



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE UNA MEGA-SEQUÍA SOBRE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DIANA BERENICE ORELLANA DUARTE

PROFESOR GUÍA:

MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EDUARDO PEREIRA BONVALLET

XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: DIANA ORELLANA DUARTE
FECHA: 12 DE JUNIO DE 2017
PROFESOR GUÍA: MARCELO OLIVARES**

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE UNA MEGA-SEQUÍA SOBRE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN CHILE

Sequías de uno o dos años son eventos normales en el territorio chileno, generalmente gatillados por sucesos naturales como el Fenómeno de la Niña o la Oscilación Decadal. Sin embargo, entre los años 2010 y 2015, se registró una sequía particularmente intensa y prolongada sin precedentes en los registros la que, además, tuvo una extensión territorial sumamente inusual, afectando desde la Región de Coquimbo hasta Los Lagos, debido a todo esto se le denominó ‘megasequía’ y sus efectos fueron considerables en agricultura, pesca, medio ambiente, energía y otros. Se prevé que estos tendrán mayor frecuencia y magnitud.

La considerable disminución de caudales producto de este fenómeno afectó directamente el abastecimiento energético del país, pues las centrales hidroeléctricas componen alrededor del 40% del aporte al sistema eléctrico nacional.

Mediante el análisis de las condiciones climáticas observadas en los últimos años (precipitaciones, aumento en las temperaturas, disponibilidad hídrica, etc.), y considerando que la megasequía tenderá a mantenerse por períodos cada vez más prolongados, se realizó una simulación de los caudales afluentes a cada una de las centrales hidroeléctricas (de embalse y de pasada) asociadas al Sistema Interconectado Central y del Norte Grande (SIC-SING), esto en una ventana de tiempo de 15 años desde el 2018. Para ello se generó una metodología tal, que permitiera que dichas series tuvieran una correlación temporal y espacial apropiada. La metodología combinó y adaptó los procedimientos asociados a cadenas de Markov y al método *Fractional Gaussian Noise*, lo que permitió generar series aleatorias probables, pero en las que se induce un estado más seco que el que se genera al considerar la media histórica como una buena representación de un estado normal para el futuro.

Las series sintéticas se utilizan para modelar el sistema eléctrico en el software Ameba, que tiene inserto en su programación la interconexión SIC-SING desde el año 2018, así como la implementación de nuevas centrales y el crecimiento en la demanda. Las series generadas son de distinta naturaleza, pero todas sequías más intensas que el período 2010-2015, en general, se puede observar que los costos marginales aumentan hacia el final de la etapa evaluada y asimismo disminuye la generación de energía hidroeléctrica. En un escenario normal, en 15 años, el aporte debiese ser del orden del 30%, mientras que en los casos modelados dicho valor alcanza hasta un 17%, esta diferencia se cubre prácticamente en su totalidad por energías convencionales, las que son más costosas y contaminantes.

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Mi paso por la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad de Chile fue un camino largo y de continuo aprendizaje, travesía que hubiese sido difícil realizar, de haberla hecho sola. Nada hubiera sido posible sin las personas que estuvieron conmigo en este camino, su apoyo en los buenos y malos momentos fue crucial para lograr mis metas.

Primero, agradecer a los profesores que me guiaron en la confección de esta memoria, profesora Ximena Vargas, por sus oportunas y constructivas correcciones que aportaron mucho a este trabajo, a Eduardo Pereira, por su gran disponibilidad y paciencia ante mis infinitas preguntas, fuiste realmente clave en este proceso y al profesor Marcelo Olivares por su sabiduría y constante apoyo en este camino, así como por su preocupación más allá de lo académico, no son muchos los docentes que se toman un minuto para conocer y entender a sus alumnos y creo que usted es una gran excepción. Un verdadero placer compartir y aprender de cada uno de ustedes.

Imposible no agradecer a esta Facultad, ya que gracias a ella tuve la oportunidad de conocer a personas maravillosas, amigos entrañables que confío siempre serán parte de mi vida; personas que hicieron de los días de estudio un proceso entretenido, e inolvidable cada momento de diversión que disfrutamos. Gracias a cada uno, por poder contar con su apoyo y por todo lo que aprendí de ustedes. Mención especial a Andrés Torres, Negrito, por el increíble apoyo y a estas alturas ya ser casi parte de la familia; Espe, mi compañera en todas y quien me entiende como nadie y Cata, mi querida amiga, persona maravillosa, siempre con sus oportunos consejos (aunque a veces pedidos tardíamente). Mis agradecimientos a todo el equipo de Difusión, con quienes realmente fue un gusto trabajar, su motivación, sus ganas de hacer cosas y de hacerlas bien, es única. Gracias a Pilar y Mane por ser mucho más que las jefas, por entendernos, apoyarnos y alentarnos. Agradezco también a Jacqueline por las conversaciones mañaneras, por ser una persona increíble y el alma del tercer piso. Gracias a la gente maravillosa que conocí trabajando con Techo Chile, por lo mucho que aprendí de ustedes y cuanto crecí como persona.

Finalmente, agradezco enormemente a toda mi familia, por ser mi pilar fundamental, mi alegría del día a día. Ellos son quienes jamás han dejado de creer en mí, de apoyarme y constituyen esa fuente de energía que me impulsa a continuar buscando nuevos desafíos. Agradezco especialmente a mis padres, Bernardita y Eduardo, por su paciencia y por ser mis mejores guías y a quienes admiro profundamente. A mi hermano Cristóbal, por ser único y darme esa eterna felicidad de tenerlo a mi lado. A mis primas, Araceli y Rocío, más hermanas que primas, que son capaces de sacarme una sonrisa hasta en el peor día. A mi tía Sandra, a quien admiro inmensamente y a mis abuelos, mi continua inspiración, por su ternura, por sus cuidados, por estar siempre presente, sin importar nada, esto es por y para ustedes.

Infinitas gracias a todos por creer en mi convicción de lanzarme hacia el logro de mis sueños y atreverme a dar el salto que me ha conducido hasta aquí. Gracias, simplemente gracias.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos	3
1.2.1.	Objetivo General	3
1.2.2.	Objetivos Específicos	3
1.3.	Metodología General	3
1.4.	Organización del Documento	5
CAPÍTULO 2	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	6
2.1.	El Cambio Climático y la Megasequía 2010-2015 en Chile	7
2.2.	Generación de Series Sintéticas	10
2.2.1.	Cadenas de Markov	10
2.2.2.	Fractional Gaussian Noise	11
2.3.	Sistema Eléctrico en Chile	14
2.3.1.	Modelo de Coordinación Hidrotérmica	16
CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA	19
3.1.	Análisis del Registro Histórico	20
3.2.	Generación de Serie Sintética	24
3.3.	Modelo Hidroeléctrico	25
CAPÍTULO 4	RESULTADOS	26
4.1.	Análisis de Series Históricas	27
4.2.	Validación del Modelo	36
4.3.	Series Sintéticas	37
4.4.	Modelo Hidroeléctrico	42

4.5. Resultados de Simulaciones de la Operación	45
4.6. Análisis de Resultados	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS Y APÉNDICES	A

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Categorías de Sequías según SPI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993)	10
Tabla 2-2. Resumen Generación últimos 6 años [GWh/año]. Fuente: (Comisión Nacional de energía, 2017)	15
Tabla 2-3. Comparación aporte hidroeléctrico en los sistemas SIC y SING. Fuente: (Comisión Nacional de energía, 2017)	16
Tabla 4-1. Estadística Serie Histórica de volúmenes anuales agregados. Período 1961 - 2014	27
Tabla 4-2. Resumen Análisis Caudales por cuenca.....	32
Tabla 4-3. Factores de relación Media Histórica-Media Futura.....	33
Tabla 4-4. Estaciones Asignadas a cada Categoría	33
Tabla 4-5. Estaciones Asignadas para cada Distribución.....	34
Tabla 4-6. Simbología Tablas de probabilidades.	34
Tabla 4-7. Probabilidades de Transición y de estado para las Cuencas entre Río Huasco y Mataquito.....	35
Tabla 4-8. Probabilidades de Transición y de estado para cuencas desde el Maule a Chiloé	35
Tabla 4-9. Características de Simulación	42
Tabla 4-10. Proyección Generación al año 2032.....	45
Tabla 4-11. Resumen de Resultados para casos determinísticos	54
Tabla 4-12. Resumen de resultados para casos estocásticos	56
Tabla 4-13. Comparación Costos totales para caso determinístico y estocástico	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1-1. Temperaturas globales promedio en la superficie. Las diferencias son relativas al promedio 1961-1990. La curva negra representa promedio decadales, los círculos son los valores anuales, mientras que la zona sombreada es el intervalo de confianza, que muestra la varianza de los datos. Fuente: Pachauri & Reisinger (2007)	2
Figura 1-2. Esquema General del Procedimiento planteado para analizar los Efectos de una megasequía sobre el Sistema Hidroeléctrico.	4
Figura 2-1. Período de recurrencia en años (escala a la izquierda). Los círculos rojos indican el promedio y las líneas verticales la desviación estándar entre modelos. Las barras celestes indican el promedio multimodelo de la precipitación relativa a la media 1970-2000 (escala a la derecha). Datos de Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5-WCRP) Fuente: CR2 (2015)	8
Figura 2-2. Mapas de cambio porcentual de precipitación para el periodo 2011-2030 con respecto al periodo 1961-1990. (a) Promedio de las simulaciones CMIP5-RCP2.6 (b) promedio de las simulaciones CMIP5-RCP8.5 (c) promedio de las simulaciones CMIP3-SRES A1B (d) simulación regional PRECIS-ECHAM. La leyenda de colores indica blanco para variación nula, tonos verdes al aumentar hasta 50% y cafés para disminuciones de hasta 50%. (Rojas, 2012)	9
Figura 2-3. Matriz representativa de caudales históricos	11
Figura 2-4. a) Proceso de Conversión de la Matriz Z en Z' . b) Proceso de acoplamiento de matrices ZS y ZS' en ZSC . Fuente: (Kirsch, et al., 2013).....	13
Figura 2-5. Distribución Tipos de Energía en Producción Bruta del SIC por años. Fuente: (Coordinador Eléctrico Nacional, 2015).	15
Figura 2-6. Problema de Coordinación Hidrotérmica	16
Figura 3-1. Series de los caudales históricos para la semana 11 en Central Auxiliar del Maipo.....	20
Figura 3-2. Análisis de Frecuencia de la semana 11, Estación Auxiliar Del Maipo. Los registros se muestran en azul, mientras que la línea verde presenta la aproximación por distribución normal.....	21
Figura 3-3. Diagrama de Proceso para Análisis de Series Históricas y Generación de Series Sintéticas.....	23
Figura 3-4. Diagrama explicativo para Selección de años. Las barras representan las probabilidades por estado, la línea es la probabilidad acumulada.....	24
Figura 4-1. Series Históricas	27

Figura 4-2. Categorización de tipos de año. La línea azul muestra los volúmenes totales anuales afluentes ordenados de menor a mayor, mientras que los puntos en naranja, los valores del SSI en eje secundario. Se indican en rojo los valores de transición seco-normal y normal-húmedo.	31
Figura 4-3. Muestreo de r^2 en eje a la derecha y Error porcentual de medias en eje a la izquierda.	36
Figura 4-4. Volúmenes totales afluentes, promedio semanal.....	37
Figura 4-5. Simulaciones de Afluentes promedios semanales al Laja	37
Figura 4-6. Ejemplo de Serie sintética para Estación Laja.....	38
Figura 4-7. Volúmenes anuales totales, en serie sintéticas sintética.	39
Figura 4-8. Volúmenes anuales totales, en serie sintéticas sintética	40
Figura 4-9. Volúmenes anuales totales, en serie que modela caudales secos, seguido por un caudal húmedo.....	40
Figura 4-10. Volúmenes anuales totales, en la serie que modela sequía al inicio.....	41
Figura 4-11. Volúmenes anuales totales, en serie que modela sequía al final	41
Figura 4-12. Estaciones modeladas en Ameba.....	43
Figura 4-13. Volúmenes anuales totales del período 1961-1975	44
Figura 4-14. Volúmenes anuales totales período 2000-2015	44
Figura 4-15. Resumen de volúmenes de los casos determinísticos, en conjunto se utilizan en modelación estocástica.	45
Figura 4-16. Generación y Costos Marginales para serie que replica período 1961-1975	46
Figura 4-17. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que replica años entre 1961 y 1975.....	46
Figura 4-18. Generación y costos marginales para serie que replica los años entre 2000 y 2015	47
Figura 4-19. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que replica años entre 2000 y 2015.....	47
Figura 4-20. Generación y Costos Marginales para caso sintético que modela una serie seca de alta variabilidad.....	48

Figura 4-21. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie sintética que presenta una sequía moderada de alta variabilidad.....	48
Figura 4-22. Generación y costo marginal para serie sintética de sequía aguda y baja variabilidad	49
Figura 4-23. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie sintética aguda de baja variabilidad.	49
Figura 4-24. Generación y Costos Marginales para serie sintética que finaliza con un caudal más húmedo.....	50
Figura 4-25. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie sintética que finaliza con un año húmedo.	50
Figura 4-26. Generación y Costos Marginales para serie que comienza con años de megasequía y luego se recupera levemente.....	51
Figura 4-27. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que comienza con una megasequía y luego se recupera.	51
Figura 4-28. Generación y Costos Marginales asociados al caso que finaliza con una megasequía	52
Figura 4-29. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que finaliza con megasequía.....	52
Figura 4-30. Generación Hidroeléctrica en GWh/año para las siete series analizadas como casos determinísticos.....	53
Figura 4-31. Costos Marginales en USD/MWh para las siete series analizadas como casos determinísticos.....	53
Figura 4-32. Volumen embalsado al final de cada año	54
Figura 4-33. Generación hidroeléctrica por caso en análisis probabilístico.....	55
Figura 4-34. Costos marginales por caso en análisis probabilístico.....	55
Figura 4-35. Volúmenes embalsados a fines de cada año por caso analizado de manera probabilística	56

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Existen diversas maneras de definir un evento natural y extremo como las sequías. Se puede entender cómo “(...) una deficiencia sostenida y extendida en las precipitaciones” (WMO, 1986) o ampliar el concepto un poco más, indicando que “son un fenómeno natural que ocurre cuando las precipitaciones han sido significativamente menores a los niveles normales registrados, causando desbalances hidrológicos serios que afectan los sistemas de producción de recursos de la tierra” (UN Secretariat General, 1994).

Una gran cantidad de estudios se han realizado respecto a las sequías y sus consecuencias sobre las personas y el medio ambiente. Por ejemplo, Harou et al. (2010) estudió las consecuencias económicas de una sequía prolongada en California, García et al. (2011) estudió el cambio climático y los efectos técnicos en el Sistema Interconectado Central de Chile, en otra área, Jactel et al. (2012) estudia efectos de sequías sobre insectos y patógenos y sus consecuencias en los ecosistemas forestales, mientras que Van Loon et al. (2016) actualiza el concepto de sequía para clarificar las escalas de tiempo y la multicausalidad que hoy se asocian a ella. Así, son muchos los enfoques que se podrían considerar, pero, en general, se distinguen cuatro categorías para clasificar el fenómeno (Wilhite & Glantz, 1985):

- Sequía Meteorológica, define la falta de precipitaciones sobre una región por un período de tiempo (...) lo que implica una disminución respecto al promedio. Algunos otros análisis estudian también la duración e intensidad.
- Sequía Hidrológica, hace referencia a un período en que las aguas superficiales y sub-superficiales no son suficientes para los usos definidos para el recurso.
- Sequía Agrícola, se refiere usualmente a un período con baja humedad de suelo lo que conlleva pérdidas de cultivos (...), esto depende de variados factores, como la evapotranspiración, demanda de agua de las plantas, temperatura, entre otros.

- Sequía Socio-económica, ocurre cuando los sistemas de gestión de recursos hídricos no logran satisfacer la demanda de estos, lo que conlleva problemas sociales.

Dichos eventos se han hecho más frecuentes en los últimos años y abarcan más territorios del planeta Tierra, lo que se ha atribuido principalmente al fenómeno del Calentamiento Global, hoy un hecho inequívoco y evidente. Distintos registros muestran el incremento en las temperaturas globales del aire y el océano, además de un fuerte derretimiento de los hielos que han aumentado el nivel del mar (Pachauri & Reisinger, 2007). La Figura 1-1 muestra como referencia la variación de temperaturas globales desde 1850.

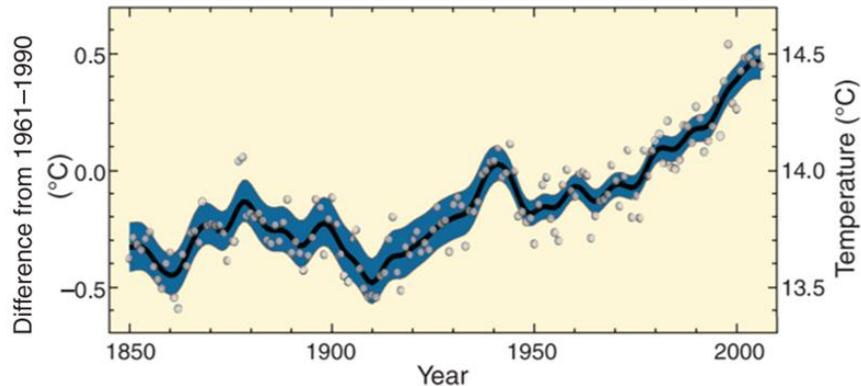


Figura 1-1. Temperaturas globales promedio en la superficie. Las diferencias son relativas al promedio 1961-1990. La curva negra representa promedio decadales, los círculos son los valores anuales, mientras que la zona sombreada es el intervalo de confianza, que muestra la varianza de los datos. Fuente: Pachauri & Reisinger (2007)

Desde el 2010 la zona centro-sur de Chile ha experimentado la sequía más larga y extensa territorialmente que se haya registrado. Ésta alcanzó niveles no observados en los últimos 100 años y afectó los recursos costeros, pesqueros, eléctricos, agrícolas, entre muchos otros. Se prevé que condiciones extremas como éstas se repetirán e intensificarán ((CR)2, 2015). Es necesario analizar en detalle y desde distintos ángulos los efectos y las posibles soluciones que se dispondrán para mitigarlas. Este trabajo se centrará en el análisis de los efectos sobre el sistema hidroeléctrico.

Por otra parte, la producción de energía en Chile depende en forma significativa de la disponibilidad de agua, de hecho, el Sistema Interconectado Central (SIC) de Chile, que alimenta a un 92.2% de la población nacional (Coordinador Eléctrico Nacional, 2015), en 2015 obtenía, según las estadísticas, hasta un 45% de la generación desde centrales de embalse o pasada (Comisión Nacional de energía, 2017), por lo que las sequías y su consecuente disminución de caudales afecta directamente el abastecimiento energético chileno. Intentar entender estos escenarios ayudará a preparar el país con nuevas tecnologías e instalaciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

A la luz de la megasequía ocurrida entre los años 2010 y 2015 en el territorio chileno, se busca analizar el impacto de futuras posibles megasequías sobre la generación hidroeléctrica en los Sistemas Interconectado Central (SIC) y del Norte Grande (SING) y, en consecuencia, el abastecimiento energético del país.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Obtener parámetros que definan la megasequía ocurrida entre 2010 y 2015 en el territorio chileno, específicamente entre las regiones IV de Coquimbo y X de los Lagos.
- Establecer una metodología para simular caudales de afluentes a centrales asociadas a SIC y SING que sean representativos de la hidrología chilena ante un evento extremo como lo es la megasequía.
- Plantear Escenarios Hidrológicos de sequía y analizar sus efectos sobre el sistema eléctrico chileno.

1.3. Metodología General

En la presente memoria se analizan los posibles efectos de una megasequía en las zonas de cobertura del SING y SIC (entre las regiones XV de Arica y Parinacota por el norte y X de los Lagos por el sur), y cómo ésta afecta al sistema eléctrico del país. Para ello se plantean básicamente tres pasos:

- Análisis de los registros históricos de caudales
- Procedimiento de generación de series sintéticas secas a partir de dicho análisis.
- Simulación en un modelo de despacho hidroeléctrico.

Estos procesos se interrelacionan según se observa en la Figura 1-2.

Los datos a utilizar son caudales afluentes a las centrales hidroeléctricas, pertenecientes tanto al Sistema Interconectado Central (SIC) como al del Norte Grande (SING), ellos se obtienen del Coordinador Eléctrico Nacional (2015) y de la base de datos de un software de despacho eléctrico, denominado Ameba.

La información histórica se analiza, tomando en cuenta la variación estadística de los caudales, las distribuciones que se pueden asociar a cada serie que evalúa una misma semana en distintos años, y la categorización de las sequías según el Standard Streamflow Index (SSI).

A partir del análisis se busca generar series que conserven las características propias de la hidrología chilena para cada región, y que a su vez se fueren hacia una sequía similar a la ocurrida en 2010-2015. Para ello se utilizan cadenas de Markov en resolución de tiempo anual, con las cuales se evalúan tres estados: seco, normal y húmedo, y se obtienen las probabilidades de transición entre ellos, las que se evalúan en distintas ventanas de tiempo, 1961-2015, 1961-1987, 1987-2015. Se escoge esta última para la generación de series sintéticas por su mayor relación con la megasequía en estudio.

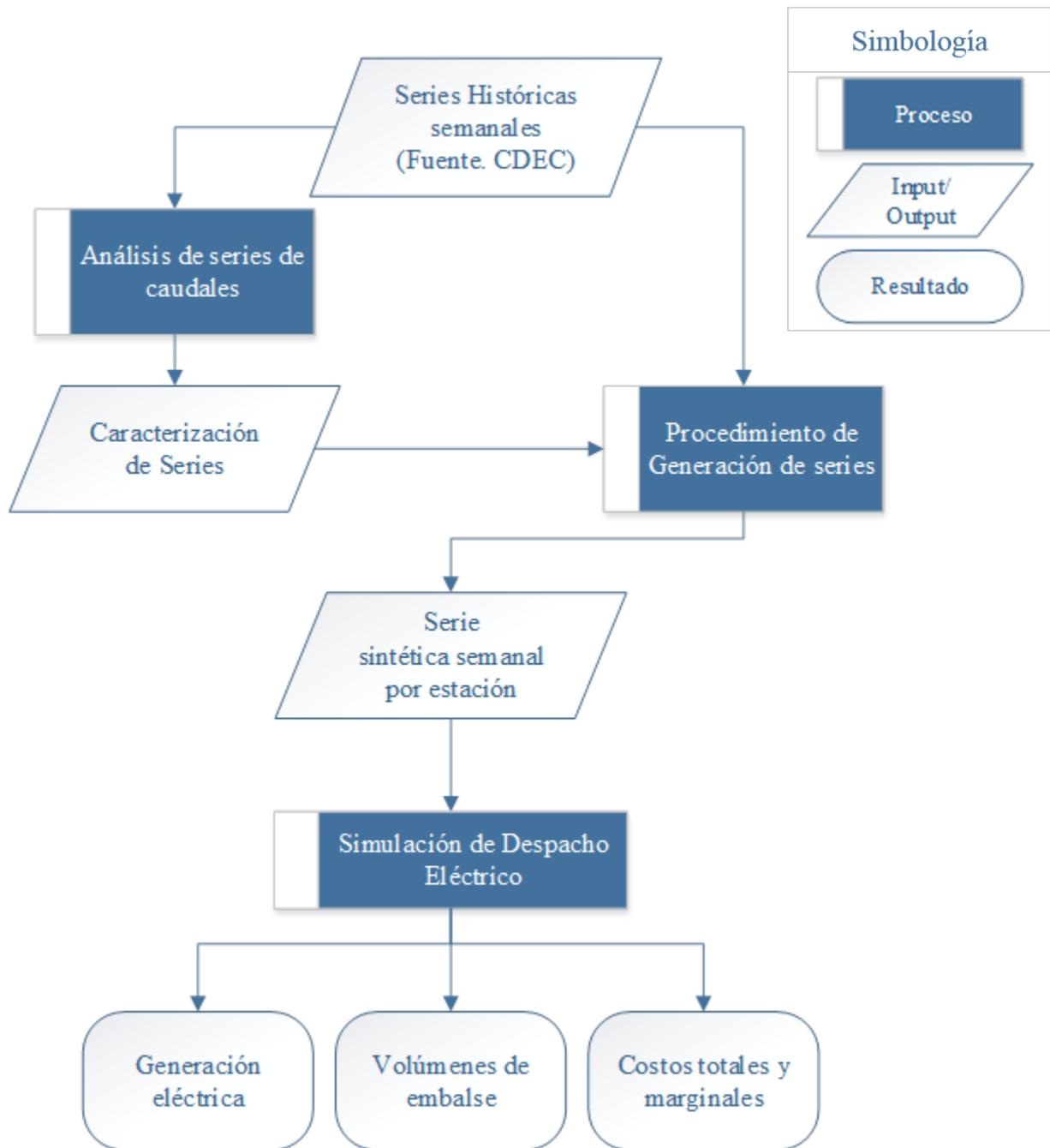


Figura 1-2. Esquema General del Procedimiento planteado para analizar los Efectos de una megasequía sobre el Sistema Hidroeléctrico.

Tomando las transiciones definidas, y mediante modified *Fractional Gaussian Noise* (Kirsch, et al., 2013), se generan series semanales que logran preservar correlaciones temporales y territoriales según se muestra más adelante.

La simulación de despacho eléctrico se realiza en un modelo existente del software computacional Ameba, en el cual se analizan casos de manera determinística y estocástica.

1.4. Organización del Documento

El documento se estructura en 5 Capítulos, más la sección de Anexos.

El capítulo 2 muestra una revisión de los principales conceptos analizados en esta memoria, separados según el tema al que pertenecen: cambio climático, generación de series sintéticas y sistema eléctrico. En esta parte se muestran los detalles de la megasecuía observada entre los años 2010 y 2015 y se introducen los métodos en que se basa el planteamiento propuesto por esta memoria.

El capítulo 3 describe la metodología empleada, incluyendo sus principales supuestos.

El capítulo 4 entrega los resultados para cada componente de la metodología propuesta: la variación hidrológica en sequía, las series sintéticas y la modelación eléctrica.

Por último, se presentan las conclusiones y análisis en el capítulo 5, donde además se establecen algunas propuestas de mejoras para el modelo y posibles déficits energéticos.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

El presente capítulo muestra algunos antecedentes, en los que se basa la metodología y los supuestos de este estudio. En primera instancia, se dan algunas generalidades acerca del problema del Cambio Climático y se detalla información referente a la Megasequía 2010-2015, fenómeno base de esta memoria que se debe conocer con claridad para replicar sus características en las series creadas.

También se detallan algunos indicadores útiles para una medición cuantitativa de las sequías, lo que permite el análisis y clasificación de las series históricas en años secos, normales o húmedos, evitando las definiciones poco claras.

Para generar series sintéticas o escenarios de cambio climático existen diversos métodos. Primero se describen las cadenas de Markov y su utilidad en este estudio y menciona de manera detallada el análisis *Fractional Gaussian Noise*, utilizado en la metodología más adelante.

La última parte del proceso es la simulación del modelo eléctrico, por ello, se introducirán los conceptos básicos de lo que implica la Coordinación hidrotérmica, además de antecedentes de los sistemas energéticos en Chile y los datos de generación registrados en los últimos años. Se incluye también una presentación del software Ameba, en el cual se modelaron los escenarios en cuestión.

2.1. El Cambio Climático y la Megasequía 2010-2015 en Chile

Por un tiempo se consideró que el aumento de períodos secos podía estar asociado a procesos naturales del ecosistema. Actualmente, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que el efecto de la actividad humana desde mediados del siglo XIX ha sido el principal causante en el aumento de la temperatura (Pachauri & Reisenger, 2007).

Para mediados del siglo en Latinoamérica se proyectan (Pachauri & Reisenger, 2007):

- Aumentos en la temperatura y la consecuente disminución en la humedad del suelo, que conllevará a un gradual reemplazo de los bosques tropicales por sabana en la zona este del Amazonas.
- Vegetaciones semiáridas serán reemplazadas por vegetaciones áridas.
- Posible pérdida en la biodiversidad y extinción de especies en muchas áreas tropicales.
- Reducción en la productividad de importantes cultivos, así como en el negocio del ganado.
- Aumento en el número de personas en hambruna.
- Cambios en los patrones de precipitación y desaparición de glaciares, afectando la disponibilidad de agua para el consumo humano, agricultura y generación de energía.

En Chile se han vivido diversos episodios de sequías a lo largo de su historia, sin embargo, éstas se han intensificado en los últimos años ((CR)2, 2015). El estudio del Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) da cuenta del dramático descenso en los caudales naturales de los ríos de Chile y como esto afecta, no sólo a la generación hidroeléctrica, sino que también a la disponibilidad del recurso para consumo humano, riego y sus efectos en la pérdida de nutrientes en el sector costero.

Las precipitaciones entre Coquimbo y la Araucanía han disminuido casi un 30%, afectando considerablemente las reservas de agua. Estos años han sido además la época más cálida del último siglo, aumentando la evaporación desde lagos, embalses y zonas agrícolas, en consecuencia, los ríos entre Coquimbo y Valparaíso alcanzaron un déficit de un 70%, y hacia el sur se llegó a valores cercanos al 25%. Por esto se ha denominado este período: Megasequía ((CR)2, 2015).

Condiciones como las actuales han ocurrido en el Norte Chico alrededor de una vez cada 15 años, mientras que en la mayoría de las estaciones de la zona centro-sur, no se tienen precedentes en los últimos 70 años. De manera similar, el período de retorno del año más seco en este período varía entre 10 años en el Norte Chico y más de 30 años en la zona centro y sur ((CR)2, 2015).

Las proyecciones climáticas indican de manera consistente que, en un horizonte de algunas décadas, la condición media será similar a la experimentada entre 2010 y 2015, acentuando y extendiendo hacia el sur el desbalance entre oferta y demanda de agua dulce ((CR)2, 2015). En la Figura 2-1 se puede observar el aumento progresivo de sequías predicho con distintos modelos de cambio climático, la imagen muestra la variación en la recurrencia de una sequía de tres o más años de duración con déficit mayor a 30%, en Chile central. Se espera que cada vez transcurran menos años para tener una nueva sequía, hasta que probablemente las medias sean similares a un año seco.

Las estimaciones se realizaron empleando siete modelos climáticos que simulan climas pasados, presentes y futuros. El período de recurrencia indicado se calculó para cada modelo.

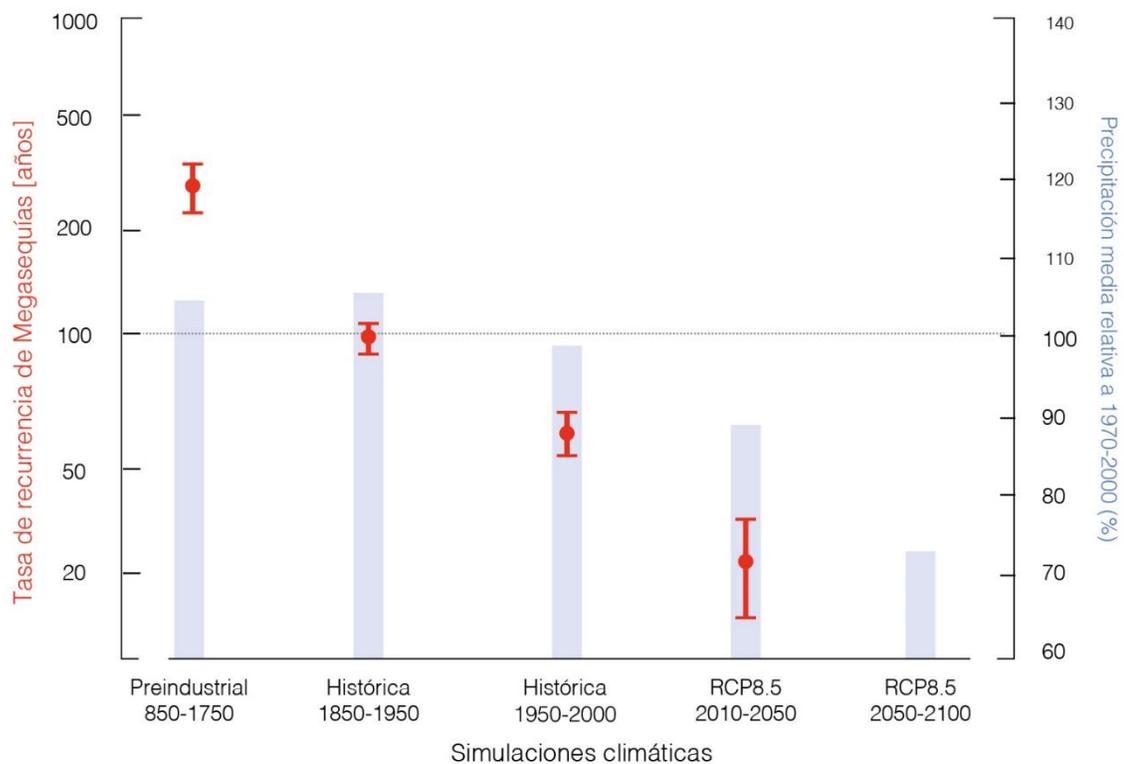


Figura 2-1. Período de recurrencia en años (escala a la izquierda). Los círculos rojos indican el promedio y las líneas verticales la desviación estándar entre modelos. Las barras celestes indican el promedio multimodelo de la precipitación relativa a la media 1970-2000 (escala a la derecha). Datos de Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5-WCRP) Fuente: CR2 (2015)

La Figura 2-2 muestra los efectos del cambio climático sobre el territorio para el periodo 2011-2030, se puede notar que varía dependiendo del modelo utilizado. El conjunto de simulaciones de los tres primeros escenarios muestra disminuciones de entre 5 y 15% entre las latitudes 27° y 45°S aproximadamente, es decir entre la tercera y décima región. Mientras que el modelo PRECIS-ECHAM, simula una disminución en la zona altiplánica (región 1), y un aumento entre las regiones segunda y cuarta, el cual está acotado a las zonas cordilleranas. Se debe notar que este último modelo tiene un importante problema de sobreestimación del ciclo anual (Rojas, 2012), aun así, en las regiones 4 y 5, el modelo simula una disminución, como lo simulan todos los modelos CMIP5. En general desde aproximadamente los 40°S al sur no se ven cambios importantes (menores al 5%).

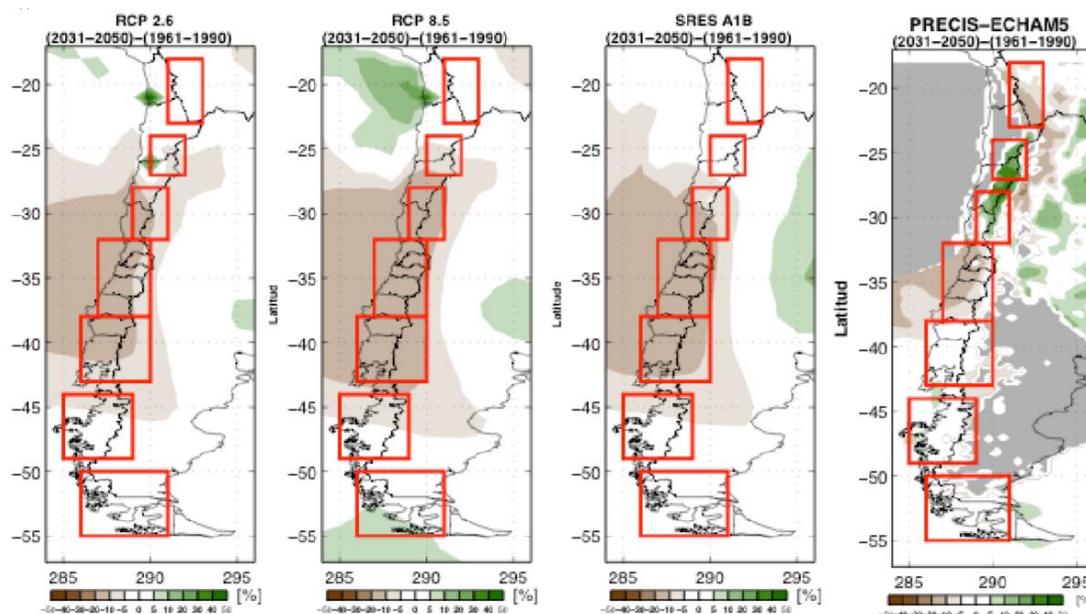


Figura 2-2. Mapas de cambio porcentual de precipitación para el periodo 2011-2030 con respecto al periodo 1961-1990. (a) Promedio de las simulaciones CMIP5-RCP2.6 (b) promedio de las simulaciones CMIP5-RCP8.5 (c) promedio de las simulaciones CMIP3-SRES A1B (d) simulación regional PRECIS-ECHAM. La leyenda de colores indica blanco para variación nula, tonos verdes al aumentar hasta 50% y cafés para disminuciones de hasta 50%. (Rojas, 2012)

Existen diversos índices para clasificar de manera cuantitativa una sequía. Ellos pueden incluir parámetros como intensidad, duración, severidad y extensión espacial. Para cuantificarla se utilizan distintas ventanas de tiempo según el parámetro de interés, se recomienda disponer de series lo suficientemente largas para obtener resultados apropiados (Mishra & Singh, 2010). “Una escala anual no es la mejor, pero es útil para extraer información del comportamiento regional, mientras que escalas mensuales son apropiadas para el monitoreo de efectos relativos a agricultura” (Panu & Sharma, 2002)

Uno de los índices más utilizados es el Standardized Precipitation Index (SPI), el cual es una relación entre precipitaciones y su media para un período de tiempo determinado. El método de cálculo consiste en: (McKee, et al., 1993).

- Separar la muestra en períodos de m meses (o n años). Se deben considerar al menos 30 años de información.
- Seleccionar la escala de tiempo de evaluación (típicamente 3, 6, 12, 24 o 48 meses).
- La serie se ajusta a una distribución de probabilidades dada (por ej. Función Gamma).
- Se calcula la probabilidad de excedencia de cada dato.
- Se calcula el valor de la probabilidad asociado a una muestra de distribución normal.
- Se calcula la desviación de la muestra respecto a una distribución de probabilidades normal con media cero y desviación estándar unitaria. Este valor es SPI.

McKee (1993) indica además que es posible establecer variantes del SPI, según la naturaleza de la serie evaluada, por ejemplo, cualquiera de las cinco fuentes de agua útiles siguientes:

- Nivel de nieve (Standardized Snowmelt and Rain Index, SMRI);
- Reservas de aguas (Standardized Reservoir Supply Index, SRSI);
- Caudales (Standard Runoff Index, SRI) -Algunos autores lo denominan Standard Streamflow Index (SSI), el presente trabajo utiliza esta sigla, basándose en las fuentes utilizadas, pero no se debe confundir con el índice para humedad-;
- Humedad del suelo (Standard Soil Moisture Index, SSMI); y,
- Nivel de Aguas subterráneas (Standard Groundwater Index, SGI).

El valor del índice obtenido permite clasificar el período de tiempo en estados discretos según la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Categorías de Sequías según SPI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993)

SPI	Categoría	Clasificación en Tres Estados
> 2	Extremadamente Húmedo	
1.5 a 1.99	Muy Húmedo	Húmedo
1 a 1.49	Moderadamente Húmedo	
-0.99 a 0.99	Normal	Normal
-1 a -1.49	Moderadamente Seco	
-1.5 a -1.99	Muy Seco	Seco
< -2	Extremadamente Seco	

2.2. Generación de Series Sintéticas

En base al análisis de series históricas de precipitaciones, caudales o alguna otra variable de estado, es posible establecer parámetros hidrológicos característicos de ciertas zonas geográficas y con ellas simular series que logren representar escenarios futuros. En este trabajo se intentan simular series que representen estados de sequía (similares a la megasequía 2010-2015).

2.2.1. Cadenas de Markov

Para forzar una serie a comportarse de alguna manera particular, se debe tener en cuenta como cambiarán las medias y desviaciones estándar respecto a la serie histórica y cuál es la probabilidad de que esos cambios ocurran. Para ello, la presente memoria, utilizará el concepto de Cadenas de Markov, que permite definir la transición de un año a otro basado en probabilidades de ocurrencia de cierto estado (por ej. Probabilidad de un año seco).

Las cadenas de Markov son una clase común de modelos estocásticos para representar una serie de tiempo de variables discretas. Es posible definir cadenas de diferentes ordenes dependiendo de la memoria que se le asocie a la serie. El caso de primer orden es de los modelo más simples y comunes donde se considera que las probabilidades de transición del siguiente estado dependen

sólo del estado presente, a esto se le denomina propiedad Markoviana (Tabari, et al., 2015). Tabari et al (2015) probó que éstas series son adecuadas para reproducir la estructura de algún índice de sequía fluviométrica (Rezaeianzadeh & Stein, 2016). Lowry y Guthrie (1968) aplicaron cadenas de Markov de distintos órdenes a períodos húmedos y secos y concluyeron que los modelos de primer orden son suficiente, aunque ordenes mayores otorgan mayor precisión en ciertas zonas geográficas.

2.2.2. Fractional Gaussian Noise

Variadas técnicas se han desarrollado a través de los años para generar series sintéticas de distintas variables hidrológicas. Una línea se basa en the Bootstrap Method, modelos que desarrollan principalmente un muestreo aleatorio de la serie histórica con ciertas interferencias en la distribución de probabilidades, este método y sus distintas variaciones son útiles, pero poseen una baja correlación entre datos, característica sumamente importante en hidrología (Efron, 1979).

Otra línea ampliamente desarrollada es la de modelos auto regresivos (AR), más completos y complejos, con alta autocorrelación, pero estacionalidad intra-anual por lo que la precisión es baja para cambios estacionales, según alguna fuente (Noakes, 1985).

Un tercer método es el *Fractional Gaussian Noise* (FGN) y sus variantes, una técnica que produce series de tiempo de caudales estocásticos auto correlacionadas y con buena precisión en la estructura de correlación estacional, se basa en los *Fractional Brownian Motions* y ha demostrado en particular un buen comportamiento en eventos extremos de sequía e inundaciones (Mandelbrot & Wallis, 1968).

Dado que esta memoria se enfoca en eventos bastante extremos, como la megasequía, se trabaja con el modelo FGN, pues además posee un procedimiento relativamente sencillo de trabajar y modificar de manera de adecuarlo a la hidrología requerida y ajustar la correlación espacial, esto último es primordial en la geografía chilena, donde la variabilidad complica la extrapolación de datos de una región a otra.

La teoría del *Fractional Gaussian Noise* (FGN) se describe en sucesivos estudios a lo largo de los años. Se presenta a continuación el método general para simular N_S años de caudales sintéticos de acuerdo Kirsch, et al. (2013)

1. Para cada estación X , se dispone de N_H años de información histórica a partir de los cuales se desean simular N_S años sintéticos, de resolución temporal T (por ej. semanal, mensual, bianual, etc.). En esta memoria, la resolución de los datos es de 4 veces por mes, por lo que se tienen 48 datos anuales (en adelante datos semanales se refiere a esta resolución temporal)
2. Para cada estación, se reordenan los datos en una variable matricial $Q_H \in \mathbb{R}^{N_H \times T}$, donde cada columna (j) representa una semana y cada fila (i) el año al que corresponde.

$$Q_H = \begin{matrix} & \xrightarrow{\text{semanas}} & \\ \begin{matrix} \boxed{} & \cdots & \boxed{} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boxed{} & \cdots & \boxed{} \end{matrix} & \downarrow \text{años} & \end{matrix}$$

Figura 2-3. Matriz representativa de caudales históricos

De esta manera $i = [1961, 2015]$ y $j = [1, 48]$

3. El método toma como supuesto que la representación histórica de una semana, es una serie que distribuye log-normal, es decir para columna de la matriz mostrada en la Figura 2-3 se tiene dicha distribución. Cada una debe ser normalizada, con (2-1) y (2-2)

$$Y_H(i, j) = \ln Q_H(i, j) \quad (2-1)$$

$$Z_H(i, j) = \frac{Y_H(i, j) - \hat{\mu}_j}{\hat{\sigma}_j} \quad (2-2)$$

Donde $\hat{\mu}_j$ y $\hat{\sigma}_j$ son, respectivamente, el promedio y la desviación estándar de la serie semanal $\overline{Y_H(j)}$, es decir cada columna de la Figura 2-3. Z_H es entonces la matriz normalizada de la serie histórica.

4. Para Z_H se calcula la matriz de autocorrelación de orden 1, P_H , donde $P_H(i, j)$ representa la correlación histórica entre la semana i y la semana j . La diagonal, por lo tanto, está formada por unos (1).

$$P_H = \text{corr}(Z_H) \quad (2-3)$$

5. Se crea, para cada estación, la matriz $C \in \mathbb{R}^{N_s \times T}$, que introduce el factor aleatorio a la serie sintética. Ésta tiene la misma configuración que la matriz de la Figura 2-3, pero el número de filas son la cantidad de años que se deseen simular (N_s). La construcción de C se realiza muestreando desde la matriz normalizada Z_H , de forma aleatoria para los años, pero con las semanas correspondientes a las simuladas, es decir, al construir la semana i del año sintético j se debe tomar como referencia la semana i de cualquier año de la serie histórica.

Es válido también considerar variables log-normales cualquiera, las que evitan datos extremos que pueden estar presentes en la serie original, sin embargo la interacción con la muestra histórica permite establecer una correlación espacial en la serie sintética, al considerar el mismo año histórico como base para un mismo año simulado en distintas cuencas, es decir, si para una semana i y año j se toma como referencia el año 1980, entonces todas las estaciones de la simulación usarán como referencia el año 1980 para esa misma semana y año. En términos matriciales esto se modela de la siguiente manera:

Sea $M \in \mathbb{R}^{N_s \times T}$, donde cada $M(i, j)$ es un dato aleatorio entre 1 y N_H , entonces cada dato de la matriz C se puede seleccionar como:

$$C(i, j) = Z_H(M(i, j), j) \quad (2-4)$$

6. Dado que la matriz de autocorrelación P_H es definida positiva se puede utilizar la descomposición de Cholesky, que indica que ésta se puede escribir como la multiplicación de una matriz triangular superior con su transpuesta:

$$P_H = U^T \cdot U \quad (2-5)$$

7. Luego se inserta la correlación histórica mediante la matriz triangular superior obtenida de Cholesky. (Justificación de este procedimiento al final del capítulo). Esta matriz contiene una muestra normalizada de datos aleatorios, pero donde todas las semanas se correlacionan entre sí.

$$Z_S = C \cdot U \quad (2-6)$$

8. Finalmente se debe desnormalizar la matriz Z_S utilizando la forma equivalente de la ecuación (2-2) para obtener Y_S que contiene los datos simulados. Como se comenzó suponiendo distribución log normal entonces la muestra de caudales sintéticos se obtiene de aplicar la exponencial.

$$Q_S = \exp Y_S \quad (2-7)$$

La matriz señalada en (2-5) representa relaciones entre todas las semanas dentro de un año, pero no de la última semana del año i , con la primera del año $i + 1$. Kirsch (2013) introduce una variación en el modelo FGN, para incorporar esta correlación interanual. Para ello se construyen dos matrices Z en lugar de una, en la primera se ordenan las semanas de la uno a la 52; mientras que en la segunda se inserta los datos de las semanas 27 a la 52 en la primera mitad, y de la 1 a la 26 del siguiente año en la segunda mitad, según se observa en la Figura 2-4a).

El procedimiento es el descrito en la parte anterior para ambas matrices, pero como último paso se acoplan los resultados para construir la matriz Z_{SC} , según se muestra en la Figura 2-4b) que contiene las correlaciones intra-anales e interanuales. Notar que, con esto, se pierde un año de información, pero permite insertar de mejor manera el cambio de año hidrológico lo que es importante en series largas.

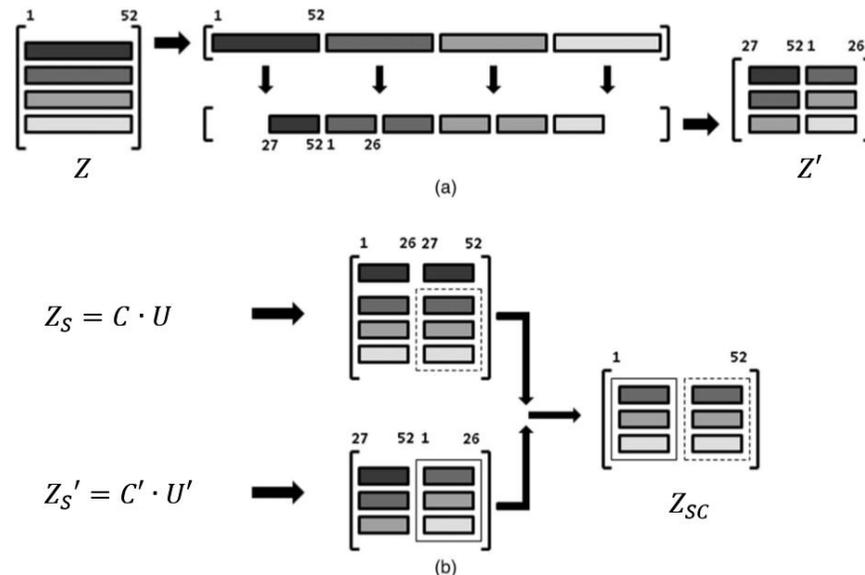


Figura 2-4. a) Proceso de Conversión de la Matriz Z en Z' . b) Proceso de acoplamiento de matrices Z_S y Z'_S en Z_{SC} . Fuente: (Kirsch, et al., 2013)

La modificación define además una manera de ajustar los caudales para reflejar futuros escenarios Hidro-climáticos, alterando los valores de σ y μ para cada serie semanal.

$$Z_{mod}(i,j) = Z(i,j) \cdot (d_j \cdot \sigma_j) + b_j \cdot \mu_j \quad (2-8)$$

Donde d_j y b_j son los factores de conversión de la media y desviación estándar, pero sometidos a todas las ecuaciones enunciadas más arriba.

2.3. Sistema Eléctrico en Chile

El Sistema Interconectado Central de Chile (SIC), está compuesto por las centrales eléctricas generadoras, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, y barras de consumo de usuarios no sometidos a regulación de precios, que operan interconectados desde Taltal por el norte (Región de Antofagasta), hasta la isla grande de Chiloé por el sur (Región de Los Lagos), produciendo el 68.5% de la generación nacional y abasteciendo al 92% de la población (Coordinador Eléctrico Nacional, 2015). Las instalaciones que conforman el SING abarcan el territorio comprendido entre las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, equivalente al 24.5% del territorio continental del país y con una producción equivalente al 19% del total del país. (CDEC-SING, 2015)

El Sistema Eléctrico Nacional, nacerá como tal en el año 2018, momento en que los actuales sistemas del Norte Grande (SING) y Central de Chile (SIC) se unifiquen. Por las características de la geografía nacional, será un sistema único en cuanto a longitud, alcanzando los 3.100 km y abarcará casi la totalidad del territorio nacional, desde la ciudad de Arica por el norte, hasta la Isla de Chiloé, en el sur, tendrá una capacidad instalada de 24000 MW y será capaz de atender una demanda máxima de 11000 MW (Coordinador Eléctrico Nacional, 2015).

En Chile, los principales sistemas para la generación eléctrica son hidráulicos, térmicos, eólicos y solares, aunque también existen una serie de pequeños aportes de la geotermia, biomasa, gas y otras, que son energías en estudio. La distribución por tipos de generación luce como se muestra en la Figura 2-5, donde se distingue el gran aporte de la hidroelectricidad y el sostenido aumento de generación a través de los años, donde el aumento de demanda se suple casi completamente por termoelectricidad.

El 2009 el aporte hídrico en el SIC significó un 59% de la generación total, sin embargo, este porcentaje cae en 2010 a 49% y llega en 2016 a un 36% como se observa en la Tabla 2-2, mientras que, en términos de capacidad instalada en este sistema, la proporción de centrales hidroeléctricas, sobre el total, varía tan solo de un 46% a un 40% (Comisión Nacional de energía, 2017), lo que no se condice y muestra un claro efecto externo que en este caso podría ser la megasequía.

Actualmente 6678 MW de los 17583 MW totales del sistema interconectado central (SIC), pertenecen a hidroelectricidad, es decir alrededor de un 38%. Si se compara la conexión SIC-SING, entonces este número se reduce a un 29%.

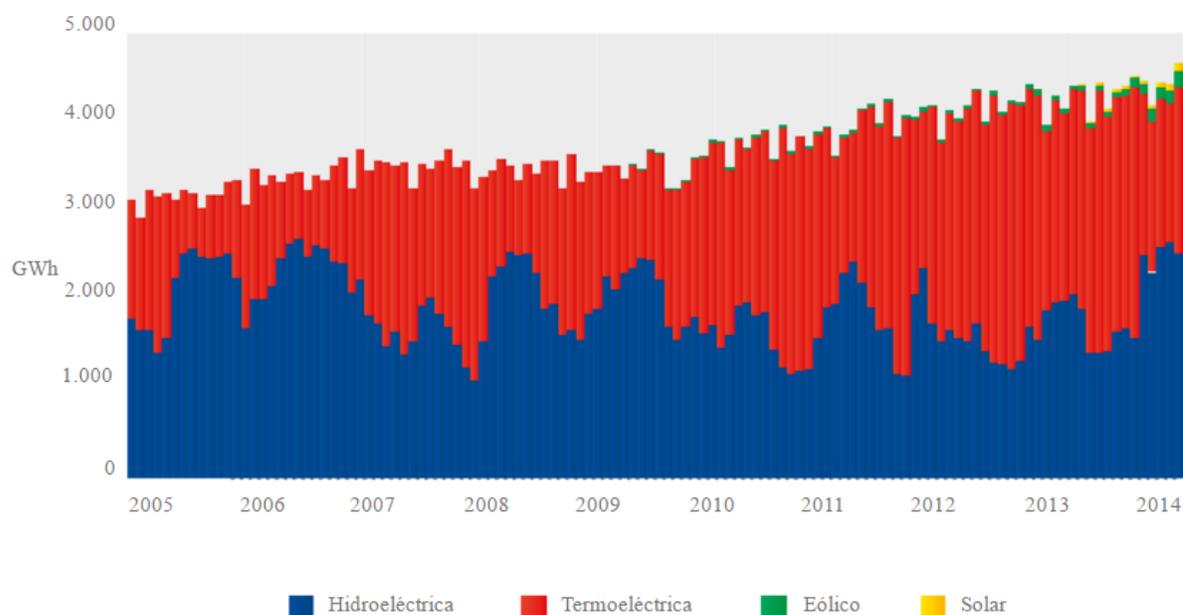


Figura 2-5. Distribución Tipos de Energía en Producción Bruta del SIC por años. Fuente: (Coordinador Eléctrico Nacional, 2015).

Tabla 2-2. Resumen Generación últimos 6 años [GWh/año]. Fuente: (Comisión Nacional de energía, 2017)

TOTAL SIC-SING (GWh)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Biomasa	841	888	1 828	2 257	2 715	2 384	2 643
Carbón	16	21	26	31	28	28	31
Carbón + Petcoke	089	134	250	053	363	114	959
Carbón + Petcoke	1 483	387	607	495	530	508	497
Cogeneración	0	0	25	121	122	134	131
Eólica	325	324	383	539	1 411	2 080	2 252
Fuel Oil	280	274	216	349	208	71	125
Gas Natural	5 122	4 218	2 356	1 629	2 018	2 591	1 815
GNL	6 233	9 935	10 101	9 629	8 009	8 501	10 172
Hidráulica Embalse	11 759	11 415	10 659	9 545	11 792	11 616	7 944
Hidráulica Pasada	9 495	9 208	9 465	9 969	11 719	12 250	11 502
Petróleo Diesel	6 514	4 080	3 609	2 437	2 542	2 082	1 764
Petróleo Diesel + Fuel Oil	115	70	48	21	9	8	0
Solar	0	0	0	7	459	1 360	2 550
TOTAL	58	61	65	68	69	71	73
Proporción hidro sobre el total	36%	33%	31%	29%	34%	33%	27%

Cabe notar que, si se separa entre los sistemas del Norte Grande y Central, la proporción cambia bastante, como se observa en la Tabla 2-3

Tabla 2-3. Comparación aporte hidroeléctrico en los sistemas SIC y SING. Fuente: (Comisión Nacional de energía, 2017)

	SIC	SING	Conjunto
2010	49.1%	0.4%	36.5%
2011	44.6%	0.4%	33.3%
2012	41.1%	0.5%	30.7%
2013	38.3%	0.4%	28.7%
2014	44.9%	0.4%	33.6%
2015	45.0%	0.4%	33.3%
2016	36.0%	0.4%	26.5%

2.3.1. Modelo de Coordinación Hidrotérmica

La coordinación hidrotérmica corresponde a la optimización de los distintos sistemas eléctricos dominados por centrales térmicas e hidroeléctricas. Se realiza con la finalidad de satisfacer cierta demanda de energía en un determinado periodo de tiempo, utilizando los recursos hídricos de manera óptima, lo cual significa un mínimo costo monetario para el sistema. Además, se busca la gestión óptima del agua almacenada en el largo y corto plazo (Troncoso, 2010). Esta coordinación se puede hacer para distintos horizontes de evaluación (semanas, meses, años).

El proceso de optimización está relacionado directamente con el dilema del operador de un embalse, quien debe decidir si retener el agua para el futuro, o generar energía eléctrica con el recurso hídrico de forma inmediata. En la Figura 2-6, se puede ver que al almacenar un mayor volumen en un embalse se debe suplir la demanda de formas más costosas (Generación Térmica), lo que tiene un mayor costo inmediato pero menor costo de operación futuro.

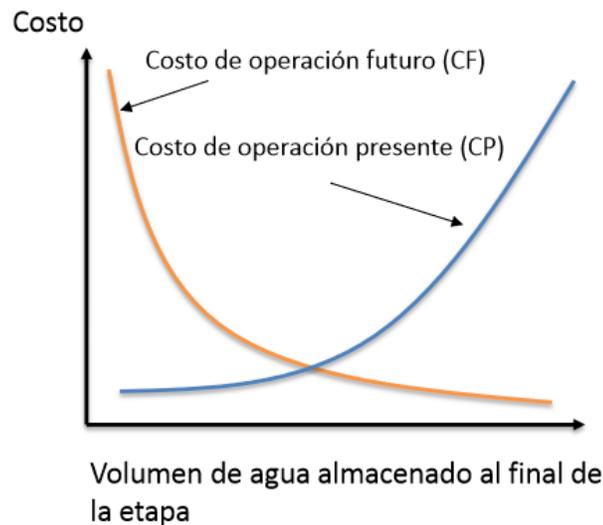


Figura 2-6. Problema de Coordinación Hidrotérmica

La optimización se realiza entonces en función del volumen de agua almacenada en las centrales de embalse, los afluentes a cada hidroeléctrica, los costos de combustibles, las demandas y las proyecciones de crecimiento.

En Chile, como en otros países con sistemas hidrotérmicos, existen actualmente varios modelos de despacho, para largo, mediano, y corto plazo. Los modelos de largo plazo se pueden clasificar, en los que utilizan una programación dinámica estocástica clásica (PDE) o una programación dinámica dual estocástica (PDDE). Esta última se utiliza para abordar problemas de mayor complejidad, pues aumenta la cantidad de escenarios hidrológicos de forma exponencial. La PDDE se basa en la observación de que la llamada Función de Costos Futuros Esperado (FCFE) se puede representar como una función lineal por partes (Palacios, 2004).

Actualmente en el sistema chileno, los modelos de planificación de la operación son: (Avilés, et al., 2011)

- Modelo SDDP (Stochastic Dual Dynamic Programming): Definido para largo, mediano y corto plazo. Utiliza la Programación Dinámica Dual Estocástica (PDDE) e incorpora dos fases; optimización y simulación de la operación, para etapas semanales. Es un modelo multinodal y multiembalse. Los escenarios son determinados en base a un modelo de series de tiempo (CPAR).
- Modelo PLP (Programación de Largo Plazo): Usa el método de PDDE para realizar la coordinación a largo plazo. Se diferencia del modelo anterior en que los escenarios se seleccionan por medio de sorteos equiprobables. Es utilizado actualmente por el CDEC-SIC para problemas de mediano plazo.
- Modelo PCP (Programación de Corto Plazo): Utilizado por el CDEC-SIC, realiza Programación Dinámica Dual Determinística (PDDD) para el corto plazo, entregando la operación semanal.
- Modelo Global de Selección de Inversiones (MGI): Basado en una programación lineal, minimiza el costo actualizado de inversión y operación. El modelo define una planificación de la operación de mediano plazo.
- Modelo OSE2000 (Operación del Sistema Eléctrico): Es un modelo que desarrolla PDDE para un horizonte de mediano plazo, es bastante parecido al modelo PLP y es utilizado actualmente por la Comisión Nacional de Energía (CNE) para el cálculo de los Precios de Nudo.
- Modelo de Operación Mensual del SIC (OMSIC): Es multiembalse y multimodal, e incorpora dos fases; la primera de programación dinámica estocástica clásica (PDE), y otra de simulación (Cadenas de Markov y Montecarlo). Está definido sólo para mediano plazo (1 o 2 años), las etapas son mensuales, y asume dos tipos de hidrologías: invierno (abril - septiembre) y deshielo (octubre - marzo).

Históricamente, el tratamiento de la hidrología que realiza el modelo PLP estuvo regulado por el Artículo 190 del D.S. N°327/1997 de acuerdo a lo siguiente “...la estadística para los gastos afluentes en centrales hidroeléctricas deberá ser representativa de las respectivas centrales y considerar, como mínimo, una muestra de 40 años hidrológicas. Esta estadística deberá ser actualizada periódicamente, de modo que siempre incluya los datos correspondientes al año hidrológico anterior al que precede a aquel en que se esté efectuando la programación de la operación”. En 2008 el Decreto N° 291 se estableció que “...el CDEC es el organismo encargado

de determinar la operación del conjunto de instalaciones de un sistema eléctrico, incluyendo las centrales eléctricas generadoras; líneas de transmisión a nivel troncal, subtransmisión y adicionales; subestaciones eléctricas, incluidas las subestaciones primarias de distribución y barras de consumo de usuarios no sometidos a regulación de precios abastecidos directamente desde instalaciones de un sistema de transmisión; interconectadas entre sí, que permite generar, transportar y distribuir energía eléctrica de un sistema eléctrico, de modo que el costo del abastecimiento eléctrico del sistema sea el mínimo posible, compatible con una confiabilidad prefijada” Ellos reciben la información de cada empresa generadora hasta el día previo y calculan el despacho correspondiente (Ministerio de Economía, Fomento y reconstrucción, 2008). Existe información disponible desde 1961.

Para simular la coordinación del Sistema Eléctrico Nacional se dispone del software Ameba, una herramienta diseñada por la consultora SPEC Energy Consulting. Ameba consiste en una plataforma web que reúne distintos modelos de optimización, permitiendo simular futuros mercados energéticos. Su procesamiento se lleva a cabo en servidores externos (Cloud), lo que permite guardar la información y revisar estados de estudio en línea (SPEC Energy consulting, 2017).

Además, Ameba incorpora la representación de múltiples tecnologías, desde las convencionales (térmica e hídrica) hasta las más modernas como fotovoltaica, eólica, CSP, entre otras, estas energías se integran para distintos modelos, con los tiempos de puesta en marcha, capacidades y limitaciones. (SPEC Energy consulting, 2017)

El software realiza diversos análisis de corto, mediano y largo plazo, Este trabajo considera el problema de largo plazo, y por tanto se utiliza el módulo de Coordinación Hidrotérmica de Ameba, que incluye una red simplificada del sistema SIC-SING que contiene 255 generadores, 33 barras y 11 embalses. Dicho módulo determina la política operativa de mínimo costo de un sistema hidrotérmico respetando las principales restricciones operacionales de los sistemas eléctricos y las cuencas hidrográficas. Se puede escoger el algoritmo SDDP o Progressive Hedging. (SPEC Energy consulting, 2017).

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

El procedimiento utilizado para analizar el efecto sobre el sistema eléctrico de escenarios similares a la megasequía 2010-2015, consta de tres etapas fundamentales (ver Figura 1-2):

- El análisis de series de caudales históricas para cada central asociada al Sistema Interconectado Central (SIC) o del Norte Grande (SING).
- La generación de escenarios de caudales sintéticos.
- La simulación de la respuesta del sistema eléctrico bajo los caudales simulados.

Las series de caudales medios semanales que se utilizan en la modelación de afluentes a centrales del SIC corresponden a los registros que utiliza el Coordinador Eléctrico Nacional - SIC para sus corridas de planificación. Las asociadas al SING se obtienen de la base de datos de Ameba.

El análisis de las series, permite conocer la muestra y modelarla como cadenas de Markov con tres estados discretos -Seco, Normal o Húmedo-, que se definen:

- A partir de rangos de caudales característicos, obtenidos de la literatura, los que definen cada estado ((CR)2, 2015) y;
- Mediante Standard Streamflow Index (SSI), índice que permite categorizar en los estados ya mencionados, según se muestra en la Tabla 2-1.

Una vez definida la cadena, se calculan las probabilidades de transición entre estados, en base a las cuales se crea una cadena sintética, donde cada año simulado tiene un estado asociado. Luego, se crean las series intraanuales de caudales, mediante el método *Fractional Gaussian Noise*, donde los valores de d_j y b_j de (2-8) están modificados de acuerdo al estado que le corresponda al año en cuestión. Estas series tendrán una resolución semanal.

Una vez definidas se ingresan al software Ameba para la modelación eléctrica.

El presente Capítulo describe en detalle los métodos mencionados anteriormente.

3.1. Análisis del Registro Histórico

La primera parte del proceso consiste en analizar los datos de afluentes semanales registrados para cada una de las 103 centrales disponibles en el Coordinador Eléctrico Nacional. Estas series se reordenan en matrices (una para cada central), las que se forman según se muestra en la Figura 2-3. En cada matriz se analizan las columnas, una a una, es decir, se trabaja por separado con cada serie j , formada por la semana j para todo año $i \in [1961, 2015]$, con el objetivo de definir la muestra de la forma más precisa posible. En esta parte se evalúan de manera general las tendencias y variaciones en la muestra, para identificar aquellas que se ajustan a alguna distribución conocida y separarlas de los casos particulares, que deben adecuar su metodología, como:

- Afluentes mensuales: Dado que algunas estaciones no poseen registros semanales, ellas replican el promedio mensual de caudales en cada semana, esto perturba la metodología de FGN. En este caso, las series sintéticas se obtienen con ventana temporal mensual, lo que genera series aleatorias de mejor ajuste y es posible aplicar FGN sin alteraciones.
- Afluentes constantes a lo largo del de registro: El Coordinador Eléctrico Nacional indica que no todas las estaciones tenían información completa desde 1961, por lo que se rellenó replicando datos existentes y correlacionando con centrales cercanas. En algunos casos, esta alteración condujo a series prácticamente uniformes dada la poca variabilidad de caudales en el período registrado. Estos datos se consideran válidos y se decide mantener el comportamiento uniforme en la construcción de series sintéticas.
- Valores escalonados: Estos casos hacen referencia a estaciones cuyas series varían de manera aleatoria, pero tomando valores ajustados a ciertos rangos. Un ejemplo de este caso es la central Auxiliar del Maipo, la presenta una serie donde se observa que los valores parecen aleatorios, sin embargo, la Figura 3-2 muestra el Análisis de frecuencia, donde se ve que ella no se ajusta a una distribución normal. Acorde al ajuste visual se modela de manera escalonada, es decir, con probabilidades asociadas a rangos.

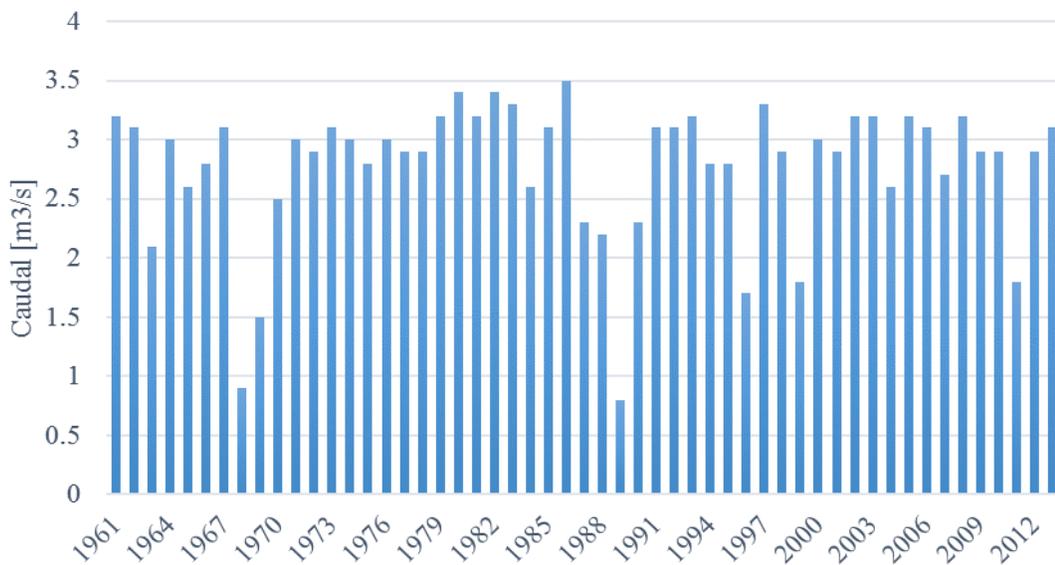


Figura 3-1. Series de los caudales históricos para la semana 11 en Central Auxiliar del Maipo.

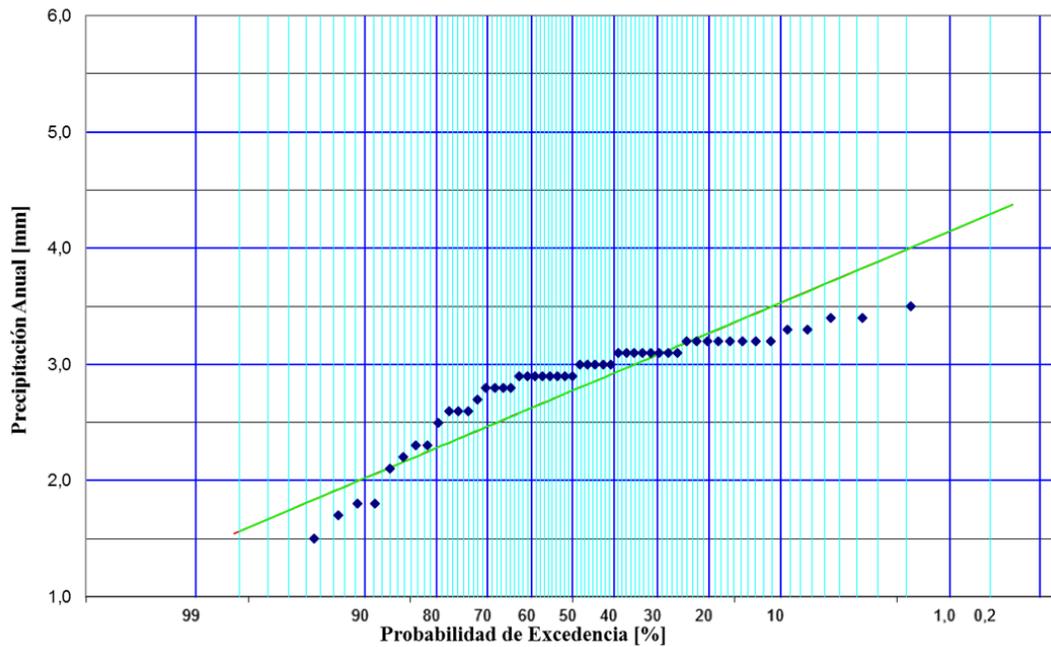


Figura 3-2. Análisis de Frecuencia de la semana 11, Estación Auxiliar Del Maipo. Los registros se muestran en azul, mientras que la línea verde presenta la aproximación por distribución normal

Se realiza luego, un análisis estadístico para cada serie, donde se calcula media y desviación estándar, las que se utilizarán en la creación de series sintéticas. Además, se requiere conocer la distribución que éstas siguen, para lo cual se consideran dos posibles ajustes de las muestras aleatorias: Normal y Log-normal. Esta decisión se toma por simplicidad en la aplicación del método FGN de generación de series sintéticas, descrito en la Revisión de Antecedentes. La selección de la distribución apropiada se lleva a cabo utilizando el test Chi-Cuadrado, corroborado mediante ajuste visual. Esto se programa en el software Matlab, cuyos resultados entregan el valor del test versus el máximo permitido (que depende de la distribución, cantidad de datos y número de rangos seleccionados), para todos aquellos en que se supere el límite se analiza detenidamente el gráfico generado, que compara la serie histórica con el ajuste a la distribución que corresponda, y se elige de manera visual. Los casos particulares deben ser trabajados de manera separada y modelados de manera que se condigan con los registros.

Dado que el método *Fractional Gaussian Noise* (FGN), requiere que la muestra sea Normal (0,1), se normalizan las series históricas acorde a su distribución. El método definido por Kirsch (2013) considera siempre distribuciones Log-normales, para las que se deben aplicar las ecuaciones antes mencionadas. Con las series normalizadas se obtiene la correlación de cada semana j con cada una de las restantes, según ecuación (2-3). Este proceso se lleva a cabo programando la función en el software Matlab, donde se distinguen tres casos:

- Aquellas Log-normales deben ser tratadas con las ecuaciones (2-1), (2-2), (2-3), (2-4), (2-5), (2-6), (2-7) y (2-8)
- En el caso de serie Normal, la ecuación (2-1) se reemplaza por la (3-1) y la (2-7) por la (3-2).

$$Y_H(i, j) = Q_H(i, j) \quad (3-1)$$

$$Q_S = Y_S \quad (3-2)$$

- Aquellas series donde se ajustan distintas distribuciones en distintas épocas del año se trabajan variando las ecuaciones según corresponda.

Una descripción detallada de estos análisis se puede observar en la primera y segunda línea de la Figura 3-3, las que definen los principales procesos a seguir en el algoritmo que define esta metodología. Además, se indican los resultados de cada uno y como en conjunto construyen la muestra sintética.

Por otro lado, para incorporar el concepto de sequía, conocer sus características y los años en que se cumplen dichas características, no se trabaja con afluentes semanales, sino que anuales, por lo que se realiza un cambio en la escala de tiempo, según se observa en la tercera línea del diagrama de la Figura 3-3. Esto, para mantener coherencia con los resultados del informe de CR2 (2015), base de esta memoria y que analiza el evento en dicha escala temporal.

En este proceso se utiliza el Standard Streamflow Index, que categoriza cada año según se muestra en la Tabla 2-1 en los estados: Seco, Normal o Húmedo. Este Índice se calcula en Matlab, con escala de tiempo anual, y se agrega además una escala de tres meses con el objetivo de comparar información. Como resultado se obtiene la categorización de cada año, con lo que se construye una cadena de Markov.

Además, por simplicidad, en este análisis se unen las estaciones con similares características hidro-meteorológicas, lo que da mayor congruencia a los resultados, para que estaciones contiguas y con hidrologías similares, definan los mismos años en estados Normal, Húmedo o Seco. Para ello, las 103 series de afluentes analizadas se separan según la central a la que confluyen y la cuenca a la que pertenece dicha central. Además, se utiliza el concepto de zonas homogéneas introducido por Rubio (2010), que permite agrupar algunas cuencas de la zona sur. De manera similar, se reúnen las cuencas de Rapel con Mataquito, teniendo en cuenta las características hidrometeorológicas de las cuencas y el cálculo del Standard Streamflow Index (SSI) de cada una, si bien sus hidrologías no son idénticas, los años definidos como normales, secos y húmedos son prácticamente los mismos en ellas.

Mediante un análisis de frecuencia se obtienen las probabilidades de ocurrencia de cada estado y analizando las cadenas de Markov se obtienen las probabilidades de transición entre ellos. Este proceso se realiza considerando distintos subconjuntos temporales para evaluar la variabilidad en la persistencia de estados a través del tiempo (1961-2015, 1961-1987, 1987-2015). Se utiliza, para la simulación de series sintéticas, el espacio temporal con características más secas, correspondiente al período 1987-2015.

Finalmente se realiza un análisis estadístico de las series anuales, del cual se obtienen los promedios y desviaciones de: caudales históricos, caudales por estado y caudales del período 2010-2015. Esto permite evaluar las variaciones entre estados y la intensidad de la megasequía en cuestión. Además, se lleva cabo un análisis de frecuencia que busca encontrar el caudal teóricamente más seco en un período de Megasequía, esto se hace en base a las probabilidades de excedencia indicadas en el Informe del (CR)2 (2015). Este caudal representará los caudales secos

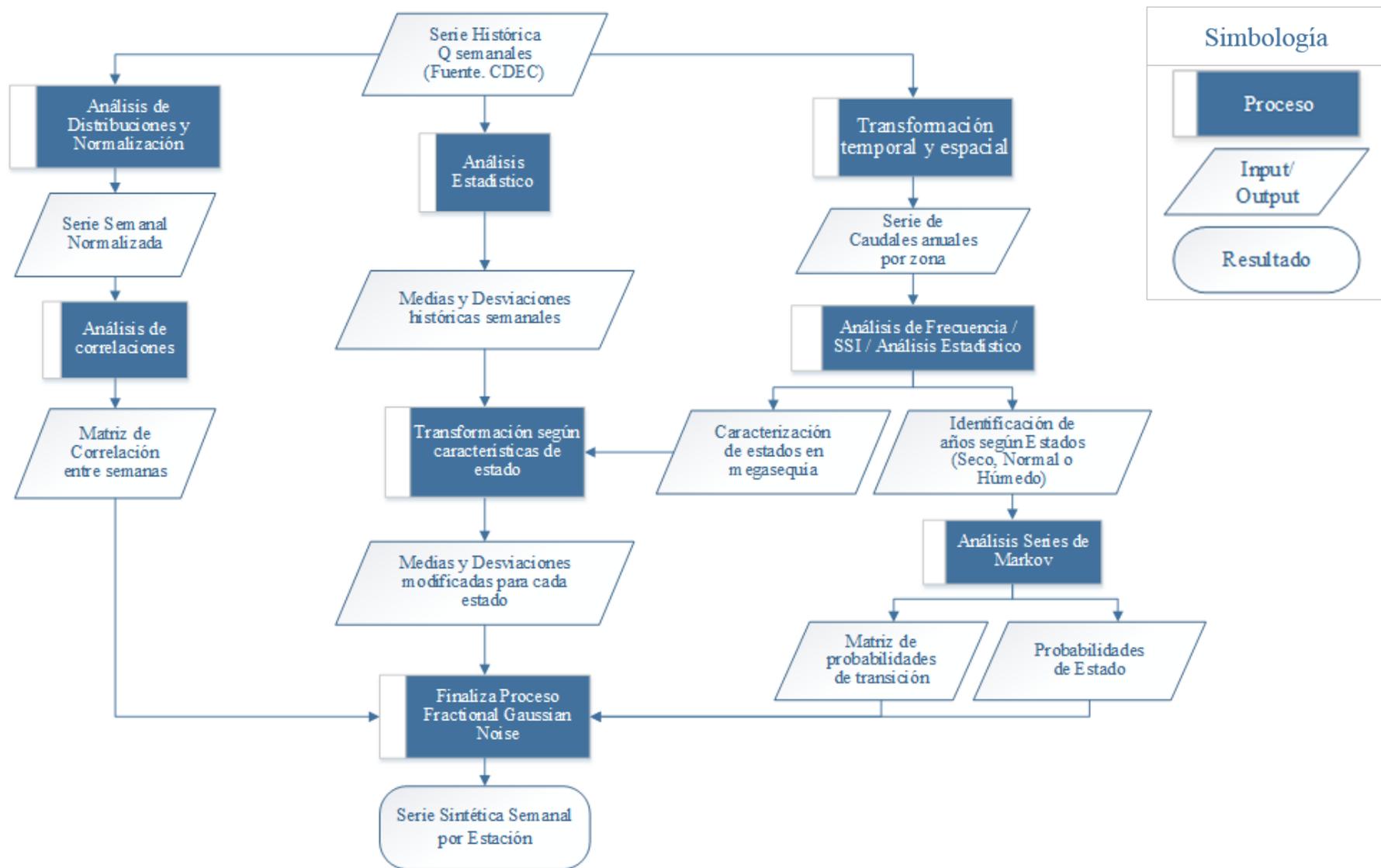


Figura 3-3. Diagrama de Proceso para Análisis de Series Históricas y Generación de Series Sintéticas

en las series sintéticas que se construyan, pues, un fuerte supuesto de este trabajo es lo indicado en el informe sobre Megasequías ((CR)2, 2015), el cual explica que en el futuro los años secos se podrán considerar similares al asociado a dicha probabilidad de excedencia, mientras que años promedio tendrán las características de las medias ocurridas entre 2010 y 2015.

Con estos datos se fuerzan las series sintéticas a ser secas, según la ecuación (2-8) para representar el evento extremo estudiado en esta memoria.

3.2. Generación de Serie Sintética

Se comienza por definir el tipo de año a generar: Seco, Normal o Húmedo, para ello se utilizan las probabilidades de estado y de transición ya calculadas, las que definen rangos de probabilidad acumulada para cada estado, de manera que, si las probabilidades por estado son:

Seco: 0.3 Normal: 0.5 Húmedo: 0.2

Entonces la probabilidad de tener caudales menores a $Q_{max\ seco}$ es 0.3 y la probabilidad de tener caudales menores a $Q_{min\ húmedo}$ es 0.8. Gráficamente se puede ver en la Figura 3-4. Con esto en consideración, el procedimiento consiste en generar números aleatorios entre 0 y 1, si el valor es menor que p_{seco} entonces el año es seco, si es mayor que $p_{seco} + p_{normal}$ entonces es húmedo, y si no, es normal.

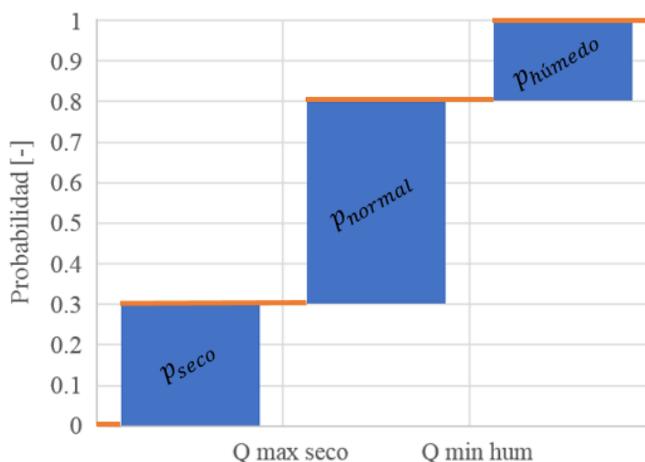


Figura 3-4. Diagrama explicativo para Selección de años. Las barras representan las probabilidades por estado, la línea es la probabilidad acumulada.

La misma lógica es seguida para los estados de transición, pues si el año i es, por ejemplo, seco, las probabilidades a utilizar son $p_{seco-seco}$, $p_{seco-normal}$, $p_{seco-húmedo}$.

Luego, con la correlación semanal y las medias y desviaciones modificadas asociadas al estado definido de las probabilidades, se utilizan las ecuaciones (2-4), (2-5), (2-6), (2-7) y (2-8) del método de *Fractional Gaussian Noise* para generar las series deseadas.

Es necesario tener en cuenta que en este proceso se utilizó la matriz aleatoria M mostrada en la Ecuación (2-4), que es la base para la generación de años sintéticos. Para mantener la

correlación espacial dicha matriz es la misma para todas las centrales en una misma simulación. Esta matriz definía que años se estaban tomando como modelo para la serie sintética, por lo tanto, ella replica en la simulación las variaciones históricas que existieron en distintas zonas, un mismo año. Esto no implica que todas las zonas geográficas presenten el mismo estado, sino que, estos se relacionan de manera similar a lo que se ha visto en la historia.

El procedimiento descrito genera una serie sintética de caudales que mantienen la correlación semanal y espacial de los datos originales y que contienen las principales características de una sequía. Este proceso se realiza para los datos históricos de afluentes en cada central.

Cada una de las series generadas debe ser analizada para definir si cumple con la clasificación de Megasequía, pues aun cuando se esté forzando al sistema a serlo, se trata de un proceso aleatorio en el que cabe la posibilidad de que se generen escenarios poco coherentes. Para ello, se diseña una planilla Excel donde, para cada estación, se analiza la media de cada año versus las definiciones estadísticas de sequía y se corrobora que existan cierta cantidad de eventos secos sucesivos, además la media de dichos eventos debe ser del orden pronosticado por (CR)2.

3.3. Modelo Hidroeléctrico

De la construcción de series sintéticas, se obtienen 5 escenarios, todos representan una megasequía variando algunas características de ella. Se incluyen además dos escenarios que se obtienen de la muestra histórica para evaluar las diferencias. El primero es la serie desde 1961 a 1975, una muestra que se puede definir como estándar en la hidrología chilena. La segunda es la serie desde 2000 a 2015, que busca analizar la megasequía ya existente.

Para llevar a cabo la simulación eléctrica se utiliza el software Ameba, descrito en la Sección de Antecedentes. En él se ingresan las series de caudales de los casos a evaluar. La primera parte de este trabajo analiza series aisladas, es decir, casos de información perfecta, con lo cual se analizan efectos puntuales de las series en cuestión, sin tomar en cuenta las probabilidades de que ocurra otro escenario. En segundo lugar, se desarrolla una modelación estocástica, planteando distintas series equiprobables y analizando para cada etapa la mejor opción de despacho eléctrico frente a las opciones posibles. Para el modelo determinístico se utiliza un algoritmo Default que analiza una serie a la vez, mientras que en el probabilístico se utiliza PLP con 20 iteraciones.

El software requiere que se ingresen un conjunto de variables, entre ellas las proyecciones de demandas, costos de combustible, costos de agua, afluentes y volúmenes iniciales de los embalses, junto con algunos otros parámetros ya incluidos en el modelo, como penalización por riego, inserción de nuevas tecnologías, capacidades de las centrales, etc. Todos estos datos se obtienen de la base de datos disponible de la Comisión Nacional de Energía (2016)

Como resultado se obtiene la generación hidroeléctrica en el sistema y la generación total, así como los costos asociados y los volúmenes de embalses. Todo en escala anual.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos al aplicar la metodología antes descrita sobre el registro semanal de 103 afluentes a distintas centrales hidroeléctricas a lo largo de Chile. La información se obtuvo desde la base de datos en línea del Centro de Despacho Económico de Carga del SIC (Coordinador Eléctrico Nacional-SIC, 2015) y de la base de datos de Ameba en el caso del SING.

Como ya se detalló, se trabaja con registros anuales, para categorizar años normales, secos o húmedos. Un análisis estadístico de estas series permite la observación de la variación en el comportamiento hidrológico de los últimos 50 años, con lo que es posible analizar el efecto del cambio climático en los caudales de ríos a lo largo del país. Por otro lado, se evalúan las series semanales (semana j para todo año $i \in [1961, 2015]$), calculando el tipo de distribución que mejor se adapta a los datos medidos, para ello se utiliza el Test Chi cuadrado y en algunos casos, ajuste visual. Los años tratados en esta parte son siempre años hidrológicos (abril – marzo) para conservar la relación estacional.

Se verifica el modelo, generando series estándar y comparando con la historia, para finalmente generar series sintéticas que cumplan con las características definidas por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia ((CR)2, 2015). A partir de ellos se establecen los tipos de escenarios que se evaluarán en el modelo eléctrico.

Los escenarios generados se ingresan al software Ameba para análisis tanto determinístico como estocástico, para esto los años deben ser ingresados como años civiles, es decir desde enero a diciembre.

4.1. Análisis de Series Históricas

A modo de referencia, se presenta en la Figura 4-1, la suma de volúmenes afluentes a cada central por año, cuyas estadísticas se muestran en la Tabla 4-1. El año histórico más seco es 1998, donde el déficit alcanzó un 40%.

Tabla 4-1. Estadística Serie Histórica de volúmenes anuales agregados. Período 1961 - 2014

Promedio 1961-2014 [Mm³]	3,952,542
Desviación Estándar [Mm³]	782,408
Máx. Volumen Año 1972 [Mm³]	5,544,765
Mín. Volumen Año 1998 [Mm³]	2,354,914

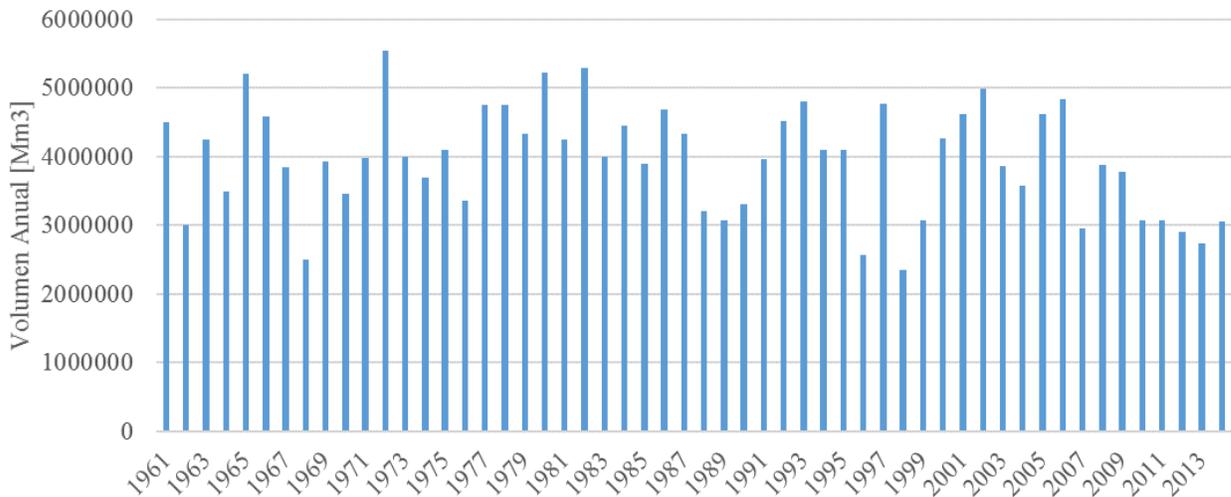


Figura 4-1. Series Históricas

Para estudiar la hidrología anual de cada serie de datos, se desagrega la figura anterior, considerando algunas zonas comunes, las que reúnen estaciones con similares características en cuanto a régimen hídrico y clasificaciones equivalentes de SSI. En este estudio, se analizan las siguientes zonas dentro del SIC y SING:

1. Cuenca del Río San José
2. Cuencas de la Pampa del Tamarugal
3. Cuenca del Río Huasco
4. Cuenca del Río Limarí
5. Cuenca del Río Aconcagua
6. Cuenca del Río Maipo
7. Cuenca del Río Rapel y Río Mataquito
8. Zona Homogénea Maule (del Río Maule y sus tributarios)
9. Zona Homogénea Araucanía y alrededores (del Río Itata al Río Valdivia)
10. Cuenca entre Río Bueno y Río Puelo

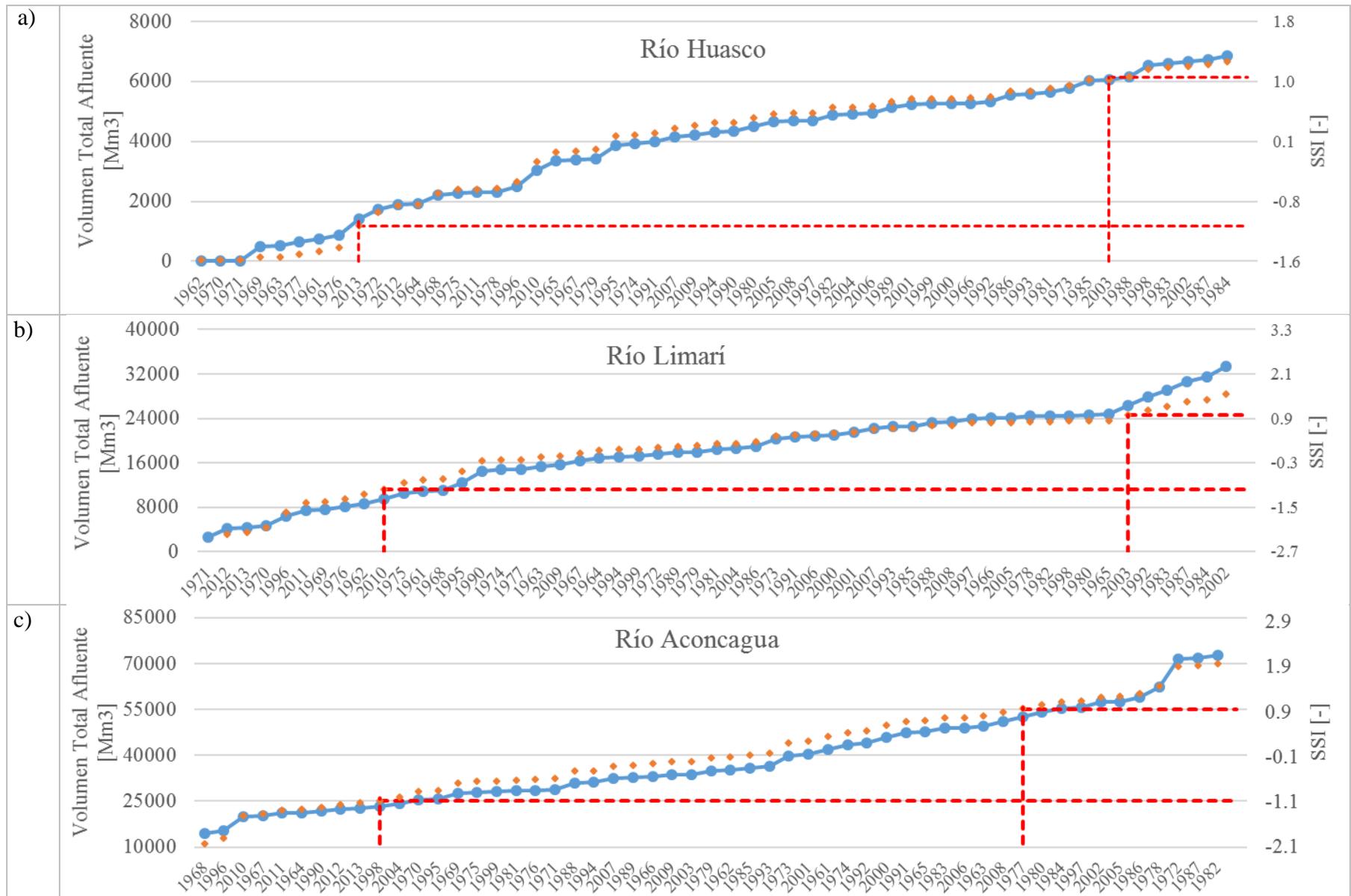
11. Cuenca de la Isla de Chiloé.

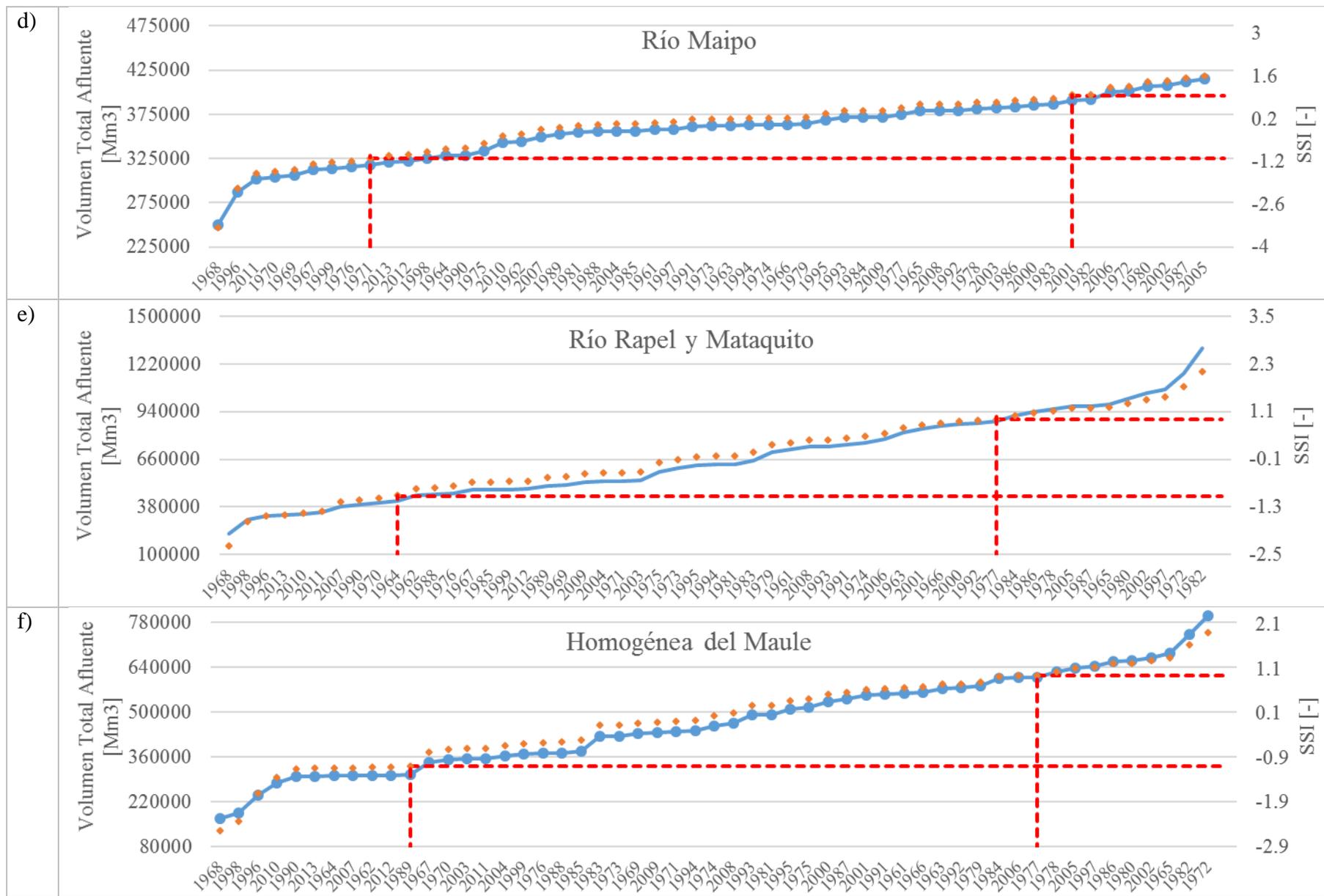
Cabe destacar que existen unidades de generación definidas en el software Ameba que agrupan hidroeléctricas reales en una única estación ficticia, representativa de la producción energética de ambas, con el fin de simplificar el sistema modelado, esto no produce efecto significativo en los resultados, sin embargo, el caso particular de la Central de Pasada Puerto Montt reúne afluentes continentales e insulares y, dado que la Isla de Chiloé tiene un régimen un tanto distinto al de la Cuenca ‘entre Río Bueno y Río Puelo’, se ha analizado la hidrología del afluente Dongo (Chiloé) de manera separada aun cuando confluyen a la misma central. El detalle de las centrales incluidas en cada zona se puede encontrar en la sección Anexos.

Para las cuencas del Río San José y Pampa del Tamarugal sólo existe una central hidroeléctrica asociada a cada una de ellas en el modelo Ameba. Los afluentes en estas centrales son casos particulares, pues son ambos constantes a lo largo de todo el registro. Las series sintéticas que se construyen para ellas, siguen con el valor constante, lo que tiene consistencia con lo observado en los últimos años.

Para cada una de las nueve zonas restantes se realiza un análisis de las medias históricas de manera de caracterizarlas, además, se lleva a cabo un análisis de frecuencia que evalúa los volúmenes anuales totales por zona, asociados al año más seco durante la megasequía, según el período de retorno calculado por el CR2 (2015). Además, se calcula el SSI para cada año de manera de encontrar los volúmenes límites de que definen un año seco, año normal o húmedo. La categorización de años se observa en la Figura 4-2, mientras que la Tabla 4-2 entrega un resumen de cada uno de los análisis realizados por zona.

El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia ((CR)2, 2015) indica que el caudal asociado al año más seco en megasequía tiene un período de retorno de 10 años en el Norte Chico y alcanza 30 años en la zona Centro-Sur de Chile, en base a esta información se han asignado los datos de la segunda columna de la Tabla 4-2, y consecuentemente se han calculado los volúmenes asociados a dicho período de retorno para cada zona de estudio, valores que se muestran en la tercera columna.





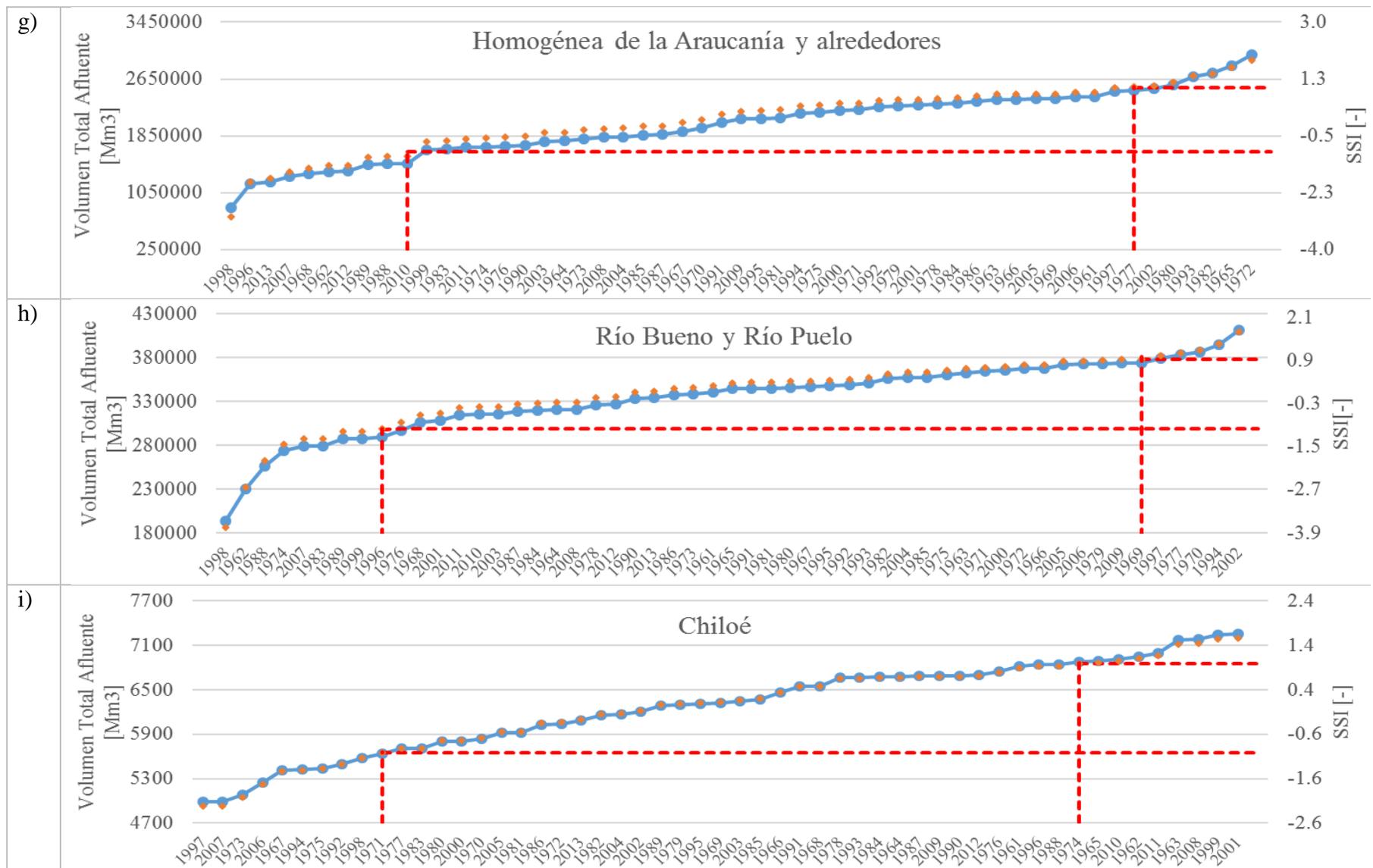


Figura 4-2. Categorización de tipos de año. La línea azul muestra los volúmenes totales anuales afluentes ordenados de menor a mayor, mientras que los puntos en naranja, los valores del SSI en eje secundario. Se indican en rojo los valores de transición seco-normal y normal-húmedo.

Tabla 4-2. Resumen Análisis Caudales por cuenca

Zona	Periodo de Retorno asociado al caudal más seco en Megasequía según CR2	Volumen anual en megasequía (CR2) [Mm3]	Volumen anual límite de sequía (SSI) [Mm3]	Volumen límite húmedo (SSI) [Mm3]	Volumen anual medio histórico [Mm3]	Volumen anual medio 2010-2015 [Mm3]	Volumen anual medio años secos [Mm3]	Volumen anual medio años normales [Mm3]	Volumen anual medio años húmedos [Mm3]
Cuenca Río Huasco	10 años	946	1577	6042	3821	1863	774	4167	6587
Cuenca del Río Limarí	10 años	7569	10092	26402	17983	6361	6364	19397	30481
Cuenca del Río Aconcagua	15 años	19552	24125	53611	38434	21562	20287	36873	65830
Cuenca del Río Maipo	30 años	286978	324821	391046	356024	321878	300779	360191	405024
Zona del Río Rapel y Río Mataquito	30 años	286978	416275	885834	665448	375759	346724	664717	1067053
Zona Homogénea Norte	30 años	195523	305899	610020	467089	308871	271104	474138	680783
Zona Homogénea Sur	30 años	709560	1482192	2487345	2000320	1424785	1267085	2059956	2722479
Cuenca entre Río Bueno y Río Puelo	-		290131	374178	333888	322486	260595	340575	388143
Cuenca de la Isla de Chiloé	-		5676	6875	6268	6670	5294	6333	7072

Con esta información se obtuvieron relaciones entre los caudales promedio de años secos o húmedos versus años categorizados en estado normal, de manera de mantener aproximadamente estas proporciones en las series sintéticas. Se asumirá en ellas que el estado promedio será similar a la media durante la megasequía 2010-2015 ((CR)2, 2015).

En base a este análisis se obtuvieron los coeficientes mostrados en la Tabla 4-3, los que indican cómo se relaciona la media de años secos, normales y húmedos de la serie sintética, respecto al promedio histórico. Los datos originales se incorporan en el modelo de generación de series sintéticas, modificados según la ecuación (2-8) utilizando el factor de la tabla según corresponda.

Tabla 4-3. Factores de relación Media Histórica-Media Futura

Zona	Seco	Normal	Húmedo
Cuenca Río Huasco	0.25	0.55	0.87
Cuenca del Río Limarí	0.3	0.4	0.6
Cuenca del Río Aconcagua	0.5	0.56	0.98
Cuenca del Río Maipo	0.8	0.9	0.99
Zona del Río Rapel y Río Mataquito	0.45	0.56	0.9
Zona Homogénea Norte	0.4	0.7	0.95
Zona Homogénea Sur	0.5	0.7	0.98
Cuenca entre Río Bueno y Río Puelo	1	1	1
Cuenca de la Isla de Chiloé	1	1	1

Se puede observar que para las cuencas de la zona austral el impacto de la megasequía es básicamente nulo en lo que respecta a caudales afluentes a centrales hidroeléctricas, por lo tanto, se considera que las series sintéticas mantienen un régimen similar.

La información de la base de datos del Centro de Energía y del software Ameba, pueden ser clasificados como series aleatorias semanales, a las que se les aplica la metodología ya explicada de manera íntegra, o en alguno de los tres casos particulares mencionados en el capítulo anterior. A modo de resumen, la Tabla 4-4 muestra la cantidad de casos por categoría, se agregan además centrales que, si bien están en la base de datos del Coordinador Eléctrico Nacional, se han excluido en la red simplificada de Ameba.

Tabla 4-4. Estaciones Asignadas a cada Categoría

Categoría	Cantidad
Aleatorios Semanales	28
Aleatorios Mensuales	46
Uniforme	7
Escalonadas	18
No aplican para Ameba	4

Por otra parte, en los casos clasificados como muestra aleatoria, tanto semanales como mensuales se distinguieron las distribuciones de la Tabla 4-5:

Tabla 4-5. Estaciones Asignadas para cada Distribución

Distribución	Cantidad
Log-normal	56
Normal	7
Mixto	11

Las distribuciones mixtas, son estaciones en que algunas semanas distribuían log-normal mientras que, en otras normal, en general se diferenciaban entre la primera y segunda mitad del año hidrológico.

Para cada serie histórica se realiza un análisis de frecuencia y se calculan las probabilidades de transición a la cadena de Markov para tres períodos distintos. Entre 1961 y 1987, 1987 y 2015 y con la serie completa 1961-2015. De esto se obtuvieron los resultados de la Tabla 4-7 y la Tabla 4-8, donde se observa la matriz de probabilidades de transición entre estados seco, normal y húmedo y las frecuencias de cada estado, según simbología de la Tabla 4-6

Tabla 4-6. Simbología Tablas de probabilidades.

Nombre de la cuenca			
$P_{seco-seco}$	$P_{seco-normal}$	$P_{seco-húmedo}$	P_{seco}
$P_{normal-seco}$	$P_{normal-normal}$	$P_{normal-húmedo}$	P_{normal}
$P_{húmedo-seco}$	$P_{húmedo-normal}$	$P_{húmedo-húmedo}$	$P_{húmedo}$

Este análisis muestra que, en general, las tendencias no varían de manera tan abrupta al comparar los primeros 27 años con los últimos 27, o con la serie completa, sin embargo, es claro que la transición seco-seco se vuelve mucho más frecuente en la segunda mitad y que las probabilidades de estado seco han aumentado en las zonas centrales. Las variaciones en zonas más extremas del país no son tan claras, pero se debe destacar que estados normales son menos probables que hace 30 años, lo que coincide con la predicción de estudios acerca del cambio climático que indican que las estaciones comienzan a volverse más extremas. En la zona norte cabe destacar que a fines de los años 60 ocurrió una severa sequía, lo que altera las probabilidades de este estado al analizar dicho período. Para modelar las series sintéticas se escoge tomar como muestra representativa el período 1987-2015, en base a cuyas probabilidades se definirán si los años modelados son secos, normales o húmedos.

Tabla 4-7. Probabilidades de Transición y de estado para las Cuencas entre Río Huasco y Mataquito

	Río Huasco				Río Limarí				Río Aconcagua				Río Maipo				Río Rapel y Mataquito			
	1961-1987	0.67	0.33	0.00	0.33	0.40	0.60	0.00	0.19	0.33	0.67	0.00	0.11	0.67	0.17	0.17	0.22	0.00	0.67	0.33
	0.13	0.73	0.13	0.56	0.16	0.74	0.11	0.70	0.12	0.53	0.35	0.63	0.12	0.71	0.18	0.63	0.19	0.44	0.38	0.59
	0.00	0.50	0.50	0.11	0.00	0.50	0.50	0.11	0.00	0.83	0.17	0.26	0.00	1.00	0.00	0.15	0.00	0.86	0.14	0.30
1987-2013	Río Huasco				Río Limarí				Río Aconcagua				Río Maipo				Río Rapel y Mataquito			
	0.33	0.33	0.33	0.04	0.75	0.25	0.00	0.19	0.50	0.33	0.17	0.26	0.50	0.50	0.00	0.19	0.17	0.67	0.17	0.26
	0.05	0.86	0.09	0.81	0.11	0.79	0.11	0.70	0.19	0.69	0.13	0.59	0.17	0.72	0.11	0.67	0.31	0.56	0.13	0.59
	0.00	0.75	0.25	0.15	0.00	1.00	0.00	0.11	0.25	0.75	0.00	0.15	0.00	0.75	0.25	0.15	0.25	0.75	0.00	0.15
1961-2013	Río Huasco				Río Limarí				Río Aconcagua				Río Maipo				Río Rapel y Mataquito			
	0.67	0.33	0.00	0.19	0.56	0.44	0.00	0.19	0.44	0.44	0.11	0.19	0.60	0.30	0.10	0.21	0.11	0.67	0.22	0.19
	0.08	0.81	0.11	0.70	0.13	0.76	0.11	0.72	0.15	0.61	0.24	0.62	0.14	0.71	0.14	0.66	0.25	0.50	0.25	0.60
	0.00	0.67	0.33	0.11	0.00	0.80	0.20	0.09	0.10	0.80	0.10	0.19	0.00	0.86	0.14	0.13	0.09	0.82	0.09	0.21

Tabla 4-8. Probabilidades de Transición y de estado para cuencas desde el Maule a Chiloé

	Z. Homogénea Norte				Z. Homogénea Sur				Entre Ríos Bueno y Puelo				Chiloé			
	1961-1987	0.00	0.67	0.33	0.11	0.00	1.00	0.00	0.07	0.00	1.00	0.00	0.11	0.00	1.00	0.00
	0.18	0.53	0.29	0.67	0.10	0.70	0.20	0.78	0.14	0.76	0.10	0.81	0.21	0.68	0.11	0.74
	0.00	1.00	0.00	0.22	0.00	1.00	0.00	0.15	0.00	1.00	0.00	0.07	0.00	0.67	0.33	0.11
1987-2013	Z. Homogénea Norte				Z. Homogénea Sur				Entre Ríos Bueno y Puelo				Chiloé			
	0.29	0.57	0.14	0.30	0.29	0.71	0.00	0.30	0.33	0.50	0.17	0.22	0.33	0.33	0.33	0.22
	0.31	0.56	0.13	0.59	0.35	0.53	0.12	0.63	0.18	0.71	0.12	0.67	0.27	0.60	0.13	0.59
	0.33	0.67	0.00	0.11	0.00	1.00	0.00	0.07	0.33	0.67	0.00	0.11	0.00	0.80	0.20	0.19
1961-2013	Z. Homogénea Norte				Z. Homogénea Sur				Entre Ríos Bueno y Puelo				Chiloé			
	0.20	0.60	0.20	0.21	0.22	0.78	0.00	0.19	0.22	0.67	0.11	0.17	0.20	0.60	0.20	0.19
	0.24	0.55	0.21	0.62	0.22	0.62	0.16	0.70	0.16	0.74	0.11	0.74	0.24	0.65	0.12	0.66
	0.11	0.89	0.00	0.17	0.00	1.00	0.00	0.11	0.20	0.80	0.00	0.09	0.00	0.75	0.25	0.15

4.2. Validación del Modelo

En primer lugar, se valida que la metodología diseñada para generar series se ajuste efectivamente a las condiciones hidrológicas de cada zona. Esto para corroborar que los supuestos hechos en la parte anterior sean válidos. Para ello se corrió el modelo 5 veces, 54 años cada vez sin considerar variación hidrológica, es decir, no se ejerció ninguna perturbación de las series originales para inducir sequías. Hecho esto, se comparó con el registro histórico, cuyo análisis se llevó a cabo calculando error porcentual de las medias respecto al promedio histórico y el factor de correlación r^2 entre serie sintética y el registro. Estas dos herramientas fueron calculadas para cada semana de cada estación.

Como resultado, el error entre medias no supera el 10%, mientras que el r^2 esta siempre sobre 0.65 que es el valor límite típico en hidrología (Santhi, et al., 2001). De manera que el modelo se considera válido.

La Figura 4-3 muestra como referencia los valores promedio por estación de r^2 . Se puede observar que todos estos datos se encuentran entre 0.8 y 1, la misma figura indica, en gráfico de barras, el error promedio asociado a cada serie, donde el máximo es de alrededor de 9%.

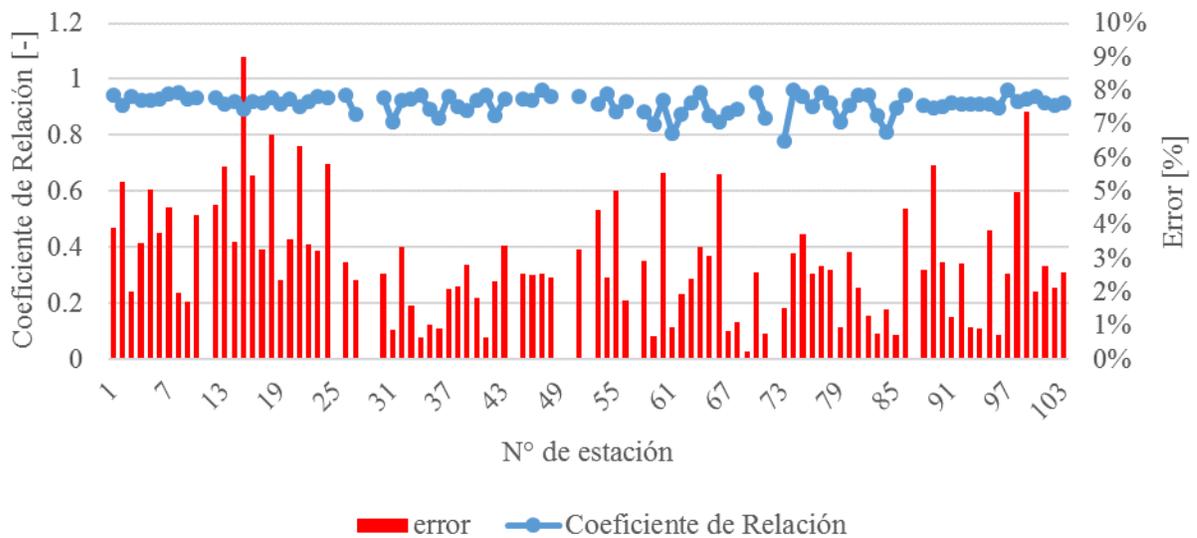


Figura 4-3. Muestreo de r^2 en eje a la derecha y Error porcentual de medias en eje a la izquierda.

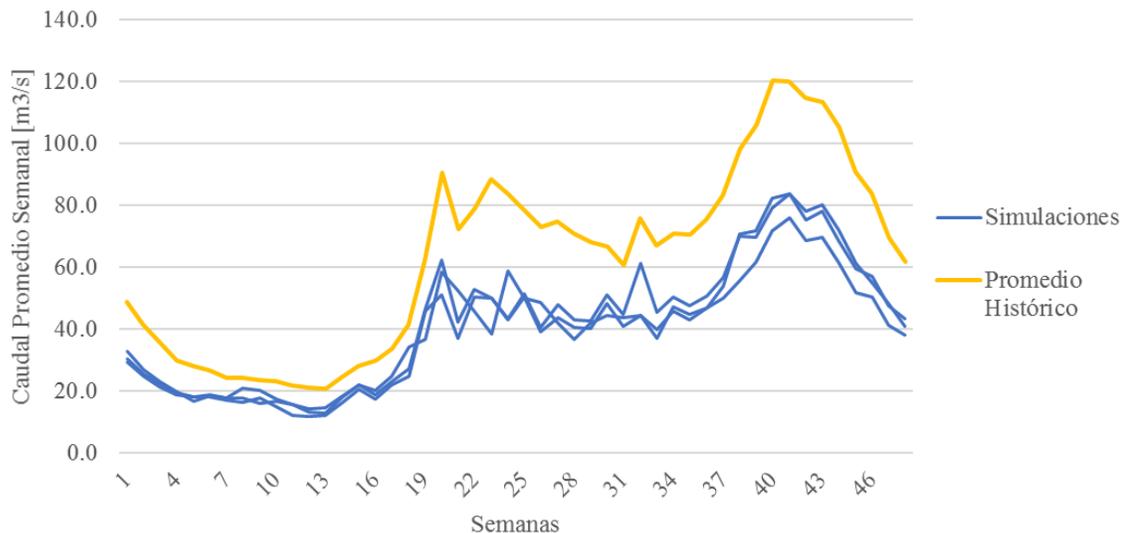
4.3. Series Sintéticas

Las series sintéticas se generaron con una longitud de 15 años para poder observar persistencias de más de 4-5 años. La Figura 4-4 muestra un promedio semanal de volúmenes afluentes todas las centrales (promedio simulación) la que da cuenta, a grandes rasgos, de la sequía modelada. Esta serie no se utiliza en ningún cálculo en particular, se presenta sólo como un resultado demostrativo para notar el orden de la sequía generada, aproximadamente con un 25% de déficit.



Figura 4-4. Volúmenes totales afluentes, promedio semanal

La Figura 4-5 muestra tres series sintéticas de afluentes al Laja, estos datos presentan la media semanal para los 15 años y de ellos se puede notar que, en promedio, los caudales semanales están siempre bajo la media histórica. La central analizada es una de las que genera mayor aporte al sistema, Central de Embalse El Toro. Se incluye, además, en la Figura 4-6, las series sintéticas completas para dicha estación donde se establece la comparación con la media histórica y con la serie de 15 años más seca de los registros, ésta última se determinó en base a la persistencia de



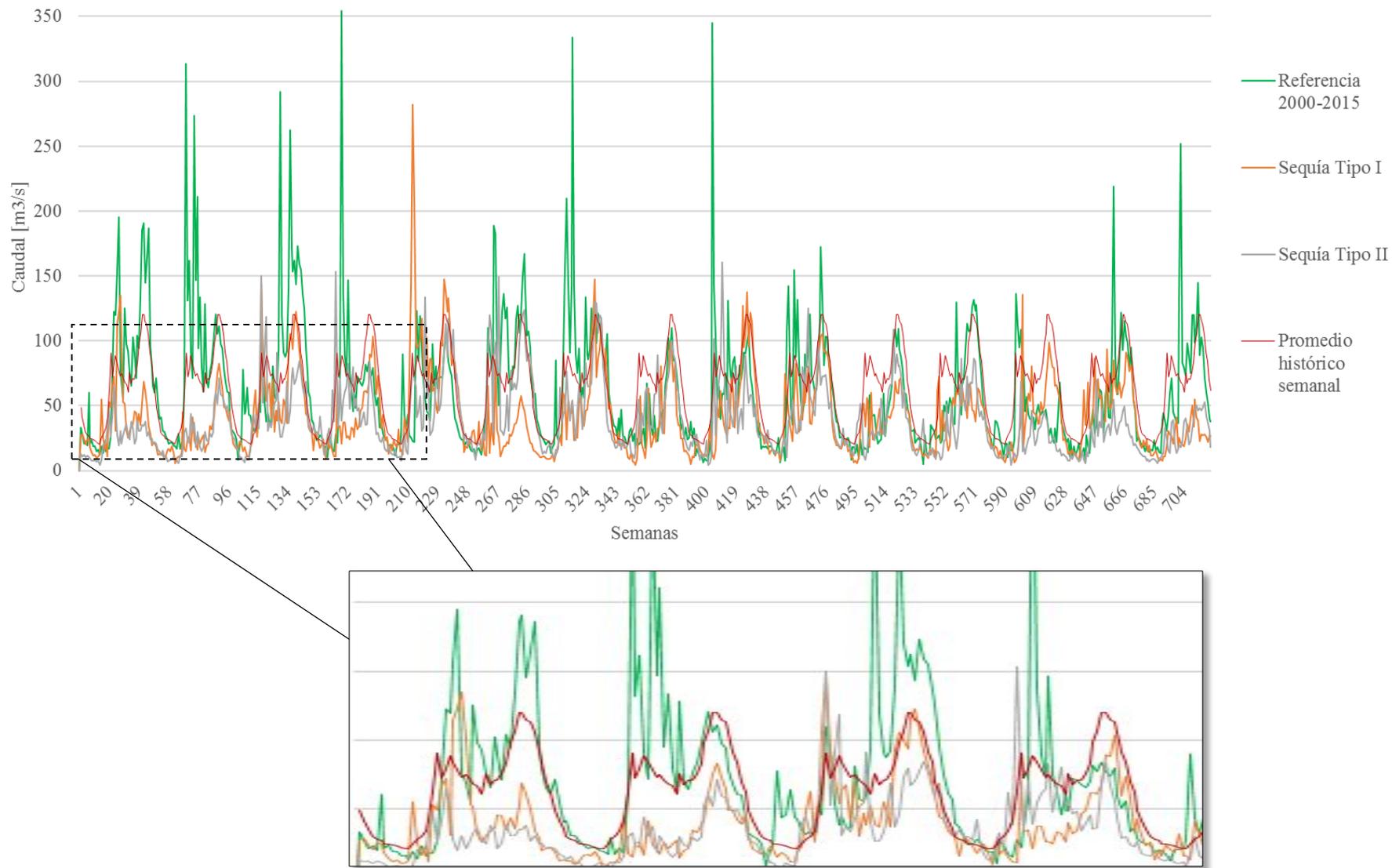


Figura 4-6. Ejemplo de Serie sintética para Estación Laja

años en sequía y la intensidad de éstas. En el caso ilustrado, dicha serie corresponde al período 2000-2015. Se puede notar en la serie sintética, que el primer tramo presenta años secos que persisten por alrededor de 6 años, además los peaks antes existentes ya no se ven reflejados en la serie generada y sólo en casos aislados se supera la media histórica. El déficit de las series anuales es del orden del 25%, por lo tanto, el modelo entrega afluentes consistentes con el comportamiento que se desea analizar.

Para llevar a cabo el análisis en el modelo eléctrico se analizaron las series sintéticas construidas en base a la descripción de estados Seco, Normal y Húmedo de la Tabla 4-2. La razón entre el promedio sintético y el histórico, permitió evaluar si se siguen las proyecciones de CR2 (2015) y, por lo tanto, si las series son representativas del fenómeno. La zona 4, por ejemplo, correspondiente a la cuenca del Río Limarí (Coquimbo), tiene en megasequía un promedio de caudales correspondiente al 30% del caudal histórico, es decir, 70% de déficit, mientras que hacia el sur el déficit oscila entre el 25 y 30%

Se construyen las series para el período 2018-2032, que se desea proyectar en el modelo eléctrico, pues desde 2018 comienza el Sistema Eléctrico Nacional, que une SIC y SING.

Las series seleccionadas definen distintos casos. A continuación, se muestran algunos de ellos, donde los gráficos de barra representan la suma de los volúmenes afluentes a todas las centrales de SIC y SING y la línea color naranja el promedio histórico de esta suma, el cual se indicó en la Tabla 4-1. La utilización de dicha suma es únicamente de referencia para notar el impacto total sobre los afluentes asociados a hidroelectricidad, los datos ingresados al modelo eléctrico se detallan en el siguiente capítulo y corresponden a caudales por estación.

- a. Sequía Tipo I: Caso de serie de caudales generados con metodología indicada, presenta una muestra bastante variable, con un déficit promedio del 25% sobre la media histórica. Las características de esta sequía son similares a la observada entre 2010 y 2015 aunque más persistente.

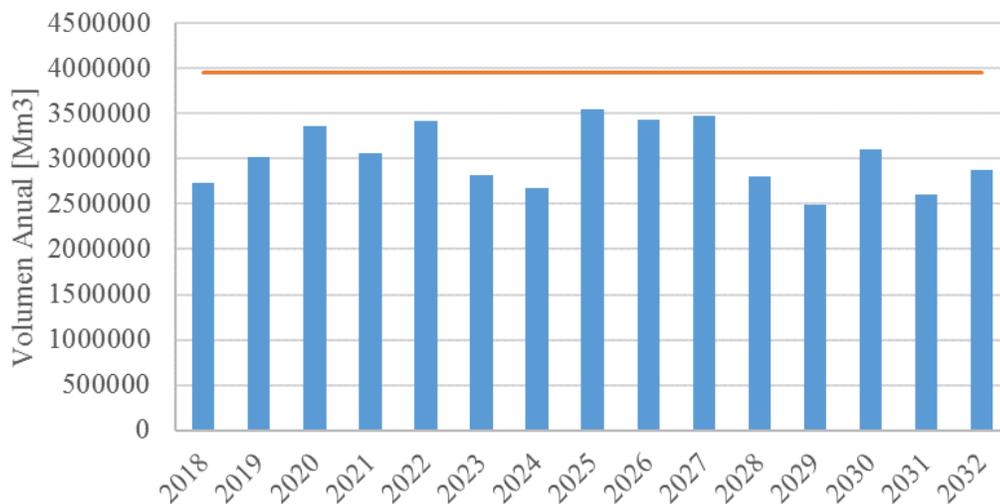


Figura 4-7. Volúmenes anuales totales, en serie sintéticas sintética.

- b. Sequía Tipo II: Caso de serie de caudales generados con metodología indicada, este representa una sequía un poco mayor a la evaluada en el caso a) pero es menos variable a través de los años. Presenta un déficit de 33% siendo incluso más intensa que la megasequía en estudio.

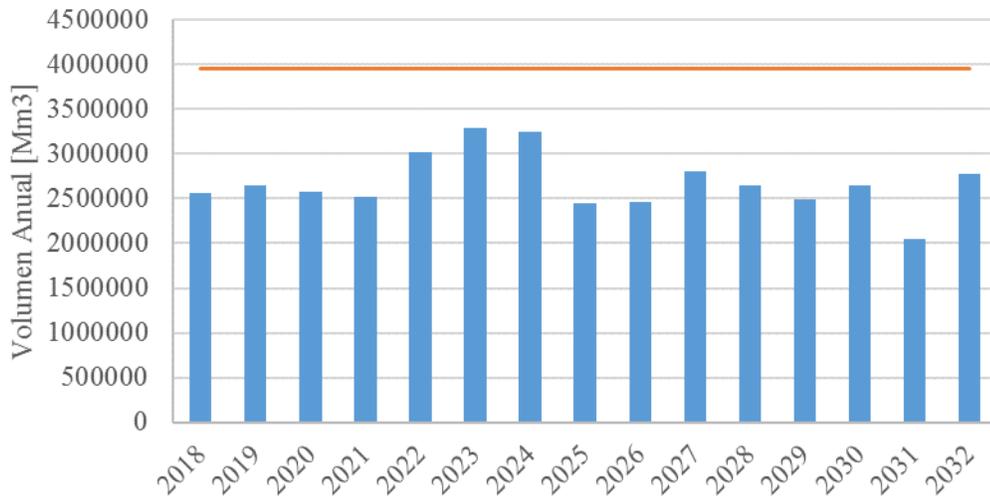


Figura 4-8. Volúmenes anuales totales, en serie sintéticas sintética

- c. Sequía prolongada con final húmedo: Serie de caudales que definen una megasequía de 14 años, seguida de un caudal húmedo modelado en base a la hidrología del año 2002. Hasta el año 14 la sequía tiene características similares a las evaluadas en el caso b)

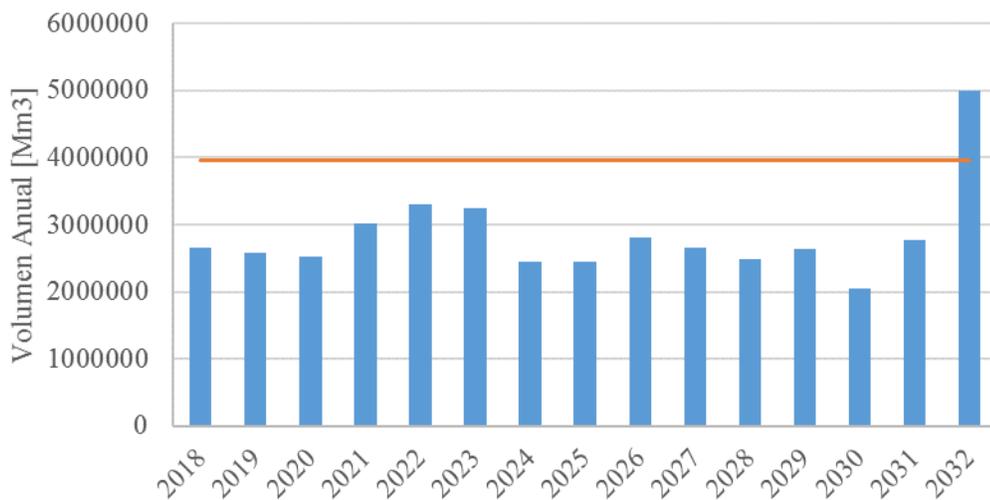


Figura 4-9. Volúmenes anuales totales, en serie que modela caudales secos, seguido por un caudal húmedo.

- d. Sequía inicial: Caso en que la serie incorpora una sequía al inicio (con las características evaluadas en este trabajo) y posteriormente las condiciones vuelven relativamente al estándar respecto a la media histórica. Este caso presenta un déficit promedio del 15%, pero los primeros 8 años, en los que se presenta la megasequía tienen un déficit mayor al 30%.

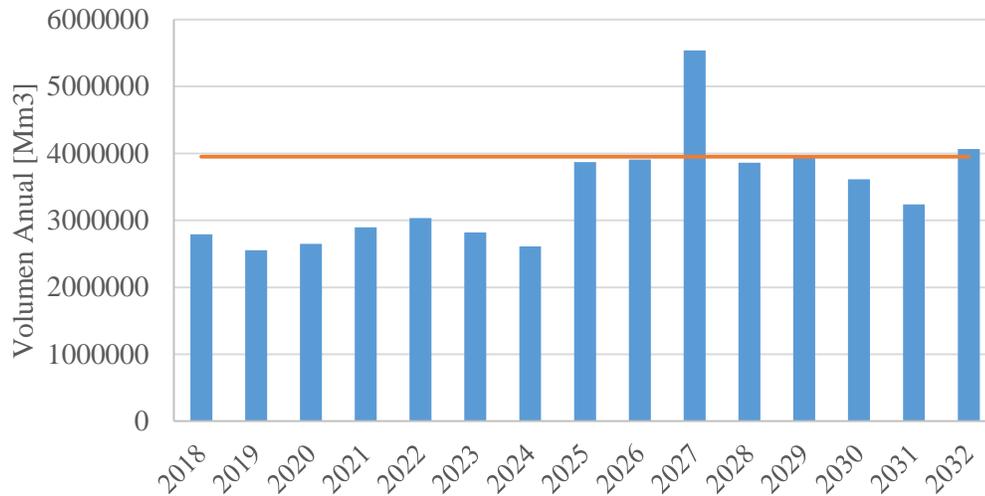


Figura 4-10. Volúmenes anuales totales, en la serie que modela sequía al inicio

- e. Sequía final: Caso que incorpora una sequía (con las características evaluadas en este trabajo) inmediatamente después de una serie con características estándares respecto a la media histórica. La megasequía en este caso alcanza un 25% de déficit, mientras que la serie completa bordea el 15%.

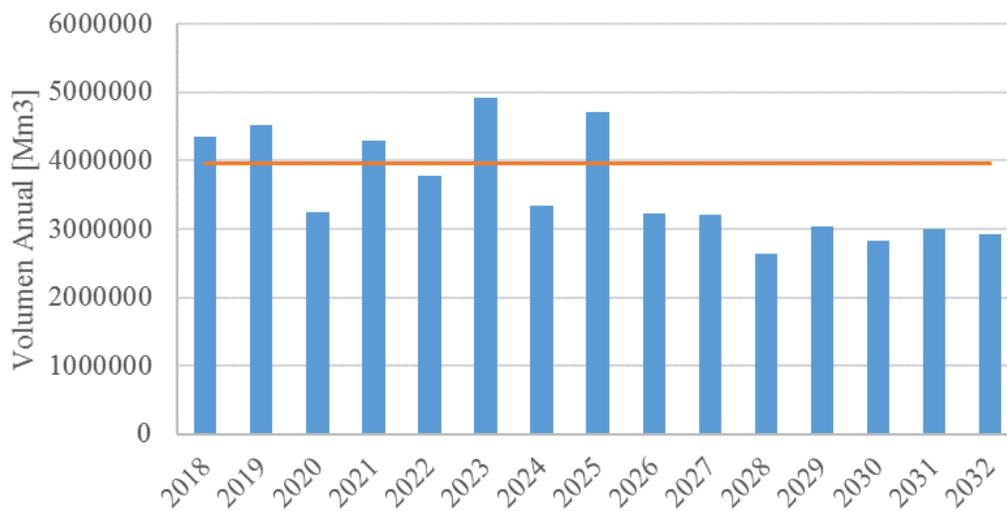


Figura 4-11. Volúmenes anuales totales, en serie que modela sequía al final

4.4. Modelo Hidroeléctrico

Las estaciones utilizadas en este análisis se presentan en la Figura 4-12

A partir de las series de caudales generadas se generan casos de estudio. Se analizarán, primero y con mayor detención, series aisladas, lo que implica que el sistema se modela como información perfecta pues conoce a priori los caudales futuros. En segundo lugar, se desarrolla la modelación estocástica, con las mismas series antes modeladas de manera individual, este caso considera cada serie equiprobable. Para el modelo determinístico se utiliza un algoritmo Default de Ameba (una serie a la vez), mientras que en el probabilístico se utiliza PLP con 20 iteraciones, el resto de las características de modelación se presentan en la Tabla 4-9:

Tabla 4-9. Características de Simulación

Variable	Característica
Modelo	De Despacho Eléctrico
Etapas	Mensuales
Bloques por etapa	6, separados en horas diurnas y nocturnas y que siguen la curva de demanda.
Start time	01-01-2018 – 00:00
End time	01-01-2033 – 24:00

Las proyecciones de demanda toman como base el año 2015, y consideran un factor de crecimiento incorporado en el software, variable por barra y que fluctúa entre 3.2% y 6%, con una media de 4%. En cuanto a los precios de combustible utilizado para energías convencionales, se utilizan datos estimados por el ministerio de energía (Comisión Nacional de Energía, 2016). El volumen de inicio para las corridas es un valor promedio, en este caso representado por datos del año 1974.

Por otro lado, el software requiere que los datos de entradas sean años calendario (enero a diciembre), y dado que los caudales se generaron como años hidrológicos, se extrae desde la serie generada (abril 2017- marzo 2033) el período correspondiente a enero 2018 – diciembre 2032, para cada escenario analizado.

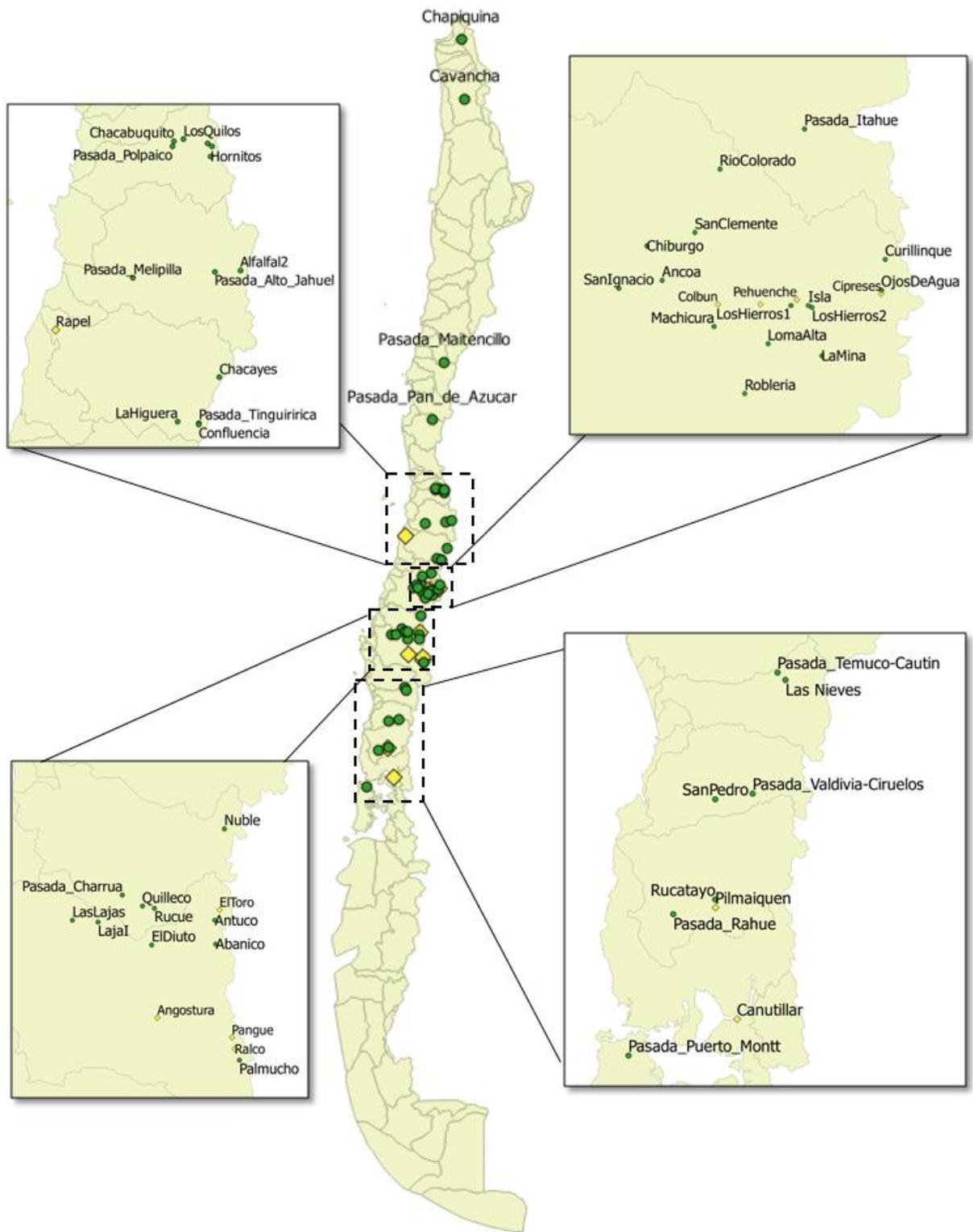


Figura 4-12. Estaciones modeladas en Ameba

Se estudiarán, además de los casos sintéticos ya mencionados, algunas series de referencia.

- a. Serie Base: este caso replica los caudales del período 1961-1975, lo que sirve de base para el estudio pues se puede notar que los volúmenes promedio se mueven en torno a la media y se presentan sequías particulares, así como años húmedos, lo que se condice con la realidad del territorio chileno promedio.

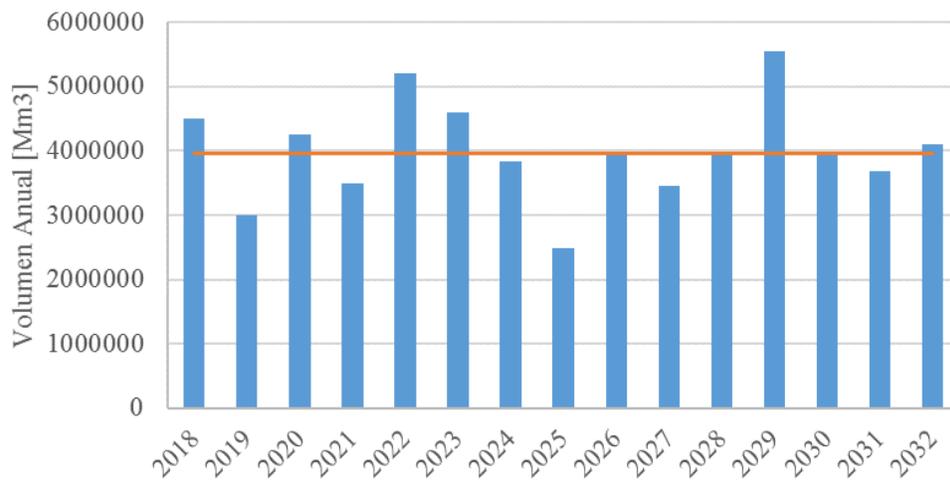


Figura 4-13. Volúmenes anuales totales del período 1961-1975

- b. Serie de megasequía real: del mismo modo que el caso base, se modela el sistema replicando la única megasequía conocida, es decir el período de 15 años que incluye 2010-2015. En la Figura 4-4 se puede notar el déficit de dicha etapa.

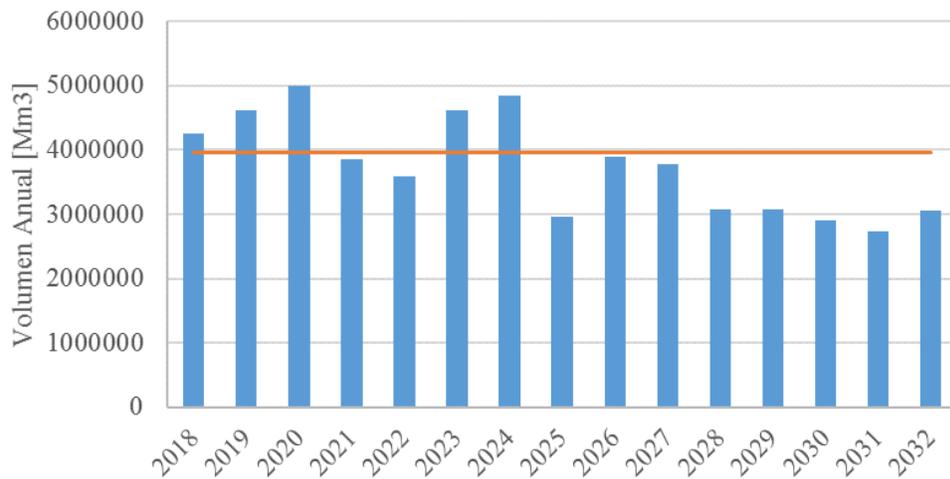


Figura 4-14. Volúmenes anuales totales período 2000-2015

En la modelación hidroeléctrica determinística y estocástica en Ameba, se agregan a los dos casos de series históricas, las primeras cinco series estudiadas antes anterior. El resumen de estos escenarios se presenta en la Figura 4-15.

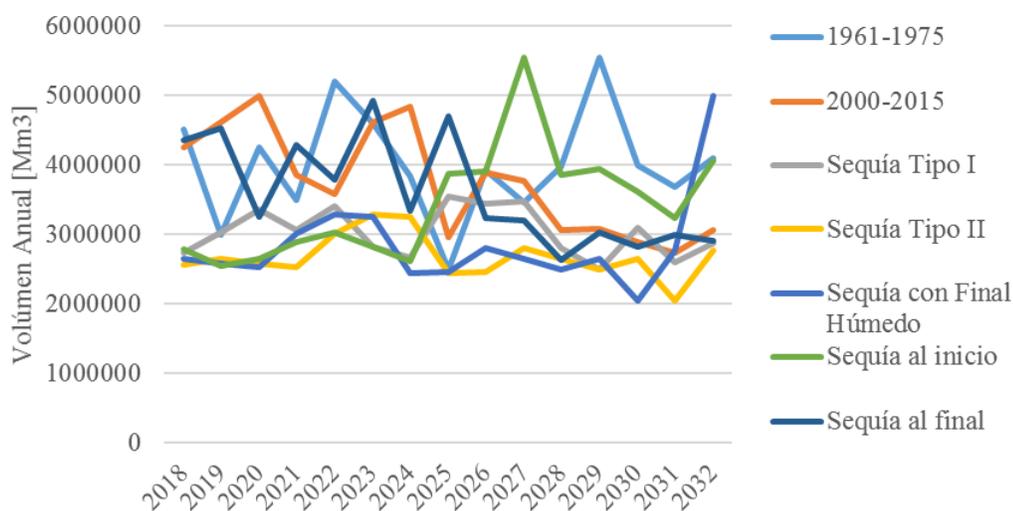


Figura 4-15. Resumen de volúmenes de los casos determinísticos, en conjunto se utilizan en modelación estocástica.

4.5. Resultados de Simulaciones de la Operación

El modelo en Ameba proyecta las demandas que se muestran en la Tabla 4-10 y a las cuales deben enfrentarse los afluentes sintéticos modelados. Para la primera parte, de análisis determinístico, se muestran los resultados de Generación anual para cada escenario, costo marginal asociado (que corresponde a un promedio anual para todas las estaciones), costos totales y volúmenes de agua embalsada anualmente en las principales centrales de Chile (se excluyen de las figuras las centrales de embalse Angostura, Melado, Pangué y Laguna Invernada por lo bajo de sus volúmenes, en las Figuras 4-16, 4-18, 4-20, 4-22, 4-24, 4-26, 4-28, se encontraban por debajo de Pilmaiquén).

Tabla 4-10. Proyección Generación al año 2032

Año	Generación [GWh/año]
2018	77150,8
2019	80510,7
2020	84708,0
2021	88035,1
2022	91782,7
2023	95384,8
2024	99567,4
2025	102922,9
2026	106730,4
2027	110420,5
2028	114658,1
2029	118523,4
2030	122361,36
2031	126690,06
2032	131710,2

- a. Período 1961-1975, se evalúan 15 años con hidrologías que tienden a ser normales, para ello se escogió el período 1961-1975. Este caso alcanza, en el año 2032 una producción hidroeléctrica equivalente 31% del total



Figura 4-16. Generación y Costos Marginales para serie que replica período 1961-1975

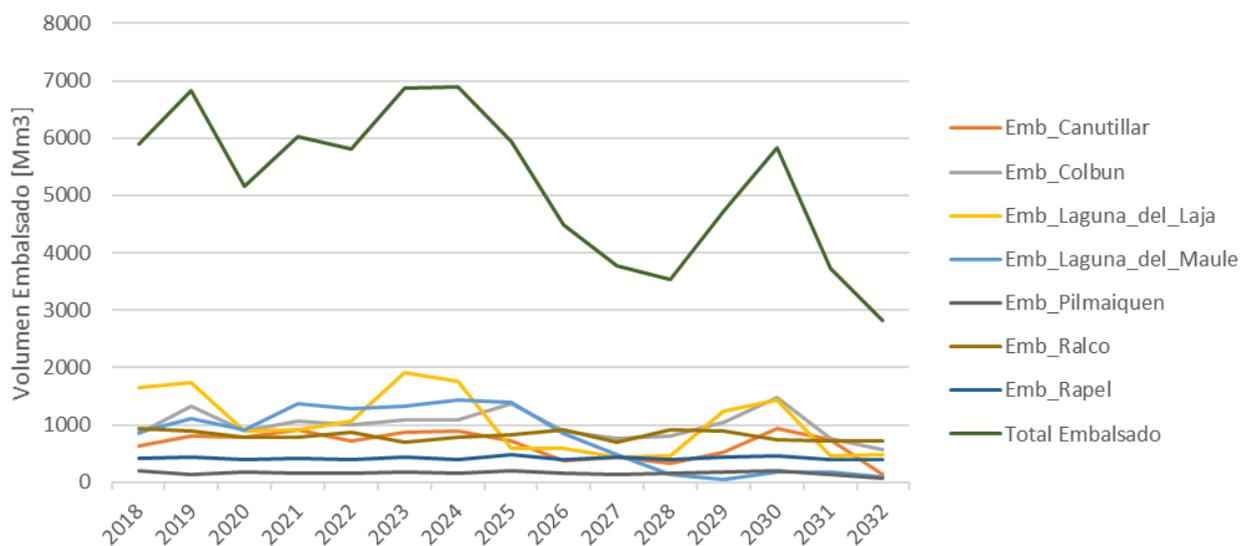


Figura 4-17. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que replica años entre 1961 y 1975

- b. Serie 2000-2015: Serie que integra el período de megasequía analizado. Alcanza al final de la serie una generación hidroeléctrica equivalente al 29% del total.

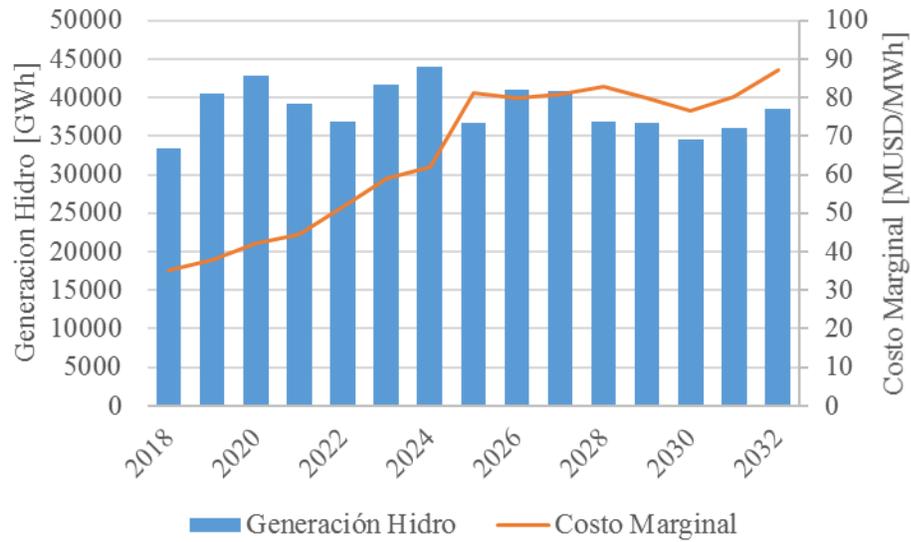


Figura 4-18. Generación y costos marginales para serie que replica los años entre 2000 y 2015

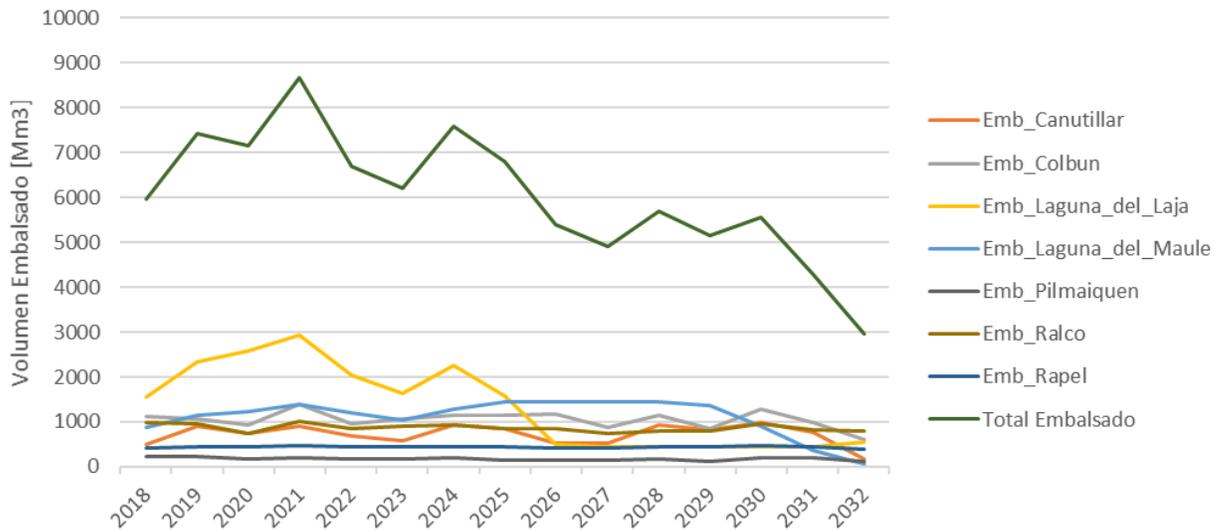


Figura 4-19. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que replica años entre 2000 y 2015.

- c. Serie Sintética: Este caso tiene una generación hidroeléctrica en 15 años, equivalente al 26% del total. Los resultados anuales se muestran en la Figura 4-20.

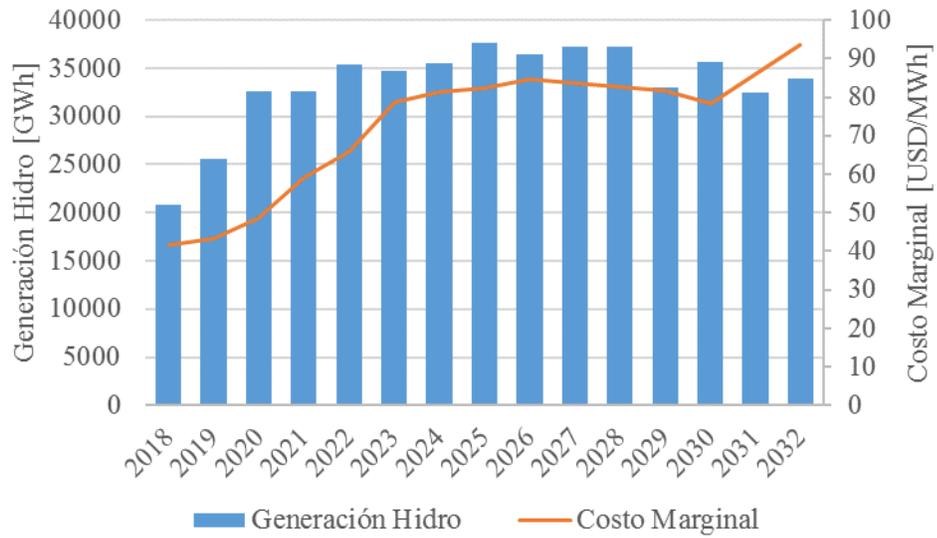


Figura 4-20. Generación y Costos Marginales para caso sintético que modela una serie seca de alta variabilidad

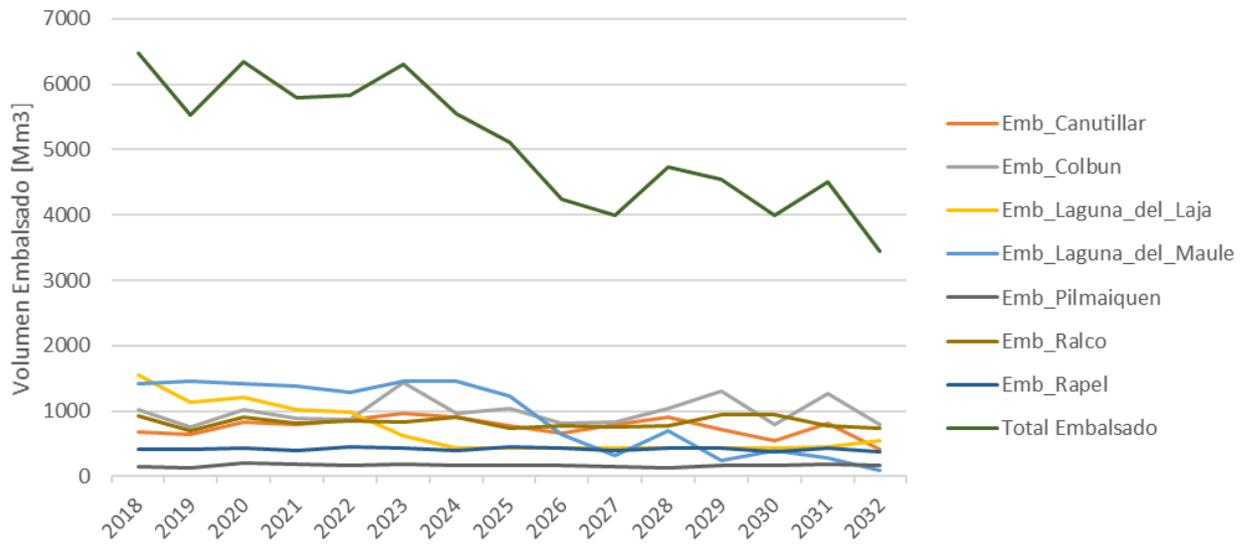


Figura 4-21. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie sintética que presenta una sequía moderada de alta variabilidad.

- d. Serie Sintética que modela una sequía agua de baja variabilidad, tiene una generación total equivalente al 24% al año 2032.

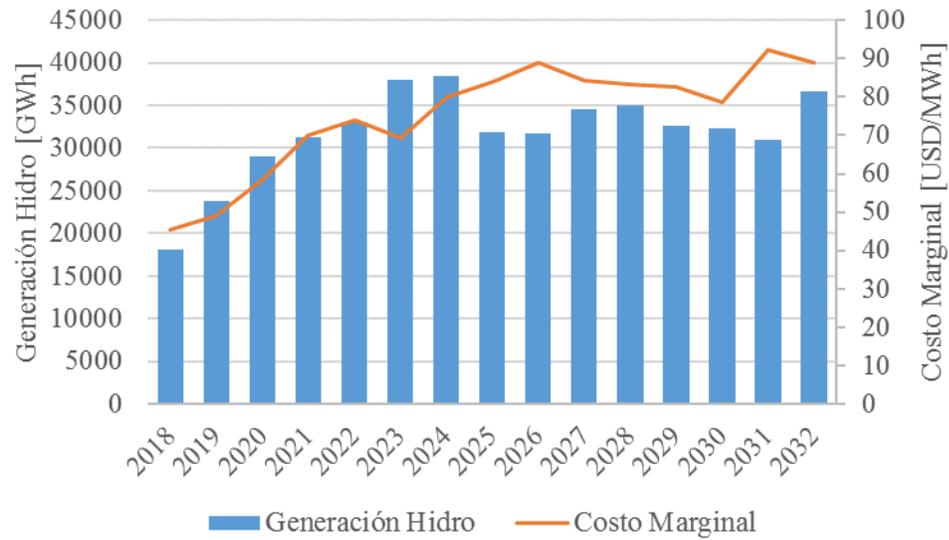


Figura 4-22. Generación y costo marginal para serie sintética de sequía agua y baja variabilidad

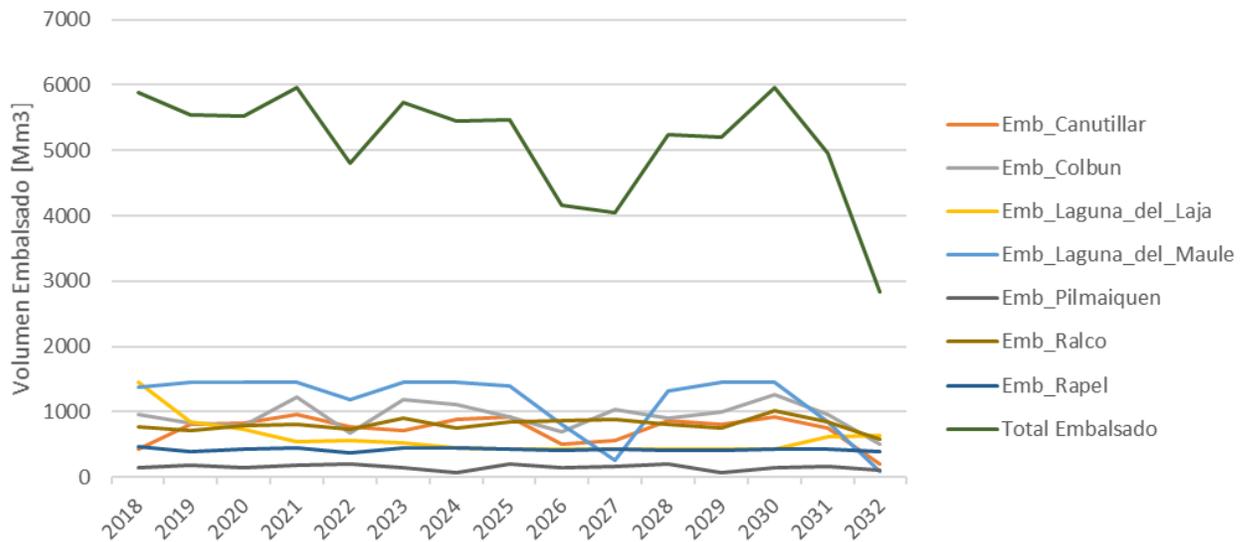


Figura 4-23. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie sintética aguda de baja variabilidad.

- e. Caudal Húmedo al final, equivalente al del año 2002. El despacho hidroeléctrico hacia el 2032 es de 36%, que es el año húmedo, sin embargo, su aporte mínimo es del orden del 24%.

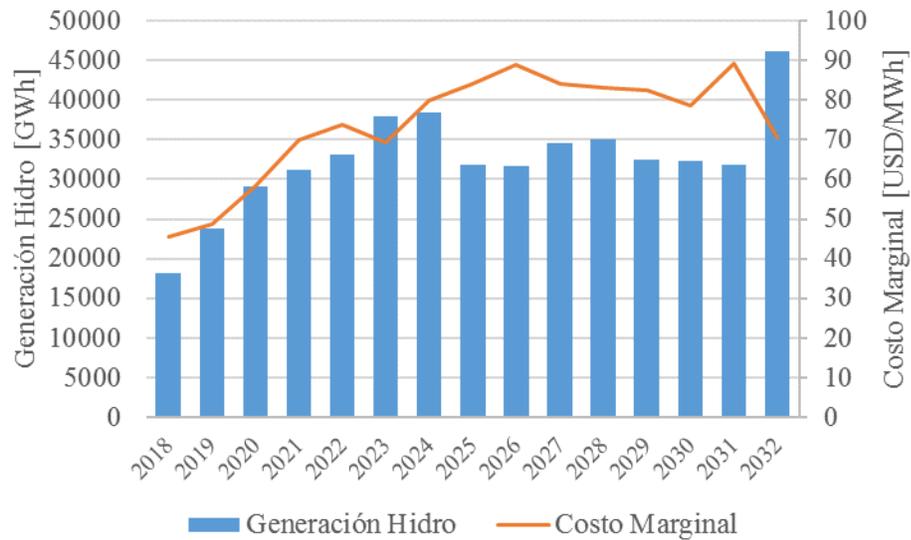


Figura 4-24. Generación y Costos Marginales para serie sintética que finaliza con un caudal más húmedo.

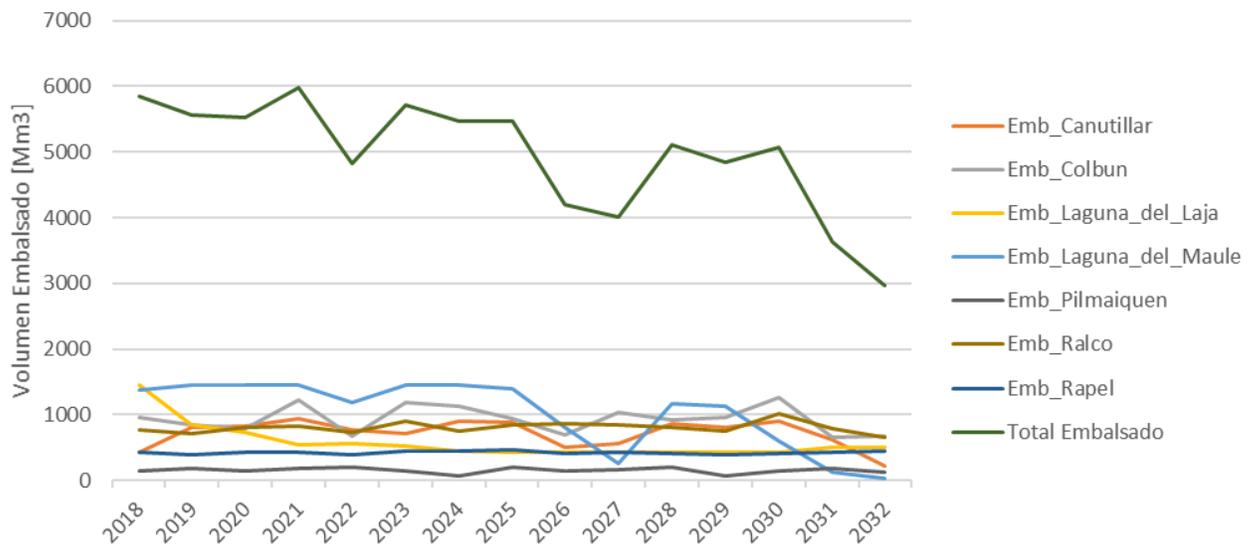


Figura 4-25. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie sintética que finaliza con un año húmedo.

f. Primera parte con sequía, el recurso hídrico entrega 25% de la generación total



Figura 4-26. Generación y Costos Marginales para serie que comienza con años de megasequía y luego se recupera levemente.

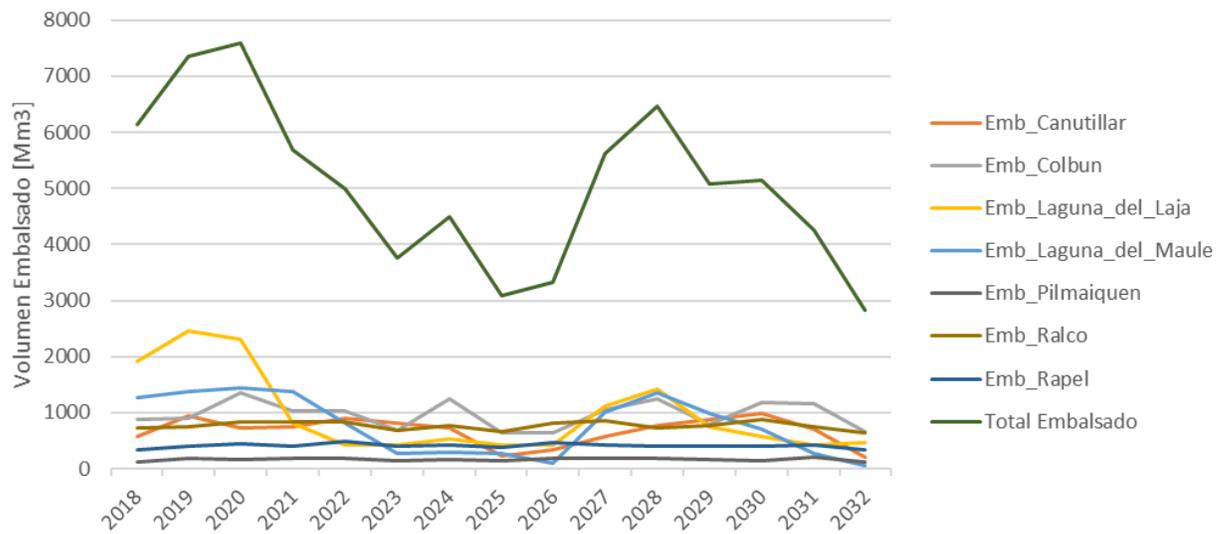


Figura 4-27. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que comienza con una megasequía y luego se recupera.

- g. Caso que comienza con caudales promedio y luego se genera un período final con megasequía, presenta 27% aporte hidroeléctrico

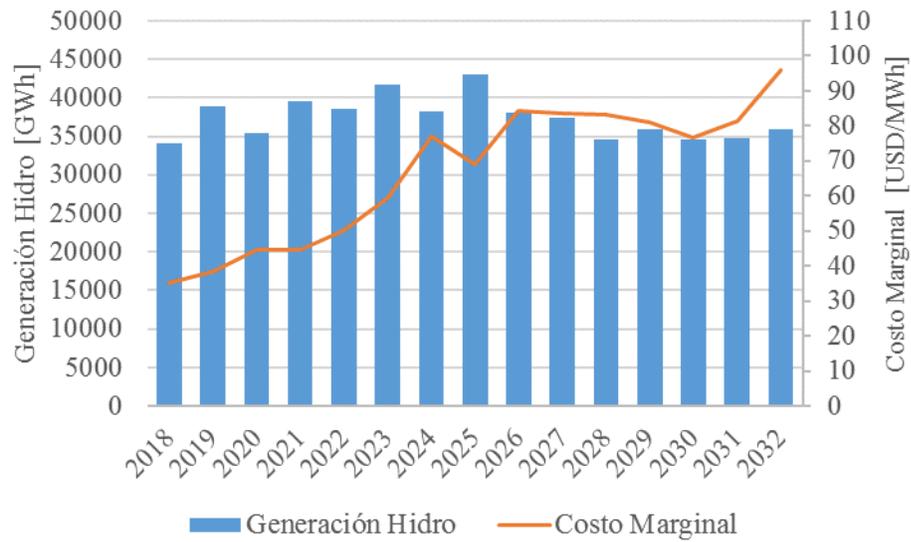


Figura 4-28. Generación y Costos Marginales asociados al caso que finaliza con una megasequía

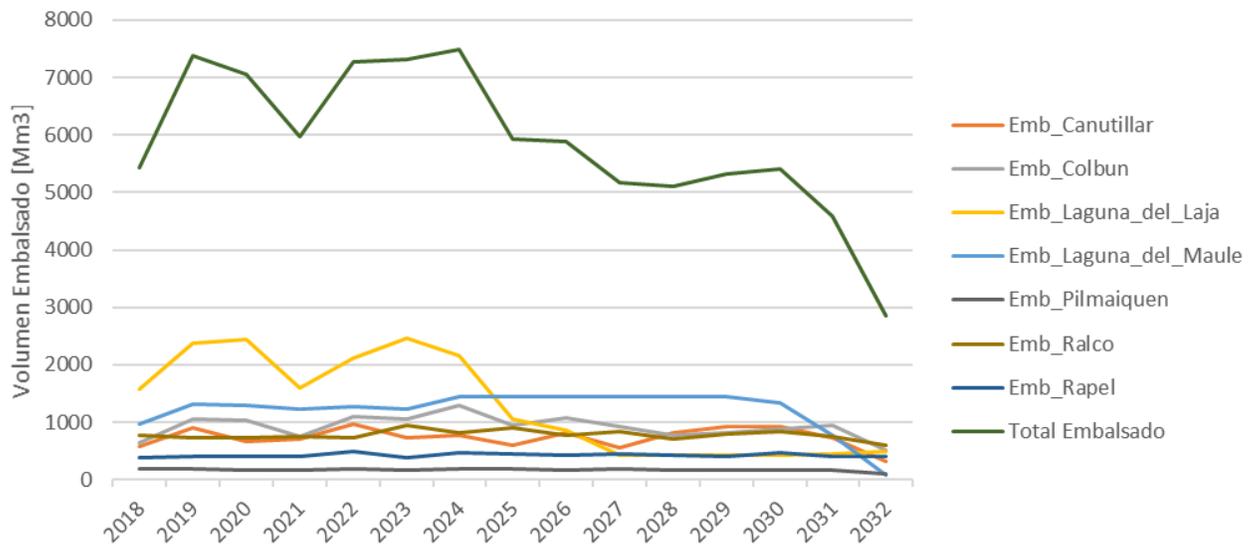


Figura 4-29. Volúmenes embalsados anuales en Principales Centrales para serie que finaliza con megasequía

A modo de resumen se presentan las figuras Figura 4-30 y Figura 4-31

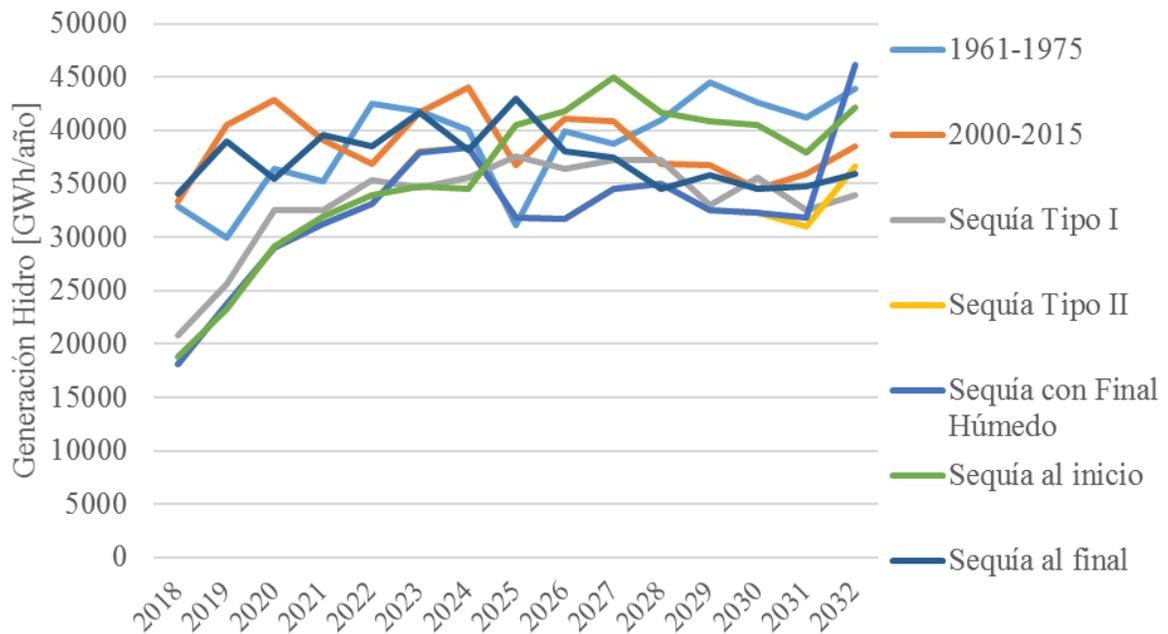


Figura 4-30. Generación Hidroeléctrica en GWh/año para las siete series analizadas como casos determinísticos.

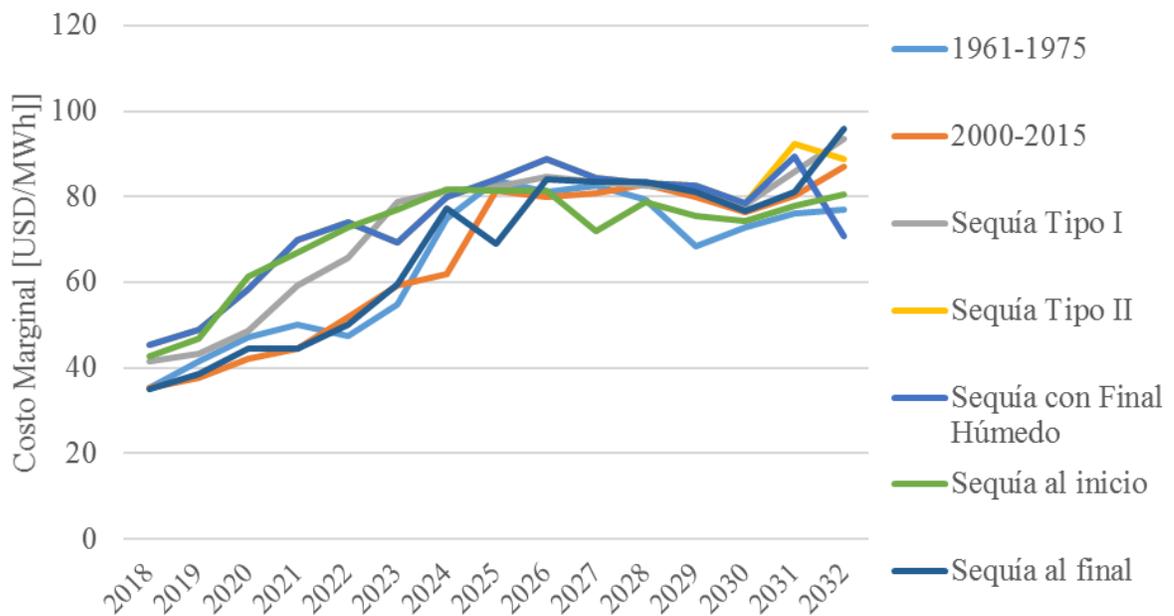


Figura 4-31. Costos Marginales en USD/MWh para las siete series analizadas como casos determinísticos.

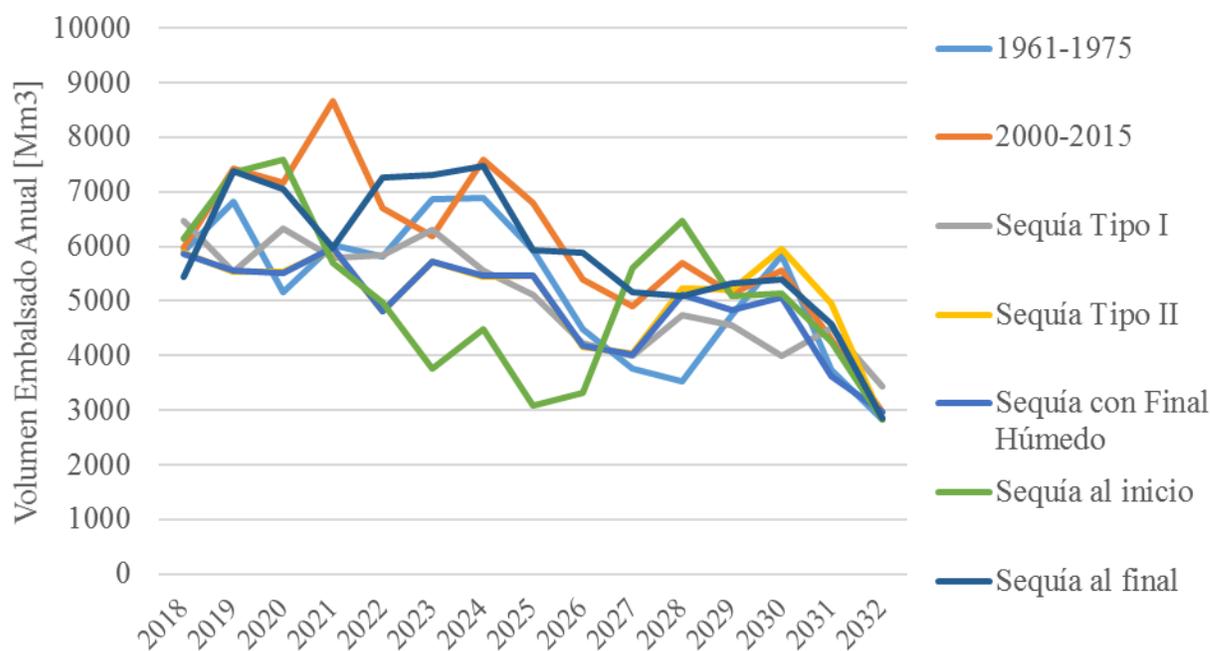


Figura 4-32. Volumen embalsado al final de cada año

La Tabla 4-11 resume los resultados anteriores, e incluye además los costos totales de generación.

Tabla 4-11. Resumen de Resultados para casos determinísticos

Caso	Máximo Costo Marginal [USD/MWh]	Mínima Generación Hidro [GWh]	Mínimo Volumen Embalsado [Mm ³]	Máximo Volumen Embalsado [Mm ³]
1961-1975	83.9	29981	2818	6887
2000-2015	87.1	33318	2967	8674
Sequía Tipo I	93.5	20831	3439	6473
Sequía tipo II	92.4	18166	2827	5960
Sequía y último año húmedo	89.3	18161	2960	5974
Sequía al inicio	81.6	18822	2835	7600
Sequía al final	95.8	34094	2857	7482

Se realiza también un caso sin información perfecta modelando de manera probabilística, los siete escenarios ya mencionados, se presentan los resultados en Figura 4-33, Figura 4-34 y Figura 4-35. La Tabla 4-12 muestra el resumen de esta simulación y permite comparar estos valores con el caso determinístico de la Tabla 4-11.

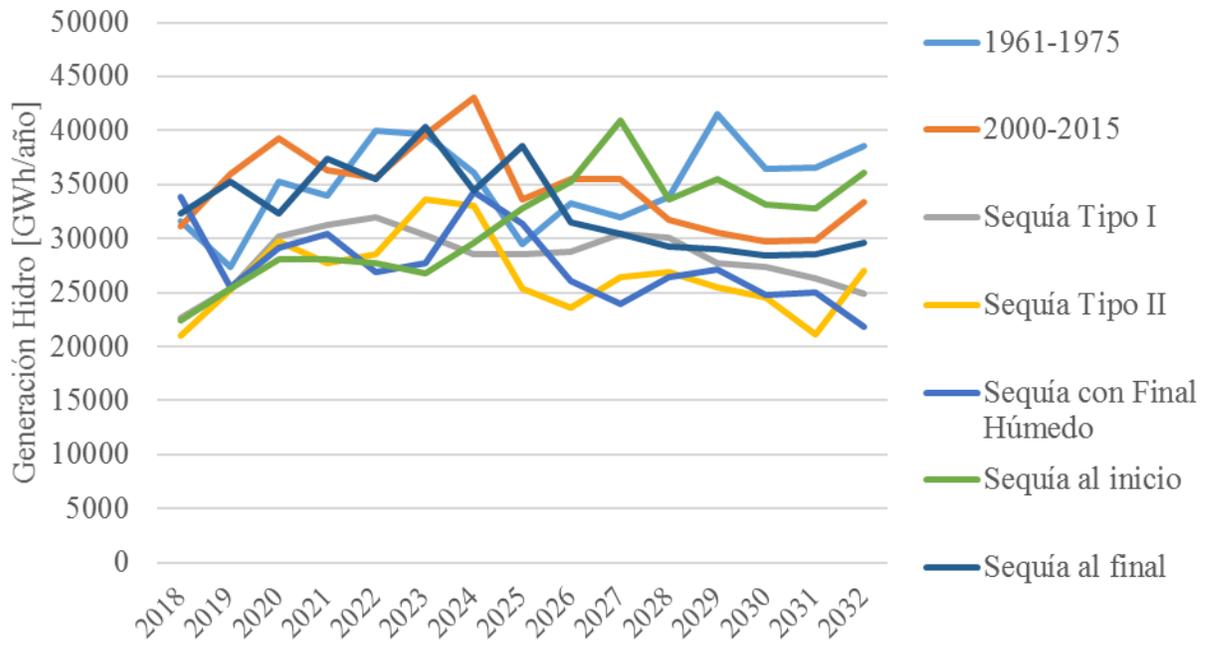


Figura 4-33. Generación hidroeléctrica por caso en análisis probabilístico.

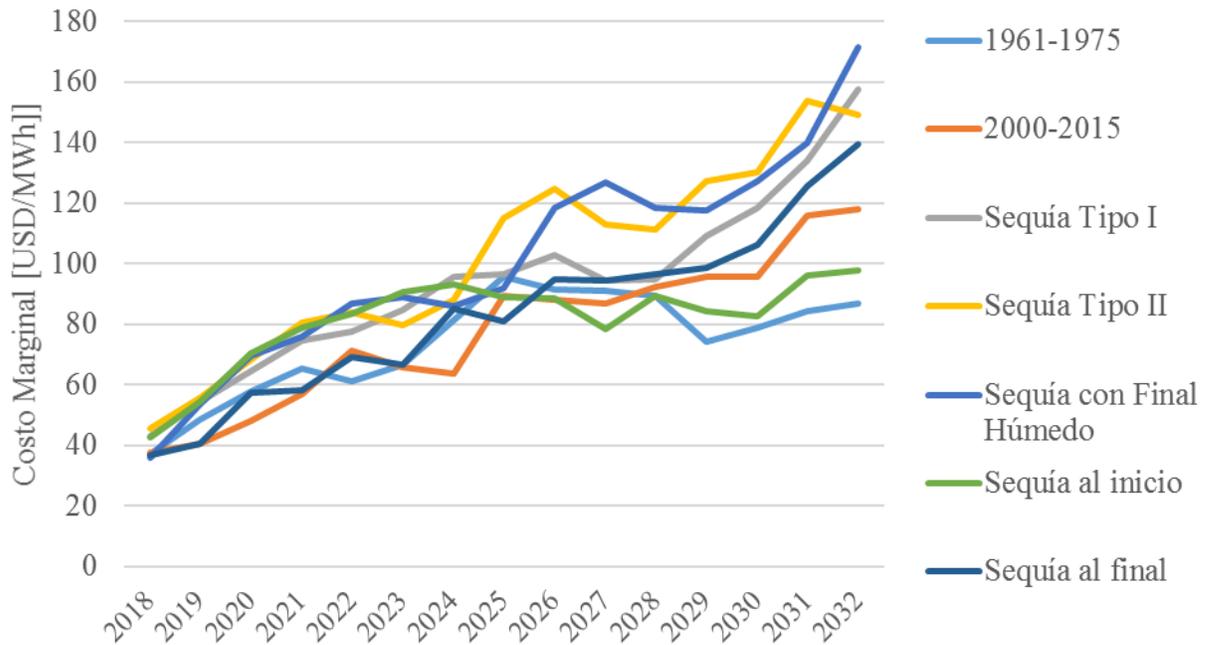


Figura 4-34. Costos marginales por caso en análisis probabilístico

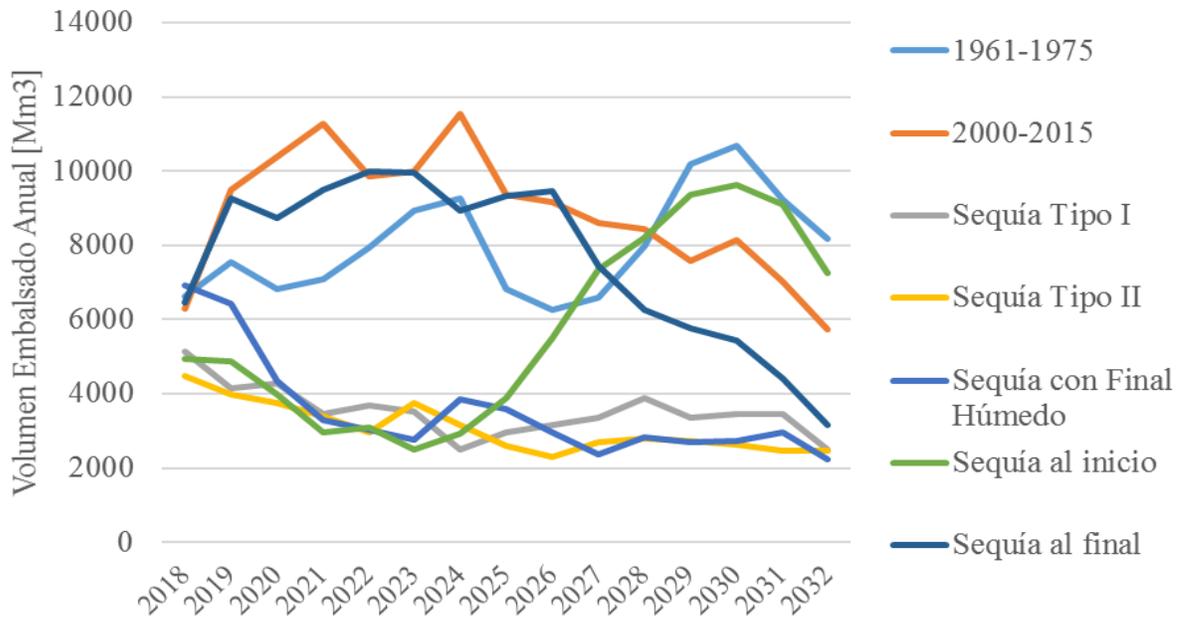


Figura 4-35. Volúmenes embalsados a fines de cada año por caso analizado de manera probabilística

Tabla 4-12. Resumen de resultados para casos estocásticos

Caso	Máximo Costo Marginal [USD/MWh]	Mínima Generación Hidro [GWh]	Mínimo Volumen Embalsado [Mm³]	Máximo Volumen Embalsado [Mm³]
1961-1975	95,8	27358	6252	10686
2000-2015	118,1	29747	5745	11556
Caso Sintético alta variabilidad	157,7	22706	2485	5137
Caso Sintético Sequía aguda	153,8	21053	2312	4463
Sequía y último año húmedo	171,3	21873	2246	6909
Sequía al inicio	98,0	22397	2498	9613
Sequía al final	139,5	28419	3145	9981

En términos de costos totales se puede observar en la Tabla 4-13 la diferencia en costos para los 15 años de estudio en caso estocástico y determinístico.

Tabla 4-13. Comparación Costos totales para caso determinístico y estocástico

Costos de Generación Total	
[MMUSD]	
Determinístico	Probabilístico
33960	34743
34910	35660
39410	39905
41030	41650
40160	41065
36020	36820
36250	37038

El detalle de todos los valores presentados puede encontrarse en la sección Anexos.

4.6. Análisis de Resultados

En primer lugar, se debe notar que en general, los costos marginales aumentan hacia el final de cada una de las series de 15 años, además la generación desde centrales hidroeléctricas tiene un aporte cada vez menor al sistema en su totalidad. Los volúmenes también tienden a disminuir, aunque esta tendencia tiene relación directa con el hecho de que no se le ha asignado valor residual al recurso hídrico luego del período en estudio.

Las series Sequía Tipo I y Sequía Tipo II, se diferencian principalmente en dos factores, la primera presenta en promedio afluentes mayores y mayor variabilidad que la segunda. De la Figura 4-20 y Figura 4-22, se puede observar que esto influye en que la generación del primer caso sea mayor pero que a su vez, los costos marginales aumenten. La menor oscilación de caudales del segundo caso, afecta en menor medida los costos marginales asociados, pero aun así los costos totales de generación son mayores.

Ahora bien, se debe notar que en una serie que posee sostenidamente años con altos déficits pero que, luego de 14 años presenta un caudal muy alto (cambiando a estado húmedo), como se muestra en Figura 4-9, entonces, en el caso determinístico, aumenta la generación hidroeléctrica y se reducen los costos asociados a ese año en particular, sin embargo, esto no cambia de manera proporcional a la variación de caudal y, de hecho los costos totales son más altos que otras alternativas. Por otro lado, la modelación probabilística para el mismo caso muestra que el costo marginal aumenta dramáticamente desde 139 USD/MWh en el año 14 (2031) a 171 USD/MWh en el año 15 (2032), alcanzando el valor más alto de las series estudiadas. La generación, permanece baja, probablemente debido a las pocas reservas de agua en sus embalses dada la probabilidad menor de tener un caudal tan alto (una en siete casos). La anticipatividad en este caso marca una gran diferencia.

Por otro lado, al modelar una sequía de alrededor de siete años seguida por un periodo de caudales promedio (Figura 4-10), se puede ver que los costos iniciales suben rápidamente en los primeros años debido al déficit hídrico, pero, a largo plazo, el sistema logra estabilizarse teniendo, después de 15 años, costos bastantes menores a las otras alternativas. Mientras que, en el caso opuesto, donde la sequía ocurre en los últimos siete años, en ambas modelaciones, estocástica y determinística, los costos son bastante más altos y la generación es menor hacia el final del período.

Respecto a los volúmenes embalsados, éstos disminuyen considerablemente a lo largo del tiempo en cada uno de los casos simulados y, en general, tienden a un mismo número, pues como ya se mencionó, el agua no tiene valor residual luego de los 15 años, por lo que el óptimo es mas o menos parecido en cada escenario. Se puede notar también que, el modelo se vuelve más conservador en modelación probabilística, conteniendo un poco más de agua, lo que es lógico considerando la no anticipatividad de esta modelación. Además, se observa que, en el caso probabilístico de sequía al inicio de la serie, el embalse tiende a llenarse hasta el año 14, previniendo años secos, por lo que en el último año queda con un volumen bastante alto al no poder liberarla, situación similar ocurre en la serie que replica los caudales de 1961-1975.

Según la simulación realizada en este trabajo, el aporte hidroeléctrico a la generación total disminuirá hasta aproximadamente un 30% en el caso base (que replica caudales 1961-1975). En los peores casos simulados, que son los sintéticos con baja variabilidad (Tipo II) y aquel que termina con un caudal húmedo, se llega hasta un 24% de aporte por parte de hidroeléctricas en el caso determinístico y 16% en el caso estocástico. Si bien se tienen en consideración nuevas fuentes de energía en el corto y mediano plazo, según los resultados obtenidos en esta memoria, es necesario cubrir entre un 7% y un 15% extra con otras energías, pues esto podría cubrirse con hidroelectricidad, si se mantuvieran condiciones promedio hacia el año 2032.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

El análisis realizado a los caudales históricos muestra que el efecto de la megasequía 2010-2015 es particularmente fuerte en la zona centro y norte del país, mientras que, hasta el momento, el sur ha seguido un comportamiento contra cíclico respecto a la zona norte, teniendo efectos mínimos comparados con el resto del país.

La utilización del método de *Fractional Gaussian Noise (FGN)*, en conjunto con cadenas de Markov para la generación de series sintéticas, se considera efectiva y de fácil manipulación, además permite la sencilla modificación de parámetros hidrológicos lo que aumenta las posibilidades de estudio, desde períodos con hidrologías húmedas o normales hasta sequías extremas como la del 2010-2015 e incluso peores. Cabe notar que se ha requerido la distribución de probabilidades, tanto para el Standard Streamflow Index como para el *Fractional Gaussian Noise*, por lo que una buena caracterización de la muestra es esencial en el proceso. Se propone, para futuros análisis, obtener caudales desde distintas fuentes, de manera de mejorar los registros del Centro de Energía, pues algunas centrales o períodos de tiempo han sido alterados. De esta manera se lograrán mejores ajustes a distribuciones normales o log-normales, evitando casos particulares como los que se mencionaron en este trabajo. Trabajar con caudales naturales requiere de una relación exacta de ellos a afluentes efectivos a centrales eléctricas, estudio complejo y fuera del alcance de esta memoria. Por otro lado, el procedimiento permite generar caudales coherentes, que cumplen con las correlaciones semanales, lo que genera una representación bastante realista en la simulación de coordinación hidrotérmica. Además, se ha establecido una correlación geográfica entre las distintas zonas definidas en esta memoria, mediante el uso de una matriz equivalente en el método FGN, esto ha permitido que las sequías sintéticas tengan relación a lo largo de Chile, lo que se considera sumamente importante en un país que se ve influenciado por hidrologías y tipos de generación notoriamente distintas según la región.

Las series sintéticas generadas son todas sequías mas intensas que la megasequía 2010-2015, pero de distinta naturaleza entre sí. Se debe notar que, respecto a los resultados de la

modelación de despacho eléctrico, el efecto económico de una sequía es menor si existe anticipatividad de las condiciones. En general, los costos marginales aumentan hacia el final de la serie, mientras que la fracción de generación hidroeléctrica sobre el total disminuye sostenidamente.

El modelo determinístico presenta un caso de información perfecta, con total anticipatividad, con lo que la generación hidroeléctrica es mayor y los costos menores al caso probabilístico. Se deben notar, los efectos negativos sobre el mercado eléctrico cuando las condiciones más probables no son las que realmente ocurren, aplicando esto tanto a caudales muy húmedos como a caudales muy secos en condiciones contrarias. Por esta razón no puede generarse el despacho eléctrico únicamente con las probabilidades históricas, sino que el sistema debe saber predecir estos fenómenos climáticos al mediano y largo plazo de manera de poder incluirlos en las modelaciones.

Por último, como se indicó en la sección de antecedentes la variación del aporte hidroeléctrico sobre la demanda energética total, ha caído desde casi un 50% hasta 45% en 2015 y, según estos resultados, disminuirá hasta aproximadamente un 30% en el caso base (que replica caudales 1961-1975), lo que implica que más de un 15% de energía comenzará a suplirse con otras fuentes aún sin megasequías, lo que tiene directa relación con el fuerte aumento previsto para la demanda. En los peores casos simulados, se llega a un 24% de aporte por parte de hidroeléctricas en el caso determinístico y 16% en el caso estocástico. Si bien se tienen en consideración nuevas fuentes de energía en el corto y mediano plazo, según los resultados obtenidos en esta memoria, el panorama respecto al caso base implica que se deben cubrir entre un 7% y un 15% de la demanda eléctrica con otras energías hacia el año 2032. Éstas son principalmente energías convencionales, como diésel y carbón, que son más caras y contaminantes. Esta última característica podría intensificar aún más la condición de megasequía, acorde a las investigaciones ya mencionadas.

BIBLIOGRAFÍA

- (CR)2, 2015. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia*. s.l.:s.n.
- Avilés, P., Olivares, M., Palma, R. & McPhee, J., 2011. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*. Santiago: Universidad de Chile.
- CDEC-SING, 2015. *Anuario 2015*. [En línea]
Available at: http://cdec2.cdec-sing.cl/html_docs/anuario2015/Espanol/index.html#4/z
- Centro de Energía, 2017. *Centro de Energía*. [En línea]
Available at: <http://centroenergia.cl/>
- Comisión Nacional de Energía, 2016. [En línea]
Available at: <https://www.cne.cl/>
- Comisión Nacional de energía, 2017. *CNE*. [En línea]
Available at: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>
- Coordinador Eléctrico Nacional, 2015. [En línea]
Available at: <https://sic.coordinadorelectrico.cl/sobre-sic/>
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods: Another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), pp. 1-26.
- García, L., Vargas, L., Rojas, M. & Valdenegro, A., 2011. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista*. Santiago de Chile: s.n.
- Harou, J. y otros, 2010. Economic consequences of optimized water management for a prolonged, severe drought in California. *Water Resources Research*, 46(5).
- Herman, J. y otros, 2016. Synthetic Drought Scenario Generation to Support Bottom-Up Water Supply Vulnerability Assessments. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(11).
- Jactel, H. y otros, 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 18(1), pp. 276-276.
- Khalili, D. y otros, 2011. Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resour Manage*, Volumen 25, pp. 1737-1757.
- Kirsch, B., Characklis, G. & Zeff, H., 2013. Evaluating the Impact of Alternative Hydro-Climatic Scenarios on Transfer Agreements: Practical Improvement for Generating Synthetic Streamflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(4), pp. 396-406.
- Mandelbrot, B. & Wallis, J., 1968. Noah, Joseph, and Operational Hydrology. *Water Resources research*, 4(5), pp. 909-918.

McKee, T., Doesken, N. & Kleist, J., 1993. The relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Eight Conference on Applied Climatology*.

Ministerio de Economía, Fomento y reconstrucción, 2008. *Decreto 291*. s.l.:s.n.

Mishra, A. & Singh, V., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hidrology*, Volumen 391, pp. 202-2016.

Noakes, D., 1985. Forecasting Monthly riverflow time series. *International Journal of forecasting*, 1(2), pp. 179-190.

Pachauri, R. & Reisinger, A., 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Vontribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, s.n.

Panu, U. & Sharma, T., 2002. Challenges in drought Research: some perspectives and future directions. *Hydrological Scienca Journal*, Volumen 47, pp. 19-30.

Rezaeianzadeh, M. & Stein, A., 2016. Drought Forecasting using Markov Chain Model and artificial Neural Networks. *Water Reour Manage*, Volumen 30, pp. 2245-2259.

Rojas, M., 2012. Estado del arte de modelos para la investigación del. *MAPS Chile*.

Rubio, E. & McPhee, J., 2010. Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952-2003. *Water Resources Research*, Volumen 46, p. W05514.

Santhi, C. y otros, 2001. Validation of the swat model o a large rwer basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Wesources Association*, 37(5), pp. 1169-1188.

SPEC Energy consulting, 2017. *Ameba*. [En línea] Available at: <http://www.spec.cl/AmebaCloud/>

SPEC Energy consulting, 2017. *SPEC*. [En línea] Available at: <http://www.spec.cl/>

Tabari, H., Zamani, R. & Rahmati, H., 2015. Markov Chains of Different Orders for Streamflow Drought Analysis. *Water Resour Manage*, Volumen 29, pp. 3441-3457.

Toro, I. & Olivares, M., 2017. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil*. Santiago: Universidad de Chile.

Troncoso, C., 2010. *Tesis para optar al Título de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Eléctrica*. Santiago: Universidad de Chile.

UN Secretariat General, 1994. *United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particular in Africa*. Paris, s.n.

Van Loon, A. y otros, 2016. Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. *Hydrology and Earth System*.

Wilhite, D. & Glantz, M., 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The role of Definitions. *Water International*, Volumen 10, pp. 111-120.

WMO, W. M. O., 1986. *Report on Drought and Countries Affected by Drought during 1974-1985*, Geneva, Switzerland: WMO.

Zelenhasic, E. & Salvai, Á., 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*, 23(1), pp. 156-168.

ANEXOS Y APÉNDICES

Anexo 1 Afluentes por Cuenca

ID	Cuenca	Central Ameba	Afluente
1	Rio San Jose	Chapiquiña	CHAPIQUIÑA
2	Pampa del Tamarugal	Cavanca	CAVANCHA Y ALTO
3	Rio Huasco	Pasada_Maitencillo	RIO_HUASCO
4	Rio Limarí	Pasada Pan de Azúcar	LA_PALOMA
			LOSMOLLES
			PUCLARO
5	Rio Aconcagua	Pasada Polpaico	SAUCEANDES
		Los Quilos	CANCOLOR
		Chacabuquito	(1)
		Blanco	CANBLANCO
		Hornitos	CANHORN
		Juncal	(1)
6	Rio Maipo	Pasada Alto Jahuel	ALFALFAL
			AUX_DEL_MAIPO
			CARENA
			COYA
			EL_LLANO
			EYZAGUIRRE
			FLORIDA
			GUAYACAN
			LAS_VERTIENTES
			LOS_BAJOS
			LOSMORROS
			MAITENES
			PUNTILLA
			QUELTEHUES
			SAUZAL_1
		SAUZAL_2	
		VOLCAN	
		Pasada_Melipilla	MALLARAUCO
		Alfalfal2	ALFALFAL_2
7	Río Rapel	Pasada Tinguiririca	EL_PASO
			SAN_ANDRES
		La Higuera	HLC_PORTILLO
			HLC_TINGUIRIRICA
		Rapel	RAPEL
			RIO_TENO
		Confluencia	HLH_AZUFRE
			HLH_TINGUIRIRICA
		Chacayes	A_CHACAYES
			CIPRESES_CHAC

Anexo 1 continuación

8	Rio Mataquito	Itahue	LIRCAY
			MARIPOSAS
			PROVIDENCIA
			PURISIMA
9	Rio Maule	LosHierros1	RÍO MELADO
		LosHierros2	(1)
		San Clemente	COLBUN
		Machicura	(1)
		San Ignacio	(1)
		Pehuenche	B_Maule
		Chiburgo	COLBUN
		Colbun	COLBUN
			CMNTronco_1
		Robleria	Rio_Melado
		Río Colorado	RIO_COLORADO
		Ancoa	ANCOA
		LaMina	LA_MINA
		Isla	B_M_Isla
		OjosDeAgua	(1)
		Curillinque	(1)
		Cipreses	CIPRESES
		LomaAlta	(1)
LosCondores	LMAULE		
10	Rio Itata	Pasada_Charrua	ALTORENAICO
			ITATA
			LLAUQUEREO
			MAMPIL
			PEUCHEN
			PICOIQUEN
		RENAICO	
		Ñuble	NUBLE
Quilleco	(1)		
Rucue	CANECOL		
11	Rio Bio	LasLajas	LAS_LAJAS
		Ralco	RALCO
		Palmucho	(1)
		Angostura	ANGOSTURA
		Pangue	PANGUE
		ElDiuto	TUCAPEL
		ElToro	ELTORO
		LajaI	LAJA_I
			TUCAPEL
		Antuco	ANTUCO
		Abanico	ABANICO

Anexo 1 continuación

12	Río Tolten	Pasada_Temuco-Cautin	ALLIPEN
			CARILAFQUEN
			EL_CANELO
			EL_MANZANO
			MAISAN
			MALALCAHUELLO
			RIO_TRUENO
		TRAIELFU	
13	Rio Valdivia	Las Nieves	LAS NIEVES
		Pasada_Valdivia-Ciruelos	PULLINQUE
		RECA	
14	Rio Bueno	SanPedro	(1)
		Pasada_Rahue	CALLAO
			CAPULLO
			DON_WALTERIO
			HIDRO_BONITO_MC1
			HIDRO_BONITO_MC2
			LICAN
			LOS_CORRALES_1
			LOS_CORRALES_2
			MUCHI
			NALCAS
		PEHUI	
PULELFU			
Rucatayo	(1)		
Pilmaiquen	PILMAIQUEN		
15	Cuencas entre Río Bueno y Río Puelo	Puerto Montt I	CANUTILLAR
			LA_ARENA
			ENSENADA
16	Isla Chiloé	Puerto Montt II	DONGO

Anexo 2. Volumen embalsado total al final de cada año

Año	Determinístico							Estocástico						
	1961-1975	2000-2015	Sequía Tipo I	Sequía Tipo II	Final Húmedo	Sequía al inicio	Sequía al final	1961-1975	2000-2015	Sequía Tipo I	Sequía Tipo II	Final Húmedo	Sequía al inicio	Sequía al final
2018	5904	5975	6473	5876	5854	6144	5432	6607	6307	5137	4463	6909	4952	6453
2019	6822	7420	5535	5537	5558	7345	7377	7531	9482	4136	3971	6436	4858	9256
2020	5166	7164	6338	5526	5515	7600	7055	6809	10395	4274	3759	4342	3974	8741
2021	6031	8674	5788	5960	5974	5694	5982	7073	11289	3448	3399	3303	2953	9486
2022	5815	6703	5829	4802	4817	4983	7273	7948	9851	3690	2943	3022	3077	9981
2023	6876	6198	6297	5730	5721	3757	7313	8937	9999	3510	3747	2766	2498	9952
2024	6887	7578	5551	5454	5468	4490	7482	9270	11556	2485	3146	3853	2910	8934
2025	5940	6803	5120	5461	5465	3087	5924	6812	9372	2962	2579	3595	3892	9345
2026	4491	5393	4232	4170	4193	3317	5887	6252	9175	3169	2312	2969	5488	9476
2027	3770	4911	3999	4053	4009	5614	5171	6598	8607	3364	2683	2348	7361	7445
2028	3538	5693	4734	5240	5110	6475	5097	7975	8428	3897	2795	2840	8205	6257
2029	4737	5145	4551	5204	4845	5085	5325	10180	7563	3347	2742	2709	9357	5775
2030	5836	5552	3994	5960	5070	5142	5399	10686	8131	3441	2640	2729	9613	5425
2031	3729	4299	4501	4956	3625	4259	4576	9230	7032	3466	2459	2945	9111	4410
2032	2818	2967	3439	2827	2960	2835	2857	8183	5745	2487	2469	2246	7238	3145

Anexo 3. Costos Marginales Promedio por barra y año

Año	Determinístico							Estocástico						
	1961-1975	2000-2015	Sequía Tipo I	Sequía Tipo II	Final Húmedo	Sequía al inicio	Sequía al final	1961-1975	2000-2015	Sequía Tipo I	Sequía Tipo II	Final Húmedo	Sequía al inicio	Sequía al final
2018	35,2	35,2	41,5	45,5	45,4	42,7	35,2	37,3	37,5	42,9	45,6	36,1	42,6	36,9
2019	41,6	37,7	43,4	49,0	48,9	46,9	38,4	48,6	40,5	54,4	55,8	53,4	54,4	40,7
2020	47,2	42,0	48,5	58,5	58,4	61,2	44,4	57,8	48,1	64,6	68,5	69,6	70,6	57,3
2021	50,1	44,6	59,3	69,8	69,8	67,0	44,5	65,4	56,9	74,7	80,4	75,8	78,8	58,1
2022	47,3	51,9	65,7	73,9	73,9	73,0	50,0	61,4	71,3	77,7	83,8	86,7	83,5	69,0
2023	54,8	59,2	78,7	69,2	69,2	76,9	59,6	66,6	65,8	84,8	79,6	89,0	90,7	66,7
2024	74,9	61,9	81,4	80,0	80,0	81,6	77,2	81,2	63,8	95,6	88,1	85,9	93,0	85,0
2025	83,9	81,3	82,2	84,0	84,0	81,4	69,0	95,8	89,2	96,4	114,9	91,8	89,1	81,2
2026	81,0	79,8	84,8	88,9	88,9	81,5	84,1	91,5	88,0	102,9	125,0	118,7	88,6	95,1
2027	82,5	81,0	83,5	84,2	84,2	72,0	83,4	91,0	86,7	94,6	113,1	127,1	78,4	94,3
2028	79,3	83,0	82,6	83,3	83,3	78,6	83,4	89,5	92,5	94,8	111,3	118,3	89,2	96,5
2029	68,5	79,9	81,8	82,6	82,6	75,4	81,0	74,2	95,6	109,1	127,5	117,8	84,2	98,7
2030	72,7	76,4	78,2	78,6	78,5	74,4	76,8	78,7	95,5	118,4	130,4	127,4	82,7	106,2
2031	76,2	80,2	86,0	92,4	89,3	77,8	81,2	84,3	116,0	134,1	153,8	139,8	96,0	125,6
2032	76,8	87,1	93,5	88,8	70,6	80,5	95,8	87,0	118,1	157,7	149,1	171,3	98,0	139,5

Anexo 4. Generación Hidroeléctrica Total

Año	Determinístico							Estocástico						
	1961-1975	2000-2015	Sequía Tipo I	Sequía Tipo II	Final Húmedo	Sequía al inicio	Sequía al final	1961-1975	2000-2015	Sequía Tipo I	Sequía Tipo II	Final Húmedo	Sequía al inicio	Sequía al final
2018	32934	33318	20831	18166	18161	18822	34094	31585	31115	22706	21053	33880	22397	32288
2019	29981	40456	25634	23764	23749	23322	38960	27358	36010	25314	25238	25496	25346	35226
2020	36433	42891	32572	29071	29061	29158	35461	35276	39256	30249	29723	29154	28126	32272
2021	35235	39136	32580	31276	31278	31982	39557	33923	36278	31305	27674	30491	28109	37382
2022	42480	36914	35389	33075	33068	33979	38503	39930	35647	31942	28545	26894	27737	35500
2023	41811	41743	34667	38000	37989	34725	41698	39613	39674	30370	33589	27719	26783	40281
2024	40061	44019	35544	38421	38421	34555	38197	36081	43062	28541	33053	34340	29624	34460
2025	31085	36771	37565	31873	31873	40454	43023	29504	33609	28562	25326	31369	32786	38553
2026	39933	41053	36459	31690	31692	41810	38084	33277	35520	28830	23576	26022	35260	31447
2027	38749	40904	37286	34562	34561	44912	37461	31936	35493	30434	26390	24001	40912	30423
2028	40935	36925	37194	35031	35030	41707	34561	33886	31696	30040	26892	26477	33628	29296
2029	44460	36743	32999	32565	32562	40889	35871	41523	30575	27779	25458	27117	35498	29025
2030	42643	34565	35608	32325	32357	40499	34545	36434	29747	27368	24565	24837	33158	28419
2031	41173	35992	32533	31038	31818	37940	34737	36555	29795	26343	21118	25031	32774	28565
2032	43944	38559	33946	36633	46181	42211	35930	38583	33374	24841	27055	21873	36133	29621