión de precipitación y/o nieve a caudal que varía en distintas escalas de tiempo, esto implica una complejidad al realizar los pronósticos de caudales con el método estadístico.
- **Mejores procesos, herramientas y mejora continua:** avanzar en procesos con altos estándares, conforme al estado del arte y mejores prácticas internacionales, así como contar con herramientas y

proveedores especializados en el fenómeno de interés (pronóstico de caudales), a efectos de lograr resultados robustos y garantizar iniciativas de mejoramiento continuo.

- **Nuevo proceso de la programación de la operación:** desde noviembre de 2017 el programa es realizado diariamente, es decir, el programa de mediano plazo es ejecutado diariamente en serie con el programa de corto plazo. Lo anterior implica realizar diariamente pronósticos de caudales semanales, con detalle diario. Anteriormente, el proceso consideraba un programa de mediano plazo que era ejecutado semanalmente con eventuales actualizaciones.
- **Experiencia de Operadores de sistemas eléctricos regionales:** Los modelos físicos de cuencas han sido utilizados por el Operador de Brasil (donde algunos modelos han sido desarrollados por centros de investigación y universidades) y por el Operador de Colombia como parte de sus acciones para gestionar las centrales hidroeléctricas, considerando la relevancia de dichas fuentes de energía en el suministro de la demanda de dichos países.

3. OBJETIVO Y ALCANCE DEL SPC

El objetivo del SPC es realizar pronósticos de caudales, con frecuencia y resolución diaria para los primeros 14 días del horizonte de programación y una estimación de la incertidumbre para el resto del año hidrológico, asociados a las cuencas hidrológicas de interés para el Proceso de la Programación de la Operación, a través de un sistema que integra un modelo hidrológico físico y pronósticos meteorológicos.

El servicio es realizado para 37 puntos de control correspondientes a las cuencas asociadas a las principales centrales hidroeléctricas, que representan alrededor de 6.000 MW de capacidad instalada. El servicio será implementado en dos etapas:

- Etapa 1, considera 20 puntos de control correspondiente a las cuencas de Rapel, Maule, Laja, Biobío y Chapo, que representa alrededor de 4.700 MW de capacidad instalada.
- Etapa 2, considera 17 puntos de control correspondiente a las cuencas de Aconcagua, Colorado (Aconcagua), Olivares, Colorado (Maipo), Cachapoal, Tinguiririca, Huanehue, Pilmaiquén y Duqueco, que representa alrededor de 1.300 MW de capacidad instalada.

4. DESARROLLO DEL SPC PARA REGIMEN OPERACIONAL

4.1. HITOS DEL SPC

En enero de 2018, se dio inicio formal al trabajo orientado a la puesta en servicio del SPC. Los hitos de este proyecto se resumen en la siguiente línea de tiempo:



Figura 3:Hitos del SPC durante 2018

Enero 2018: se realiza la primera reunión formal donde el Proveedor presenta un calendario con el programa de trabajo, que incluye el estado de avance de los medios físicos y tecnológicos que se utilizarán en la etapa de desarrollo del modelo físico (servicios meteorológicos, servidores, entre otros). Se definen, además, las actividades iniciales requeridas al Coordinador.

Febrero 2018: desde finales de enero y durante febrero, el Coordinador entrega al Consultor las estadísticas semanales y diarias de caudales afluentes para los puntos de control que forman parte de la Etapa 1 del proyecto, necesarias para la calibración del modelo hidrológico. Además, se entregan las instrucciones necesarias para que el SPC pueda recopilar de forma automática los datos de caudales diarios, informados por las empresas coordinadas, en el “Sistema de Operación Real” del Coordinador. Finalmente, se capacita a los profesionales del Proveedor respecto al balance de caudales utilizados en el proceso de la programación de la operación.

Marzo 2018: El Consultor realiza las tareas iniciales de parametrización del modelo hidrológico, tarea consistente en ingresar todas aquellas variables relevantes para simular el comportamiento de las cuencas y sus afluentes. Durante el mes de marzo, el proyecto se enfoca en la calibración del modelo físico para los puntos de control de la Etapa 1.

Abril – agosto 2018: A inicios de abril, el SPC cuenta con las funcionalidades requeridas para la entrega de pronósticos. A esa fecha, sin embargo, una cantidad importante de puntos de control no cuenta con una calibración aceptable que permita entregar pronósticos confiables. El Consultor realiza un levantamiento detallado e informa al Coordinador cada una de las inconsistencias detectadas, las cuales son revisadas y corregidas. Conforme a lo anterior, en el mes de abril se inicia la marcha blanca del SPC y el Coordinador comienza a recibir diariamente los caudales pronosticados.

Adicionalmente, comienza el trabajo de revisión de los pronósticos de la marcha blanca por parte del Coordinador. Se revisan los datos entregados por el SPC, tiempos de entrega y formatos de pronósticos requeridos para incorporar a la programación de corto y mediano plazo. Además, en esta etapa se definen y se aplican los indicadores de desempeño que se utilizarán para evaluar la mejora de los pronósticos, respecto a la metodología actualmente utilizada por el Coordinador.

Por último, durante este periodo se realiza el ejercicio en paralelo entre la programación de mediano y corto plazo (PLP y PLEXOS respectivamente), comparando los resultados utilizando los caudales entregados por el SPC respecto a los utilizados en la metodología actual. Se levantan y definen las tareas mínimas para el trabajo de mejora continua que el SPC establece por contrato.

Agosto 2018: Definición e implementación preliminar de portal web para que los Coordinados puedan visualizar los resultados del SPC.

Septiembre 2018: Término de evaluación del SPC y aprobación de la marcha blanca.

4.2. CALIBRACIÓN DEL SPC

La calibración abarca un periodo previo al comienzo del pronóstico propiamente tal y permite que el modelo hidrológico, alimentado por información meteorológica reciente, desarrolle una simulación fidedigna del estado hidrológico actual de la cuenca. El modelo se alimenta con información histórica de caudales, las mismas utilizadas por el Coordinador en sus procesos (estadística de caudal diaria y semanal). Al finalizar esta etapa el modelo debería pronosticar un caudal similar al que se observa para el día más próximo. En caso de existir una discrepancia entre el caudal simulado al inicio de pronóstico y el caudal observado en tiempo real, se aplica un método de corrección de caudales para ajustar el resultado del modelo hasta que calce con los datos observados. Dicho esto, la dificultad en el proceso de calibración de los pronósticos tiene directa relación con la calidad de las estadísticas de caudales enviados por las Empresas Coordinadas respectivas.

El trabajo de calibración por parte del Proveedor del SPC, con el apoyo de profesionales del Coordinador en la corrección de inconsistencias en las estadísticas diarias y/o semanales, ha permitido calibrar y realizar pronósticos aceptables para los 20 puntos de control indicados en la Tabla 1.

N°	Cuenca	Nombre Punto de Control
1	Rapel	Afluente a Embalse C.Rapel
2	Maule	Claro en S.Carlos + E.Las Garzas
3		Hoya Intermedia Pehuenche
4		C.I. BT C.Isla - desagüe L.Maule
5		C.I. E.C.Colbún-Maule en Armerillo
6		Hoya Intermedia Colbún
7		Afluentes E.Melado
8		Afluentes Laguna Maule
9		Afluentes Laguna Invernada
10		Laja
11	C.I. BT C.Abanico L.Laja	
12	Rucue	
13	Cuenca Intermedia Tucapel-Central Laja1	
14	Afluentes L.Laja	
15	C.I. Rama Laja C.Antuco	

16	Biobío	Afluente río Huequecura.
17		Cuenca intermedia Embalses Pangué – Angostura
18		Afluentes Embalse Ralco
19		C. I. entre Ralco y Pangué
20	Chapo	Afluentes Lago Chapo

Tabla 1: Punto de control de la Etapa 1

5. EVALUACIÓN MARCHA BLANCA

Para evaluar el SPC se han definido indicadores de desempeño, que permiten comparar objetivamente sus resultados respecto a la actual metodología usada en el Proceso de Programación de la Operación. El detalle de los indicadores y resultados de la marcha blanca de la etapa 1 del SPC, se describen en el Anexo A (informe desarrollado por el Proveedor) y el Anexo C.

La evaluación de la marcha blanca consiste en calcular para la primera y segunda semana del pronóstico del SPC, para cada punto de control, los indicadores de desempeño para los pronósticos diarios de caudales del SPC (definidos como IMSPC), contra los caudales que se obtienen usando la metodología actual de pronóstico (definidos como IMA).

Para el período de evaluación entre el 3 de mayo y el 30 de junio, los resultados para la primera semana muestran que, para el 100% de los puntos de control evaluables (puntos de control calibrados durante la evaluación), el SPC tiene un error absoluto (indicador MAPE) igual e inferior respecto a al error obtenido con la metodología que actualmente es utilizada por el Coordinador para pronosticar caudales afluentes. A su vez, para el periodo comprendido entre el 03 de mayo y el 28 de julio, los resultados muestran para la segunda semana del pronóstico que para un 85% de los puntos de control evaluables, el SPC también tiene un error absoluto (indicador MAPE) igual e inferior respecto al error obtenido con la metodología actual.

A modo ilustrativo, en la Figura 4 se presenta el pronóstico de caudal del embalse Ralco y embalse Rapel, calculados con la metodología actual y el SPC, y el valor real observado. Se puede apreciar que, ante eventos de precipitaciones, los caudales obtenidos con el SPC tienen un mayor desempeño que la metodología actual y no existe un desfase entre el caudal observado y el caudal pronosticado.

Por último, respecto a los pronósticos desde la tercera semana en adelante, se implementó una metodología para reducir la incertidumbre, la cual se describe en el Anexo A. Sin embargo, para validar dicha metodología se requiere un proceso de marcha blanca mayor que sea compatible con el horizonte de evaluación de un pronóstico de largo plazo, a efectos de lograr una correcta calibración e introducir eventuales mejoras metodológicas para lograr un pronóstico de calidad. Conforme a lo anterior, en un inicio el SPC será utilizado considerando sólo los pronósticos de los primeros 14 días y la reducción de incertidumbre de los pronósticos de largo plazo o desde la tercera semana se implementarán a partir del año hidrológico 2019-2020.

Mayores detalles de la calibración y evaluación de desempeño se encuentran en el Anexo A.

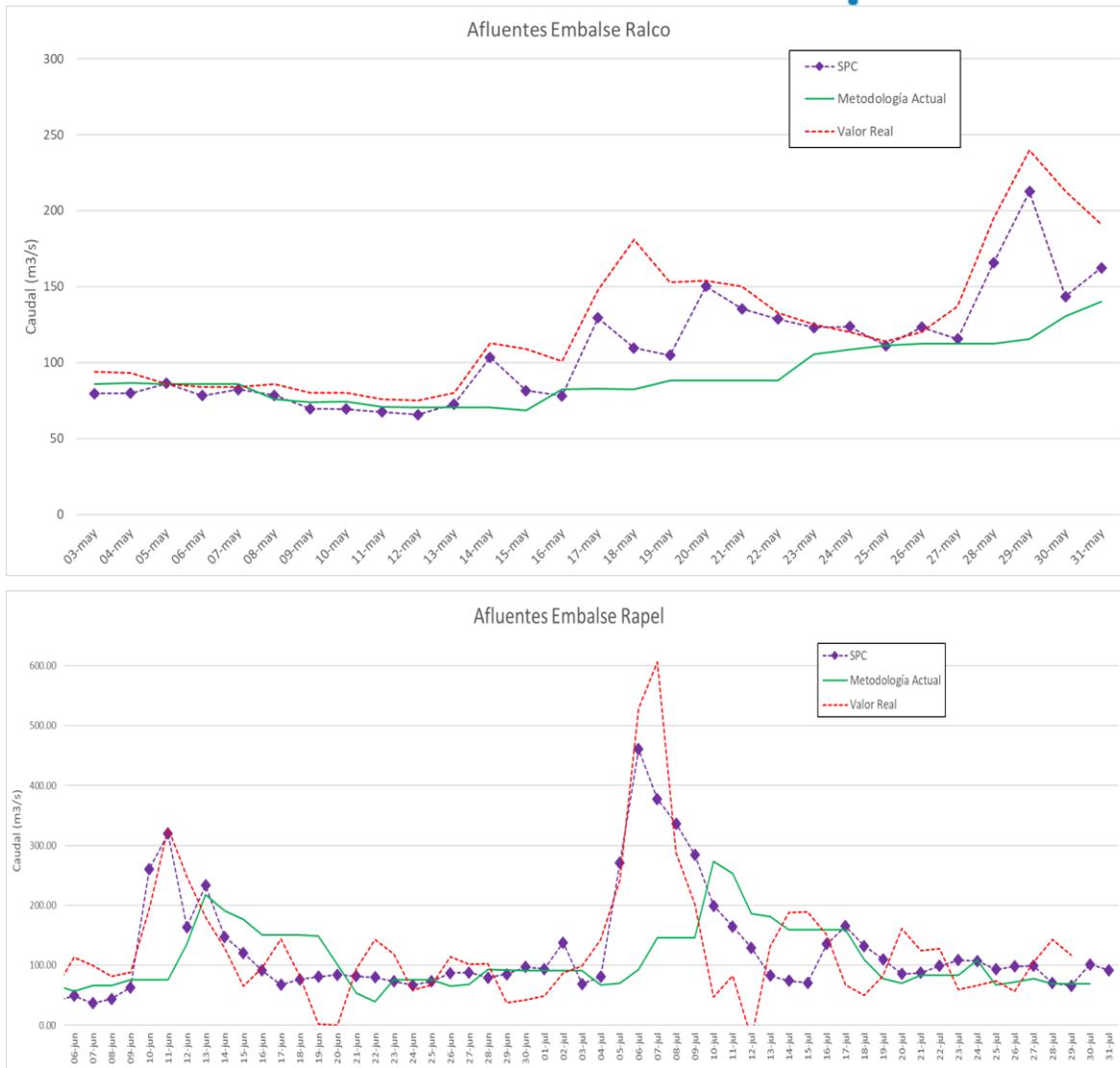


Figura 4: Caudales pronosticados vs observados en embalse Ralco y Rapel.

6. IMPACTO DEL SPC EN LA OPERACIÓN DEL SEN

6.1. SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN

Durante la marcha blanca, se ha simulado la programación de los días 12, 13, 14, 15, 26 y 27 de junio, utilizando la misma base de los programas de operación publicados (oficiales), pero considerando los caudales del SPC. Se han elegido estos días para analizar los resultados de ambas metodologías frente a eventos de precipitación importantes en el pasado (9 y 10 de junio) contra un periodo posterior sin precipitaciones (7 días siguientes), y frente a eventos de precipitación futuros (26, 27 y 28 de junio). A continuación, se presentan las principales conclusiones del análisis comparativo realizado para los días 12 y 26 de junio (los resultados del resto de días evaluados se encuentran en el Anexo D).

a) Afluentes del programa publicado vs programa con la marcha blanca del SPC

En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestran los caudales afluentes promedios de la primera semana del programa semanal (Programación de mediano plazo), utilizados en el programa publicado y en las simulaciones de la marcha blanca del SPC.

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	46.3	22.1	-24.2
HI Pangué-Angostura	201.74	120.0	-81.7
Afluente Colbún	209	115.4	-93.6
Hoya Intermedia Muro Armerillo	61.74	36.2	-25.5
Río Rucúe	12.7	18.7	6.0
H.I. Laja 1	93.2	45.7	-47.5
Afluentes a Laguna Invernada	19.9	17.4	-2.5
Afluente Rapel	135.6	92.9	-42.7
Caudales afluentes a Lago Laja	68.2	46.3	-21.9
Caudales de pasada Antuco s/filt	68	45.3	-22.7
Caudal captacion Alto Polcura	3.5	3.9	0.4
Caudal Hoya Intermedia Abanico	5.1	4.5	-0.6
Afluente de la Laguna del Maule	29.3	4.1	-25.2
Caudal Tucapel	136.1	108.6	-27.5
Afluente Ralco	163.2	154.1	-9.1
H.I. Ralco-Pangué	47.3	17.4	-29.9
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	35.5	33.3	-2.2
Claro en San Carlos	16.8	14.8	-2.0

Tabla 2: Caudal promedio semanal del Programa semanal del 12 de junio de 2018.

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	97.3	113.2	15.9
HI Pangué-Angostura	86.22	234.6	148.4
Afluente Colbún	111.3	120.0	8.7
Hoya Intermedia Muro Armerillo	15.87	16.9	1.1
Río Rucúe	9.9	25.0	15.1
H.I. Laja 1	16.7	59.8	43.1
Afluentes a Laguna Invernada	17.8	17.3	-0.5
Afluente Rapel	64.8	107.4	42.6
Caudales afluentes a Lago Laja	31.9	67.5	35.6
Caudales de pasada Antuco s/filt	36.4	50.2	13.8
Caudal captacion Alto Polcura	3.3	4.8	1.5
Caudal Hoya Intermedia Abanico	4.6	5.9	1.3
Afluente de la Laguna del Maule	4.5	6.5	2.0
Caudal Tucapel	68.3	110.8	42.5
Afluente Ralco	144.5	262.7	118.2
H.I. Ralco-Pangué	22.3	59.8	37.5
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	34.4	27.2	-7.2
Claro en San Carlos	10.7	15.3	4.6

Tabla 3: Caudal promedio semanal del Programa semanal del 26 de junio de 2018

Las diferencias observadas se deben a que la metodología actual (publicado) considera los registros de caudales diarios de los últimos siete días y, en contrapartida, el SPC considera una proyección de caudales considerando información meteorológica futura. En este sentido, los resultados de la Tabla 2 se explican porque la metodología actual está proyectando (erróneamente) afluentes que incorporan las crecidas de caudales de los días 9 y 10 de junio. No obstante, en los 7 días posteriores al 12 de junio no se presentaron precipitaciones y los caudales reales presentaban un comportamiento recesivo. En este sentido, los caudales proyectados por el SPC son menores (en la mayoría de los afluentes), debido a que la nueva metodología utiliza efectivamente pronósticos de precipitaciones.

Por otra parte, los resultados de la Tabla 3 se explican porque la metodología actual está proyectando (erróneamente) afluentes que incorporan los caudales de los 7 días anteriores, los que no tuvieron importantes crecidas, mientras que el SPC proyectó las precipitaciones que hubo los días 27 y 28 de junio.

Así, el SPC entrega información más realista de los caudales esperados, lo que permite gestionar los recursos hídricos con una eficiencia mayor que la metodología actual.

b) Generación por tecnología del Programa semanal y Programa diario (programa publicado versus programa marcha blanca)

La menor cantidad de afluentes pronosticados por el SPC tiene como consecuencia que el programa de operación para los días 12 al 15 de junio considere una menor generación del parque hidroeléctrico y, en consecuencia, un aumento en la generación térmica, tanto en la programación semanal como en la programación diaria (Figura 5 y Figura 6). Así mismo, la mayor cantidad de afluentes pronosticados por el SPC tiene como consecuencia que el programa de operación para los días 26 y 27 de junio considere una mayor generación del parque hidroeléctrico y, en consecuencia, una disminución en la generación térmica, tanto en la programación semanal como en la programación diaria.

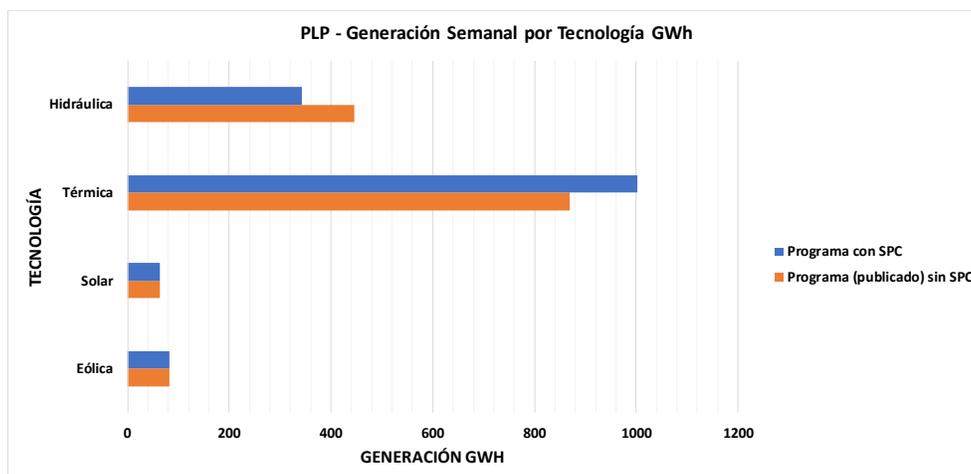


Figura 5: Generación del Programa semanal del 12 de junio

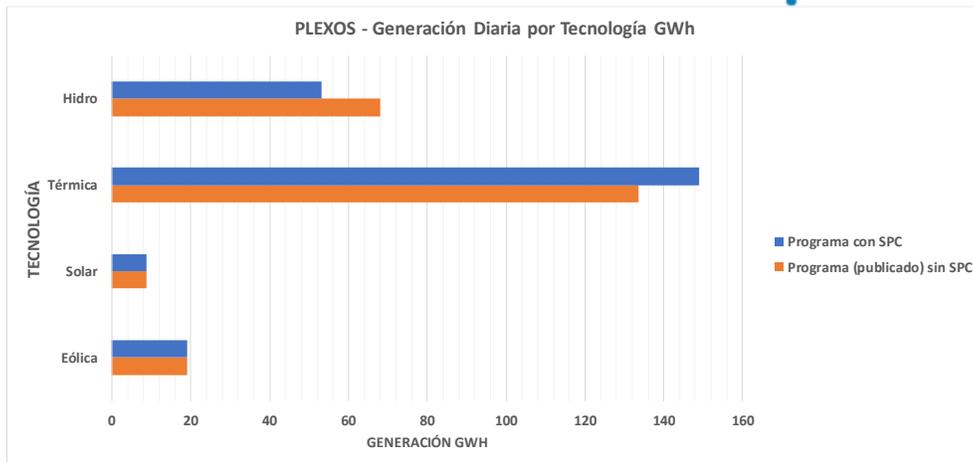


Figura 6: Generación del Programa diario del 12 de junio

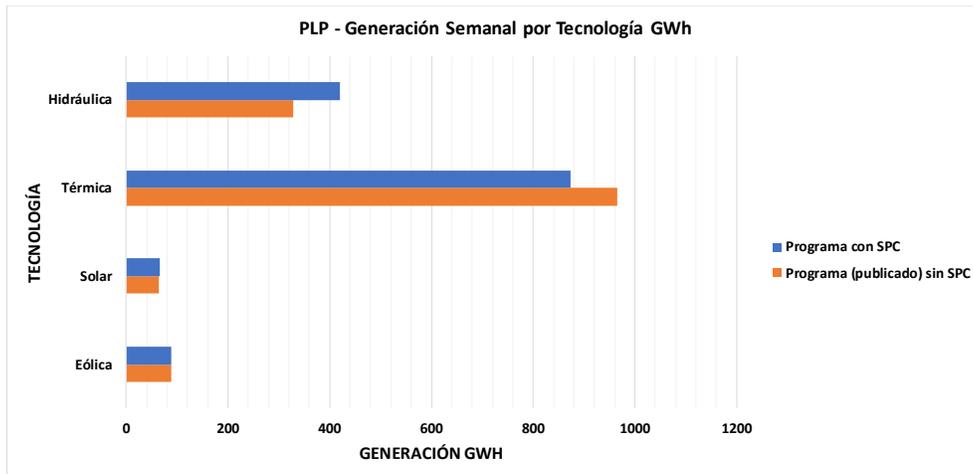


Figura 7: Generación del Programa semanal del 26 de junio

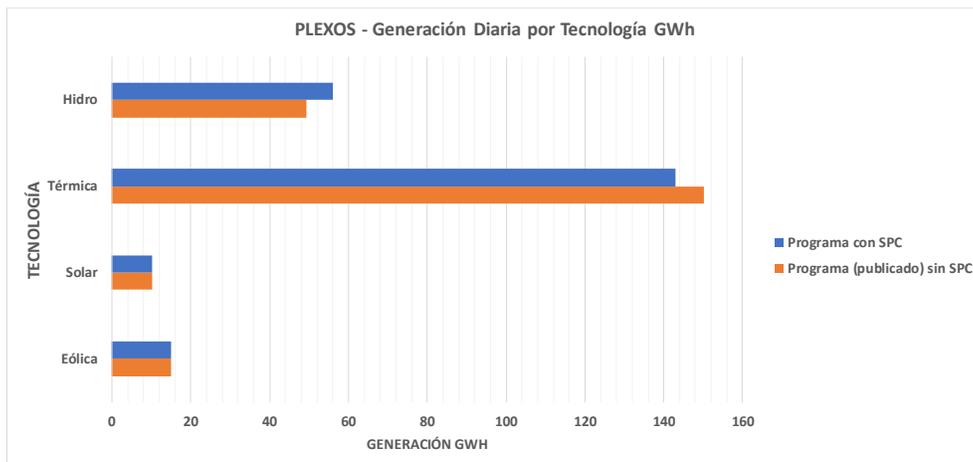


Figura 8: Generación del Programa diario del 26 de junio

c) Principales diferencias en el despacho de las centrales del Programa diario

Si se compara la generación de las centrales relevantes, en los casos del 12 al 15 de junio, se observa una mayor generación con centrales térmicas (GNL), explicada por la menor disponibilidad de recursos hídricos previstos por el SPC, respecto a los programas publicados, según se muestra en la Tabla 4. Así mismo, en los casos del 26 y 27 de junio se observa una menor generación con centrales térmicas (GNL), explicada por la mayor disponibilidad de recursos hídricos previstos por el SPC, respecto a los programas publicados.

Central	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	47.6	13.9	-33.7
PANGUE	48.9	32.5	-16.4
PEHUENCHE	51.3	25.3	-26
RALCO	45.1	42.1	-3
RALCO	45.1	42.1	-3
RAPEL	17.2	20.5	3.3
MACHICURA	11.2	3.3	-7.9
ANGOSTURA	38	24.2	-13.8
SAN_IGNACIO	6.1	1.5	-4.6
MEJILLONES_1	8.1	14	5.9
MEJILLONES_2	14.1	16.1	2
TOCOPILLA_U14	1.8	10.5	8.7
TOCOPILLA_U15	12.1	11	-1.1
NUEVA_RENCA-TG+TV_GNL_A	43	52	9
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	5.7	53.6	47.9
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	0	6.6	6.6
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	0	53.5	53.5

Tabla 4: Generación por central del Programa diario del 12 de junio de 2018.

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	8.4	11.9	3.5
PANGUE	32.2	55.7	23.5
PEHUENCHE	33.5	31.7	-1.8
RALCO	40.1	69.3	29.2
RAPEL	11.1	15.5	4.4
ABANICO	5.1	5.2	0.1
ANTUCO	15.2	19	3.8
MACHICURA	2	2.8	0.8
RUCUE	14.2	17.2	3
QUILLECO	6.2	7.4	1.2
ANGOSTURA	21.7	43.5	21.8
LAJA_I	1.5	3.2	1.7
SAN_IGNACIO	0.7	1.2	0.5
MEJILLONES_1	12.5	9.1	-3.4
TOCOPILLA_U14	3.9	0	-3.9
NUEVA_RENCA-TG+TV_GNL_A	48.6	40.8	-7.8
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	48.5	22.7	-25.8
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	7.1	0	-7.1
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	28.8	0	-28.8
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_B	5.6	0	-5.6
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_F	7.3	0	-7.3

Tabla 5: Generación por central del Programa diario del 26 de junio de 2018.

d) Trayectorias de cotas de embales

En la Figura 9, se muestra la trayectoria de cotas de los embalses para el primer día del programa diario del 12 de junio, y en la Figura 10, la trayectoria de cotas de los embalses para el primer día del programa diario del 26 de junio.

Al respecto, se aprecia en todos los embalses que para el programa publicado del 12 de junio hubo un mayor volumen de agua consumido. Esto indica que hubo una mayor generación hidroeléctrica y, por lo tanto, la cota disminuye. Como se comentó anteriormente, el resultado se explica porque la metodología actual (publicado) considera información pasada de los caudales con valores mayores a los que se deberían esperar. Por otro lado, el sistema SPC indica que se debe embalsar agua (caso embalse Colbún) o realizar un uso más conservador del agua embalsada respecto de los resultados de la metodología actual, considerando que no se prevén mayores afluentes en el futuro cercano.

Si bien estos resultados intuitivamente son los esperados producto de tener un mejor pronóstico de caudales, las simulaciones permiten tener un orden de magnitud de los cambios esperados del SPC en la operación del SEN.

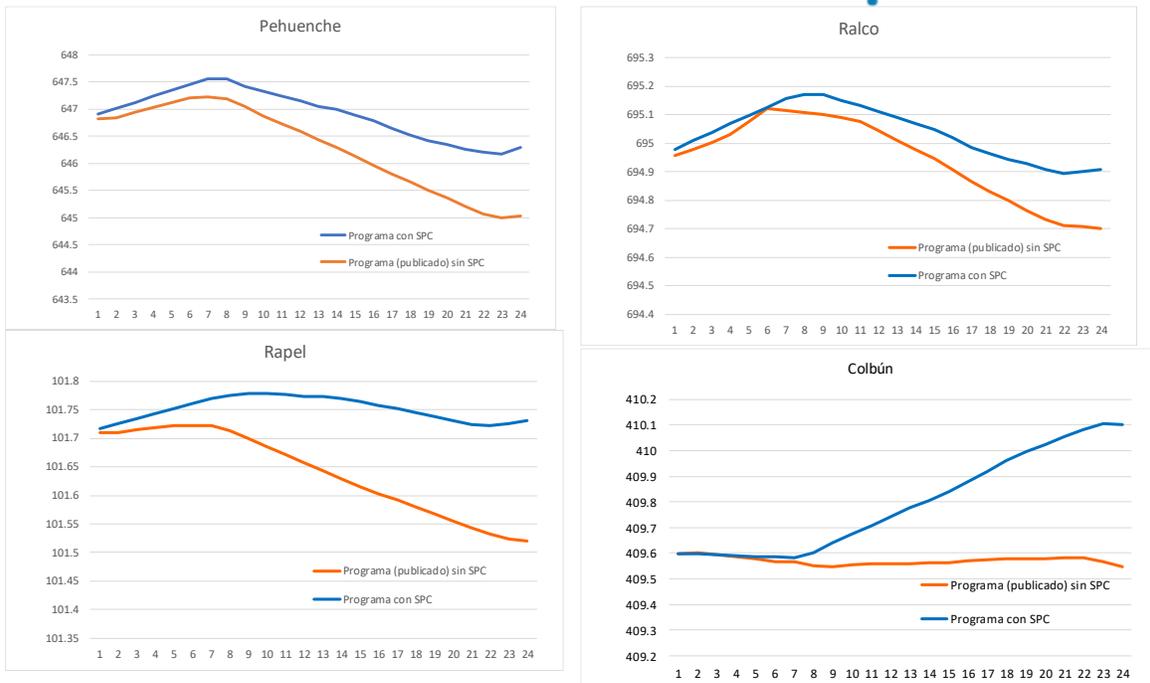


Figura 9: Trayectoria de cotas del primer día del Programa diario del 12 de junio

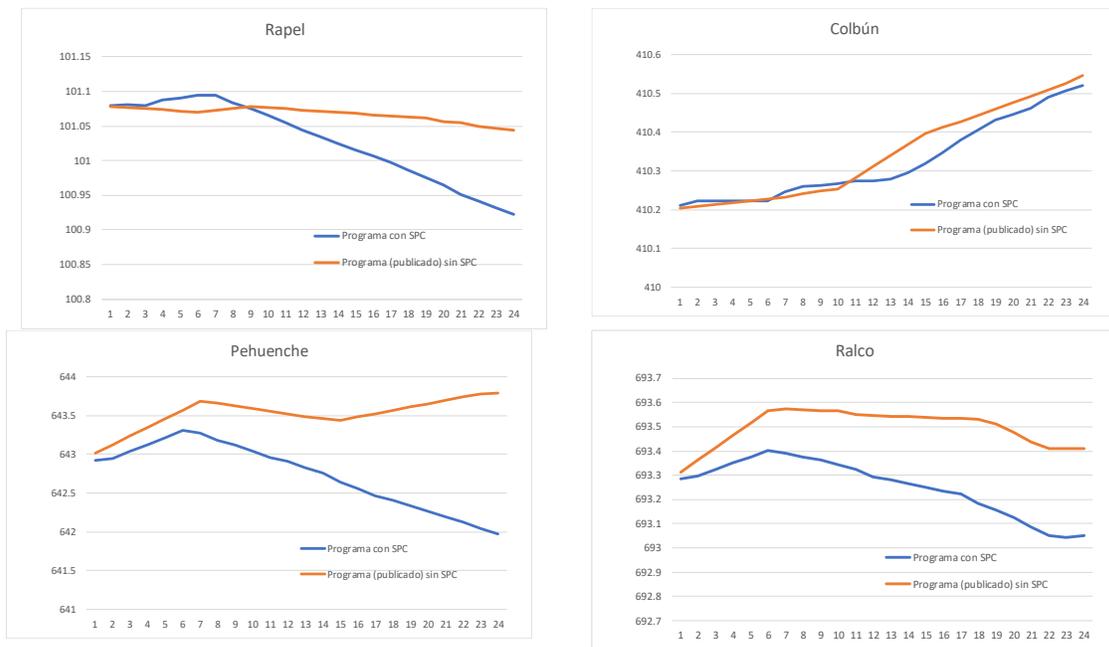


Figura 10: Trayectoria de cotas del primer día del Programa diario del 26 de junio

7. USO DEL SPC EN LA PROGRAMACIÓN DEL SEN

Actualmente los caudales utilizados en el proceso de programación se determinan utilizando el Manual de Procedimientos “Definición de los Caudales a Utilizar para Planificar la Operación”. Este procedimiento se basa en métodos estadísticos y no utiliza pronósticos de precipitaciones ni considera el estado previo de la cuenca en el corto plazo. Para el período de deshielo, octubre-marzo de cada año hidrológico, el procedimiento actual considera medidas de nieve acumulada en las cuencas más importantes, para con esto y otra información relevante, elaborar un pronóstico de deshielo con el objetivo de reducir la estadística a simular en el período indicado, disminuyendo con esto la incertidumbre en los caudales.

A partir de los resultados del SPC y recomendaciones del Proveedor, se definió utilizar los pronósticos de acuerdo con lo indicado en el diagrama de la Figura 11.

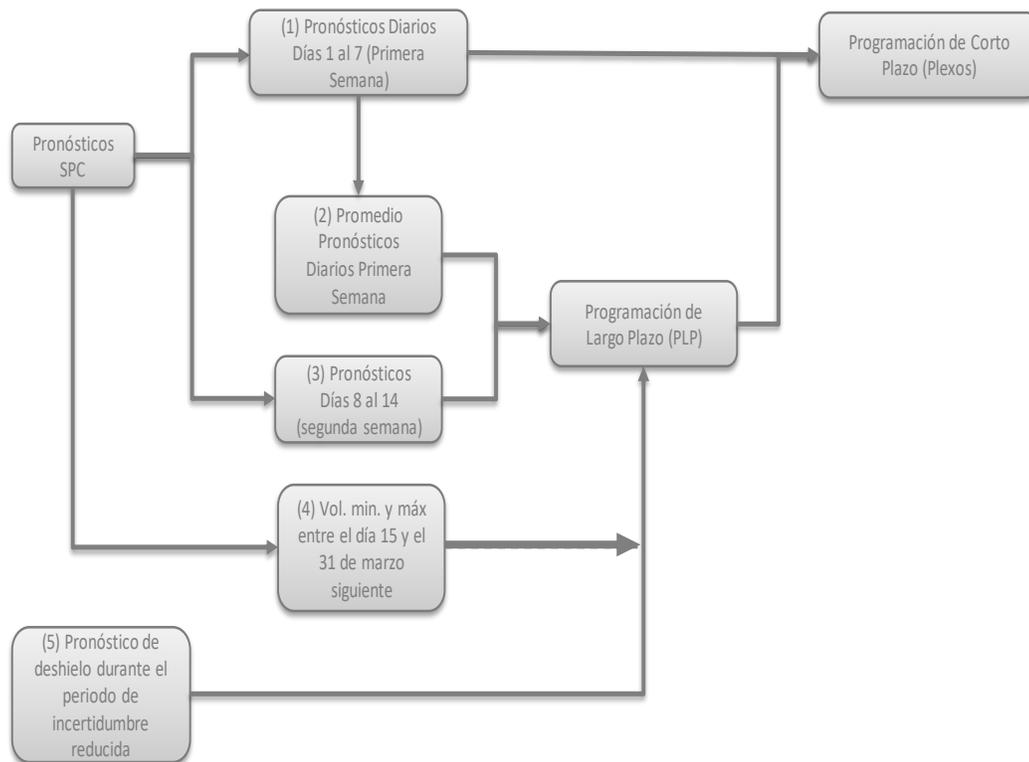


Figura 11: Diagrama de la programación de la operación.

Cada una de las etapas del diagrama se describe a continuación:

- (1) El pronóstico de caudal diario a programar en PLEXOS® corresponde a la mediana de todos los escenarios del pronóstico para cada día, en los primeros 7 días.
- (2) La primera semana (etapa) del modelo PLP, utilizado para la programación de mediano plazo, considera el promedio de los pronósticos de los primeros 7 días para cada una de las cuencas determinados previamente en el punto (1).
- (3) La segunda semana (etapa) del modelo PLP considera la reducción de la estadística hidrológica para cada uno de los puntos, con el volumen mínimo y máximo determinados a partir del SPC.

- (4) Desde la tercera semana hasta el 31 de marzo siguiente, el procedimiento reduce la estadística hidrológica a los volúmenes máximos y mínimos que entrega el pronóstico, considerando un intervalo del 90% (V_{min} es el 5% y $V_{máx}$ es el 95%). Cabe señalar que la aplicación del SPC para determinar pronósticos desde la tercera semana será implementado para el año hidrológico 2019-2020, considerando que la metodología propuesta por el Proveedor aún está en evaluación.
- (5) Cuando se disponga de un pronóstico de deshielo, se utilizarán ambos pronósticos. Para los primeros 14 días se utilizará SPC y desde el día 15 en adelante se utilizará el Pronóstico de deshielo. A partir de la tercera semana el pronóstico de deshielo se podrá complementar con los pronósticos entregados por el SPC.

8. COMENTARIOS FINALES

El Coordinador se encuentra desarrollando iniciativas en materia de modelos y herramientas para la operación del SEN a efectos de mejorar y modernizar sus procesos. El desarrollo de modelos de pronóstico se encuentra dentro de este marco de trabajo, dado que permiten tomar acciones costo-eficientes para abastecer la demanda al menor costo posible, así como reducir desviaciones, mejorar dimensionamiento de reservas y optimizar la gestión de embalses de centrales hidroeléctricas.

En particular, el SPC ha sido desarrollado por especialistas e investigadores en geofísica e hidro-meteorología. Asimismo, el SPC ha sido validado por el Coordinador a través de una fase piloto acotada y ampliada (Estudios año 2015 y 2016), así como en una versión desarrollada el año 2018 para un régimen operacional diario, lo cual la constituye en una herramienta robusta y objetiva.

El SPC permitirá mejorar la calidad de los pronósticos de caudales en los 14 días del horizonte de evaluación, así como reducir la incertidumbre en los caudales desde la tercera semana en adelante. Dichas medidas se traducirán en una operación más segura, eficiente y flexible del SEN.

El presente informe incluye el mecanismo que utilizará el Coordinador para utilizar los pronósticos del SPC en el proceso de la programación de la operación. Considerando los resultados de la evaluación del desempeño del SPC y lo señalado en el artículo 48 del DS 291, una vez que la CNE apruebe este algoritmo predictivo se utilizará sólo el pronóstico de los primeros 14 días en la programación de la operación. Es decir, para el tratamiento hidrológico desde la tercera semana se utilizarán los criterios de la metodología actual.

La metodología propuesta por el Proveedor para los pronósticos desde la tercera semana aún está en evaluación y se requiere de un tiempo mayor para su evaluación, así como para la implementación de potenciales mejoras metodológicas. Sin perjuicio de lo anterior, dicho pronóstico se prevé se encuentre analizado y validado por el Coordinador previo al inicio del año hidrológico 2019-2020. Al respecto las mejoras a evaluar e implementar previo a su implementación son:

- Evaluación del uso de pronósticos estacionales de temperatura y precipitación para reducir la distribución de caudales proyectados durante la época de invierno.
- Determinación de criterios para reducir los escenarios resultantes del SPC.

Asimismo, el pronóstico de los primeros 14 días del SPC estará permanentemente bajo acciones de mejoramiento continuo por medio de un experto hidro-meteorólogo por parte del Proveedor con dedicación completa al proyecto. Dentro de las actividades previstas, se considera al menos:

- Diagnóstico y mejoramiento de la información de caudal diario.

- Mejoramiento del pronóstico de caudal durante las crecidas.
- Corrección de problemáticas identificadas
- Recalibraciones en la medida que el desempeño del SPC lo amerite
- Evaluación de posibles mejoras a los modelos de nieve

Anexo A: Implementación y evaluación del Sistema de Pronóstico de Caudales (Informe preparado por Meteodata para el Coordinador)

1 Resumen Ejecutivo

Durante el presente año Meteodata ha elaborado un nuevo Sistema de Pronóstico de Caudales (SPC) para el Coordinador Eléctrico Nacional. Tras el cumplimiento y documentación de la etapa de desarrollo de este sistema, se inició la etapa de marcha blanca, la que sirve para demostrar que el SPC genera pronósticos con mejor desempeño que la actual metodología base, junto con identificar posibles fallas y aspectos a mejorar. El presente reporte muestra la evaluación del SPC durante este periodo de prueba.

Durante la marcha blanca el SPC funcionó sin interrupciones alojado en un servidor de alta gama computacional, junto con poseer todos los respaldos pertinentes. Se comprobó que toda la información necesaria para generar los pronósticos de caudales (modelos numéricos de predicción, registros observacionales hidro-meteorológicos y caudales recientes) es obtenida de forma segura, habiendo implementado además todo un protocolo en caso de problemas.

La programación del SPC se ha mantenido invariable durante la marcha blanca, generando las corridas de pronóstico y resultados en los horarios y formatos de información acordados con el Coordinador Eléctrico. La página web asociada ha sido implementada de tal manera que permite la visualización de los pronósticos de caudales en puntos de control, pronóstico meteorológico, últimos datos observacionales, estatus del SPC, entre otros varios aspectos.

Pese a la constatación de algunos problemas con la información de registros históricos, el SPC pudo ser calibrado satisfactoriamente para todos los puntos de control. Durante el periodo de marcha blanca el SPC mostró la capacidad de anticipar la variabilidad y respuesta de los caudales a episodios de precipitación, aunque mostró una tendencia de subestimar el caudal durante periodos de crecida. La evaluación cuantitativa del SPC deja de manifiesto que presenta mejores resultados que la actual metodología base, principalmente en cuanto a variabilidad en el corto plazo. En el largo plazo, de manera cualitativa, el SPC muestra una proyección que es consistente con la condición climática en la actualidad.

En la marcha blanca se identifican algunos aspectos a mejorar en el futuro, los que están asociados a generar un mejor diagnóstico de la información de caudales que alimenta al SPC, así como buscar y evaluar aspectos del pronóstico que influyen en la subestimación de las crecidas.

Todos los aspectos evaluados permiten aseverar que el SPC cumplió con todos los objetivos de la marcha blanca, estando listo para entrar en régimen de servicio.

2 Introducción

Durante el primer semestre del año 2018 Meteodata ha desarrollado, implementado y operado un nuevo Sistema de Pronóstico de Caudales (en adelante el “SPC”) para el Coordinador Eléctrico Nacional (en adelante, “Coordinador”). Tras el desarrollo inicial del SPC, fue necesario poner a prueba el sistema, esto con el objetivo de demostrar la capacidad del SPC de generar pronósticos de mejor desempeño que la metodología base utilizada por el Coordinador en la actualidad, junto con identificar aspectos a mejorar y evaluar posibles fallas o problemas que se puedan generar en el régimen de producción.

Entre las fechas 3 de mayo y 27 de junio de 2018 se ha operado el SPC en modo de “Marcha Blanca”, con el objetivo de evaluar el sistema tanto por parte del desarrollador (Meteodata) como por parte del usuario final de esta plataforma (Coordinador). En este periodo se ha podido probar todos los aspectos asociados a la operación del sistema, donde se incluye los sistemas de adquisición de información de entrada (caudales, observaciones meteorológicas y pronósticos numéricos), la ejecución del modelo de pronóstico, la generación de datos de salida, la operación de la página web que visualiza los resultados del SPC, la evaluación del desempeño del modelo y la detección y corrección de problemas específicos en los distintos puntos de control.

El presente reporte presenta un diagnóstico del estado del sistema al concluir la marcha blanca. En la sección 3 se describe los diversos componentes del SPC. La discusión abarca la metodología de pronóstico, la infraestructura computacional utilizada, los sistemas de captura de datos externos, la programación de los pronósticos y los productos generados (archivos de datos y aplicación Web). Luego en la sección 4 se presenta un resumen de los puntos de control incluidos en el sistema y el estatus de cada uno. La sección 5 presenta la evaluación del desempeño del SPC durante la marcha blanca, considerando tanto el pronóstico de corto plazo como el de largo plazo. Finalmente, en la sección 6 se identifican los aspectos prioritarios para mejorar en el futuro.

3 Descripción del SPC

3.1 Diseño del SPC

El SPC es un sistema predictivo basado en la aplicación de un modelo hidrológico para simular caudales afluentes en las hoyas hidrográficas asociadas a los embalses o centrales hidroeléctricas del Sistema Eléctrico Nacional. La pieza fundamental del sistema de pronóstico es el modelo hidrológico físico VIC (*Variable Infiltration Capacity*).

La figura 1 muestra, en términos muy generales, los elementos del sistema y las etapas en que se aplica el modelo hidrológico. Se puede distinguir entre tres etapas principales:

1) La etapa denominada “*spinup*” abarca un periodo previo al comienzo del pronóstico propiamente tal y permite que el modelo hidrológico, alimentado por información meteorológica reciente, desarrolle una simulación fidedigna del estado hidrológico actual de la cuenca. La idea es que, al finalizar esta etapa el modelo represente un caudal similar al que se observa a la fecha t_0 . Además, se espera que el modelo haya desarrollado una estimación realista del agua almacenada en el suelo y en el manto de nieve sobre las cotas altas de la cuenca. Durante la etapa de *spinup*, se realizan ajustes ciertas variables del modelo (precipitación, temperatura y humedad del suelo) para asegurar que el caudal simulado por el modelo se mantenga cerca del valor observado. Al finalizar el periodo de *spinup*, el caudal generado por el modelo es típicamente dentro de $\pm 10\%$ del caudal observado.

2) A partir de la fecha t_0 el modelo hidrológico sigue corriendo en una etapa que se denomina **corto plazo**, que se extiende a 14 días desde t_0 . En esta etapa el modelo usa como información de entrada los datos meteorológicos generados por los *pronósticos numéricos de predicción del tiempo*. Dichos pronósticos tienen la capacidad de anticipar los episodios de precipitación que pueden generar variabilidad en el caudal, y también las variaciones en temperatura que pueden afectar el derretimiento de nieve durante la época de deshielo. El enfoque del pronóstico de corto plazo es generar estimaciones del caudal a nivel *diario*.

3) En la etapa de **largo plazo**, se continúa corriendo el modelo hidrológico hasta alcanzar un año completo. Aquí, el modelo usa como información de entrada escenarios meteorológicos (que corresponden a las condiciones observadas en años anteriores), de manera análoga al uso de la estadística de caudales de años anteriores en el actual procedimiento. La ventaja de usar un modelo hidrológico para generar escenarios del caudal futuro en base a escenarios meteorológicos es que, debido a la simulación en la etapa de *spinup*, el modelo es consciente del estado hidrológico de la cuenca al momento de iniciar las simulaciones de largo plazo. Entonces, las simulaciones futuras de caudal estarán sesgadas dependiendo de las condiciones hidrológicas en su comienzo. Por ejemplo, en el caso de un año inusualmente húmedo, el modelo hidrológico desarrollará una mayor cantidad de agua en el suelo y un manto de nieve más espeso, lo cual tenderá a producir escenarios con mayores caudales hacia el futuro, sobre todo en la época de deshielo. En cambio, si las condiciones recientes fueron inusualmente secas, el modelo producirá caudales menores hacia el futuro, siendo forzado por los mismos escenarios meteorológicos.

Tal como el procedimiento actual dentro del Coordinador, se puede generar un escenario para cada año histórico disponible. Actualmente los años históricos utilizados van desde 1960 a 2016 (57 años) al igual que la estadística de caudal disponible (años hidrológicos 1960-1961 a 2016-2017). Además, este procedimiento también implica que al comienzo de cada año hidrológico nuevo se agrega el último año con información al sistema. Por ejemplo, al comienzo del año 2019, el resultado del SPC incluirá un escenario que corresponde al año 2017-2018.



Figura 1. Diagrama de flujo del sistema de pronóstico de caudales operado durante la marcha blanca. El pronóstico se divide en etapas de corto (0-14 días) y largo plazo (14 a 365 días).

3.2 Modelo hidrológico

El SPC es un sistema predictivo basado en la aplicación de un modelo hidrológico para simular caudales afluentes en las hoyas hidrográficas asociados a los embalses o centrales hidroeléctricas del Sistema Eléctrico Nacional.

La pieza fundamental del sistema de pronóstico es el modelo hidrológico físico VIC (*Variable Infiltration Capacity*). Este es un modelo semidistribuido, desarrollado en la Universidad de Washington, el cual considera las heterogeneidades del terreno en la simulación de procesos hidrológicos, los que a su vez se basan en los flujos entre la atmósfera y el suelo y el balance de agua y de energía en la superficie. VIC resuelve ecuaciones de los balances para generar la estimación del caudal.

El modelo VIC ha sido aplicado para cuencas que incluyen el río Columbia, Ohio, Arkansas y Mississippi (todos en Estados Unidos). También ha sido ampliamente usado en otras partes del mundo. En Chile ha sido aplicado en estudios de cambio climático (Bozkurt et al 2015) y en la evaluación del potencial hidroeléctrico (MINENERGIA/GIZ 2014). Numerosos artículos científicos describen los fundamentos físicos del modelo VIC (por ejemplo: Liang 1994, Lohmann et al 1998, Gao et al 2010, más información técnica sobre el modelo se puede encontrar en su página web¹).

Los procesos hidrológicos simulados por VIC incluyen los siguientes:

- Acumulación y ablación (derretimiento, sublimación) del manto de nieve en distintas bandas de elevación.
- Interacción con una capa de vegetación (transpiración, retención de agua).
- Interacción atmósfera-superficie (incluyendo evaporación).
- Infiltración de agua en el suelo.
- Generación de escorrentía superficial y subsuperficial (flujo base).

¹ <http://vic.readthedocs.org/>

- Módulo para simular el traspaso de agua hacia (y a través de) la red de cauces, basado en el concepto de un hidrógrafo unitario.

El modelo representa el suelo dividido en tres capas, en una profundidad de entre 1 a 2 metros. Además, el modelo contempla una capa de vegetación desagregada en 'tilas' para cada tipo de vegetación presente en la región espacial representada por el modelo. Finalmente, el modelo puede dividir la cuenca en bandas de diferentes alturas donde puede desarrollarse acumulación de capas de nieve.

Los datos de entrada del modelo son series diarias de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima. A partir de estas variables básicas, el modelo VIC aplica procedimientos estándares para estimar los valores de otros parámetros meteorológicos que requiere, tales como la radiación, temperatura y humedad. Los datos de precipitación y temperatura pueden ser observaciones en-situ, análisis meteorológicos o los resultados de predicciones de modelos de pronóstico. Para muchas cuencas consideradas en el SPC, existe poca información observacional en las cotas altas de la cuenca (>2000 metros). La falta de conocimiento de las variables meteorológicas en las zonas altas (sobre todo la precipitación) es una de las fuentes de incertidumbre más importante en el sistema.

Las salidas más relevantes del modelo VIC son el flujo base y la escorrentía superficial. Ambas son fuentes de agua que contribuyen al caudal simulado. Se generan cuando el contenido de agua en las capas superiores (escorrentía superficial) e inferiores (flujo base) del suelo se acercan a sus niveles de saturación. La escorrentía superficial normalmente se genera durante periodos de precipitación, mientras que el flujo base varía mucho más lentamente.

En el SPC el modelo VIC es configurado en modo agregado ("lumped") y representa la cuenca hidrológica asociada al punto de control con bandas de altura espaciadas en 250 metros. Tomando en cuenta la variación de temperatura con altura, el modelo determina si la precipitación en cada banda corresponde a lluvia o nieve y, de esta manera, puede simular la evolución del manto de nieve en las cotas altas de la cuenca, cuyo derretimiento contribuye al caudal estimado para la época de deshielo.

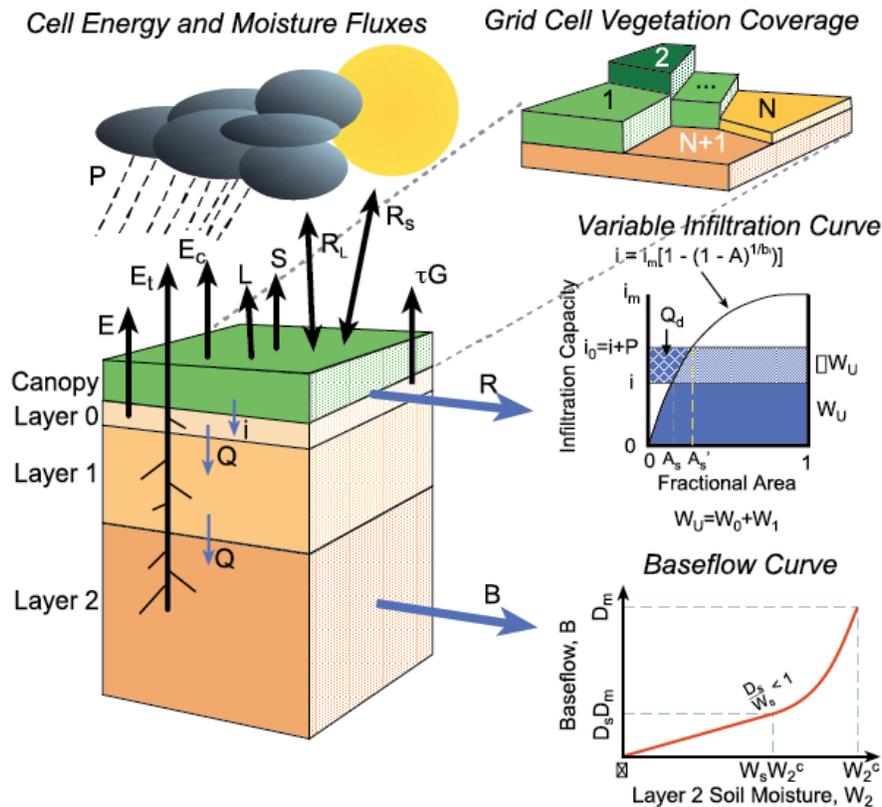


Figura 2. Diagrama esquemático de los componentes claves del modelo VIC. La figura fue tomada de la página Web donde se encuentra la documentación del modelo. Además de los componentes mostrados en esta figura, el modelo VIC tiene la capacidad de simular un manto de nieve, la influencia de lagos y humedales, agua congelada en el suelo, y el transporte de agua hacia y por los ríos

3.3 Configuración y Calibración

En esta sección se describe brevemente el proceso de calibración del SPC. Como todos los modelos hidrológicos, el modelo VIC tiene un número importante de parámetros que inciden fuertemente en su comportamiento. Estos parámetros representan características del suelo (como la porosidad y conductividad hidráulica del suelo, factores de infiltración, y capacidades de almacenamiento) junto con otros que representan características de la nieve (albedo), o incertidumbres en las variables meteorológicas de entrada (factores de precipitación). En la mayoría de los casos no es posible fijar valores a priori para estos parámetros, ya que no existen mediciones asociadas o porque simplemente representan variables más bien conceptuales que no son medibles físicamente. La práctica más común es estimar valores para los parámetros más importantes a través de un proceso denominado *calibración*, en el cual se modifican los parámetros hasta lograr el mejor ajuste entre el caudal simulado por el modelo y el caudal observado en el punto de control. El modelo VIC configurado para el SPC tiene aproximadamente 9 parámetros que se ajustan durante la calibración, los cuales se muestran en la tabla 1.

En el SPC la calibración del modelo depende de la etapa del pronóstico (corto plazo o largo plazo) ya que la etapa determina qué tipo de datos de caudales son utilizados para evaluar el modelo (caudales diarios o

estadística semanal), los datos meteorológicos de entrada (pronósticos numéricos o climatología) y la escala de tiempo relevante (diario o semanal). En ambos casos el proceso de calibración fue semiautomático, es decir, se utilizaron métodos automáticos para buscar la configuración óptima del modelo, pero el resultado siempre fue revisado y corroborado visualmente antes de ser incorporado en el SPC.

Para determinar si la calibración del modelo fue exitosa, se calcularon diferentes métricas de desempeño, incluyendo la Eficiencia Nash-Sutcliffe², que es una estadística ampliamente usada para evaluar el desempeño de modelos hidrológicos (Morasi et al, 2007). Según el estudio de Morasi (2007), un valor del NSE mayor a 0.5 es considerado aceptable para un modelo de caudal calibrado, mientras valores superiores a 0.65 y 0.75 se pueden considerar como “buenos” y “muy buenos”, respectivamente. Además de los criterios objetivos, se buscaba obtener una relación visualmente adecuada entre los caudales simulados y observados. Cabe señalar que cada punto de control es calibrado de manera individual.

Parámetro	Tipo	Descripción
D2	Suelo	Profundidad de 2° capa del suelo
D3	Suelo	Profundidad de 3° capa del suelo (capa inferior)
b _{infiltr}	Suelo	Capacidad de infiltración
D _s	Suelo	Umbral de para el inicio de flujo base no-lineal en el suelo.
W _s	Suelo	Umbral de humedad en el suelo para el inicio de flujo base.
DS _{max}	Suelo	Velocidad máxima de flujo base permitido. Se relaciona con la conductividad del suelo y la pendiente del terreno.
P _f	Meteorología	Factor de precipitación media
dT	Meteorología	Ajuste a la temperatura media de la cuenca
Albedo	Nieve	Albedo de nieve fresca (~0.85)

Tabla 1: Parámetros que se configuran durante el proceso de calibración. La mayoría de los parámetros tienen que ver la representación del suelo en el modelo.

3.3.1 Calibración del pronóstico de corto plazo

El pronóstico de corto plazo utiliza información meteorológica de modelos de pronóstico del tiempo para generar predicciones de caudal en el periodo 0-14 días. Los modelos numéricos utilizados se presentan en la tabla 3 e incluyen dos modelos determinísticos (GFS y ECMWF-DET) y dos modelos tipo *ensemble* (GEFS y ECMWF-ENS). Los modelos determinísticos y ensemble se usan para generar un total de 57 proyecciones, cifra que es igual al número de proyecciones generadas para el pronóstico de largo plazo.

² La eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) se define como:

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_m^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde Q_o es el caudal observado y Q_m es el caudal simulado. Un valor de 1.0 indica un modelo perfecto mientras un valor de 0.0 indica que el modelo no tiene mejor desempeño que un pronóstico trivial.

Modelo	Descripción	Tipo	Frecuencia de actualización	Horizonte de pronóstico	Numero de predicciones usados en el SPC (Total = 57)
GFS	Global Forecast System	Determinístico	6 horas	7 días	1
GEFS	Global Ensemble Forecast System	Ensemble de 20 miembros	6 horas	14 días	20
ECMWF-DET	Modelo ECMWF	Determinístico	12 horas	7 días	1
ECMWF-ENS	Modelo ECMWF	Ensemble de 50 miembros	12 horas	14 días	35

Tabla 2. Modelos de pronóstico meteorológico utilizados por el SPC. Los modelos tipo *ensemble* entregan múltiples predicciones de corto plazo, cada uno partiendo de una condición inicial diferente.

La calibración del modelo de corto plazo fue realizada en dos etapas. Primeramente, el modelo fue calibrado utilizando datos meteorológicos históricos (descritas en la sección 3.3.2). Luego, el modelo fue recalibrado para el periodo abril 2015 a abril 2018 utilizando los resultados de los modelos de pronóstico GFS y ECMWF como datos de entrada, y considerando solamente el periodo de invierno (abril a septiembre). Este ajuste adicional es necesario porque en la práctica, la información meteorológica utilizada para el pronóstico de corto plazo proviene de los modelos de pronóstico meteorológico y no de observaciones. Cabe señalar que para el periodo indicado sólo se cuenta con resultados para los modelos determinísticos. Datos de los modelos ensemble están disponibles desde febrero 2018 y por ende no se pueden incluir en la calibración del modelo.

La tabla 3 muestra las estadísticas NSE obtenidas para cada punto de control. En la mayoría los puntos de control el valor obtenido es considerado (>0.5) aceptable o bueno (> 0.65). El desempeño de la calibración es generalmente mejor en puntos de control que cuentan con datos diarios de buena calidad y peor en los puntos de control que tienen datos ruidosos o que no representan un régimen natural. En algunos puntos de control, el valor del NSE es menor que 0.5 indicando que la calibración es poca satisfactoria. Dichos puntos son: Laguna de Maule, CI Rama Laja, CI Colbún-Maule en Armerillo, CI Laja1 y Alto Polcura. Estos casos corresponden a puntos de control que tienen datos particularmente ruidosos (La Laguna de Maule siendo el caso más extremo) y por lo cual el valor del NSE refleja más bien la baja calidad de los datos de caudal y no necesariamente una baja calidad del modelo. La inspección visual de los resultados del modelo para estos puntos indica que el modelo entrega resultados razonables en estos puntos, por lo cual se incluyen en el SPC.

En el caso de Alto Polcura, el valor del NSE es negativo lo cual implica que el modelo simplemente no se pudo calibrar. Es decir, no hubo una configuración del modelo que resulte mejor que un pronóstico constante. Es posible que existan problemas con los datos de caudal diario disponible, aspecto que está siendo investigado.

Es importante señalar que la recalibración del modelo con los resultados del pronóstico es **conservadora**, en el sentido que el modelo calibrado tiende a subestimar los caudales máximos asociadas a los episodios de precipitación. Esto se debe a que la relación entre precipitación y caudal es altamente no-lineal y una sobreestimación relativamente pequeña de la precipitación pronosticada puede generar una sobreestimación muy grande ($>100\%$) en el pronóstico de caudal. Como consecuencia, resulta “óptima” una configuración del modelo que tiene una menor sensibilidad a la precipitación. Cabe señalar que el uso de una configuración conservadora para el pronóstico de corto plazo es deseable desde el punto de vista de la operación del sistema

eléctrico, ya que, según lo indicado por el Coordinador, un error positivo (sobreestimación) genera mayores costos en el sistema que un pronóstico que subestima el caudal.

3.3.2 Pronóstico de largo plazo

El pronóstico de largo plazo consiste en la ejecución del modelo hidrológico usando como entrada escenarios meteorológicos que corresponden a las condiciones observadas en años anteriores, de manera análoga al uso de la estadística de caudales de años anteriores en el actual procedimiento. La ventaja de usar un modelo hidrológico para generar escenarios del caudal futuro en base a escenarios meteorológicos es que, debido a la simulación en la etapa de *spinup*, el modelo es consciente del estado hidrológico de la cuenca al momento de iniciar las simulaciones de largo plazo. Entonces, las simulaciones futuras de caudal estarán sesgadas dependiendo de las condiciones hidrológicas en su comienzo. Por ejemplo, en el caso de un año inusualmente húmedo, el modelo hidrológico desarrollará una mayor cantidad de agua en el suelo y un manto de nieve más espeso, lo cual tenderá a producir escenarios con mayores caudales hacia el futuro, sobre todo en la época de deshielo. En cambio, si las condiciones recientes fueron inusualmente secas, el modelo producirá caudales menores hacia el futuro, siendo forzado por los mismos escenarios meteorológicos.

La información meteorológica usada para forzar el modelo hidrológico fue generada a partir de los datos de todos los sitios de monitoreo histórico de precipitación y temperatura en la zona centro-sur de Chile. Típicamente, se integran observaciones meteorológicas de más de 6 sitios de medición para cada punto de control. Las observaciones meteorológicas se complementan con estimaciones de precipitación y temperatura tomadas de reanálisis atmosféricos (ERA-40³ para el periodo 1960 a 1980 y MERRA-2⁴ desde 1980 en adelante), que permiten caracterizar de mejor manera la variabilidad espacial y temporal de dichas variables.

Es importante notar que el pronóstico de largo plazo es calibrado con la *estadística semanal* disponible para cada punto de control, siendo en este sentido diferente a la calibración para el pronóstico de corto plazo que se basa en datos de caudal diario. Hacer la calibración de esta manera asegura que los resultados del pronóstico sean comparables con la estadística, facilitando la interpretación del resultado y el cálculo de métricas como la probabilidad de excedencia, entre otras. Esta estrategia de calibración implica que el modelo de largo plazo es optimizado para generar resultados en intervalos *semanales*.

La calibración del modelo de largo plazo consideró los mismos parámetros que el pronóstico de corto plazo (tabla 1). Cabe señalar que, en contraste al modelo de corto plazo, el modelo de largo plazo no es conservador, dado que se basa solamente en observaciones y a nivel semanal la sensibilidad del modelo a errores en los datos de precipitación es mucho menor que el pronóstico diario. Además, es necesario que el pronóstico de deshielo sea capaz de reproducir la distribución completa del caudal observado, incluyendo los periodos extremos. La tabla 3, en su tercera columna, presenta las estadísticas de Nash-Sutcliffe obtenidas con el modelo ya calibrado, las cuales se consideran aceptables para todos los puntos de control, salvo el punto de control de Laja 1, que tiene un valor de 0.33. En este caso el problema de calibración se debe principalmente a la pobre calidad de la estadística de caudal semanal disponible. Cabe señalar que los puntos de control que muestran menor desempeño generalmente corresponden a los puntos de control con menor calidad de datos o que se alejan significativamente de un régimen natural, la cuenca intermedia de Laja 1 siendo el caso más extremo de ellos.

³ ERA40: ECMWF 40-year Reanalysis

⁴ MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2

Punto de Control	NSE	
	Corto Plazo	Largo Plazo
Afluente a Embalse C. Rapel	0.63	0.80
Claro en S. Carlos + E. Las Garzas	0.76	0.79
Afluentes Laguna Invernada	0.63	0.84
C.I. BT C. Isla - desaguë L. Maule	0.52	0.78
Afluentes E. Melado	0.74	0.85
Afluentes Laguna Maule	0.10	0.61
C.I. BT Maule C. Pehuenche-L. Invernada-L. Maule	0.56	0.83
C.I. E. C. Colbún-Maule en Armerillo	0.44	0.79
C.I. Rama Laja C. Antuco	0.41	0.86
C.I. BT C. Abanico L. Laja	0.53	0.52
Rucúe	0.55	0.68
Cuenca Intermedia Tucapel-Central Laja 1	0.48	0.33
Polcura en BT C. Antuco	0.59	0.83
Captación Alto Polcura	-0.15	0.77
Afluentes L. Laja	0.66	0.80
C. I. entre Ralco y Pangue	0.71	0.67
Afluentes Embalse Ralco	0.72	0.89
Afluente río Huequecura.	0.75	0.85
Cuenca intermedia Embalses Pangue - Angostura	0.64	0.81
Afluentes Lago Chapo	0.83	0.82
Hoya Intermedia Colbún	0.70	0.85

Tabla 3. Desempeño (estadística NSE) del modelo calibrado para las etapas de corto plazo y largo plazo. Según el estudio de Morasi et al, (2007) un NSE > 0.5 se considera “satisfactorio”, > 0.65 es “bueno” y un valor > 0.75 es considerada “muy bueno”. En el caso del modelo de corto plazo, las estadísticas NSE se calculan para el periodo de invierno (abril a septiembre) usando observaciones de caudal diario y los resultados de los modelos calibrados usando datos de entrada de los pronósticos GFS y ECMWF (2015-2018). En el caso del pronóstico de largo plazo, el modelo es calibrado con la estadística semanal disponible para el año completo. Para evaluar el modelo se considera el periodo 1980-2017.

3.4 Infraestructura física

El SPC es implementado en un sistema computacional que es propiedad de Meteodata. El SPC propiamente tal es instalado en un servidor nuevo de alta gama comprado por Meteodata y dedicado en 100% a la ejecución del SPC y el alojamiento de la página web del proyecto. El servidor se ubica físicamente en el Datacenter “Lidice” de GTD Teleductos, ubicado en el centro de Santiago. El Datacenter cuenta con respaldo de Energía, climatización y conectividad con modalidad 2N o al menos N+, Uptime superior a 99.9% e Internet redundante de ancho de banda 100/10 Mbps. Cabe señalar que desde el inicio de la marcha blanca no se ha experimentado ninguna falla de hardware, conectividad o energía.

Adicionalmente, se ha instalado un servidor de desarrollo y respaldo ubicada en las oficinas de Meteodata, en conjunto con un servidor arrendado ubicado físicamente en Estados Unidos. Este segundo servidor es utilizado para bajar y procesar los datos de los pronósticos meteorológicos, y también puede correr el SPC en caso de una falla en el servidor principal.

3.5 Sistemas de adquisición de datos

Durante la marcha blanca se ha podido comprobar el correcto funcionamiento de todos los sistemas de adquisición de datos externos para el SPC, los cuales se describen a continuación:

3.5.1 Modelos de predicción de tiempo

Se ha implementado sistemas para obtener automáticamente los datos de pronósticos numéricos determinísticos y ensemble de los sistemas de predicción GFS y ECMWF (Tabla 2). Cabe señalar que los datos del modelo ECMWF son parte de un servicio pagado y Meteodata cuenta con un contrato para la recepción y uso de los datos de este modelo desde el 8 de febrero de este año en adelante.

Durante la marcha blanca no se ha experimentado ningún atraso significativo en la adquisición de los datos de los modelos de pronóstico.

3.5.2 Observaciones hidro-meteorológicas

Se ha implementado sistemas de adquisición de los datos meteorológicos de la red de monitoreo. La información es actualizada cada 2 horas, recopilando automáticamente datos relevantes de precipitación, temperatura y caudal desde la página web de la División General de Aguas (dgasatel.mop.cl). Durante la marcha blanca el sistema ha funcionado correctamente, sin presentar fallas ni atrasos importantes.

3.5.3 Caudales recientes

Se ha implementado sistemas para obtener las estimaciones de caudal diario para todos los puntos de control. Los sistemas de captura de datos utilizan el API provisto por el Coordinador y los caudales para ciertos puntos de control se obtienen mediante la replicación de los cálculos de balance que aplica el Coordinador en sus procesos internos.

Durante la marcha blanca se ha operado el sistema de captura de datos y se ha podido corregir varios problemas incluyendo el manejo información faltante, actualización retrospectiva de los datos, y correcciones en los métodos de estimación de caudal para los puntos de control donde la información entregada por las empresas coordinadas no se considere confiable. Actualmente el sistema de captura de datos de caudal esta funcionando de manera estable.

3.6 Ejecución del modelo

La programación diaria del SPC ha seguido un esquema prácticamente idéntico al indicado por Meteodata en la propuesta técnica del proyecto, teniendo como objetivo garantizar la entrega del pronóstico de caudales a las 09:00 horas de la mañana, a más tardar.

La figura 3 presenta la programación del SPC que fue implementada durante la marcha blanca. Tal como se había planteado, el SPC es ejecutado dos veces cada mañana, a las 4:30 y 7:40 hrs, y los resultados están disponibles a las 5:30 y 8:40 hrs, respectivamente. Los datos meteorológicos y de caudal se actualizan antes de la realización de cada pronóstico. En la infraestructura computacional dedicada al SPC, la ejecución del pronóstico completo (corto + largo plazo) para un punto de control se demora entre 1 y 2 minutos, y la ejecución de todos los puntos de control se demora poco más que media hora.

Es un objetivo primordial el cumplimiento de la entrega del pronóstico diariamente antes de las 09:00 AM. Durante todo el periodo de marcha blanca el SPC se pudo generar el pronóstico completo antes de la hora límite de 09:00 AM, indicando una disponibilidad del pronóstico de efectivamente 100%.

3.7 Archivos de salida

Durante la marcha blanca se ha implementado rutinas para generar archivos de datos con los resultados del pronóstico en los formatos requeridos por el Coordinador. El formato de los archivos de salida ha sido validado por el Coordinador. La tabla 4, a continuación, presenta un resumen de los formatos disponibles.

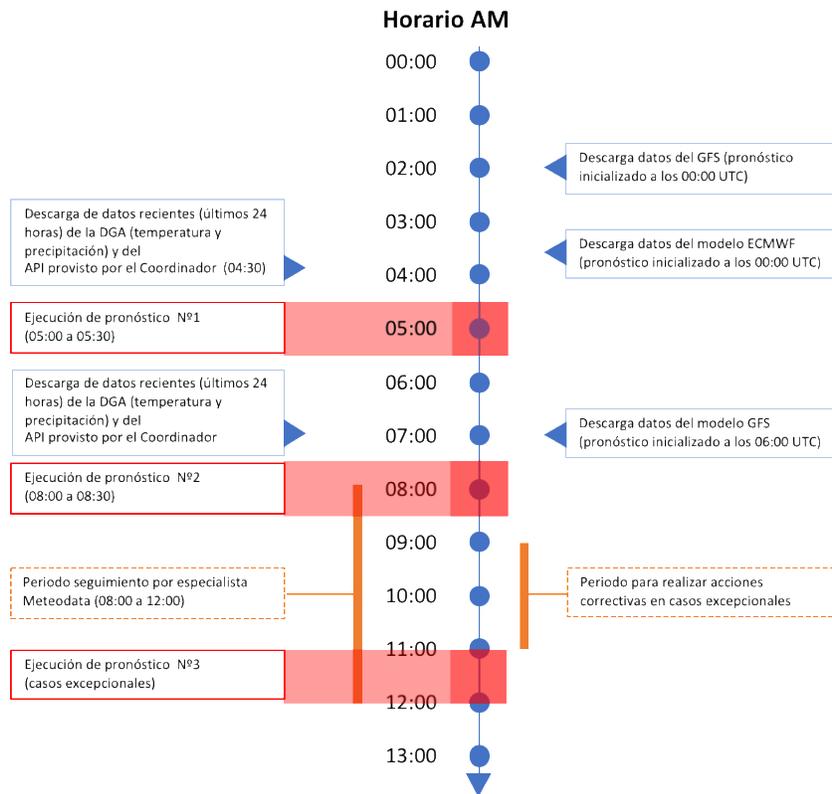


Figura 3. Programación diaria del sistema de pronóstico durante la marcha blanca. No fue necesario realizar el pronóstico N°3 durante la marcha blanca, Aunque Meteodata ha comprobado internamente que la capacidad de realizar pronósticos adicionales después de las 09:00 AM esta funcionando correctamente.

Archivo	Descripción	Recomendaciones de uso
Datos Diarios	Proyección de caudal, precipitación, temperatura máxima y mínima en intervalos diarios para una semana a partir de la fecha del pronóstico.	
Resumen 1º Semana	Caudal mediano para la 1º semana del pronóstico en todos los puntos de control.	
Datos semanales	Caudal mediano en las semanas 1º a 4º para cada punto de control y cada escenario hidrológico.	Ignorar los valores extremos de la distribución de caudales pronosticada. En la práctica, se recomienda utilizar los datos entre los percentiles 5% y 95% de la distribución de caudales pronosticados. Para el periodo de largo plazo (>14 días) se recomienda utilizar los datos en intervalos semanales (recordar que el modelo de largo plazo es calibrado con la estadística semanal)
Datos anuales	Caudal diario completo para el periodo 1 a 365 días, para cada punto de control y escenario hidrológico.	

Tabla 4 Archivos de datos con los resultados del SPC.

3.8 Página web

Durante la Marcha Blanca se ha operado una página web que visualiza los resultados del SPC. En términos prácticos, la disponibilidad de la página ha sido mayor que el 99% del tiempo durante el periodo de marcha blanca. Los periodos (cortos) de indisponibilidad generalmente estuvieron asociados a la implementación de actualizaciones.

Las componentes públicas de la página web se resumen en la tabla a continuación. El Coordinador contará con mayores funcionalidades de análisis a través de la web del SPC.

Componente	Descripción
Pronóstico a corto plazo	Página que presenta detalle por cuenca del pronóstico de caudal para el periodo de 0 – 14 días. Incluye el pronóstico de la precipitación media y temperatura en la cuenca.

Tabla 5. Componentes públicas de la aplicación del SPC.

4 Puntos de control

La tabla 6 presenta los puntos de control considerados en la Marcha Blanca y el estatus del SPC para el pronóstico de corto y largo-plazo para cada punto. Ha sido posible configurar el modelo de pronóstico satisfactoriamente para todos los puntos de control, con la única excepción de Alto Polcura que durante la marcha blanca presentó un comportamiento del caudal diario no reproducible.

Cuenca	Punto de control	Calibración		Observaciones
		Corto Plazo	Largo Plazo	
Rapel	Afluente a Embalse C. Rapel	✓	✓	
Maule	Hoya Intermedia Colbún	✓	✓	
	Claro en S. Carlos + E. Las Garzas	✓	✓	
	Afluentes Laguna Invernada	✓	✓	
	C.I. BT C. Isla - desagüe L. Maule	✓	✓	
	Afluentes E. Melado	✓	✓	
	Afluentes Laguna Maule	✓	✓	
	C.I. BT Maule C. Pehuenche-L. Invernada-L. Maule	✓	✓	
	C.I. E. C. Colbún-Maule en Armerillo	✓	✓	
Laja	C.I. Rama Laja C. Antuco	✓	✓	
	C.I. BT C. Abanico L. Laja	✓	✓	
	Rucúe	✓	✓	Asignado un caudal máximo de 14 m ³ /s para este punto de control
	Cuenca Intermedia Tucapel-Central Laja1	✓	⊙	Baja calidad de la estadística semanal
	C.I. Laja en Tucapel-Desagüe L. Laja-Capt. Alto Polcura	⊙	✓	Sin información de caudal diario. El pronóstico de corto plazo ha sido calibrado con la estadística semanal
	Polcura en BT C. Antuco	✓	✓	
	Captación Alto Polcura	X	✓	No ha sido posible configurar el modelo del pronóstico de corto-plazo. Ver discusión abajo.
	Afluentes L. Laja	✓	✓	
Biobío	C. I. entre Ralco y Pangue	✓	✓	
	Afluentes Embalse Ralco	✓	✓	
	Afluente río Huequecura.	✓	✓	
	Cuenca intermedia Embalses Pangue - Angostura	✓	✓	
Chapo	Afluentes Lago Chapo	✓	✓	

Tabla 6 Estatus de cada punto de control considerado en el SPC al fin de la marcha blanca. En la columna de calibración el símbolo ✓ indica que el modelo ha sido configurado para el punto de control y muestra un desempeño aceptable. El símbolo ⊙ indica una configuración subóptima, que no obstante entrega calidad suficiente para que sea utilizado en régimen operacional. El símbolo X corresponde a un punto de control que no se ha podido calibrar adecuadamente.

Cabe señalar que algunos puntos de control originalmente contemplados para la marcha blanca han sido excluidos del SPC, dado que no corresponden a regímenes natural y por ende no se pueden pronosticar con un modelo hidrológico, o que fueron considerados redundantes. Dichos puntos de control son:

- Captación Río Teno
- Afluentes Embalse Central Colbún
- Maule en Bocatoma Central Pehuenche
- Biobío antes Junta Huirí Huirí

Por otra parte, el punto de control Rucúe no fue incluido en la lista inicial de puntos de control. Sin embargo, éste ha sido incluido para poder contar con todos los puntos de control relevantes en la cuenca del Río Laja.

Respecto al punto de control Alto Polcura, hasta la fecha no ha sido posible configurar el modelo del pronóstico de corto-plazo, debido a problemas en los datos diarios disponible (ver discusión en la sección 3.3.1). Dado que este punto de control tiene poca importancia para el sistema eléctrico, se propone utilizar la metodología base para Alto Polcura hasta resolver las dificultades con este punto de control, como parte del mejoramiento continuo del SPC.

5 Evaluación del desempeño

En esta sección se presenta la evaluación del desempeño del SPC durante la marcha blanca. Se considera la evaluación cuantitativa del pronóstico de corto plazo y una evaluación cualitativa del pronóstico de largo plazo.

5.1 Pronóstico de corto plazo

En general el modelo de pronóstico ha demostrado un comportamiento satisfactorio durante la marcha blanca, mostrando la capacidad de anticipar variabilidad de caudal asociado con los episodios de precipitación así evidenciando claras ventajas con respecto a la metodología base (que no tiene ninguna capacidad de anticipar eventos). Un ejemplo del comportamiento de pronóstico de corto plazo es mostrado en las figuras 4 y 5. Un aspecto llamativo del comportamiento del pronóstico es una tendencia de subestimar el caudal durante episodios de crecida, lo cual tiene que ver principalmente con el uso de una configuración conservadora del modelo hidrológico.

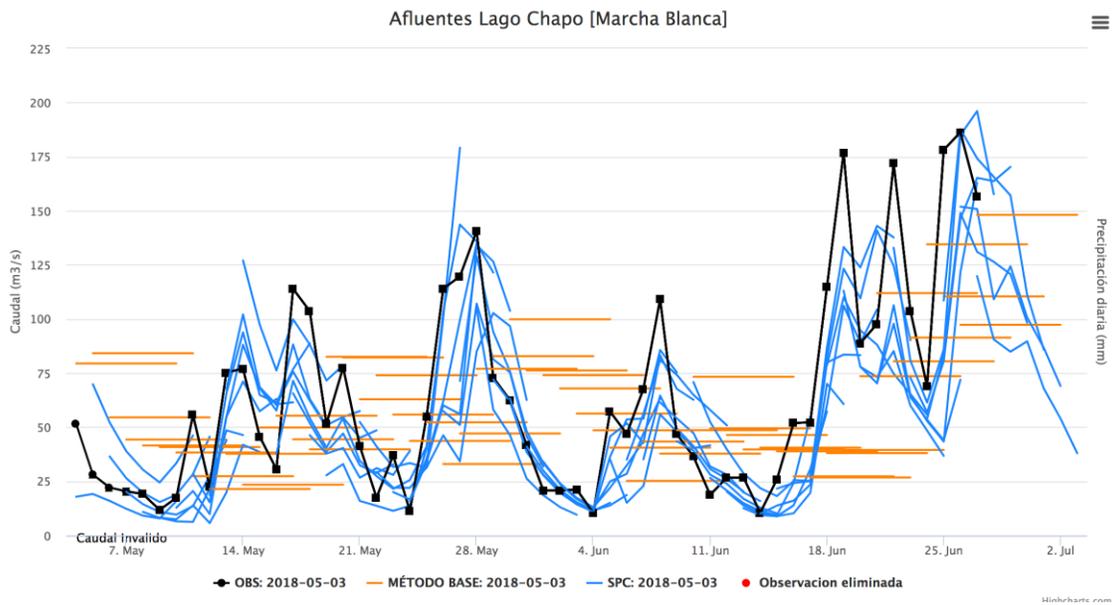


Figura 4 Evaluación del SPC en el punto de control “**Afluentes Lago Chapo**”. Curva negra indica valores reportados, curvas azules indican resultados del pronóstico de caudales, curva naranja indica resultados de la metodología base.

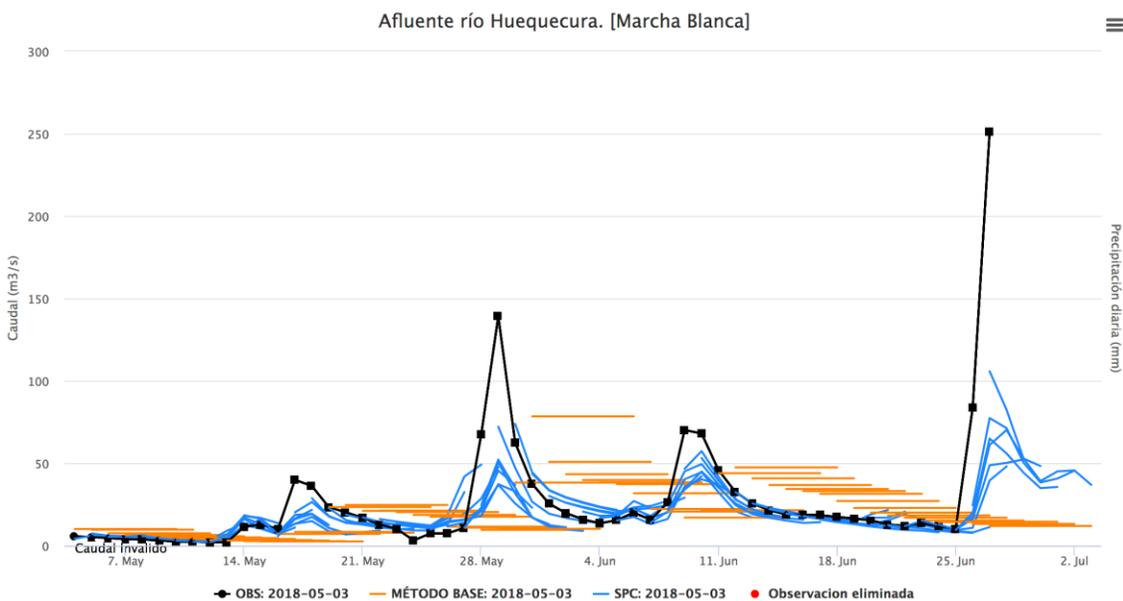


Figura 5 Evaluación del SPC en el punto de control “**Río Huequecura**”. La simbología es igual que el gráfico anterior.

La evaluación cuantitativa del pronóstico de corto plazo se ha basado en el cálculo de indicadores que comparan el desempeño del SPC con el desempeño de la metodología base actualmente usada por el Coordinador para realizar proyecciones de caudal. Dichos indicadores se denominan “Márgenes de Desempeño” o MDP. Un MDP

positivo implica que el SPC tiene un mejor desempeño que la metodología base, mientras un valor negativo indica el SPC tiene peor desempeño⁵. Se utilizan márgenes de desempeño basados en tres indicadores diferentes, que se describen en la tabla a continuación y en el Anexo A.

Margen de desempeño	Indicador	Descripción
MDP _{MAPE}	Error absoluto medio porcentual (MAPE)	Indicador que mide el error porcentual de los pronósticos, respecto al valor de caudal observado en cada punto de control.
MDP _{NSE}	Eficiencia Nash-Sufcliff (NSE)	Estadística normalizada que compara la magnitud de la varianza del error del pronóstico con la varianza de las observaciones del caudal.
MDP _{CORR}	Coefficiente de correlación	Describe el grado de colinealidad entre el pronóstico y el caudal observado. Sirve para cuantificar la capacidad del pronóstico de reproducir la variación temporal de caudal.

Tabla 7. Indicadores utilizados para cuantificar el desempeño del pronóstico de corto-plazo. La definición de cada indicador es presentada en el Anexo A.

Para la mayoría de los puntos de control fue posible implementar el modelo en la parte inicial de la marcha blanca, permitiendo la evaluación “en-línea” de los pronósticos generados día a día. Para algunos puntos de control se detectaron problemas importantes con las observaciones de caudal que se tenían que resolver durante el periodo de marcha blanca. Para dichos puntos, la evaluación del SPC es necesariamente retrospectiva.

Cabe señalar que la evaluación considera los pronósticos del caudal diario en un horizonte de +1 a +7 días desde la fecha de emisión de cada pronóstico.

La tabla 8 presenta un resumen de los resultados obtenidos durante marcha blanca, considerando el periodo entre 3 de mayo y 27 de junio (53 pronósticos en total). Es posible apreciar que los márgenes de desempeño son generalmente positivos para las tres estadísticas consideradas. Los mejores resultados se obtienen para la estadística MDP_{CORR}, indicado que el SPC mejora sustancialmente el pronóstico de la variabilidad diaria de los afluentes. Los indicadores MDP_{MAPE} y MDP_{NSE} miden la diferencia entre el SPC y la metodología base y muestran resultados positivos para prácticamente todos los puntos de control. Existen algunos puntos para los cuales se obtuvieron valores de MDP cercanos a 0 o negativos. En general estos casos corresponden a puntos de control que tienen problemas de calidad de datos (BT. Pehuenche o Alto Polcura), o puntos de control asociados a cuencas altas (de régimen nival) que tienen muy poca sensibilidad a los episodios de precipitación durante invierno (como por ejemplo la Laguna Invernada o la Laguna del Maule).

Dados los resultados obtenidos durante el periodo de marcha blanca, se concluye que el sistema pronóstico de corto plazo esta funcionando de manera correcta y que en términos generales presenta un desempeño igual o superior que la metodología base actualmente utilizada por el Coordinador y, por lo tanto, se considera que el sistema está listo para ser utilizado operativamente.

⁵ El MDP se define como $MDP = (IMA - IMSPC) / IMA$, donde IMA es valor del indicador obtenido con la metodología base y IMSPC valor obtenido con el SPC.

Punto de Control	Tipo Eval.	MAPE			NSE			CORR			MDP Total Ponderado	Margen Mínimo Requerido
		BASE	SPC	MDP	BASE	SPC	MDP	BASE	SPC	MDP		
Afluente a Embalse C. Rapel	MB	55	33	40*	127	35	72*	81	18	78*	47	10
Claro en S. Carlos + E. Las Garzas	MB	38	25	33*	116	62	47*	73	23	69*	38	10
Afluentes Laguna Invernada	MB	10	9	4	127	130	-3	97	76	22*	5	10
C.I. BT C. Isla - desagüe L. Maule	MB	23	22	7	106	98	8	81	54	32*	10	10
Afluentes E. Melado	MB	55	43	22*	114	80	29*	87	36	59*	26	10
Afluentes Laguna Maule	MB	88	74	16*	132	108	18*	105	79	25*	17	10
C.I. BT Maule C. Pehuenche-L. Invernada-L. Maule	RT	20	20	0	117	89	38*	80	57	71*	11	10
C.I. E. C. Colbún-Maule en Armerillo	MB	90	61	33*	134	50	63*	101	29	76*	40	10
C.I. Rama Laja C. Antuco	MB	24	15	38*	106	55	48*	71	32	56*	41	10
C.I. BT C. Abanico L. Laja	RT	16	12	25*	117	66	44*	73	30	59*	30	10
Rucúe	RT	51	33	35*	153	48	69*	90	19	79*	43	10
Cuenca Intermedia Tucapel-Central Laja1	MB	71	43	40*	141	51	64*	100	29	74*	46	10
Polcura en BT C. Antuco	MB	47	32	32*	102	75	26*	75	34	55*	34	10
Captación Alto Polcura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Afluentes L. Laja	MB	52	38	26*	110	69	38*	87	41	53*	30	10
C. I. entre Ralco y Pangué	MB	52	37	28*	106	61	43*	74	23	69*	34	10
Afluentes Embalse Ralco	MB	34	26	25*	99	66	34*	71	20	72*	31	10
Afluente río Huequecura.	MB	85	46	46*	121	68	44*	103	28	73*	49	10
Cuenca intermedia Embalses Pangué - Angostura	MB	63	39	38*	111	77	31*	96	30	69*	40	10
Afluentes Lago Chapo	MB	62	36	42*	116	48	59*	86	24	72*	47	10
Hoya Intermedia Colbún	MB	42	31	27*	114	71	38*	85	30	65*	32	10

Tabla 8 Evaluación cuantitativa del SPC comparado con la metodología base (BASE). El anexo A contiene la definición de las estadísticas presentadas consulte el anexo A. La columna “Tipo. Eval” indica si la evaluación utiliza los resultados obtenidos durante la marcha blanca (MB) o con simulaciones retrospectivas (RT). Colores verdes indican que el SPC mostró mejor desempeño que la metodología base. Colores rojos indican que el desempeño del SPC fue igual o peor que la metodología base. El asterisco indica que el valor del MDP es significativamente diferente a cero, con un nivel de confianza de 5%. La columna “MDP Total Ponderado” es el resultado de los valores ponderados de cada indicador (80% MAPE+10%NSE+10%CORR).

Respecto a la evaluación del pronóstico de la segunda semana, se considera un periodo de evaluación comprendido entre la el 03 de mayo hasta el 28 de julio del año 2018. Adicionalmente, la evaluación de la segunda semana excluyen los resultados de “C.I. Laja en Tucapel - Desagüe L. Laja - Capt. Alto Polcura”,

“Canal Teno” y “Captación Alto Polcura”, los cuales no pudieron ser calibrados debido a problemas en la calidad o disponibilidad de los registros observacionales disponibles.

A diferencia de la evaluación aplicada para la primera semana, las estadísticas mostradas aquí se basan en el *promedio semanal* del caudal proyectado, es decir, no se comparan los caudales diarios sino caudales semanales. En el caso de la metodología **Base**, es el valor *mediano* de la estadística semanal reducida. Para el SPC, el valor semanal del caudal es el promedio semanal del valor mediano diario de los escenarios pronosticados (al igual que el cálculo para la 1° semana).

Para la semana 2° la estadística MAPE 16% (comparado con el 42%) obtenido para la semana 1°. En el caso del NSE y CORR, los resultados son mixtos. La explicación para este comportamiento está siendo investigado, aunque se considera probable que sea una particularidad del comportamiento de los pronósticos durante el (corto) periodo de evaluación y no un aspecto permanente del SPC.

Se considera que los resultados obtenidos para la segunda semana son generalmente favorables, aunque se reconoce que las mejoras con respecto a la metodología base son menores que lo esperado según los resultados obtenidos en los estudios de factibilidad realizados por Meteodata en los Estudios del año 2015 y 2016. Se considera que esto es entendible considerando que:

- a) La muestra (de pronósticos) usada para evaluar el desempeño es muy corta (menos de 3 meses, comparado con más de 10 años en los estudios);
- b) La marcha blanca se realizó durante un invierno relativamente seco, generando que los beneficios del SPC disminuyan;
- c) Existen problemas de la calidad de los registros observacionales de caudal diario disponibles en línea en varios puntos de control.

Cuenca	Punto de Control	MAPE			NSE			CORR			MDP Total Ponderado	Margen Mínimo Requerido
		BASE	SPC	MDP	BASE	SPC	MDP	BASE	SPC	MDP		
Rapel	Afluente a Embalse C.Rapel	49	30	39	223	99	56	74	46	38	41	10
Maule	Afluentes Laguna Invernada	12	9	30	102 3	517	49	54	80	-49	24	10
Maule	Afluentes Laguna Maule	43	54	-26	186	227	-22	104	126	-20	-25	10
Maule	C.I. BT C.Isla - desagüe L.Maule	24	20	17	113	104	8	40	50	-25	12	10
Maule	Hoya Intermedia Pehuenche	24	20	18	114	109	4	51	59	-16	13	10
Maule	Afluentes E.Melado	44	35	20	151	132	13	54	64	-19	15	10
Maule	Claro en S.Carlos + E.Las Garzas	36	32	12	246	164	33	56	57	-2	13	10
Maule	C.I. E.C.Colbún-Maule en Armerillo	75	47	38	262	104	60	87	57	35	40	10
Maule	Hoya Intermedia Colbún	36	28	22	149	119	20	52	56	-7	19	10
Maule (dup)	C.I. BT Maule C.Pehuenche-L.Invernada-L.Maule*	24	27	-12	114	178	-56	51	84	-66	-22	10
Maule (dup)	C.I. E.C.Colbún-Desagüe L.Invernada-L.Maule*	36	27	26	149	116	22	52	61	-17	21	10
Río Laja	Polcura en BT C.Antuco	35	30	15	92	105	-14	49	62	-28	8	10
Río Laja	Afluentes L.Laja	31	30	2	97	130	-34	62	81	-31	-5	10
Río Laja	C.I. BT C.Abanico L.Laja	23	24	-1	112	138	-23	67	117	-76	-11	10
Río Laja	C.I. Rama Laja C.Antuco	19	17	9	99	122	-24	54	71	-33	2	10
Río Laja	Cuenca Intermedia Tucapel-Central Laja1	45	36	19	137	107	22	66	59	12	19	10
Río Laja	Rucue	43	19	55	500	128	74	56	36	37	55	10
Río Biobio	Afluentes Embalse Ralco	32	25	23	85	87	-2	49	49	0	18	10
Río Biobio	C. I. entre Ralco y Pangue	43	43	1	136	173	-27	70	72	-3	-2	10
Río Biobio	Cuenca intermedia Embalses Pangue - Angostura	57	41	28	130	126	3	81	89	-9	22	10
Río Biobio	Afluente río Huequecura.	69	47	32	128	121	6	77	71	8	27	10
Chapo	Afluentes Lago Chapo	57	51	11	122	126	-3	116	74	36	12	10

Tabla 9. Evaluación del desempeño del pronóstico semanal para la **semana 2**. Se muestran los resultados para las estadísticas MAPE, NSE y CORR para la metodología base (BASE) y el SPC. También se muestra el Margen de Desempeño (MDP) para cada estadística. Si el MDP es significativamente mayor que 0, las celdas correspondientes tienen color verde. En caso contrario, las celdas tienen color de fondo rojo. Si el valor de MDP no es significativamente diferente de cero, el color de fondo se deja en blanco. El nivel de significancia es 0.0.

5.2 Pronóstico de largo plazo

El pronóstico de largo plazo cubre el horizonte de 14 a 365 días y su objetivo principal es generar estimaciones de caudal para la época de deshielo (entre octubre y marzo). Una evaluación del desempeño del pronóstico de largo plazo durante el periodo de marcha blanca no es posible en el presente informe, ya que se tendría que esperar hasta el fin del periodo de deshielo para poder comparar el pronóstico con el caudal real observado durante la marcha blanca. Las pruebas internas realizadas por Meteodata en el desarrollo del pronóstico de largo plazo para la marcha blanca indican que la implementación del SPC tiene un desempeño aceptable. Además, al examinar los resultados obtenidos por el sistema en el cierre de la marcha blanca muestran un comportamiento consistente con la situación climatología actual.

A modo de ejemplo, consideramos el caso del punto de control Embalse Melado, ubicado en la cuenca del Río Maule. La figura 6 muestra una visualización del pronóstico obtenido para el día 1 de abril, es decir, al comienzo de año hidrológico actual. El gráfico muestra una proyección del caudal que es prácticamente idéntica a la estadística completa de caudal. Este comportamiento es esperable, ya que a principios de abril el año hidrológico recién comenzó y no hay forma de saber si el año será más seco o más húmedo que lo normal.

En contraste, la figura 7 muestra la proyección generada por el SPC el día 27 de junio. Ahora el pronóstico del SPC muestra una proyección de caudal significativamente distinta de la estadística completa, con una tendencia de proyectar escenarios de caudal más secos que la estadística. Este resultado es consistente con la coyuntura climatológica, dado que las condiciones hidrológicas han sido relativamente secas, con un déficit anual de precipitación acumulada alrededor de 30% hasta el 27 de junio.

Cabe señalar que Meteodata ha realizado una revisión cualitativa del comportamiento del pronóstico SPC en los otros puntos de control y se ha concluido que en todos ellos los resultados arrojados por el SPC son consistentes con la situación climatológica actual.

Es también importante señalar que durante el periodo de deshielo el SPC será complementado con el pronóstico de deshielo actualmente utilizado por el Coordinador, que se basa principalmente en métodos estadísticos. Según pruebas realizados para años históricos, se prevé que un pronóstico exhibirá un mejor desempeño que cualquier de los dos sistemas por separado.

En relación con el pronóstico desde la tercera semana, el SPC puede generar predicciones de caudales relativamente extremas que escapan del rango de los valores observados en los registros históricos disponibles y, por lo tanto, se deben considerar poco realistas. Conforme a lo anterior, Meteodata recomienda acotar simétricamente el rango de los escenarios pronosticados, como una medida para evitar el uso de pronósticos extremos en los procesos del Coordinador.

Conforme a lo anterior, durante la marcha blanca del SPC se determinó que para un pronóstico “típico”, se identifica hasta 2 escenarios que muestran valores extremos. Por lo tanto, Meteodata recomienda acotar los escenarios al rango definido por los percentiles 5% y 95%. Cabe señalar que, al considerar un acotamiento simétrico de los caudales pronosticados, no se introduce ningún sesgo en los resultados y permite tener una regla objetiva y reproducible respecto de la aplicación del SPC por parte del Coordinador.

Sin perjuicio de lo anterior, el pronóstico entregado por el SPC se utiliza en el proceso de Programación para reducir la estadística histórica de caudales (actualmente 57 años hidrológicos). En la eventualidad de que los valores extremos del pronóstico del SPC fueran inferiores o superiores a los volúmenes mínimos o máximos de la estadística histórica, respectivamente, se simulará en el modelo de operación, a partir de la tercera semana, la estadística histórica.

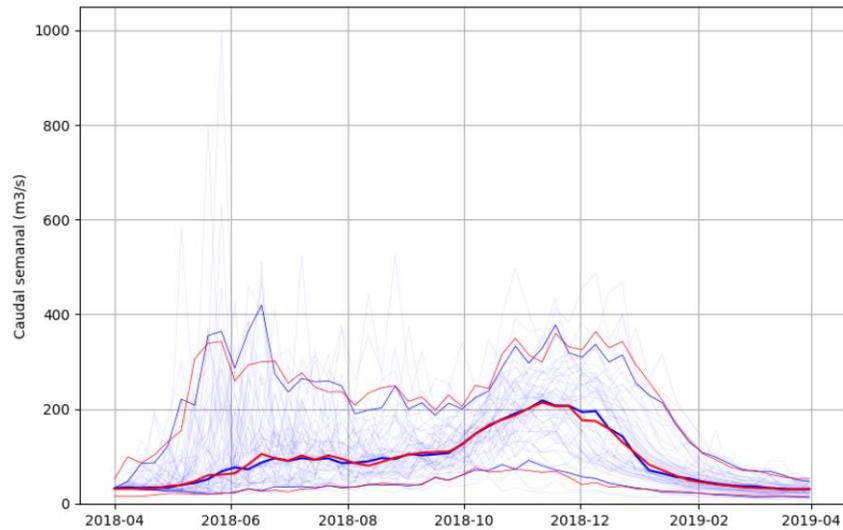


Figura 6 Pronóstico de caudal realizado al comienzo de la temporada (1 de abril 2018) para Embalse Melado. Las líneas azules semitransparentes son las proyecciones individuales del SPC usando meteorología de años anteriores. La línea azul ancha muestra la mediana de la distribución y las azules líneas inferiores y superiores indican el percentil 5% y 95% de la distribución. Por otra parte, la línea ancha roja indica la mediana de la estadística semanal, y las líneas rojas inferiores y superiores indican el percentil 5% y 95% de la estadística.

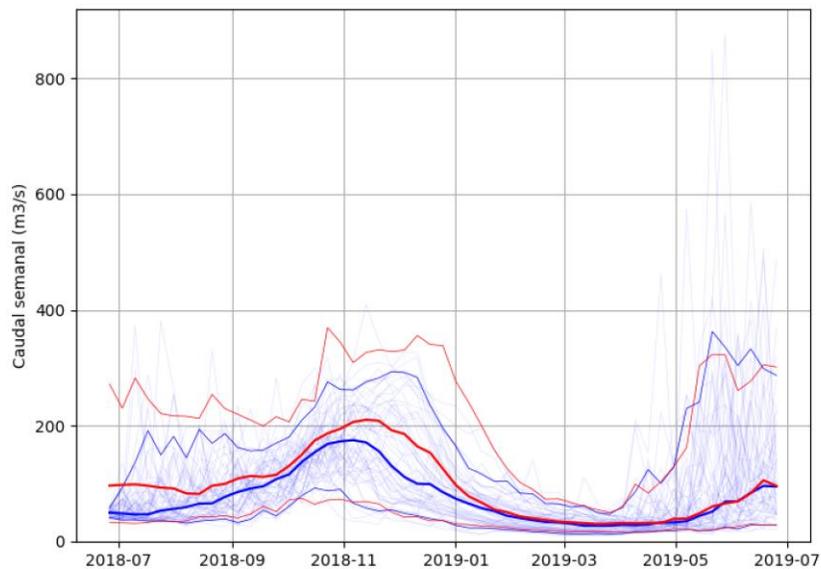


Figura 7. Pronóstico de caudal realizado el día 26 de junio para el Embalse Melado. Las precipitaciones observadas en las cercanías de la cuenca indican que a la fecha se ha acumulado un déficit de ~30% con respecto a la precipitación normal a la misma fecha. Esta condición climatológica se ve reflejada en el pronóstico de caudal, que muestra un valor medio significativamente menor que la estadística, y un rango que se excluye escenarios más húmedos.

A mayor abundamiento, en el Anexo B los resultados de la evaluación de desempeño para las semanas 2, 3 y 4, de acuerdo a lo requerido en el Contrato. Para una evaluación de los pronósticos de horizontes de meses,

este se realizará periódicamente y en intervalos que permitan tener un periodo de evaluación razonable para evaluar su desempeño.

6 Oportunidades de mejora

Si bien, se considera que el desempeño del SPC durante la marcha blanca ha sido satisfactorio, se ha identificado varios aspectos del sistema que se consideran subóptimos y que se pretendan abordar en el futuro como parte del proceso de mejoramiento continuo. A continuación, se detallan dos aspectos particulares cuyo mejoramiento es considerado prioritario:

6.1 *Diagnóstico y mejoramiento de la información y caudal diario*

Durante la marcha blanca se han detectado varios problemas con los datos de caudal diario disponibles para los puntos de control. Los problemas incluyen atrasos en la actualización de los datos en el API del Coordinador, valores informados o calculados evidentemente erróneos, cambios en las metodologías de cálculo, o comportamiento de caudal diferentes a lo observado en los datos “históricos” que fueron usados para calibrar el SPC. En algunos puntos de control los problemas resultaron tan importantes que no fue posible calibrar el modelo hidrológico hasta el final de la marcha blanca. Mientras en algunos puntos de control las incertidumbres en los datos de caudal parecen ser fundamentales, en otros casos parece ser posible mejorar la calidad de la información, mediante un análisis detallado de los métodos usados para calcular el caudal o la incorporación de fuentes de información adicional como por ejemplo observaciones de caudal de la red de monitoreo de la DGA. Los puntos de control identificados para el diagnóstico y mejoramiento son: Laguna de Maule, CI Rama Laja, CI Colbún-Maule en Armerillo, CI Laja1, Alto Polcura, CI Pehuenche y CI Mina.

6.2 *Mejoramiento del pronóstico de caudales durante crecidas*

Un aspecto llamativo del comportamiento de SPC durante la marcha blanca ha sido su fuerte tendencia de subestimar la magnitud de las crecidas. Esto se debe en parte a que el modelo ha sido calibrado de manera *conservadora* para evitar sobrestimar los caudales durante episodios de precipitación. Con los resultados de la marcha blanca a la vista, se considera importante reevaluar la estrategia de calibración del modelo, con el objetivo de representar mejor las crecidas.

Durante la marcha blanca el SPC ha mostrado una tendencia a subestimar las máximas del caudal asociadas a los episodios de precipitación. Esta subestimación ha sido mayor a lo esperado, incluso tomando en cuenta la calibración conservadora del pronóstico de corto plazo. Al analizar las razones de esta subestimación, se ha notado que los pronósticos numéricos de precipitación y temperatura durante la marcha blanca han subestimado estas variables durante los episodios de precipitación más fuerte, lo cual puede haber tenido un impacto importante en los caudales pronosticados por el SPC. Por lo tanto, es necesario investigar si es posible implementar métodos de corrección robustos para eliminar posibles sesgos en los resultados de los modelos numéricos. También se considera pertinente reevaluar la estrategia de calibración del modelo buscando estrategias que permiten mejor capturar las crecidas sin perjudicar el desempeño general de pronóstico.

6.3 *Mejoramiento continuo*

Es relevante señalar que ambas actividades de mejoramiento mencionadas anteriormente se enmarcan en un proceso de *mejoramiento continuo* que se realizará de manera constante durante todo el periodo de operación del SPC. El mejoramiento considera la realización de tareas básicas como la constante revisión del desempeño

del sistema, corrección de problemas y recalibración del modelo en la medida que el desempeño del sistema lo amerite.

Además, se realizarán estudios orientados a la evaluación e implementación de mejoras de mayor envergadura en el SPC. La determinación de prioridades y temas de investigación se hará en junto con el Coordinador. Como modalidad de trabajo, los estudios de mejora se realizan en periodos de aproximadamente 6 meses y en fase con las épocas de invierno y de deshielo, de tal manera que durante una época dada se puede investigar técnicas para mejorar el desempeño durante la época que viene. Específicamente:

- Durante el periodo marzo a agosto se trabajará en el estudio, evaluación e implementación de métodos orientados a mejorar el desempeño del sistema durante la época de deshielo
- Durante el periodo septiembre a febrero se trabajará en el estudio, evaluación e implementación de métodos orientados a mejorar el desempeño del sistema durante el periodo aleatorio (periodo de invierno).

Por ejemplo, durante la época aleatoria se podría analizará posibles mejoras en el modelo de nieve, las cuales, de ser efectivas, podrían ser implementados en el sistema operacional para la siguiente época de deshielo. Cabe señalar también que las actividades de mejoramiento se realizarán con el apoyo de un experto hidrometeorólogo con dedicación completa al proyecto.

7 Recomendaciones

Los resultados presentados en el presente informe permiten aseverar que el SPC cumplió con los objetivos de la marcha blanca, estando listo para entrar en régimen de servicio y se recomienda su uso en la operación del sistema eléctrico nacional. A la vez, se recomienda proceder con las actividades de mejoramiento identificados como prioritarios en la sección anterior.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones específicas sobre el uso operacional de los datos resultados del SPC:

- En aplicaciones que requieren derivar un valor del caudal a partir de los resultados de los 57 escenarios, se recomienda ocupar el valor *mediano*.
- En aplicaciones que requieren definir un rango de caudales, se recomienda utilizar el conjunto de resultados entre el percentil 5% y 95% de los 57 escenarios
- Para el pronóstico de largo plazo (> 14 días) se recomienda utilizar los datos en intervalos semanales o mayor.

Anexo B: Metodología actual de pronóstico de caudales y tratamiento de incertidumbre hidrológica

Actualmente los caudales utilizados en el proceso de programación se determinan utilizando el Manual de Procedimientos “Definición de los Caudales a Utilizar para Planificar la Operación”. Este procedimiento se basa en métodos estadísticos y no utiliza pronósticos de precipitaciones ni considera el estado previo de la cuenca. Para la primera semana de simulación se utiliza un caudal determinístico y para el resto de horizonte se consideran los registros históricos (estadística de caudales observados), desde el año 1960, distinguiéndose dos periodos del ciclo hidrológico, los cuales son:

- Periodo aleatorio (abril - septiembre): Coincide con la época lluviosa en la zona central, durante la cual existe una incertidumbre elevada en la proyección de caudales debido a la dificultad de pronosticar los eventos de precipitación que pueden generar rápidos aumentos en los caudales afluentes.
- Periodo de incertidumbre reducida o “deshielo” (octubre – marzo): En esta época la variabilidad asociada a eventos de precipitación es menor y el comportamiento de los caudales está asociado al proceso de deshielo del manto de nieve acumulado durante el invierno.

La Figura 12 muestra el esquema de la metodología actual en términos de las etapas utilizadas en el proceso de programación y el mes del año en que se ejecuta la metodología (mes inicial del proceso). El pronóstico para la primera semana (calculado determinístico) solo considera caudales medios diarios de los últimos siete días y para el resto del horizonte se considera la estadística histórica o estadística completa, según el periodo (aleatorio o deshielo). En el periodo aleatorio, la estadística de las semanas 2 a la 4 se reduce condicionando los caudales al afluente determinístico de la primera semana.

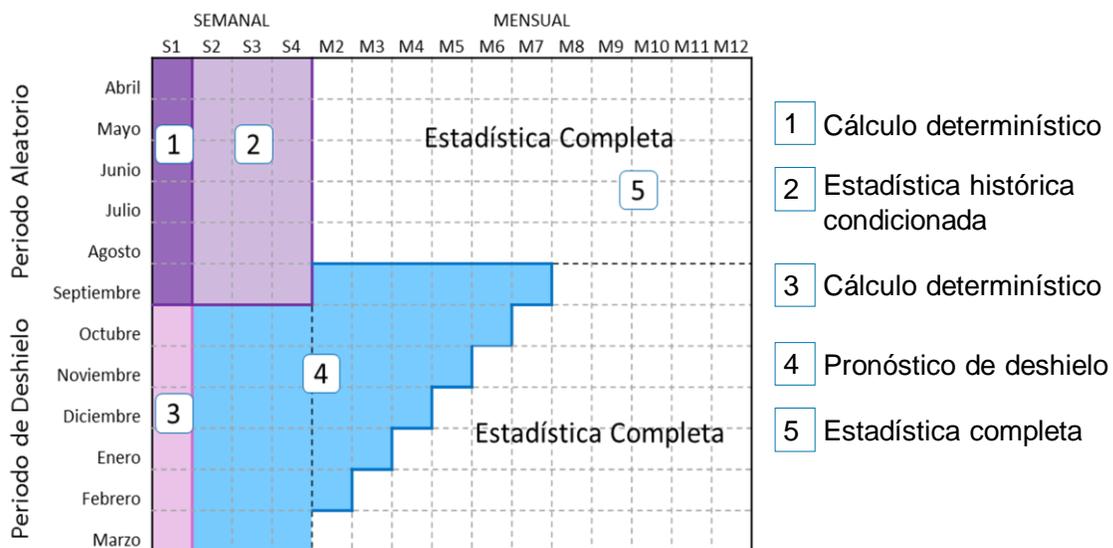


Figura 12: Esquema de metodología actual de pronóstico de caudales.

Anexo C: Indicadores de desempeño

Para el pronóstico de corto plazo se utilizan tres indicadores de desempeño: MAPE, NSE y CORR. Cada indicador es expresado como un porcentaje, y un valor de 0% indica un resultado óptimo (sin error).

Los tres indicadores se definen de la siguiente manera:

$$MAPE(Q_m, Q_o) = 100 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_m - Q_o|}{\sum_{i=1}^n Q_o}$$

$$NSE(Q_m, Q_o) = 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_m^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2} \right]$$

$$CORR(Q_m, Q_o) = 100 - 100 \left[\frac{\sum_{i=1}^n Q_o^i Q_m^i - n \sum_{i=1}^n Q_o^i \sum_{i=1}^n Q_m^i}{(n-1) s_o s_m} \right]$$

Donde Q_m es el caudal pronosticado y Q_o es el caudal observado. El índice i se refiere a la enumeración de todos los pronósticos disponibles en el periodo de evaluación. s_o y s_m representan la desviación estándar de los caudales observados y modelados, respectivamente.

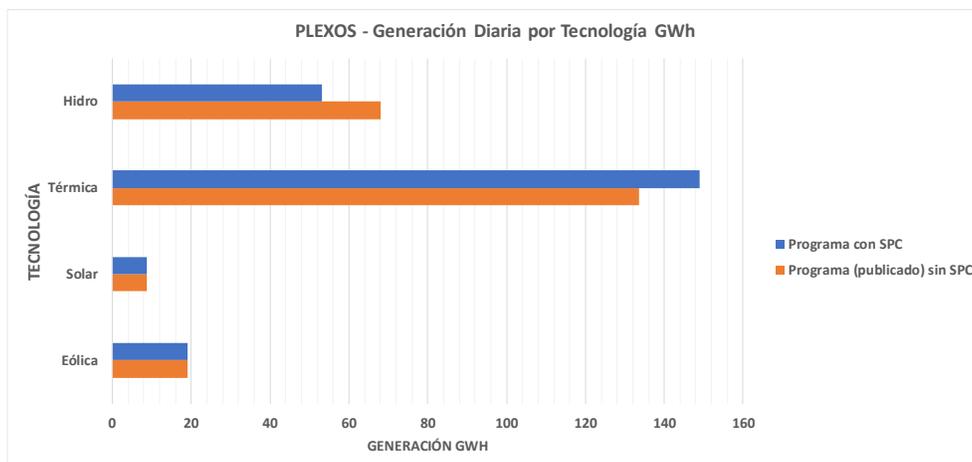
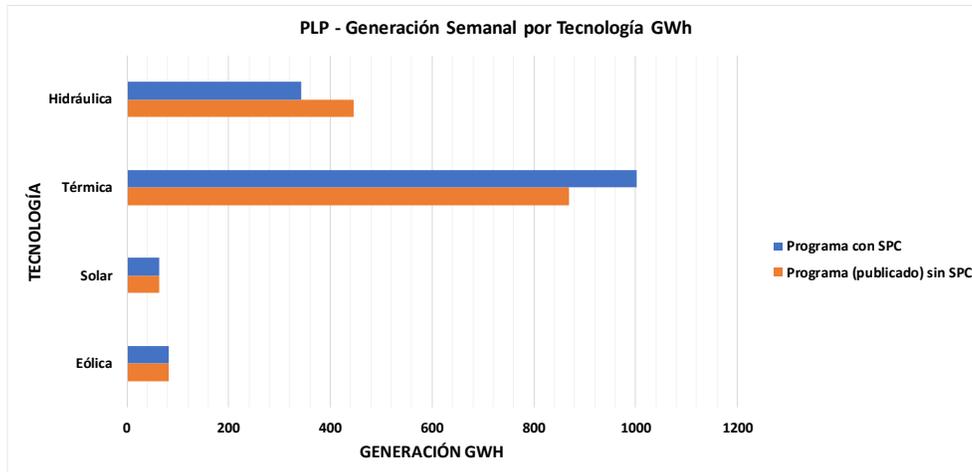
Notar que la correlación es expresada como $CORR = (100\% - \text{coeficiente porcentual de correlación})$. Entonces, un valor $CORR=0.0$ corresponde a una correlación perfecta.

Cabe señalar que el indicador CORR es limitado por los valores 0 y 200%. Por otra parte, los valores de MAPE y NSE no tienen un límite superior.

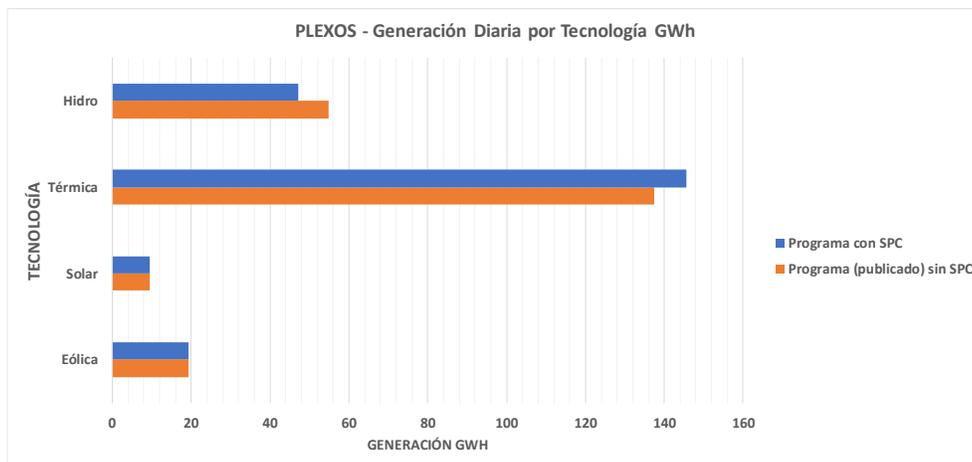
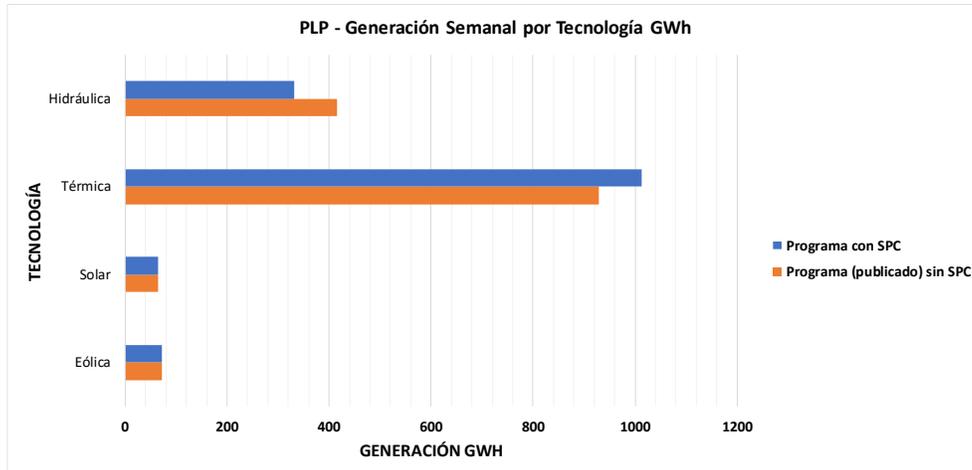
Anexo D: Resultados de la simulación de la operación del SEN

8.1.1. Generación por tecnología del programa semanal y programa diario (programa publicado y programa marcha blanca)

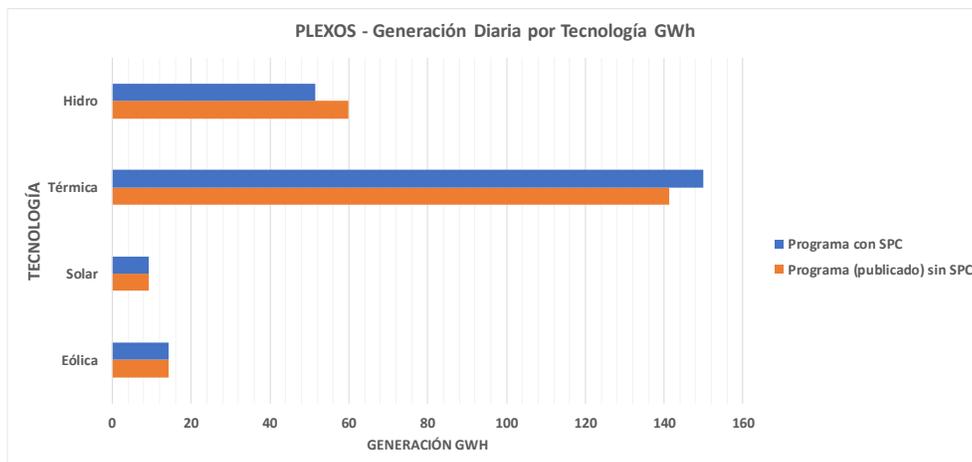
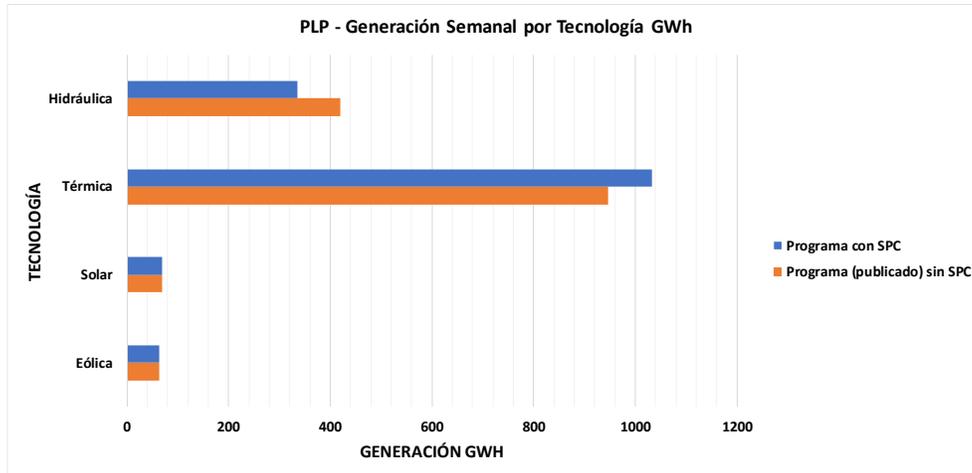
Programa del 12 de junio de 2018



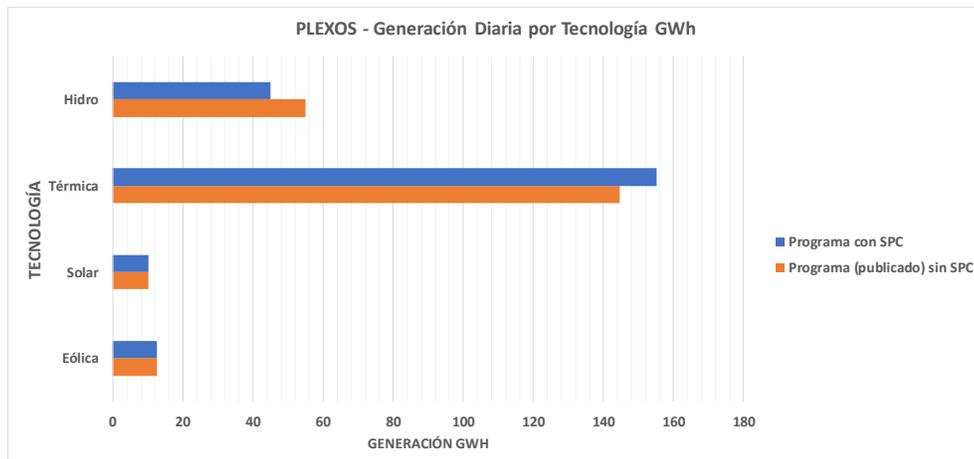
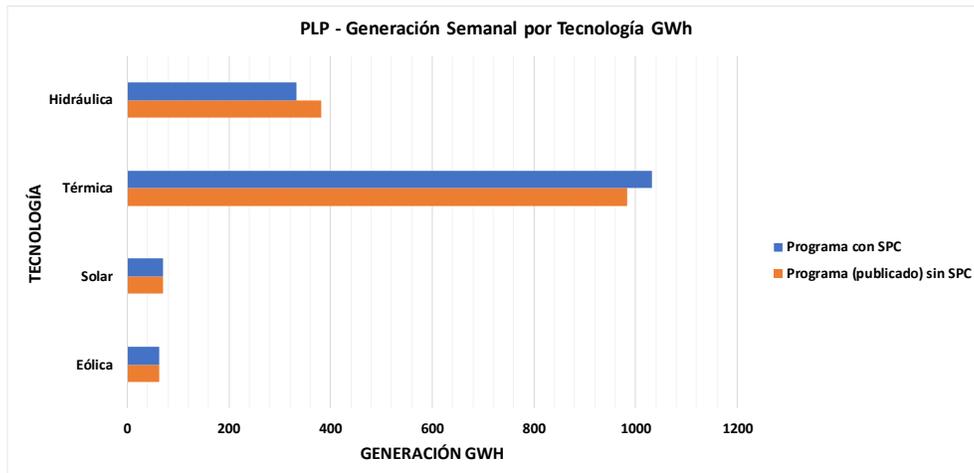
Programa del 13 de junio de 2018



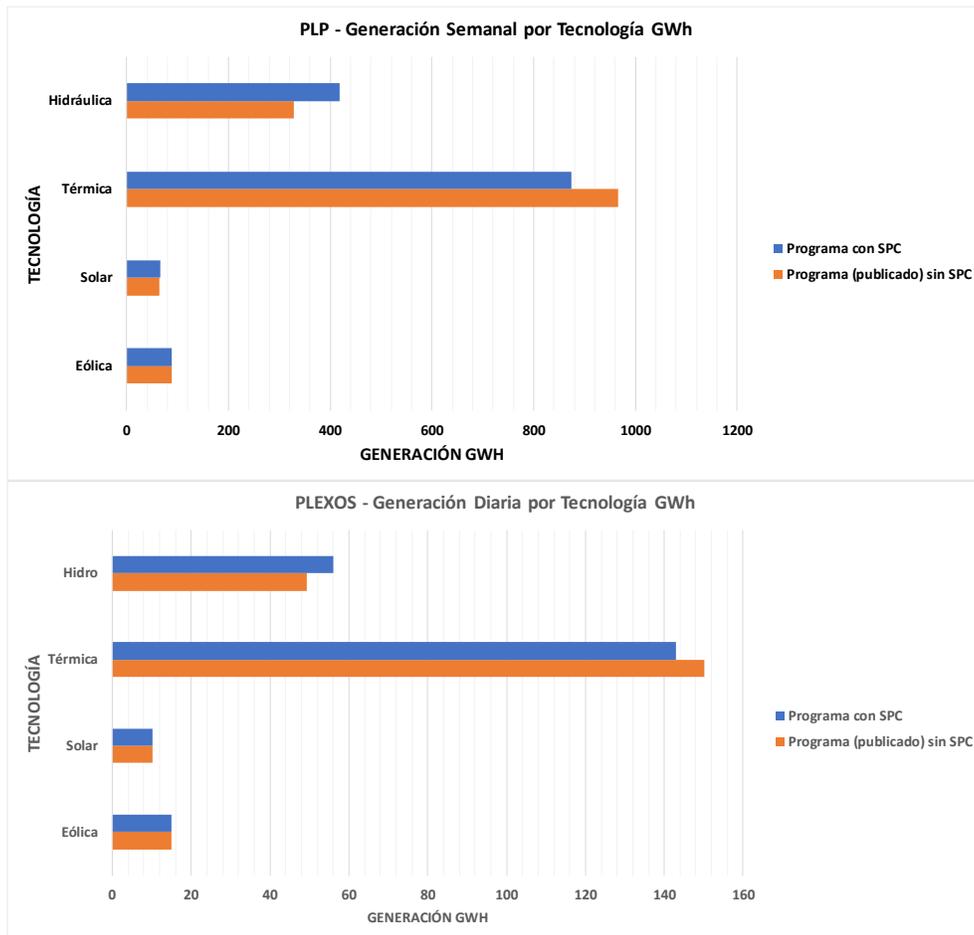
Programa del 14 de junio de 2018



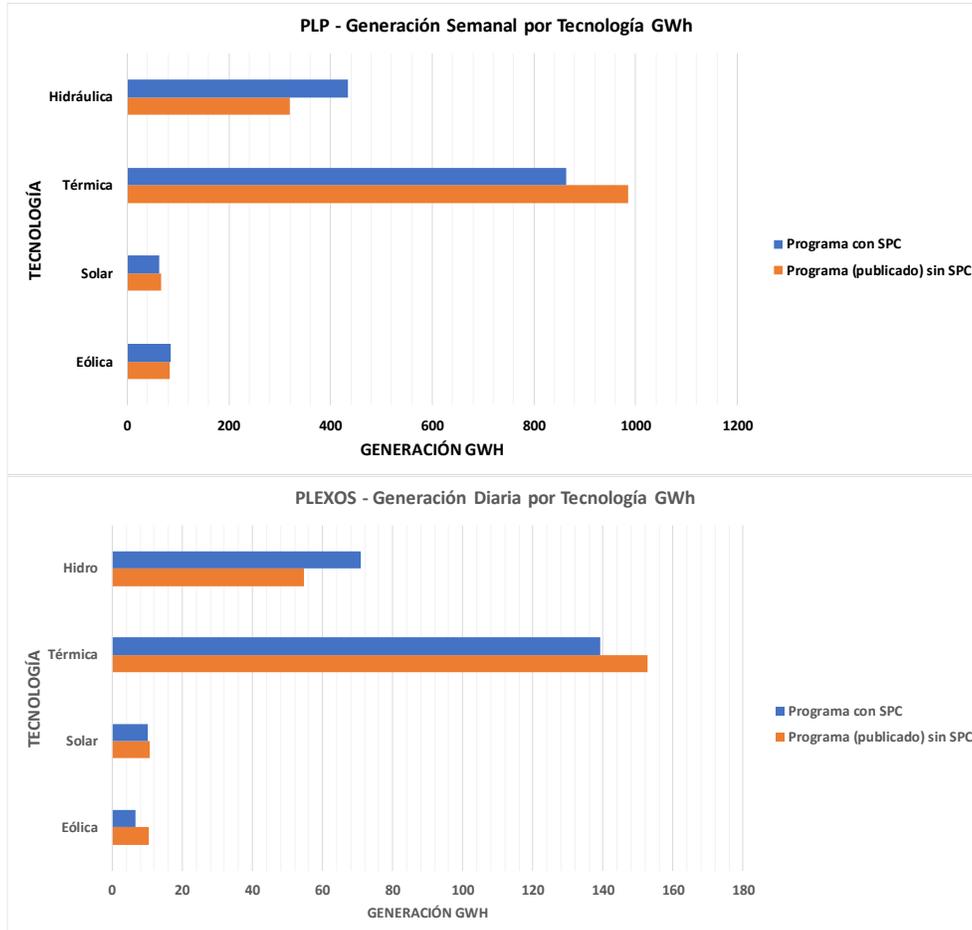
Programa del 15 de junio de 2018



Programa del 26 de junio de 2018



Programa del 27 de junio de 2018



8.1.2. Principales diferencias en el despacho de las centrales

Programa del 12 de junio de 2018

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	47.6	13.9	-33.7
PANGUE	48.9	32.5	-16.4
PEHUENCHE	51.3	25.3	-26
RALCO	45.1	42.1	-3
RALCO	45.1	42.1	-3
RAPEL	17.2	20.5	3.3
MACHICURA	11.2	3.3	-7.9
ANGOSTURA	38	24.2	-13.8
SAN_IGNACIO	6.1	1.5	-4.6
MEJILLONES_1	8.1	14	5.9
MEJILLONES_2	14.1	16.1	2
TOCOPILLA_U14	1.8	10.5	8.7
TOCOPILLA_U15	12.1	11	-1.1
NUEVA_RENCA-TG+TV_GNL_A	43	52	9
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	5.7	53.6	47.9
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	0	6.6	6.6
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	0	53.5	53.5

Programa del 13 de junio de 2018

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	40.6	13.4	-27.2
PANGUE	35.7	30.1	-5.6
PEHUENCHE	41.1	19.2	-21.9
RALCO	40.5	36.7	-3.8
RAPEL	22.4	27.8	5.4
ANTUCO	21.2	16.7	-4.5
CURILLINQUE	5	4.1	-0.9
ISLA	4	3.2	-0.8
MACHICURA	9.6	3.2	-6.4
RUCUE	19.2	15.4	-3.8
QUILLECO	8.2	6.6	-1.6
ANGOSTURA	29.8	23.3	-6.5
LAJA_I	3.5	2.4	-1.1
SAN_IGNACIO	5	1.3	-3.7
TOCOPILLA_U12	0.5	4.2	3.7
TOCOPILLA_U13	0	3.3	3.3
TOCOPILLA_U14	10	11.5	1.5
KELAR-TG1+TG2+TV_GNL_A	0	3.6	3.6
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	37.6	53.6	16
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	0	8	8
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	6.3	55.4	49.1

Programa del 14 de junio de 2018

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	44	13.4	-30.6
PANGUE	36	32.3	-3.7
PEHUENCHE	38.3	27.1	-11.2
RALCO	41.8	38.3	-3.5
RAPEL	29.7	24.2	-5.5
ANTUCO	20.3	15.7	-4.6
CURILLINQUE	4.9	3.7	-1.2
ISLA	3.9	3	-0.9
MACHICURA	10.4	3.1	-7.3
RUCUE	18.4	14.9	-3.5
QUILLECO	7.9	6.4	-1.5
ANGOSTURA	29.2	23.9	-5.3
LAJA_I	2.9	2.3	-0.6
SAN_IGNACIO	6	1.8	-4.2
MEJILLONES_1	7.3	9.6	2.3
TOCOPILLA_U12	0	1	1
TOCOPILLA_U14	4.3	7.4	3.1
NUEVA_RENCA-TG+TV_GNL_A	49.7	52.2	2.5
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	31.6	51.2	19.6
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	0	7.6	7.6
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	2.2	52.5	50.3

Programa del 15 de junio de 2018

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	25.8	21.7	-4.1
PANGUE	34.5	30.4	-4.1
PEHUENCHE	30.4	20.5	-9.9
RALCO	40.6	36.2	-4.4
RAPEL	29.5	22.8	-6.7
ABANICO	5.1	5	-0.1
ANTUCO	20.2	15.5	-4.7
CURILLINQUE	5	3.9	-1.1
ISLA	3.9	3	-0.9
MACHICURA	6.1	5.1	-1
RUCUE	18.3	14.6	-3.7
QUILLECO	7.9	6.3	-1.6
ANGOSTURA	28	22.9	-5.1
LAJA_I	2.7	2.3	-0.4
SAN_IGNACIO	3	2.4	-0.6
CEMENTOS_BIOBIO_F06	0	1.4	1.4
TOCOPILLA_U12	0	2.4	2.4
TOCOPILLA_U13	0	1.2	1.2
TOCOPILLA_U14	6.6	7.4	0.8
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	53.2	53.7	0.5
COLIHUES_U1_HFO	0	1.2	1.2
CMPC_PACIFICO_BL3	0	0.7	0.7
LOS_PINOS	0	12.1	12.1
QUINTERO_1B_GNL_A	0	5.2	5.2
QUINTERO_1A_GNL_A	0	5.2	5.2
ANTILHUE_U1	0	6.2	6.2
COLIHUES_U2_HFO	0	1.2	1.2
ANTILHUE_U2	0	6.2	6.2
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	6.6	8.1	1.5
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	51.3	52.4	1.1

Programa del 26 de junio de 2018

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	8.4	11.9	3.5
PANGUE	32.2	55.7	23.5
PEHUENCHE	33.5	31.7	-1.8
RALCO	40.1	69.3	29.2
RAPEL	11.1	15.5	4.4
ABANICO	5.1	5.2	0.1
ANTUCO	15.2	19	3.8
MACHICURA	2	2.8	0.8
RUCUE	14.2	17.2	3
QUILLECO	6.2	7.4	1.2
ANGOSTURA	21.7	43.5	21.8
LAJA_I	1.5	3.2	1.7
SAN_IGNACIO	0.7	1.2	0.5
MEJILLONES_1	12.5	9.1	-3.4
TOCOPILLA_U14	3.9	0	-3.9
NUEVA_RENCA-TG+TV_GNL_A	48.6	40.8	-7.8
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	48.5	22.7	-25.8
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	7.1	0	-7.1
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	28.8	0	-28.8
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_B	5.6	0	-5.6
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_F	7.3	0	-7.3

Programa del 27 de junio de 2018

Central	Generación GWh		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
COLBUN	8.4	11	2.6
PANGUE	30.3	57.4	27.1
PEHUENCHE	27.2	33.8	6.6
RALCO	37.1	69.3	32.2
RAPEL	11.7	19.4	7.7
ABANICO	5.1	5.3	0.2
ANTUCO	14.8	20	5.2
CURILLINQUE	5.8	5.5	-0.3
ISLA	4.6	4.4	-0.2
MACHICURA	2	2.6	0.6
RUCUE	13.8	18.2	4.4
QUILLECO	5.9	7.8	1.9
ANGOSTURA	20.4	46.4	26
LAJA_I	1.2	3.5	2.3
MEJILLONES_1	13.2	10.2	-3
MEJILLONES_2	22.8	22.4	-0.4
TOCOPILLA_U14	3	0	-3
TOCOPILLA_U15	6.2	1	-5.2
ANGAMOS_2	39.2	39.1	-0.1
PAS_MEJILLONES	2.7	2.8	0.1
COCHRANE_1	37.8	37.6	-0.2
COCHRANE_2	37.8	37.6	-0.2
NUEVA_RENCA-TG+TV_GNL_A	47.3	30.4	-16.9
SAN_ISIDRO-TG+TV_GNL_A	48.5	8.1	-40.4
SAN_ISIDRO_2-TG+TV_GNL_A	62.6	60.9	-1.7
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_C	3.5	0	-3.5
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_C	18.9	0	-18.9
LAUTARO_2_BL1	2.5	2.4	-0.1
LAUTARO_2_BL2	0.7	0	-0.7
NEHUENCO_1-TG+TV_GNL_B	16.9	0	-16.9
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_B	4.2	2.2	-2
NEHUENCO_2-TG+TV_GNL_F	8.8	0	-8.8

En cada uno de los programas de la marcha blanca del 14 al 17 de junio, se observa una mayor generación con centrales térmicas, explicada por la menor disponibilidad de recursos hídricos según el SPC, respecto a los programas oficiales, mientras que en los programas de la marcha blanca del 25 y 27 de junio, se observa una menor generación con centrales térmicas, explicada por la mayor disponibilidad de recursos hídricos según el SPC, respecto a los programas oficiales.

8.1.3. Afluentes del programa publicado y del programa marcha blanca.

Se muestran los afluentes promedios de la primera semana, utilizados en el programa publicado y en las simulaciones de la marcha blanca.

Programa del 12 de junio de 2018

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	46.3	22.1	-24.2
HI Pangué-Angostura	201.74	120.0	-81.7
Afluente Colbún	209	115.4	-93.6
Hoya Intermedia Muro Armerillo	61.74	36.2	-25.5
Río Rucúe	12.7	18.7	6.0
H.I. Laja 1	93.2	45.7	-47.5
Afluentes a Laguna Invernada	19.9	17.4	-2.5
Afluente Rapel	135.6	92.9	-42.7
Caudales afluentes a Lago Laja	68.2	46.3	-21.9
Caudales de pasada Antuco s/filt	68	45.3	-22.7
Caudal captación Alto Polcura	3.5	3.9	0.4
Caudal Hoya Intermedia Abanico	5.1	4.5	-0.6
Afluente de la Laguna del Maule	29.3	4.1	-25.2
Caudal Tucapel	136.1	108.6	-27.5
Afluente Ralco	163.2	154.1	-9.1
H.I. Ralco-Pangue	47.3	17.4	-29.9
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	35.5	33.3	-2.2
Claro en San Carlos	16.8	14.8	-2.0

Programa del 13 de junio de 2018

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	39.7	27.3	-12.4
HI Pangué-Angostura	176.5	123.0	-53.5
Afluente Colbún	162.1	99.2	-62.9
Hoya Intermedia Muro Armerillo	39.91	14.5	-25.4
Río Rucúe	12.4	18.0	5.6
H.I. Laja 1	77.5	47.0	-30.5
Afluentes a Laguna Invernada	18.6	17.4	-1.2
Afluente Rapel	217.6	140.7	-76.9
Caudales afluentes a Lago Laja	51.8	44.4	-7.4
Caudales de pasada Antuco s/filt	58.8	41.7	-17.1
Caudal captación Alto Polcura	3.6	4.3	0.7
Caudal Hoya Intermedia Abanico	5.2	5.1	-0.1
Afluente de la Laguna del Maule	24.4	4.0	-20.4
Caudal Tucapel	110.7	79.2	-31.5
Afluente Ralco	153.1	143.1	-10.0
H.I. Ralco-Pangue	44.7	23.1	-21.6
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	34.2	26.1	-8.1
Claro en San Carlos	14.9	13.0	-1.9

Programa del 14 de junio de 2018

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	40.4	44.3	3.9
HI Pangué-Angostura	164.68	119.6	-45.1
Afluente Colbún	140.6	82.0	-58.6
Hoya Intermedia Muro Armerillo	28.16	9.5	-18.7
Río Rucúe	13.3	16.0	2.7
H.I. Laja 1	52.8	50.2	-2.6
Afluentes a Laguna Invernada	17.8	16.7	-1.1
Afluente Rapel	191.2	112.1	-79.1
Caudales afluentes a Lago Laja	52.5	47.6	-4.9
Caudales de pasada Antuco s/filt	55.5	38.9	-16.6
Caudal captación Alto Polcura	3.7	5.6	1.9
Caudal Hoya Intermedia Abanico	5	4.7	-0.3
Afluente de la Laguna del Maule	14.8	4.0	-10.8
Caudal Tucapel	108	74.0	-34.0
Afluente Ralco	151.1	136.5	-14.6
H.I. Ralco-Pangue	41.1	30.3	-10.8
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	33.9	23.1	-10.8
Claro en San Carlos	14.1	11.7	-2.4

Programa del 15 de junio de 2018

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	38.7	61.5	22.8
HI Pangué-Angostura	160.71	115.4	-45.3
Afluente Colbún	132.5	73.6	-58.9
Hoya Intermedia Muro Armerillo	28.37	8.0	-20.3
Río Rucúe	13.9	16.3	2.4
H.I. Laja 1	45.1	50.8	5.7
Afluentes a Laguna Invernada	18	16.4	-1.6
Afluente Rapel	176.8	110.6	-66.2
Caudales afluentes a Lago Laja	53.1	47.4	-5.7
Caudales de pasada Antuco s/filt	54.7	37.7	-17.0
Caudal captación Alto Polcura	3.7	5.5	1.8
Caudal Hoya Intermedia Abanico	5.1	4.8	-0.3
Afluente de la Laguna del Maule	11.9	4.3	-7.6
Caudal Tucapel	107.8	72.1	-35.7
Afluente Ralco	146.5	128.7	-17.8
H.I. Ralco-Pangue	35.1	26.2	-8.9
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	35.3	24.9	-10.4
Claro en San Carlos	13.5	12.3	-1.2

Programa del 26 de junio de 2018

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	97.3	113.2	15.9
HI Pangué-Angostura	86.22	234.6	148.4
Afluente Colbún	111.3	120.0	8.7
Hoya Intermedia Muro Armerillo	15.87	16.9	1.1
Río Rucúe	9.9	25.0	15.1
H.I. Laja 1	16.7	59.8	43.1
Afluentes a Laguna Invernada	17.8	17.3	-0.5
Afluente Rapel	64.8	107.4	42.6
Caudales afluentes a Lago Laja	31.9	67.5	35.6
Caudales de pasada Antuco s/filt	36.4	50.2	13.8
Caudal captación Alto Polcura	3.3	4.8	1.5
Caudal Hoya Intermedia Abanico	4.6	5.9	1.3
Afluente de la Laguna del Maule	4.5	6.5	2.0
Caudal Tucapel	68.3	110.8	42.5
Afluente Ralco	144.5	262.7	118.2
H.I. Ralco-Pangue	22.3	59.8	37.5
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	34.4	27.2	-7.2
Claro en San Carlos	10.7	15.3	4.6

Programa del 27 de junio de 2018

Afluente	Afluente programado m3/s		
	Programa (publicado) sin SPC	Programa con SPC	Diferencia
Afluente Chapo	148.1	77.8	-70.3
HI Pangué-Angostura	81.5	263.6	182.1
Afluente Colbún	90.5	134.8	44.3
Hoya Intermedia Muro Armerillo	14.57	27.2	12.6
Río Rucúe	9.2	28.1	18.9
H.I. Laja 1	11.8	67.0	55.2
Afluentes a Laguna Invernada	17.4	17.4	0.0
Afluente Rapel	68	143.4	75.4
Caudales afluentes a Lago Laja	31.4	59.6	28.2
Caudales de pasada Antuco s/filt	35.2	54.3	19.1
Caudal captación Alto Polcura	3.3	4.7	1.4
Caudal Hoya Intermedia Abanico	4.6	6.3	1.7
Afluente de la Laguna del Maule	9.4	7.1	-2.3
Caudal Tucapel	66.5	127.3	60.8
Afluente Ralco	144.6	263.1	118.5
H.I. Ralco-Pangue	22.5	70.8	48.3
C. I. Laguna del Maule y Boc. Central Pehuenche	30	31.7	1.7
Claro en San Carlos	10.4	16.4	6.0

Los programas oficiales de los días 12 al 15 de junio de la marcha blanca consideran los caudales generados por las lluvias del fin de semana inmediatamente anterior (9 y 10 de junio), mientras que los pronósticos del

SPC basados en pronósticos de precipitaciones, muestran caudales futuros menores a estos, lo que explica las diferencias en las programaciones de cada uno de los días.

Los programas oficiales de los días 26 y 27 de junio de la marcha blanca consideran los caudales generados de la semana anterior, los que no tuvieron grandes crecidas, mientras que los pronósticos del SPC basados en pronósticos de precipitaciones, muestran caudales futuros mayores, producidos por las lluvias de los días 27 y 28 de junio.

8.1.4. Trayectorias de cotas primer día

A continuación, se muestra la trayectoria de cotas para el primer día en cada uno de los programas en Plexos, en el programa publicado y en el programa con SPC.

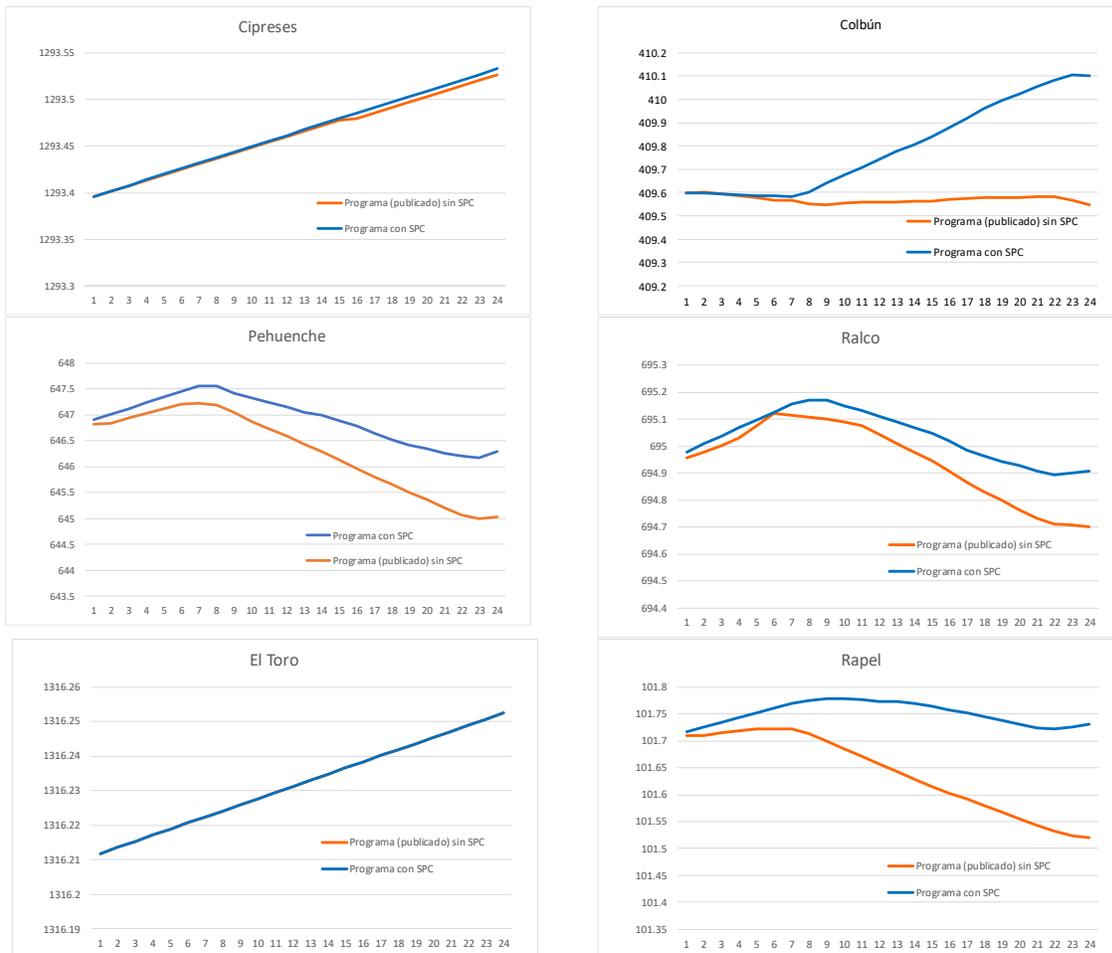
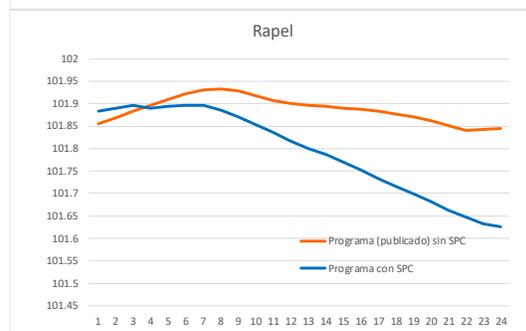
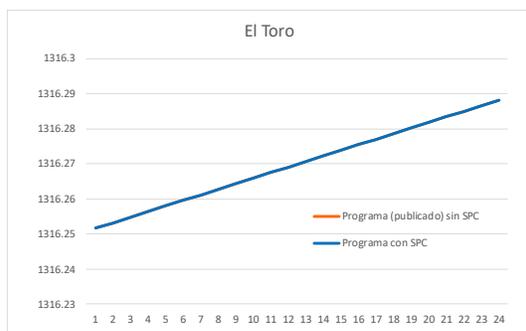
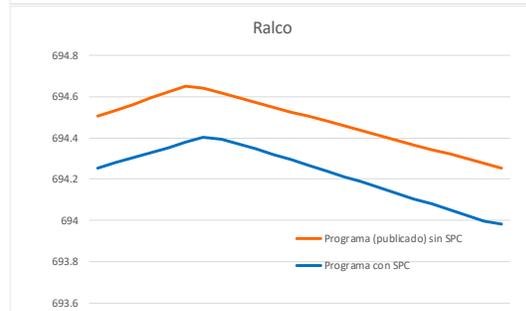
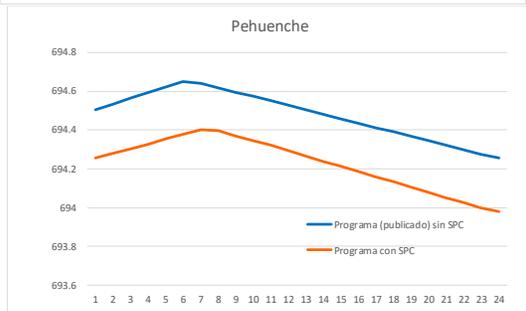
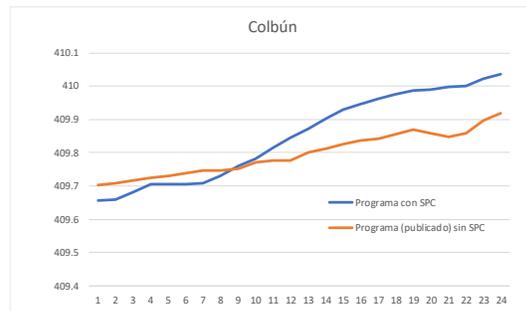
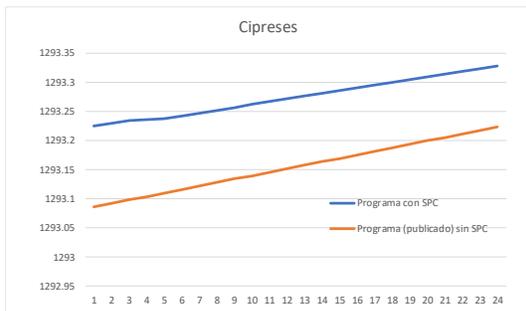




Figura 13: Programa del 12 de junio de 2018



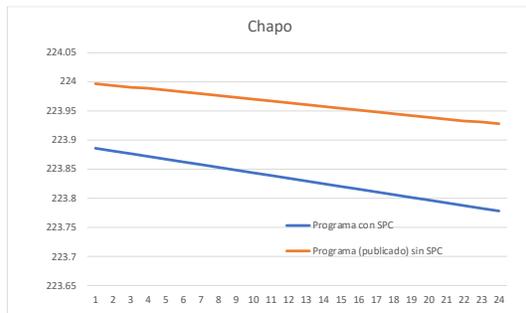


Figura 14: Programa del 13 de junio de 2018

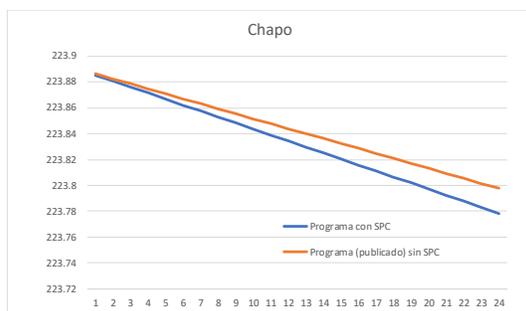
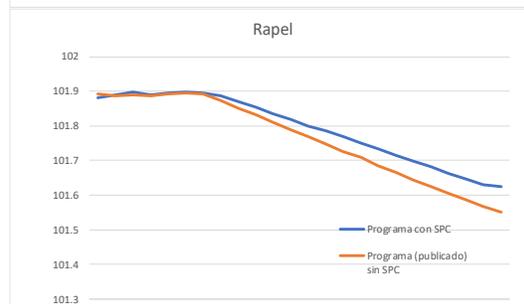
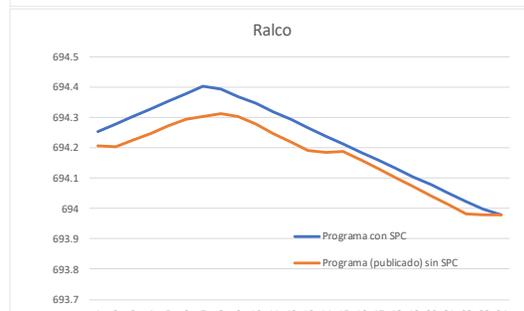
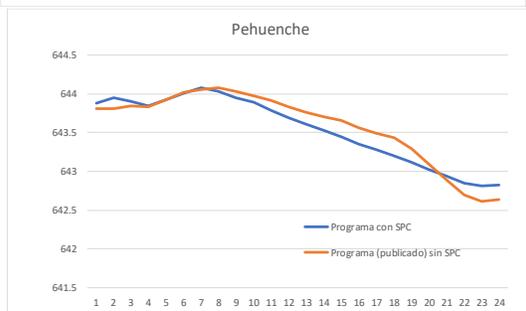
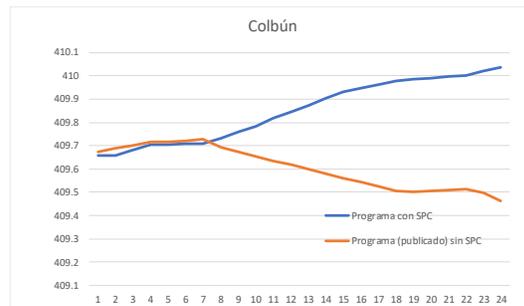
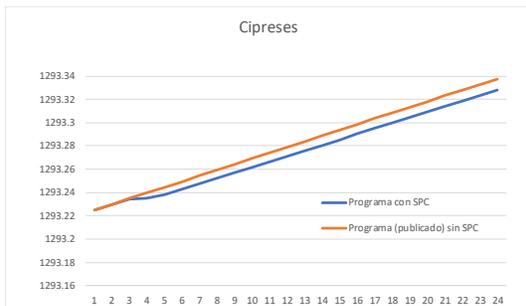


Figura 15: Programa del 14 de junio de 2018



Figura 16: Programa del 15 de junio de 2018

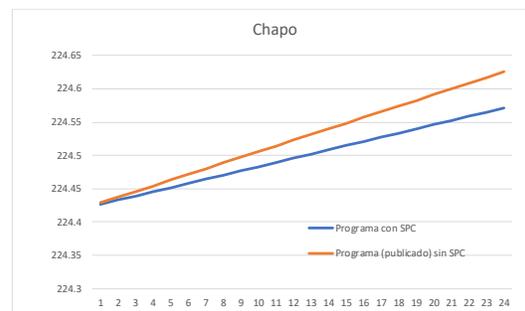
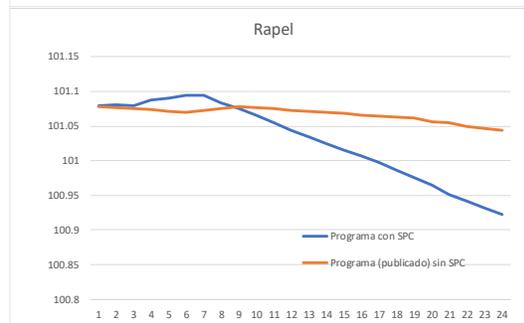
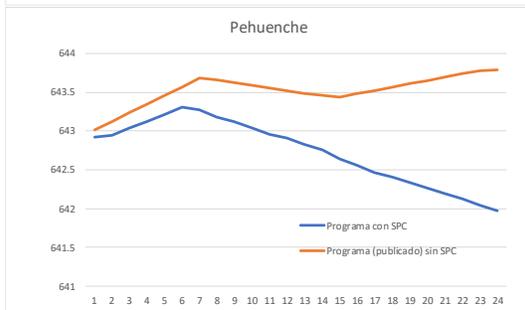
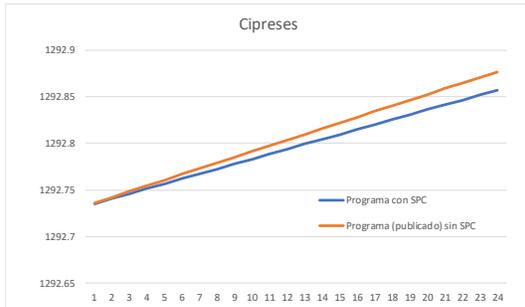


Figura 17: Programa del 26 de junio de 2018

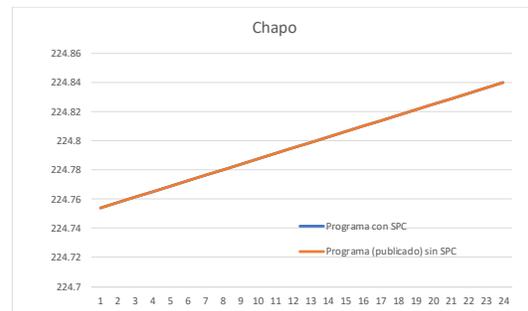
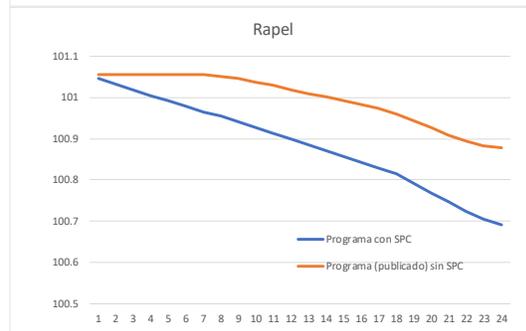
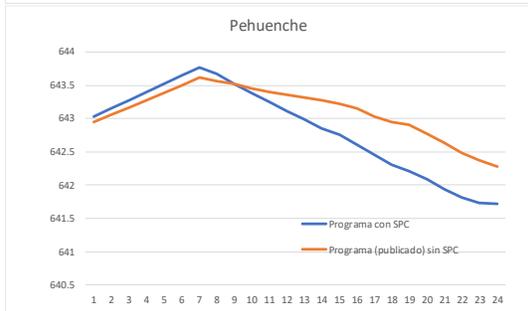
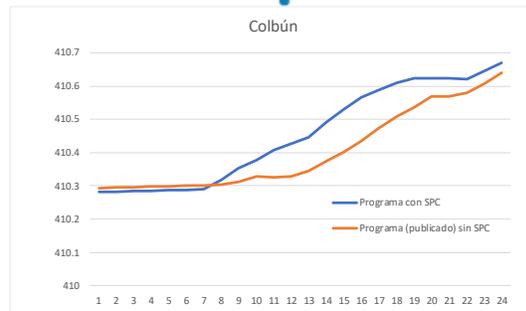
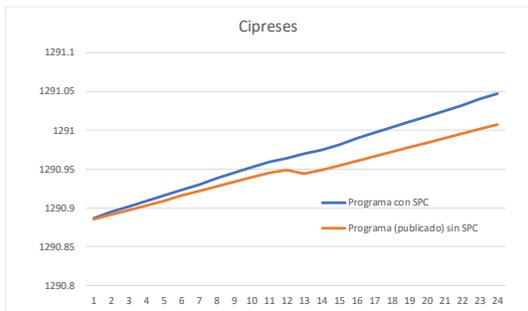


Figura 18: Programa del 27 de junio de 2018