



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**“PROYECCIONES DE DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO
EN LA CUENCA ALTA DEL MAIPO, BAJO ESCENARIOS RECIENTES
DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ROSARIO SERRANO BUSTOS

PROFESORA GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JAMES MCPHEE TORRES

MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2014

RESUMEN

En el último siglo se han presentados alzas sostenidas en las temperaturas medias globales, producto del aumento en la emisión de los gases de efecto invernadero, debido al desarrollo social y consecuente aumento de la población a nivel mundial. Recientemente se han publicado algunos resultados de la fase 5 del proyecto de comparación de modelos acoplados, CMIP5, en el cual se ha instado a que las instituciones mejoren los modelos de circulación global, GCM, y que entreguen no sólo una serie meteorológica temporal, sino un conjunto de series alternativas. Además se han definido escenarios basados en distintas consideraciones de patrones de concentración representativos, RCP, que consideran forzantes radiativas fijas hacia el año 2100. Debido a la importancia del recurso hídrico para el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Santiago y a la presencia de variados proyectos hidroeléctricos de centrales de pasada, la zona del río Maipo es considerada vulnerable frente a los cambios climáticos que podrían ocurrir, por lo que se pretende estimar los efectos que estos tendrían en la hidrología de la cuenca alta del Maipo, para el período 2040-2070.

Para realizar el estudio, se analizarán los modelos GCM que proveen la información meteorológica para la zona y se contrastarán sus resultados con las observaciones existentes en las estaciones meteorológicas y así seleccionar aquel que se estime más adecuado por mantener en el período de línea base las características climáticas de la región. Se utilizarán los resultados del GCM seleccionado, para proyectar las condiciones climáticas futuras en la zona, para los escenarios extremos. Para realizar el estudio, se analizaron los modelos GCM que proveen la información meteorológica para la zona y se contrastaron sus resultados con las observaciones existentes en las estaciones meteorológicas y así seleccionar aque que se estime más adecuado por mantener en el período de línea base las características climáticas de la región. Se utilizarán los resultados del GCM seleccionado para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5, que corresponden al con menor y mayor nivel de radiación solar respectivamente. Los diez conjuntos de proyecciones de cada escenario se utilizaron como entrada al modelo del software de planificación hidrológica WEAP, con el que se obtuvieron diferentes proyecciones de los recursos hídricos en al menos tres cuencas de la parte alta el río Maipo.

Con el resultado de este estudio se espera obtuvo la proyección en la disponibilidad del recurso hídrico en el período antes señalado, las variaciones en la hidrología y la respectiva incertidumbre asociada a cada escenario como también aquella asociada a los escenarios susceptibles de ocurrir. Siendo el cambio más notorio el paso de un régimen netamente nival a uno mixto nivo-pluvial en todas las cuencas.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quisiera agradecer a mi familia, por estar siempre presentes, apoyarme y respaldarme en mis decisiones, por más descabelladas que parezcan (por ejemplo, estudiar ingeniería), especialmente mis padres que se la jugaron para que viviera cómoda y segura en Santiago. Mis hermanas y mi hermano, mi nana la Tota que está en mi vida desde que nací y a Vicentín con la Javi mis sobrinos lindos.

También quiero agradecer a mis amigos y amigas, tanto aquellos que se mantuvieron de mi vida en Chillán (especialmente IV medio DSCH: Gabi, Coco, Aldo, Chanta querido), como las amistades que forjé acá en Santiago y los que llegaron a mí por diversos motivos. Dentro de los personajes santiaguinos destacables que puedo nombrar (sin desmerecer a los no nombrados, claramente me faltaran muchos), los chicos vacile de plan común, Leti, Nico, Chelo, Pablito, Joaco, Dani, Coni, Juani (nunca olvidaré Río 2013, pieza pudú), Mosca, Nicoso. El grupo de los ovallinos (Sabu bu bu, Monea y Jobito), los chicos y chicas de hidráulica, especialmente los más partners Pollito, Viqui, Rolo, Diego, Jano, Balbo, Seba, Pauli, Peglo....en fin muchos que pasaron y están en mi vida Bochefiana aún.

No podría olvidarme de agradecer a los profes (particularmente a la profe Xime, por apoyarme en mi memoria) y secres de la U que me enseñaron, guiaron y apoyaron en mi paso, un tanto despistado, por la universidad (gracias Jaqui por ponerme al tanto de lo que está pasando y como hacer las cosas!)

Por otro lado, no podría dejar de agradecer a todos los que forman parte de otro lado de mi vida, en el esquí y la bici, principalmente en la terma grandiosa que tanto me ha enseñado y entregado, lugar de muchísima energía donde me siento en casa. Todos mis amigos que pertenecen a esa montaña, en invierno, verano o ambas. Dentro de éste ámbito conocí una gran amiga, Shaki – Ale – Pachamama Fuentes, le agradezco por estar ahí en todas mis locuras. También a muchos otros que he conocido aquí, como Pelusa, Dani, Piera, Pancha, Cote, Peke, Caraeloco, Andrew, etc.

Finalmente, agradecer a mi casa acá en Santiago, a todos mis Naranjos por ser un gran apoyo y una linda familia no convencional, incluidos Parlante y Brinco.

¡¡En fin, muchas gracias a todos los que han contribuido y formado parte en mis 25 vueltas por el Sol...Que empiece la fiesta!!

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	14
1.1Motivación.....	14
1.2Objetivos.....	15
1.2.1General.....	15
1.2.2Específicos:.....	15
1.3Metodología.....	15
1.4Resultados esperados.....	16
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
2.1Cambio Climático.....	17
2.2 Escenarios de cambio climático.....	18
2.3 Modelación climática: Modelos de circulación general.....	20
2.3.1 Generalidades.....	20
2.3.2Calibración y validación de los modelos.....	22
2.3.3 Análisis estadístico de proyecciones de variables meteorológicas.....	22
2.4 Modelaciónhidrológica.....	23
2.4.1 Generalidades del modelo WEAP: Water Evaluation and Planning.....	23
2.4.2 Variables involucradas.....	24
2.4.3 Validación del modelo.....	27

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	28
3.1 Cuenca del Maipo	28
3.2 Cuenca Maipo en las Melosas	31
3.3 Cuenca Volcán en los Queltehues	32
3.4 Cuenca Afluente embalse el Yeso	33
CAPÍTULO IV: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS	35
4.1 Control fluviométrico	36
4.2 Precipitación	38
4.3 Temperatura.....	40
4.4 Viento	42
4.3 Glaciares	43
4.4 Nubosidad.....	44
CAPÍTULO V: MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	45
5.1 Resultados de la calibración	48
5.2 Resultados Validación	53
CAPÍTULO VI: ELECCIÓN Y ESCALADO DE RESULTADOS DEL MODELO CLIMÁTICO	56
6.1 Especificaciones Mk-3.6	57
6.2 Escalado de las variables meteorológicas.....	57
6.2.1 Escalado espacial	57

6.2.2 Escalado temporal	58
6.3 Análisis de proyecciones meteorológicas escaladas.....	60
6.3.1 Temperatura	60
6.3.2 Precipitación	66
CAPÍTULO VII: PROYECCIONES DE CAUDAL, PERÍODO 2040 A 207074	
7.1 Proyecciones de Caudales	74
7.1.1 Escenario RCP 2.6	75
7.1.2 Escenario RCP 8.5	83
7.2 Análisis y comparación entre escenarios.....	90
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	95
IX. BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXO 1: Funciones de Transferencia en Escalado de Forzantes	104
ANEXO 2: Resultados Test F-Fischer para selección comportamientos modales en precipitación.....	117
ANEXO 3: Proyecciones de Caudales por WEAP, ambos escenarios	119
ANEXO 4: Esquema centrales proyectadas y existentes, proyecto Alto Maipo121	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variación observada desde: a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante Marzo Abril. Fuente: IPCC (2007).	17
Figura 2: Procesos naturales y antropogénicos de mayor importancia e influencia en el sistema climático. Adaptado de Mosset <i>al</i> (2010).....	18
Figura 3: Calentamiento global según escenarios RCP. El valor medio de cada escenario se muestra en las líneas gruesas de color, mientras que las zonas sombreadas indican desviación estándar. Adaptado de Knutti et al. (2012).....	20
Figura 4: Esquema de los GCM. Adaptado de Viner (1998).	22
Figura 5: Elementos hidrológicos modelados. Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía	25
Figura 6: Delimitación de las cuencas en estudio.....	29
Figura 7: Mapa Cuencas y sus alrededores, Fuente: Google Earth	29
Figura 8: Usos de suelo en la cuenca alta del Maipo.....	31
Figura 9. Curva variación estacional Maipo en las Melosas	32
Figura 10. Curva variación estacional Volcán en los Queltehues	33
Figura 11. Curva variación estacional Afluente embalse el Yeso	34
Figura 12. Ejemplo ajuste gráfico de gradiente de Precipitación logarítmico vs altura, a nivel mensual.....	39
Figura 13: Esquema conceptual modelo WEAP	47
Figura 14. Hidrogramas calibración MELM, AEY, VEQ.....	50
Figura 15. Curvas de duración calibración MELM, AEY, VEQ	51

Figura 16. Evapotranspiración bandas bajas vs Pirque	52
Figura 17. Altura de nieve en la banda alta de calibración, todas las cuencas.	53
Figura 18. Hidrogramas validación MELM, VEQ, AEY.....	54
Figura 19. Curvas de duración, validación MELM, VEQ, AEY.....	55
Figura 20. Cuadrante correspondiente a estación Pirque. NO corresponde al vértice noroeste del cuadrante, NE al noreste, SO al suroeste y SE al sureste. Fuente: Google Earth.....	58
Figura 21. Escalado temporal Enero serie 2.....	59
Figura 22. Escalado temporal Mayo serie 5.....	59
Figura 23. Curvas duración temperatura pre escalado temporal.....	60
Figura 24. Curvas duración temperatura post escalado temporal.....	61
Figura 25. Escalado de datos históricos de temperatura. Línea Base.....	62
Figura 26. Temperatura promedio anual RCP 2.6 vs temperatura media en Pirque para el período de línea base.....	63
Figura 27. Temperatura promedio anual RCP 8.5 vs temperatura media en Pirque para el período de línea base.....	63
Figura 28. Media móvil decadal escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5.....	64
Figura 29. Contraste temperaturas medio anuales en Pirque, escenarios RCP 2.6, 8.5 y línea base. Líneas continuas indican promedio de series para cada escenario. Líneas punteadas indican la variabilidad de los valores según series.....	65
Figura 31. Temperatura media mensual Pirque, serie 4.....	65
Figura 32. Curva duración precipitación pre escalado temporal en Línea Base.	66
Figura 33. Curva duración precipitación post escalado temporal, en Línea Base.....	66

Figura 34. Escalado de datos históricos de precipitación. Línea Base.....	67
Figura 35. Precipitación promedio anual, escenario RCP 2.6, líneas negras indican intervalo de confianza.....	68
Figura 36. Precipitación promedio anual, escenario RCP 8.5, líneas negras indican intervalo de confianza.....	68
Figura 37. Precipitación anual promedio para escenario RCP 2.6 promedio período 2040-2070 vs promedio línea base (mm/año)	69
Figura 38. Precipitación anual promedio para escenario RCP 8.5 promedio período 2040-2070 vs promedio línea base (mm/año)	69
Figura 39. Distribución mensual de precipitaciones junto a anomalías respecto a línea base, RCP 2.6 y RCP 8.5.....	71
Figura 40. Precipitación promedio mensual RCP 2.6 según comportamiento.....	73
Figura 41. Precipitación promedio mensual RCP 8.5 según comportamiento.....	74
Figura 42. Serie de caudales futuros en cuenca MELM, escenario RCP 2.6. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.....	76
Figura 43. Serie de caudales futuros en cuenca VEQ, escenario RCP 2.6. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.....	76
Figura 44. Serie de caudales futuros en cuenca AEY, escenario RCP 2.6. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.....	77
Figura 45. Curvas de duración cuenca MELM, escenario RCP 2.6, agrupadas según comportamiento modal.....	77
Figura 46. Curvas de duración cuenca VEQ, escenario RCP 2.6, agrupadas según comportamiento modal.....	78
Figura 47. Curvas de duración cuenca AEY, escenario RCP 2.6, agrupadas según comportamiento modal.....	78

Figura 48. Curva variación estacional. Modo 1, RCP 2.6. En negro caudal medio mensual, línea base.	79
Figura 49. Curva variación estacional. Modo 2, RCP 2.6. En negro caudal medio mensual, línea base.	79
Figura 50. Curva variación estacional. Modo 3, RCP 2.6. En negro caudal medio mensual, línea base.	79
Figura 51. Contraste altura de nieve banda superior promedio de las tres cuencas.	80
Figura 52. Deficiencia de agua estimada para cada año por falencia en deshielo modelo hidrológico. Línea Base	81
Figura 53. Contraste en Curvas de variación estacional y caudal medio MELM, RCP 2.6.....	82
Figura 54. Contraste en Curvas de variación estacional y caudal medio VEQ, RCP 2.6	82
Figura 55. Contraste en Curvas de variación estacional y caudal medio AEY, RCP 2.6	83
Figura 56. Contraste Volumen total escurrido anual, escenario RCP 2.6	83
Figura 57. Serie de caudales futuros en cuenca MELM, escenario RCP 8.5. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.....	84
Figura 58. Serie de caudales futuros en cuenca VEQ, escenario RCP 8.5. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.....	84
Figura 59. Serie de caudales futuros en cuenca AEY, escenario RCP 8.5. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.....	85
Figura 60. Curvas de duración cuenca MELM, escenario RCP 8.5, agrupadas según comportamiento modal.....	85
Figura 61. Curvas de duración cuenca VEQ, escenario RCP 8.5, agrupadas según comportamiento modal.....	86
Figura 62. Curvas de duración cuenca AEY, escenario RCP 8.5, agrupadas según comportamiento modal.....	86

Figura 63. Curvas variación estacional Modo 1, escenario RCP 8.5. En negro caudal medio mensual, línea base.....	87
Figura 64. Curvas variación estacional Modo 2, escenario RCP 8.5. En negro caudal medio mensual, línea base.....	87
Figura 65. Curvas variación estacional Modo 3, escenario RCP 8.5. En negro caudal medio mensual, línea base.....	87
Figura 66. Contraste en Curvas de variación estacional promedio y caudal medio MELM, RCP 8.5.....	88
Figura 67. Contraste en Curvas de variación estacional promedio y caudal medio VEQ, RCP 8.5.....	88
Figura 68. Contraste en Curvas de variación estacional promedio y caudal medio AEY, RCP 8.5.....	89
Figura 69. Contraste Volumen total escurrido anual, escenario RCP 8.5.....	89
Figura 70. Contraste variación estacional promedio series MELM, ambos escenarios.....	90
Figura 71. Contraste variación estacional promedio series VEQ, ambos escenarios.....	91
Figura 72. Contraste variación estacional promedio series AEY, ambos escenarios.....	91
Figura 73. Variación porcentual de caudal medio mensual, escenarios vs línea base, MELM. ...	92
Figura 74. Variación porcentual de caudal medio mensual, escenarios vs línea base, VEQ.	93
Figura 75. Variación porcentual de caudal medio mensual, escenarios vs línea base, AEY.	94
Figura 76. Cuadro resumen, volúmenes escurridos anuales y anomalías por escenario.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen escenarios RCP. Fuente: Moss et al. (2010).....	19
Tabla 2. Instituciones vigentes en el desarrollo de modelos climáticos para escenarios RCP.....	21
Tabla 3. Estaciones utilizadas, información proporcionada por la DGA.....	29
Tabla 4. Bandas de elevación MELM	34
Tabla 5. Bandas de elevación VEQ.....	35
Tabla 6. Bandas de elevación AEY	35
Tabla 7. Estadística de Caudales Maipo en las Melosas, período 1984-2004.....	36
Tabla 8. Estadística de Caudales Volcán en los Queltehues, período 1984-2004.....	36
Tabla 9. Estadística de Caudales Afluyente embalse el Yeso, período 1984-2004.....	37
Tabla 10. Estaciones utilizadas para la construcción del gradiente de precipitación. Se selecciona Pirque como estación base.....	38
Tabla 11. Coeficientes de ajuste logarítmico y error cuadrático medio asociado, para gradiente de precipitación. $P=A\ln(\text{Cota})+B$	40
Tabla 12. Coeficientes de ajuste lineal y error cuadrático medio asociado, para gradiente de temperatura. Fuente: Ahumada (2012).....	41
Tabla 13. Distribución mensual del viento para todas las cuencas. Fuente: Departamento geofísica, Universidad de Chile.....	42
Tabla 14. Rendimiento unitario mensual para glaciares.....	43
Tabla 15. Cobertura de nubes a nivel mensual, estación meteorológica El Bosque. Fuente: DGA	44
Tabla 16. Parámetros calibrados del modelo hidrológico WEAP.....	48

Tabla 17. : Indicadores de error calibración cuencas	53
Tabla 18. Indicadores de error, validación del modelo	56
Tabla 19. Medias y varianzas según comportamiento modal RCP 2.6	72
Tabla 20. Medias y varianzas según comportamiento modal RCP 8.5	73
Tabla 21. Resumen hidrología de escenarios vs línea base MELM.....	92
Tabla 22. Resumen hidrología de escenarios vs línea base VEQ.....	92
Tabla 23. Resumen hidrología de escenarios vs línea base AEY.....	93

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El clima es un sistema de alta complejidad, dada la gran cantidad de variables y relaciones que involucra. Es por esto que su predicción y/o simulación es muy compleja. Entre las variables más relevantes que lo afectan se encuentra la actividad solar y volcánica, los océanos y en los últimos siglos el desarrollo y actividad humana.

En el último siglo se han observado alzas sostenidas en la temperatura media global, nombrándose a la emisión de gases de efecto invernadero, producto del rápido desarrollo de la actividad humana y la actividad solar, que presenta ciclos de mayor y menor actividad (actualmente en un ciclo de mayor actividad) como principales responsables.

Desde el punto de vista del desarrollo social, es de gran importancia estimar los cambios hidrológicos que puedan producirse en el futuro cercano. En particular en Chile, un país agrícola, es de especial relevancia cuantificar cambios en los regímenes hidrológicos y disponibilidad de las cuencas de la zona centro norte y norte. En este caso se estudiará la cuenca alta del Maipo ubicada en la región Metropolitana. Se elige esta cuenca dado que hay una serie de proyectos hidroeléctricos de centrales de pasada, como el caso de Alfalfal II y Las Lajas, proyectos pertenecientes a la empresa AES Gener, además de las centrales ya existentes Alfalfal I y Los Maitenes y el embalse El Yeso, que provee de agua potable y para agricultura en la región.

Se han realizado varios estudios de este tipo en el país, Ayala, 2011; Mardones, 2009; Mena, 2009; Reyes, 2012 y Gómez, 2013, donde se utilizó una metodología similar a la que se adoptará para este trabajo. En la mayoría de estos trabajos se han utilizado escenarios futuros denominados SRES¹ tales como A2, B2 y A1B que, a base de distintas consideraciones de desarrollo social y económico global o local, proyectan características climáticas futuras a gran escala (1 a 2,5°) para las distintas regiones.

Los nuevos resultados del proyecto de comparación de modelos acoplados, en su fase 5, CMIP², proponen mejores representaciones de los procesos atmosféricos junto a conjuntos de posibles series meteorológicas futuras para cada uno de los escenarios que se plantean, lo que muestra la incertidumbre respecto de estas variables. Los escenarios denominados RCP³, se basan en distintas evoluciones de las forzantes radiativas, por lo que al considerar los extremos RCP2.6 y RCP8.5 (ver sección 2.2 para mayor detalle) se pretende tomar en consideración la incertidumbre respecto al patrón de evolución que realmente se tendrá.

¹ Special Report Emission Scenarios

² Coupled Model Intercomparison Project

³ Representative Concentration Pathways

1.2Objetivos

1.2.1General

Estimar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Maipo para el período 2040-2070, a raíz de la variabilidad climática simulada bajo escenarios RCP 2.6 y 8.5 de cambio climático.

1.2.2Específicos:

Implementar un modelo hidrológico de la cuenca a nivel mensual, utilizando como línea base el período 1982-2004.

Elección adecuada del modelo de circulación general (GCM) a utilizar para la proyección.

Definición de una metodología para el escalado de los resultados del GCM seleccionado a nivel de cuenca, ya que éstos tienen una resolución de cientos de kilómetros en la zona de interés.

Obtención de los cambios en las variables meteorológicas forzantes (Precipitación y Temperatura) a nivel mensual y la consecuente respuesta hidrológica de la cuenca para el período 2040-2070 en la cuenca alta del Maipo.

Determinar las proyecciones de disponibilidad de agua en la cuenca, la variación hidrológica e incertidumbre asociada.

1.3Metodología

Para el estudio y análisis de los efectos de la variabilidad climática en el período 2040-2070, debe recopilarse de la información de estaciones pluviométricas y/o fluviométricas de la DGA, en la cuenca alta del Maipo, para poder correlacionarla con los modelos GCM que tengan información en la zona. Se seleccionarán los GCM que tengan resultados para los escenarios RCP y utilizará aquel que mejor se ajuste a las características climáticas en la región para el período base.

Se modelaran hidrológicamente las tres subcuencas escogidas del alto Maipo. Este modelo se implementará con el software WEAP, cuya calibración se efectuará corroborando los caudales en la salida de las subcuencas con los registros históricos de las estaciones, proporcionados por la dirección general de aguas (DGA).

Posteriormente se seleccionará un modelo de circulación general a utilizar, deben escalarse temporal y espacialmente los resultados del GCM, ya que estos tienen una resolución aproximada

de 100 kilómetros. Posteriormente deben ajustarse a la resolución de cuenca, para así poder representar el comportamiento a nivel local.

Se realizará la simulación hidrológica de la cuenca, bajo el supuesto de que las relaciones establecidas en el período base para el modelo GCM seleccionado, se consideran válidas en el futuro. De esta forma es posible generar las series de tiempo de caudales, para cada escenario modelado en las subcuencas del alto Maipo.

Con los resultados de las series de tiempo de caudal para los escenarios extremos, se logra obtener todo el espectro de incertidumbre respecto a la variabilidad climática que afecta la zona.

1.4 Resultados esperados

Estimar el cambio en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del Maipo para el período 2040-2070 y su correspondiente incertidumbre.

Lograr una modelación hidrológica adecuada de las subcuencas altas del río Maipo, con el software WEAP a escala mensual.

Escalado espacial y temporal adecuado de las variables de precipitación y temperatura otorgado por el GCM seleccionado.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cambio Climático

El clima es un sistema de alta complejidad sujeto a ciclos periódicos de mayor y menor temperatura media global, sin embargo, a partir de la revolución industrial en el siglo XIX, la emisión de GEI⁴, principalmente dióxido de carbono, ha aumentado de forma radical. El incremento de las emisiones genera que la forzante radiativa aumente, esto significa que mayor cantidad de radiación es retenida en la atmósfera terrestre, traduciéndose, entre otros efectos, en un aumento de las temperaturas medias globales producto del efecto invernadero.

En la Figura 1 se observan las tendencias, respecto al promedio 1961-1990, de la temperatura media global, del nivel del mar y la cubierta de nieve en el Hemisferio Norte, información recopilada por el IPCC⁵ (IPCC, 2007). Se observa que las tres tendencias indican un calentamiento global generalizado, denotando como principales causantes el aumento en los GEI, las variaciones en la cubierta terrestre y de radiación solar en la alteración del equilibrio energético del sistema climático.

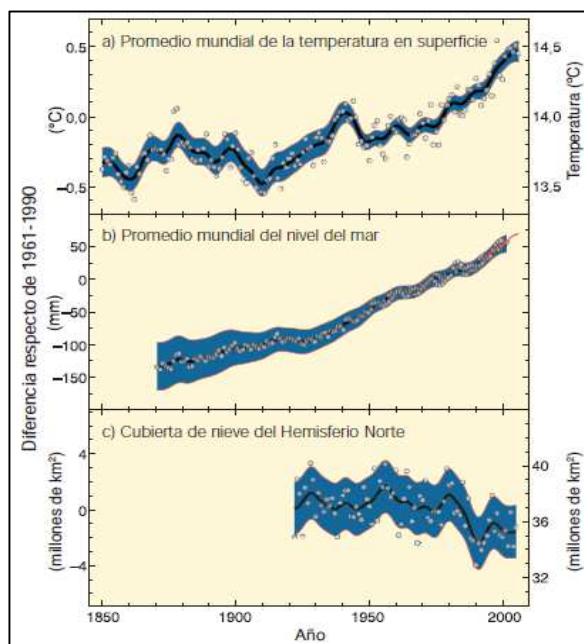


Figura 1: Variación observada desde: a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante Marzo-Abril. Fuente: IPCC (2007).

⁴ Gases efecto invernadero

⁵ Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático

Según Arnell (1999), el calentamiento global llevará probablemente a una intensificación de los regímenes hidrológicos, aumentando las precipitaciones a nivel mundial, pero con una distribución desigual a lo largo del planeta. Además, se estima que hoy en día un tercio de la población mundial rural experimenta niveles de estrés hídrico⁶ y que para el año 2025 se incremente a dos tercios de la población, producto del crecimiento demográfico y uso del agua.

2.2 Escenarios de cambio climático

A consecuencia del cambio climático, es que el IPCC ha definido desde 1990 una serie de escenarios futuros. Hoy en día los escenarios se han perfeccionado bastante desde sus inicios y representan más fielmente, una mayor cantidad de forzantes, procesos e impactos del cambio climático. En la Figura 2, se pueden observar los procesos de mayor importancia, tanto naturales como antropogénicos que son incluidos en los escenarios más modernos de cambio climático (Moss et al., 2010).

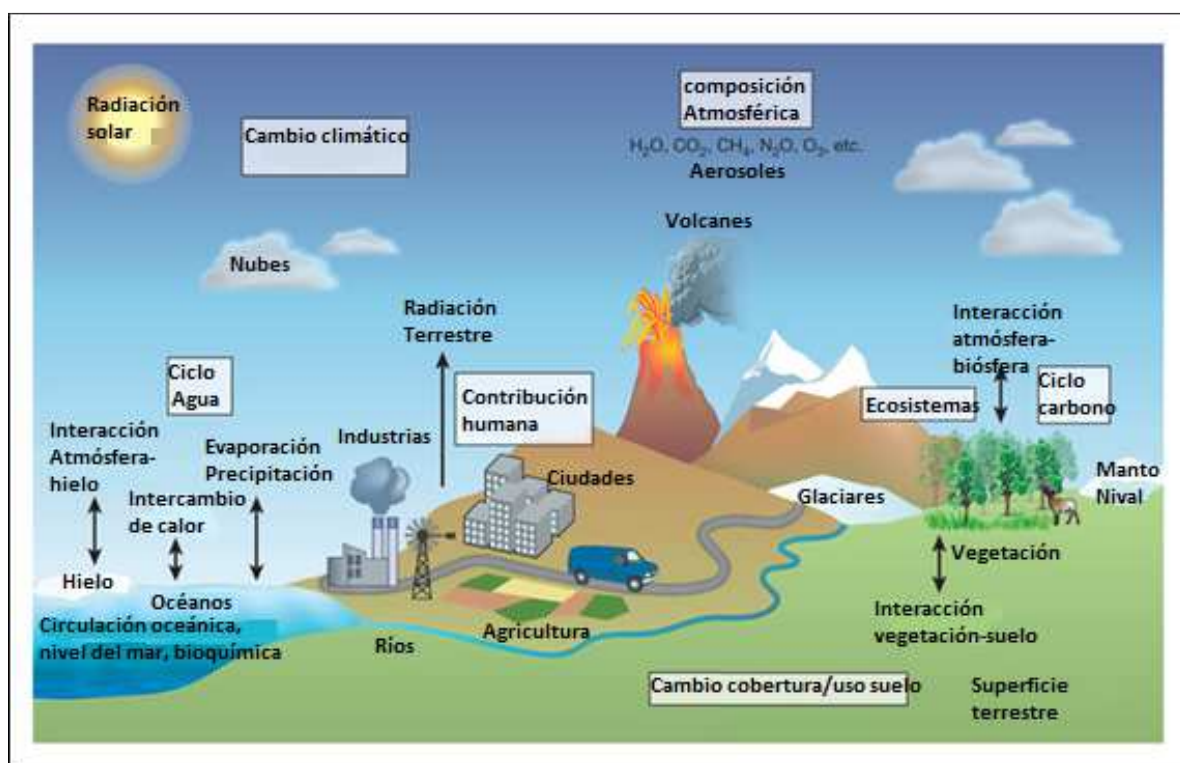


Figura 2: Procesos naturales y antropogénicos de mayor importancia e influencia en el sistema climático. Adaptado de Mosset *al* (2010).

⁶Uso mayor al 20% de la disponibilidad

Actualmente se ha definido un nuevo tipo de escenarios donde en vez de considerarse ciertos niveles futuros de emisión de GEI, como se había hecho anteriormente, se fijaron los niveles de forzantes radiativas hacia el año 2100. La forzante radiativa se define como la diferencia entre la radiación entrante a la Tierra versus la radiación que se entrega de vuelta al espacio, lo que implica que si la diferencia es positiva se tendrá calentamiento, producto de la acumulación de energía en la superficie terrestre.

Este nuevo tipo de escenarios son llamados Representative Concentration Pathways (RCP) y son los que se utilizarán en este trabajo. Los RCP, a diferencia de escenarios anteriores donde se definían valores de emisión de GEI (SRES, por ejemplo), fijan valores de forzantes radiativas, pero también es igualmente relevante la trayectoria de dichas forzantes, ya que éstas no están asociadas a escenarios únicos de desarrollo socioeconómico y de emisión, pues considera que varios escenarios pueden conllevar a un mismo nivel de forzante radiativa. En la **Error! Reference source not found.**, puede apreciarse un resumen de los RCP utilizados actualmente, mientras que en la Figura 3 se despliegan los escenarios y su comportamiento hasta el año 2500.

Tabla 1. Resumen escenarios RCP. Fuente: Moss et al. (2010).

Nombre	Forzante radiativa [Wm-2]	Concentración [ppm]	Trayectoria
RCP 8.5	> 8.5 en 2100	> 1,370 CO ₂ -equiv. en 2100	En aumento
RCP 6.0	~6 post estabilización en 2100	~850 CO ₂ -equiv.(estabilización post 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 4.5	~4.5 post estabilización en 2100	~650 CO ₂ -equiv. (estabilización post 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 2.6	Peak en ~3 antes de 2100 luego declina	Peak en ~490 CO ₂ -equiv. Antes de 2100 luego declina	Peak y declina

El aumento en las forzantes radiativas para las próximas décadas y decenios hace imperante la necesidad de modelar los posibles efectos a nivel hidrológico y la consecuente modificación en la disponibilidad de recursos hídricos en las cuencas a nivel global, herramientas necesarias en la gestión y explotación de los recursos hídricos en el mediano y largo plazo.

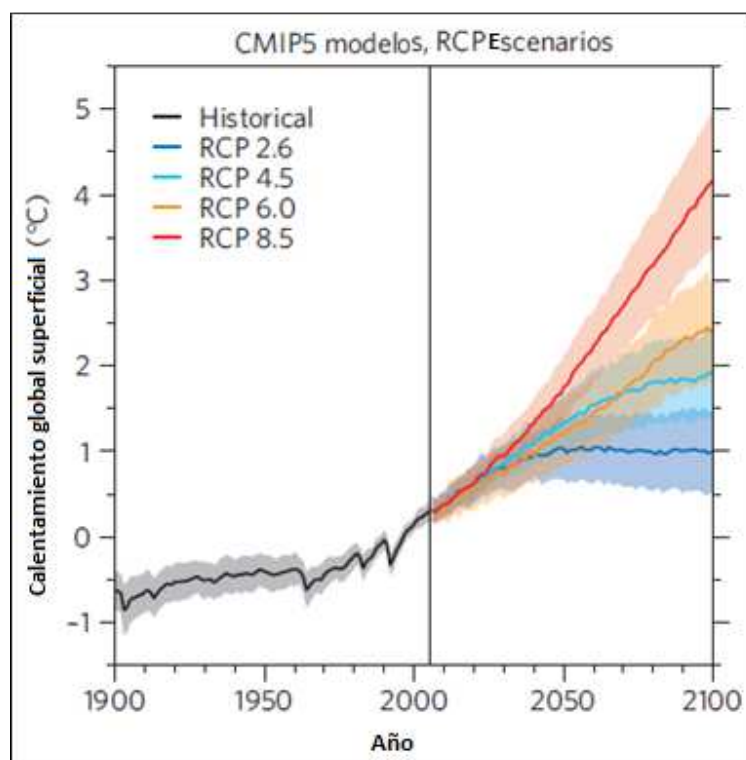


Figura 3: Calentamiento global según escenarios RCP. El valor medio de cada escenario se muestra en las líneas gruesas de color, mientras que las zonas sombreadas indican desviación estándar. Adaptado de Knutti et al. (2012).

2.3 Modelación climática: Modelos de circulación general

2.3.1 Generalidades

Según la definición del IPCC 2007, los modelos de circulación general (GCM) constituyen una simplificación e idealización del sistema climático. Representando procesos físicos en la atmósfera, criósfera y superficie terrestre, son la herramienta más avanzada disponible en la simulación de la respuesta global al cambio climático.

Los GCM utilizan una grilla tridimensional del globo, con resoluciones horizontales típicas del orden de 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, llegando incluso a 30 capas en el océano. La grilla es por tanto bastante gruesa, siendo imposible de modelar los procesos que ocurren a menores escalas (como formación de nubes y procesos hidrológicos a nivel de cuenca). Hoy en día existen modelos que acoplan los procesos que ocurren en la atmósfera y en el océano, realizando balances de masa, calor y momentum entre las celdas de la grilla, en la **Error! Reference source not found.** se presentan las principales instituciones dedicadas al desarrollo de modelos climáticos en la actualidad. En la Figura 4, puede observarse un esquema general de los GCM con los principales procesos considerados en la modelación. Los resultados que entregan estos modelos son series de tiempo de variables meteorológicas como temperatura y precipitación.

Tabla 2. Instituciones vigentes en el desarrollo de modelos climáticos para escenarios RCP

Sigla Institución	País
CSIRO-BOM	Australia
BCC	China
GCESS	China
NCAR	Estados Unidos
NSF-DOE-NCAR	Estados Unidos
CMCC	Europa
CNRM-CERFACS	Europa
CNRM-CERFACS	Europa
CSIRO-QCCCE	Australia
CCCma	Canadá
LASG-CESS	China
LASG-IAP	China
FIO	China
NASA GMAO	Estados Unidos
NOAA GFDL	Estados Unidos
Sigla Institución	País
NASA GISS	Estados Unidos
INM	Rusia
MOHC	Reino Unido
NIMR/KMA	Reino Unido/Corea del Sur
IPSL	Francia
MIROC	Japón
MIROC	Japón
MPI-M	Alemania
MRI	Japón
NCC	Noruega

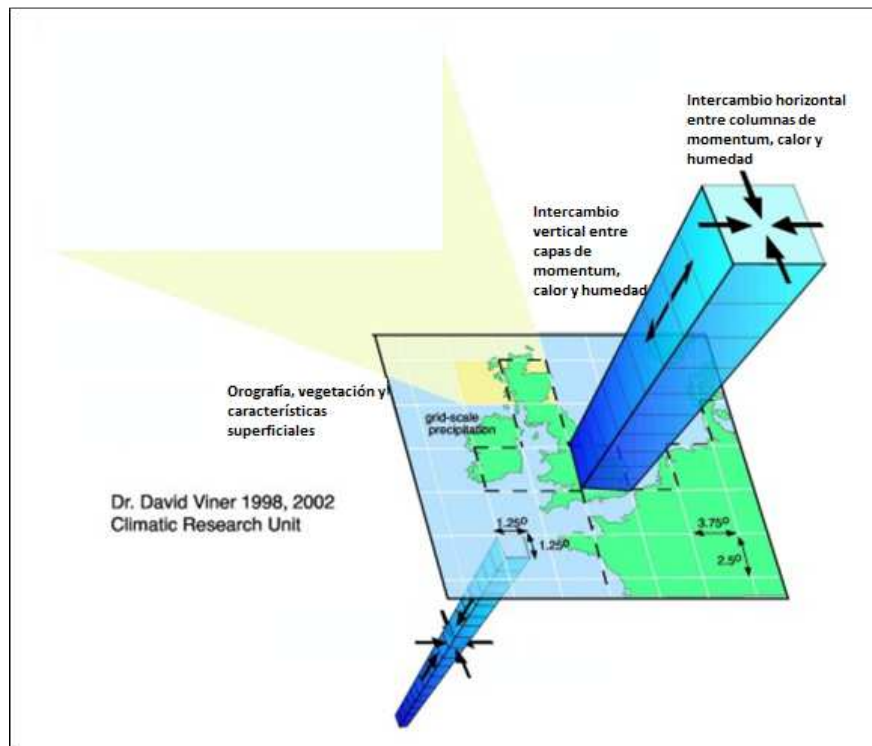


Figura 4: Esquema de los GCM. Adaptado de Viner (1998).

2.3.2 Calibración y validación de los modelos

El CMIP⁷, actualmente en su fase 5, ha definido un nuevo set de experimentos para modelos climáticos, en los que busca determinar tres factores:

- Valoración del modelo (que tan bien el modelo simula el clima pasado).
- Predicciones climáticas para el futuro.
- Intercomparación de los resultados del modelo.

⁷CoupledModelIntercomparison Project

2.3.3 Análisis estadístico de proyecciones de variables meteorológicas

Para realizar un correcto análisis de las proyecciones de las forzantes meteorológicas y salidas del modelo hidrológico, debe asegurarse que posean la misma distribución probabilística, es decir, solo pueden compararse aquellas series de precipitación y/o temperatura que pertenezcan a la misma población estadística, aquellas que tengan correlación en su comportamiento. La pertenencia a la población estadística se realizará mediante dos métodos: Prueba F de Fisher y análisis gráfico, en el que se corrobora o refuta gráficamente los resultados de la prueba de Fisher.

En la prueba F de Fisher, el estadístico utilizado sigue una distribución F, si la hipótesis nula⁸ no puede ser rechazada. Una de las hipótesis para lo cual es utilizada esta prueba, es la de que muestras pertenecientes a la misma población tienen la misma (o similar) medida y distribución estándar. Una distribución F (o F de Snedecor), es una distribución de probabilidad continua, que posee la siguiente forma:

$$F = \frac{\frac{D_1}{k_1}}{\frac{D_2}{k_2}}$$

Donde,

D_i siguen una distribución χ^2 con k_i grados de libertad. $\forall D_i$ son estadísticamente independientes.

2.4 Modelación hidrológica

2.4.1 Generalidades del modelo WEAP: Water Evaluation and Planning

WEAP es una herramienta computacional de modelación para la planificación y distribución de aguas. Incluye específicamente un modelo hidrológico y funciona en base de balance de oferta y demanda de aguas. A diferencia de otros modelos de planificación de recursos hídricos basados en modelación hidrológica externa, WEAP es un modelo forzado por variables climáticas. Además incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características lo convierten en un modelo ideal para realizar estudios de cambio climático.

⁸ Es una hipótesis utilizada en estadística, con el fin de apoyar una hipótesis alternativa. Si la hipótesis nula no puede ser refutada, se asume verdadera.

El modelo hidrológico adoptado es espacialmente continuo y está configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren la extensión de toda la zona de análisis. A su vez, cada subcuenca tiene características propias de uso de suelo, cobertura vegetal y se les asigna un set de datos climáticos.

Cada unidad de modelación posee dos estanques de balance de agua para cada tipo de uso/cobertura de suelo, donde el balance se reparte entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (CCGUC-SEI, 2009).⁹

Actualmente hay varios estudios de impacto y planificación realizados en los que se ha utilizado este software modelando cuencas a nivel mundial, como en el estudio de Droogers et al. (2012), donde se analizan las proyecciones de crecimiento en la demanda y variación en la oferta de recursos hídricos hacia el 2050 en Medio Oriente y Norte de África, o el estudio en Chile como el de Vargas et al. (2013) que analiza la disponibilidad de agua a futuro con el modelo Mk3.0 en cuencas de altura como Maipo en San Alfonso y también Zavala (2013) que enfoca un estudio similar en la cuenca del Cachapoal, XI región.

2.4.2 Variables involucradas

Dentro de las variables necesarias para la modelación y calibración del sistema hidrológico, se encuentran el uso de suelo para la caracterización de la cuenca y el set de datos climáticos para la caracterización del clima.

Para definir el uso de suelo en la cuenca se necesita la siguiente información:

- DEM del área de estudio
- Coeficiente de cultivo

Los DEM pueden obtenerse directamente de ASTER GDEM, operación conjunta del ministerio de economía, comercio e industria de Japón (METI) y de la NASA. Por su parte los coeficientes de cultivo se calibraran según la literatura correspondiente al clima de la región.

El set de datos climáticos para la calibración de la cuencason:

- Precipitación
- Temperatura

⁹Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, StockholmEnvironmentInstitute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Punto de derretimiento
- Punto de congelamiento
- Latitud

De los cuales solo el punto de congelamiento y derretimiento son parámetros a calibrar, mientras que el resto se obtiene de la dirección general de aguas (DGA). Adicionalmente para la calibración son necesarios datos de caudales de estaciones fluviométricas, utilizándose en la comparación de los resultados del modelo, información también proporcionada por la DGA. Por último, debe incorporarse información respecto a la infraestructura de control y aprovechamiento existente en la cuenca.

En la Figura 5, se observa un esquema de las componentes del modelo hidrológico WEAP, donde el balance se realiza entre los estanques que representan la zona de raíces y zona profunda. Las ecuaciones de balance de masa para cada estanque se presentan, en las ecuaciones (1) y (2).

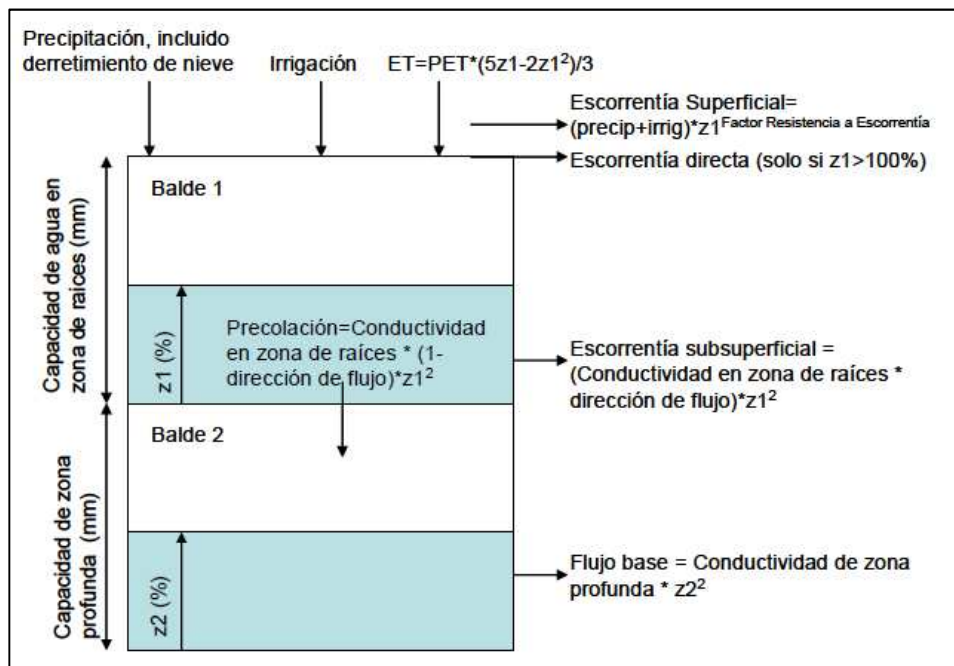


Figura 5: Elementos hidrológicos modelados. Fuente: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, StockholmEnvironmentInstitute, 2009. Guía

Estanque superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^2 - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2 \quad (1)$$

Estanque inferior

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{2,j}^2 \quad (2)$$

En el estanque superior, los términos de izquierda a derecha, representan: cambio en la humedad del suelo, precipitación efectiva, evapotranspiración, escorrentía superficial, flujo intermedio y percolación.

Los términos de la ecuación de balance representan:

Sw_j : Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces.

$z_{1,j}$: Nivel de humedad en la zona de raíces.

P_e : Precipitación efectiva, incluye derretimiento de nieve y riego.

PET : Evaporación potencial cultivo referencia, aproximación de Penman-Montieth.

$k_{c,j}$: Coeficiente de cultivo para las diferentes porciones de cobertura de suelo.

RRF_j : Índice de resistencia a la escorrentía para cada cobertura de suelo.

k_s : Conductividad de zona de raíces.

f_j : Dirección preferencial de flujo.

Dw_j : Capacidad de almacenamiento en la zona profunda.

$z_{2,j}$: Nivel de humedad en la zona profunda.

k_d : Conductividad de zona profunda.

Hay que tener especial cuidado cuando se trabaja en cuencas altas, ya que debe considerarse la acumulación de nieve. WEAP posee una metodología definida para el análisis en la acumulación de nieve. Esta metodología utiliza dos parámetros calibrables, la temperatura de congelamiento y temperatura de derretimiento.

$$Pe(t) = (A_c(t) + Pp(t)m_c) \quad (4)$$

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i < T_c \\ \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} T_c & \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} T_c < T_i < T_d \end{cases}$$

Donde:

Pe :Aportes de precipitación líquida y derretimiento de nieve a la escorrentía.

A_c :Área de cobertura nival.

Pp :Precipitación total.

m_c :Coeficiente de acumulación de nieves.

T_i :Temperatura media mensual.

T_c :Temperatura de congelamiento.

T_d :Temperatura de derretimiento.

Generalmente se busca en la calibración ajustar los caudales peak y los caudales base. Hay que tener consideración de que entre los parámetros calibrables hay relaciones no lineales, y por tanto, la alteración de uno puede influir indirectamente en los otros parámetros.

2.4.3 Validación del modelo

Para analizar la fidelidad en ajuste de calibración y validación del modelo hidrológico, se utilizarán tres indicadores de error simultáneamente: el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (N-S): estadístico normalizado que índice el nivel de la varianza residual en comparación con la variación de los datos observados; sesgo porcentual (PBIAS): Tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados; y error cuadrático medio (R^2): Cuantifica la fidelidad de los datos simulados vs los observados. En las ecuaciones 5, 6 y 7 se pueden ver las expresiones respectivas a cada indicador.

$$Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_o^i - Q_m^i)^2}{\sum_i^n (Q_o^i - \overline{Q_o})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_i^n (Q_o^i - Q_m^i) \times 100}{\sum_i^n Q_o^i} \right] \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (Q_o^i - \overline{Q_o}) \times (Q_m^i - \overline{Q_m})}{\sqrt{\sum_i^n (Q_o^i - \overline{Q_o})^2 \times (Q_m^i - \overline{Q_m})^2}} \quad (7)$$

Donde,

Q_o^i : Caudal observado en el mes i

Q_m^i : Caudal modelado en el mes i

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la siguiente sección se realiza una descripción de la cuenca alta del río Maipo, en conjunto con las tres subcuencas a estudiar, aquellas definidas por las estaciones Maipo en las Melosas (MELM), Volcán en los Queltehues (VEQ) y la estación sintética Afluente al embalse el Yeso (AEY), ver Tabla 3. En la Figura 6 y Figura 7, puede observarse la delimitación de las tres subcuencas y su disposición geográfica.

3.1 Cuenca del Maipo

El río Maipo da origen a la principal hoya hidrográfica de la Región Metropolitana de Santiago, posee regímenes tanto nivales, mixtos como pluviales, según se encuentre en la zona alta media o baja de la cuenca respectivamente. La cuenca del río drena unos 15.380 km² y su caudal promedio es de 92,3 m³/s.

El Maipo nace en la laguna Nacimiento, en los faldeos del Volcán Maipo. En la cordillera misma, recibe las aguas de tres grandes tributarios: los ríos Volcán, Colorado y Yeso. Aguas abajo, en la cuenca de Santiago, desemboca en él, el río Mapocho. Otros afluentes del Maipo, son los ríos Clarillo y Angostura, así como el estero Puangue. Tras recorrer 250 kilómetros, el Maipo desemboca en el Océano Pacífico, en las inmediaciones de la localidad de Llolleo.

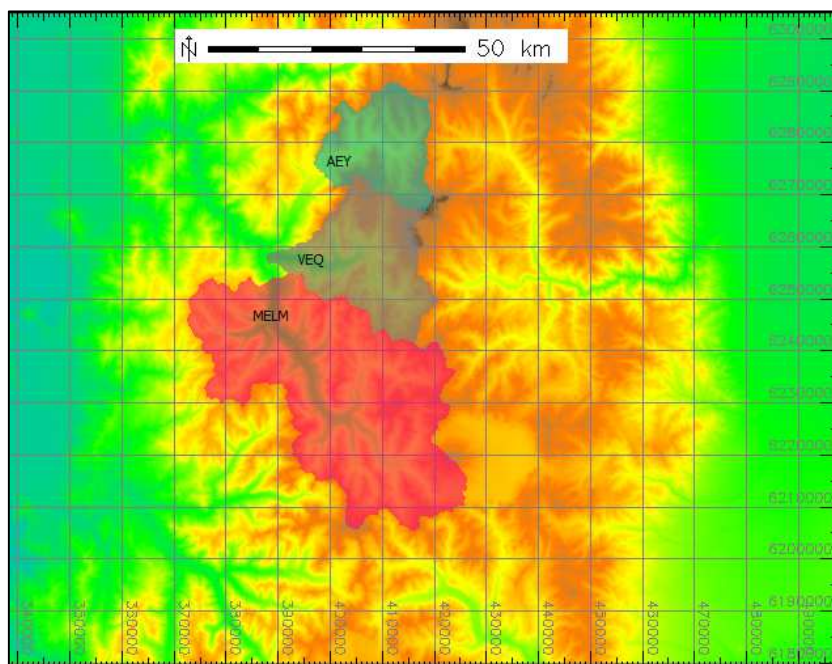


Figura 6: Delimitación de las cuencas en estudio.

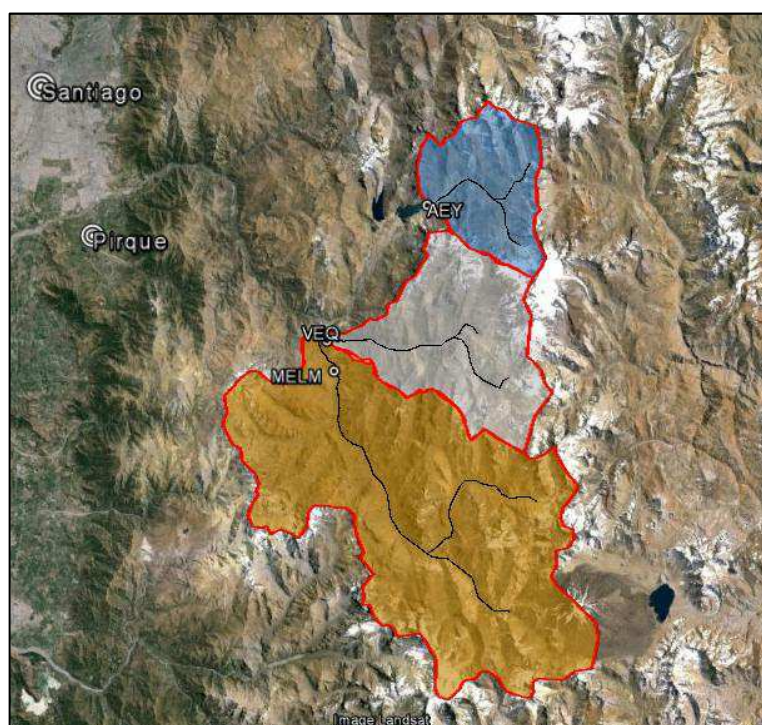


Figura 7: Mapa Cuencas y sus alrededores, Fuente: Google Earth

Tabla 3. Estaciones utilizadas, información proporcionada por la DGA.

Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]
MELM	05701002-9	33°51'04"	70°11'54"	1527
VEQ	05702001-6	33°48'31"	70°12'40"	1365
AEY		33°38'19"	70°02'14"	2570

Por su parte el uso de suelo (Figura 8) en la zona alta de la cuenca del Maipo corresponde principalmente a zonas desprovistas de vegetación dada la altura con suelo rocoso (sobre 1300 msnm), nieves y glaciares, en menor medida matorrales y praderas. El clima es continental precordillerano con grandes oscilaciones térmicas entre día y noche, templado en verano y frío en invierno. Las precipitaciones están concentradas principalmente en los meses de invierno (Junio-Septiembre), mientras que los veranos son secos y soleados.

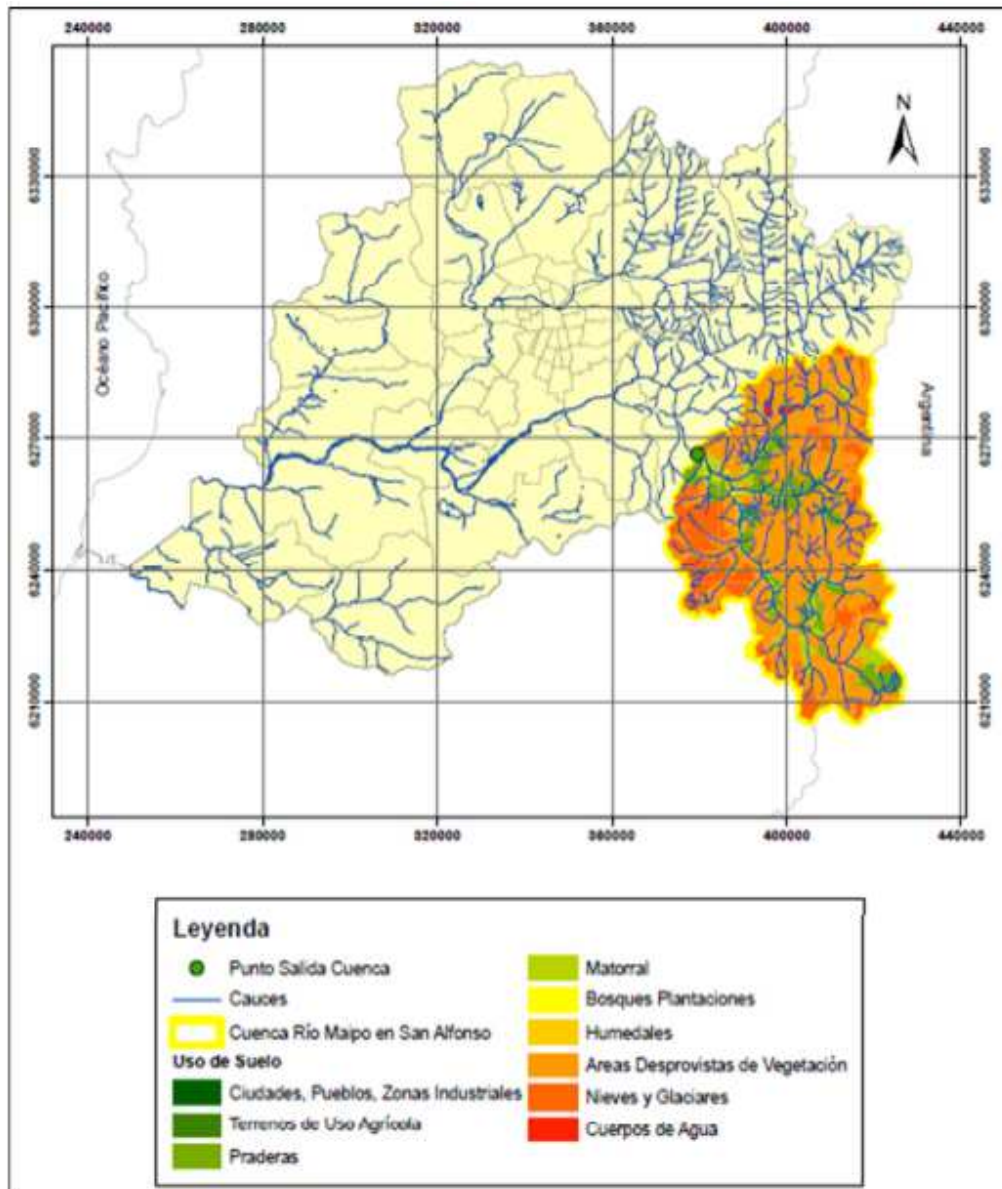


Figura 8: Usos de suelo en la cuenca alta del Maipo

3.2 Cuenca Maipo en las Melosas

La cuenca definida por la estación Maipo en las Melosas (Latitud: 33°50'53'', Longitud: 70°11'46'') tiene un área de 1461 km² y una elevación media de 3500 msnm. El río Maipo en este tramo aún no presenta los aportes de sus principales tributarios: Volcán y Yeso; presenta un marcado régimen nival con caudal peaken el mes de Diciembre y un caudal medio anual en el período de estudio (1982-2004) de 44 m³/s.

En la Figura 9, se presenta la curva de variación estacional, de marcado régimen nival con caudales bajos entre Abril y Septiembre.

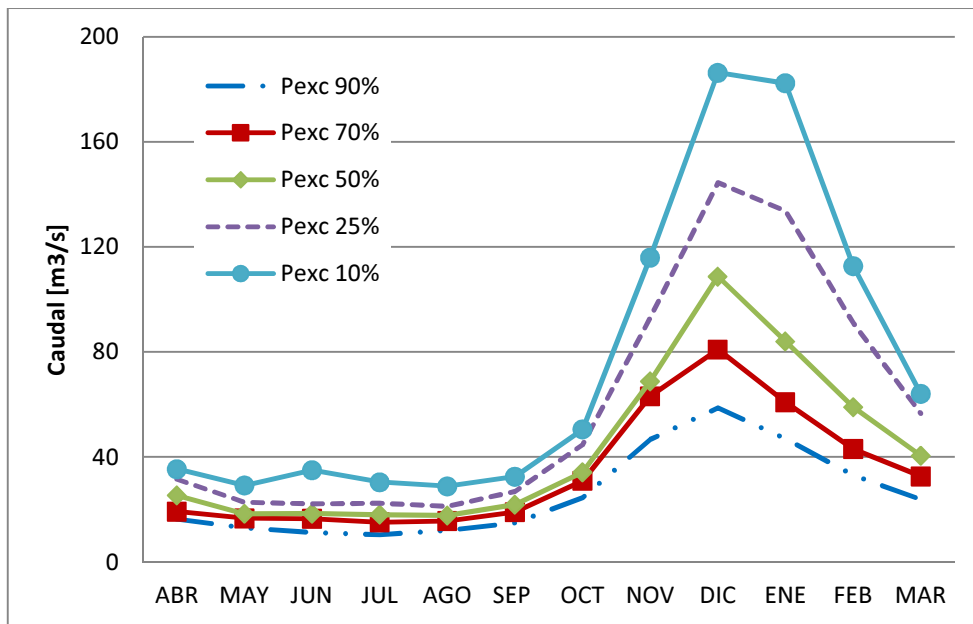


Figura 9. Curva variación estacional Maipo en las Melosas

3.3 Cuenca Volcán en los Queltehues

La cuenca definida por la estación Volcán en los Queltehues (Lat: 33°48'20'', Long: 70°12'32'') abarca un área de 524 km² y elevación media de 3300 msnm. El río Volcán se forma por los deshielos provenientes del volcán San José y es uno de los principales tributarios del río Maipo. Dada su altura su régimen marcadamentenival, con caudales peak en los meses de Diciembre y Enero y un caudal medio anual de 17 m³/s, en la Figura 10 puede observarse su correspondiente curva de variación estacional.

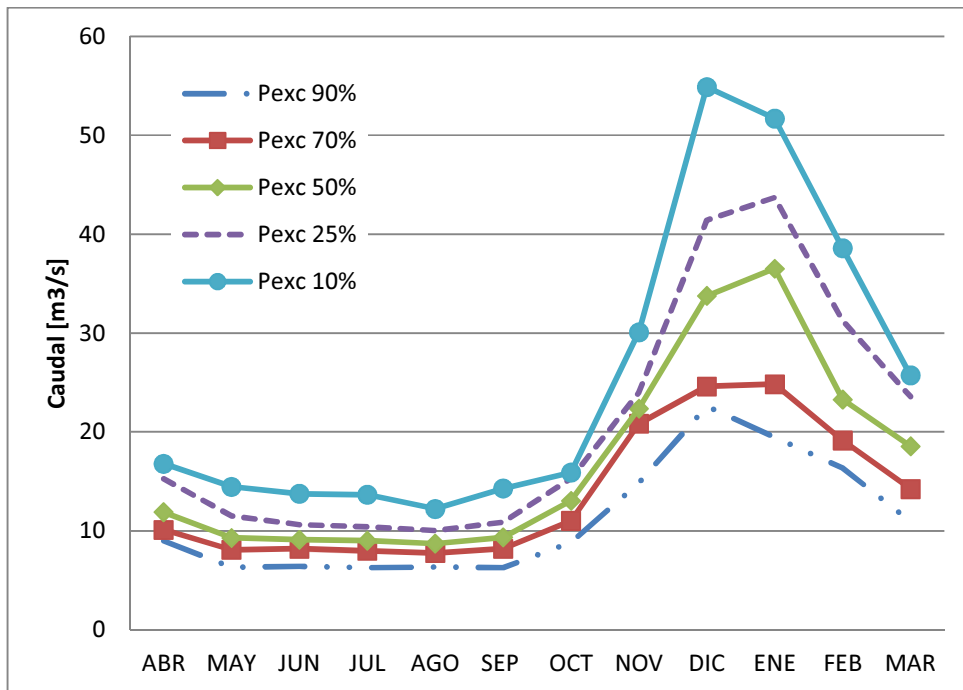


Figura 10. Curva variación estacional Volcán en los Queltehues

3.4 Cuenca Afluente embalse el Yeso

La cuenca Afluente al embalse el Yeso, cuenta con una serie de caudales sintéticos. La cuenca define un área de 360 km² siendo la más alta con elevación media de 4000 msnm, desemboca en el embalse el Yeso. El río Yeso nace en las cercanías de las termas del Plomo y tiene una longitud de 40 km hasta su desembocadura en San Gabriel. Al igual que las cuencas anteriores, es de gran altura lo que implica la presencia de precipitaciones sólidas en invierno y un marcado régimen nival (ver Figura 11) con caudales peak en Diciembre y un caudal medio anual de 10 m³/s.

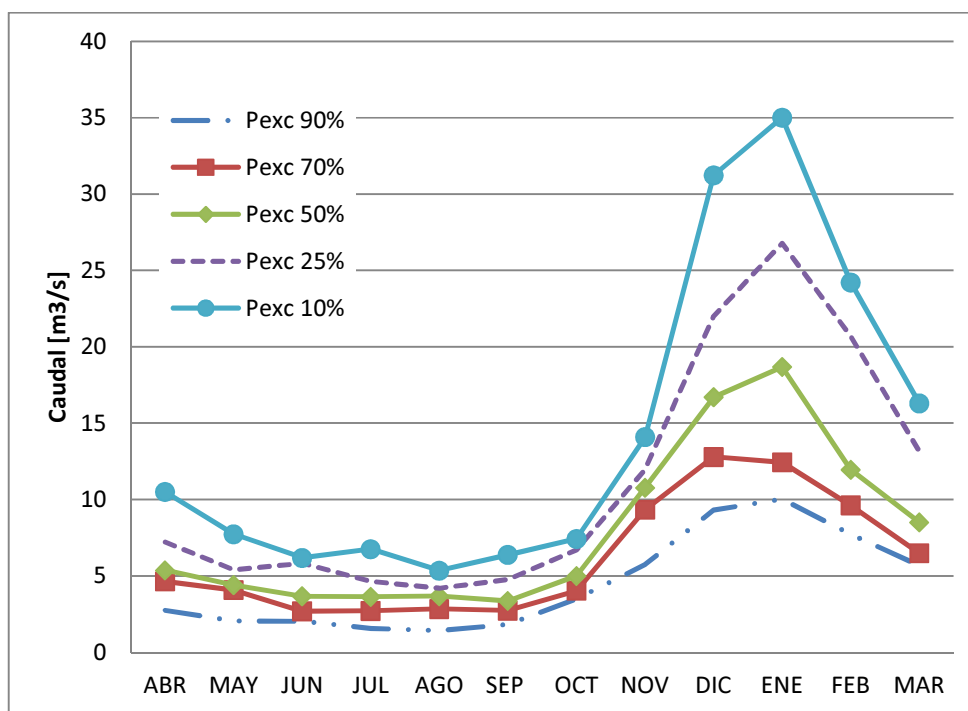


Figura 11. Curva variación estacional Afluente embalse el Yeso

Para la construcción del modelo hidrológico se optó por dividir cada cuenca en bandas de elevación representativas, las cuales tendrán las mismas características de suelo y climatología. Para esto se definieron 3 bandas de elevación con áreas similares, las que se presentan en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 4. Bandas de elevación MELM

MELM	Bandas Elevación		
	Alta	Media	Baja
Zona			
Límite inferior [m]	4000	3000	1421
Límite superior [m]	5315	4000	3000
Área [km ²]	700	754	658

Tabla 5. Bandas de elevación VEQ

VEQ	Bandas Elevación		
Zona	Alta	Media	Baja
Límite inferior [m]	3700	3000	1301
Límite superior [m]	6020	3700	3000
Área [km2]	283	201	159

Tabla 6. Bandas de elevación AEY

AEY	Bandas Elevación		
Zona	Alta	Media	Baja
Límite inferior [m]	4500	3500	2556
Límite superior [m]	6084	4500	3500
Área [km2]	196	163	162

CAPÍTULO IV: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS

Parte fundamental en la construcción del modelo hidrológico es definir las características climatológicas de cada banda de elevación, para esto es necesario construir gradientes de precipitación y temperatura con las estaciones meteorológicas presentes en la zona, dado que no se cuenta con información disponible dentro de las cuencas y la construcción de gradientes permitirá extrapolar los valores para las alturas medias de cada banda de elevación.

4.1 Control fluviométrico

Como puntos de control para la calibración del modelo hidrológico se utilizará la fluvimetría de las estaciones Maipo en las Melosas, Volcán en los Queltehues y Afluente embalse el Yeso, utilizando como período base los años hidrológicos 1982-2004, se utiliza este período por tener la longitud suficiente para abarcar años húmedos, secos y normales. En las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9, se observa la estadística de caudales para el período de calibración en las tres cuencas.

Tabla 7. Estadística de Caudales Maipo en las Melosas, período 1984-2004

Q [m ³ /s]	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est.
ENE	99.7	16.2	299	61.5
FEB	67.1	22.9	182.7	37.15
MAR	43.2	22.6	96.5	17.72
ABR	25.4	15.4	44.5	7.69
MAY	19	7.4	31.4	5.67
JUN	21	10.3	63.8	11.02
JUL	18.8	9.2	31	6.47
AGO	18.4	9.4	29.3	5.45
SEP	22.9	9.7	44	7.51
OCT	36.7	19.5	52.5	9.43
NOV	75.1	34.1	121.8	22.4
DIC	116	38.6	271.1	54.45

Tabla 8. Estadística de Caudales Volcán en los Queltehues, período 1984-2004

Q [m ³ /s]	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est.
ENE	34.7	16.3	68.0	12.93
FEB	25.8	11.9	56.3	9.95
MAR	18.6	10.6	37.0	6.24
ABR	12.4	7.3	23.4	3.73
MAY	9.5	3.0	14.5	2.70
JUN	9.5	5.9	18.0	2.71
JUL	9.3	5.6	14.6	2.55
AGO	8.8	5.7	14.2	2.04
SEP	9.5	5.7	15.2	2.52
OCT	12.7	6.4	17.2	2.84
NOV	21.9	8.8	31.9	5.15
DIC	33.9	12.2	56.9	11.81

Tabla 9. Estadística de Caudales Afluente embalse el Yeso, período 1984-2004

Q [m ³ /s]	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. Est.
ENE	19.9	7.9	46.3	10.01
FEB	15.0	7.1	37.5	7.52
MAR	9.5	4.5	22.1	4.33
ABR	6.0	2.3	12.8	2.58
MAY	4.5	1.3	8.0	1.92
JUN	4.0	1.2	8.1	1.86
JUL	3.6	1.2	7.1	1.65
AGO	3.4	1.3	6.1	1.34
SEP	3.8	1.3	7.8	1.64
OCT	5.2	2.4	7.9	1.52
NOV	10.4	4.0	18.8	3.09
DIC	17.4	7.2	33.1	7.17

4.2 Precipitación

Para estimar la precipitación se utilizó la información de 6 estaciones meteorológicas, que se enuncian en la Tabla 10. Se optó por construir un gradiente logarítmico de precipitaciones en función de la altura en vez de uno lineal como usualmente se adoptaba en trabajos similares anteriores (Ahumada, F. 2012, Mardones, 2009), dado que la linealidad en el gradiente sobreestima las precipitaciones para las zonas de gran altitud en la cuenca. Se realizó un relleno estadístico de los datos faltantes en las estaciones para el período base definido, y posteriormente se definió un gradiente mensual, se sugiere estudiar la variación en los resultados al incluir gradientes diferentes para años húmedos y secos. Se utilizará la estación Pirque como base para la interpolación de precipitación por ser aquella con menor cantidad de datos faltantes.

Tabla 10. Estaciones utilizadas para la construcción del gradiente de precipitación. Se selecciona Pirque como estación base.

Estación	Código BNA	Latitud	Longitud	Altitud [msnm]
Carmen de las Rosas	05740004-8	33° 45' 35"	71° 09' 05"	165
El Vergel	05717008-5	33° 41' 45"	70° 55' 25"	340
Pirque	05711003-1	33° 40' 25"	70° 35' 13"	659
San José de Maipo Retén	05704006-8	33° 38' 10"	70° 21' 11"	943
San Gabriel	05704004-1	33° 46' 57"	70° 14' 22"	1266
El Yeso	05703008-9	33° 40' 00"	70° 05' 00"	2475

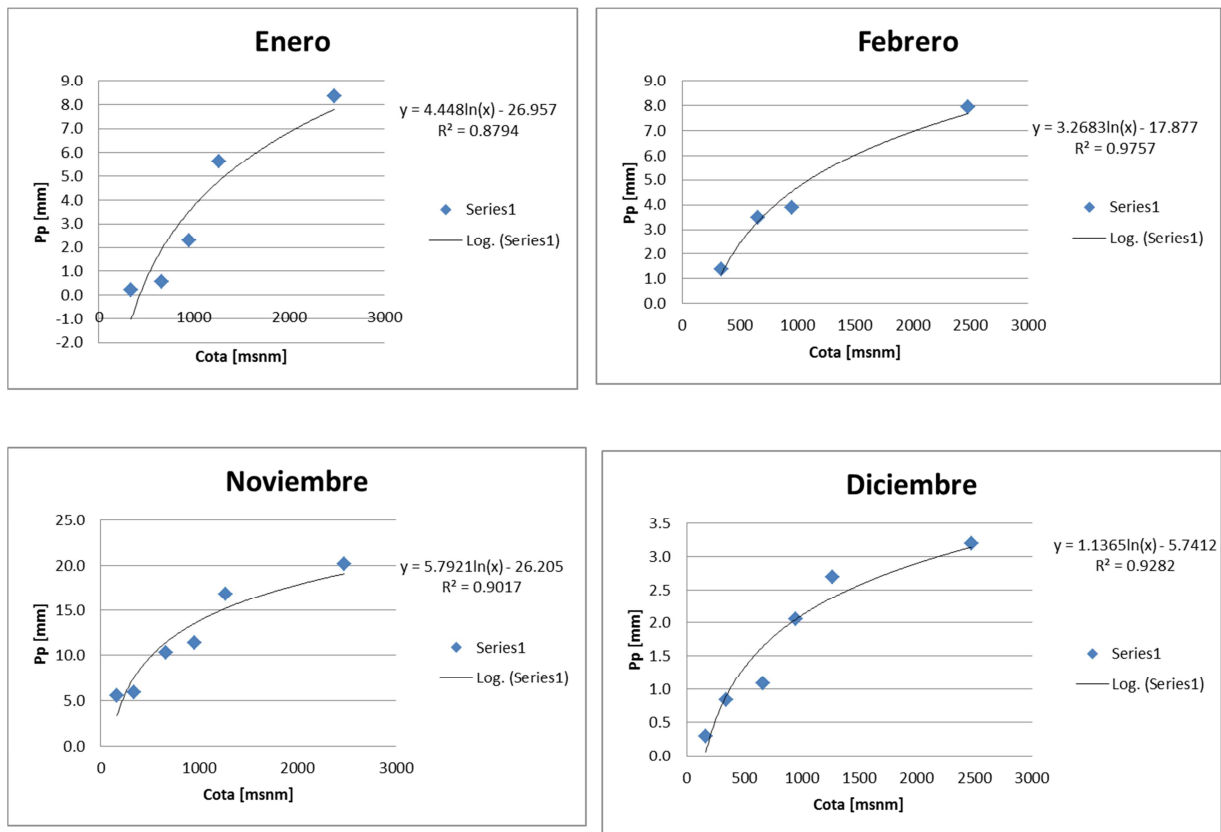


Figura 12. Ejemplo ajuste gráfico de gradiente de Precipitación logarítmico vs altura, a nivel mensual

$$Pp_{z,m} = \frac{A_m * \ln(z) + B_m}{Prom_m} * Pp_{Pirque_m} \quad (8)$$

Donde,

$Pp_{z,m}$: Precipitación en altitud z y mes m

A_m : Coeficiente A para mes m

B_m : Coeficiente b en el mes m

$Prom_m$: Precipitación promedio en estación base Pirque en el mes m

Pp_{Pirque_m} : Precipitación en estación base Pirque en el mes m

Tabla 11. Coeficientes de ajuste logarítmico y error cuadrático medio asociado, para gradiente de precipitación. $P = A \ln(\text{Cota}) + B$

Mes	A	B	R ²
ENE	4.45	-26.96	0.88
FEB	3.27	-17.88	0.98
MAR	3.40	-14.98	0.94
ABR	8.74	-31.14	0.95
MAY	16.92	-30.81	0.88
JUN	30.68	-44.60	0.84
JUL	13.10	1.78	0.87
AGO	15.95	-20.04	0.95
SEP	15.22	-54.26	0.85
OCT	4.87	-16.46	0.83
NOV	5.79	-26.21	0.90
DIC	1.14	-5.74	0.93

4.3 Temperatura

De manera análoga a la construcción del gradiente de precipitación, se construye el gradiente de temperatura, pero utilizando un gradiente lineal. En este caso se utilizará el gradiente construido en la tesis de Ahumada, (2012), cuyo ajuste se observa en la Tabla 12.

$$T_{z,m} = \frac{A_m * z + B_m}{Prom_m} * T_{Pirque_m} \quad (9)$$

Donde,

$T_{z,m}$: Temperatura en altitud z y mes m

A_m : Coeficiente A para mes m

B_m : Coeficiente B en el mes m

$Prom_m$: Temperatura promedio en estación base Pirque en el mes m

T_{Pirque_m} : Temperatura en estación base Pirque en el mes m

Tabla 12. Coeficientes de ajuste lineal y error cuadrático medio asociado, para gradiente de temperatura. Fuente: Ahumada (2012)

Mes	A	B	R ²
Enero	-0.004	22.23	0.92
Febrero	-0.004	21.72	0.90
Marzo	-0.003	20.03	0.91
Abril	-0.003	16.45	0.96
Mayo	-0.003	12.74	0.99
Junio	-0.002	10.52	0.96
Julio	-0.002	9.53	0.92
Agosto	-0.003	10.91	0.94
Septiembre	-0.003	12.85	0.98
Octubre	-0.003	15.82	0.99
Noviembre	-0.004	18.46	0.97
Diciembre	-0.004	20.92	0.95

4.4 Viento

Para la determinación del viento en diferentes altitudes de las cuencas, se obtuvo la información del explorador eólico del departamento de geofísica de la Universidad de Chile (ver Tabla 13). Se optó por utilizar la misma distribución mensual del viento para las tres cuencas dada la cercanía de las mismas y por no mostrar mayores diferencias en los resultados del modelo hidrológico, como se presentará en el próximo capítulo, sin embargo, se aumentó la velocidad del viento para la banda superior de cada cuenca, dado que esta variable también aumenta con la altura.

Tabla 13. Distribución mensual del viento para todas las cuencas. Fuente: Departamento geofísica, Universidad de Chile.

Mes	Viento [m/s]
Enero	4.1
Febrero	3.4
Marzo	3.6
Abril	3.6
Mayo	3.7
Junio	5.0
Julio	5.0
Agosto	5.6
Septiembre	3.7
Octubre	4.7
Noviembre	3.9
Diciembre	4.2

4.3 Glaciares

Se incluirá en la modelación hidrológica un aporte mensual producto de los glaciares existentes en la zona. Se modela este aporte utilizando la tasa de rendimiento en conjunto con el retroceso promedio a nivel mensual de los mismos. Donde el retroceso en el mes i , genera un aporte en el mes $i+1$ (ver fórmula 8).

El aporte glaciar se inserta en el modelo hidrológico como aporte de flujo a la banda superior en cada una de las cuencas, en forma de series de tiempo de caudales de los aportes glaciares para cada cuenca.

$$Q_{glaciar\ mes\ i} = q * \text{Área}\ glaciar_{mes\ i-1} \quad (10)$$

Donde,

$$q = \text{rendimiento del glaciar} \left[\frac{\frac{m^2}{s}}{km^2} \right]$$

Tabla 14. Rendimiento unitario mensual para glaciares.

Mes	Rend. Unitario [m ² /s/km ²]
Septiembre	0.0211
Octubre	0.0305
Noviembre	0.1875
Diciembre	0.3848
Enero	0.5096
Febrero	0.4267
Marzo	0.2272
Abril	0.1322
Mayo	0.0520
Junio	0.0242
Julio	0.0211
Agosto	0.0211

4.4 Nubosidad

Para la determinación de la fracción de nubosidad, se utilizó el anuario meteorológico de la década de 1980 y la estación Santiago el Bosque, ubicada en la zona sur-poniente de Santiago, como se puede observar en la Tabla 15. Para la banda alta se aumentó el porcentaje de cielo despejado en los meses de Invierno (para Junio, Julio un valor de 0.3), dado que la línea de nubes suele estar a una cota menor. La graduación va de 0 a 1, siendo 1 el cielo totalmente despejado.

Tabla 15. Cobertura de nubes a nivel mensual, estación meteorológica El Bosque. Fuente: DGA

Mes	Cobertura de nubes
Enero	0.94
Febrero	0.85
Marzo	0.72
Abril	0.59
Mayo	0.44
Junio	0.14
Julio	0.16
Agosto	0.40
Septiembre	0.49
Octubre	0.56
Noviembre	0.58
Diciembre	0.75

CAPÍTULO V: MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Como se mencionó anteriormente, el período base para la modelación comprende de Abril-1982 a Marzo-2004 a escala mensual. Específicamente se adopta el período Abril-1982 a Marzo-1998 para la calibración de las cuencas y Abril-1998 a Marzo-2004 para la validación de las mismas. Se toman estos períodos dado que incluyen años húmedos, normales y secos, lo que permitirá obtener un ajuste más confiable.

La metodología de calibración consiste en:

1. Construcción conceptual del modelo hidrológico. Entradas, Catchments, salidas de la cuenca (ver Figura 13).
2. Cargar datos del CAPÍTULO IV: RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS.
3. Modificar parámetros de calibración.
4. Correr el modelo y comparar caudales simulados vs caudales modelados, correlación en curvas de duración, acumulación de nieve y volúmenes anuales.
5. Cálculo de indicadores de error: coeficiente de Nash-Sutcliffe, sesgo porcentual (PBIAS) y error cuadrático medio (R^2) (ver ecuaciones 5, 6 y 7).
6. Al obtener resultados satisfactorios para los indicadores de error, validar la calibración.

Los parámetros a calibrar son:

- Coeficiente de Cultivo (Kc): Relación entre evapotranspiración real para un cultivo y la evapotranspiración de referencia para las mismas condiciones climáticas.
- SoilWaterCapacity (SWC): Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en el estanque superior.
- Deep WaterCapacity (DWC): Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en el estanque inferior.
- RootZoneConductivity (RZC): Conductividad en la zona de raíces (estanque superior), capacidad de absorción mensual.
- Deep Conductivity (DC): Conductividad en la zona profunda (estanque inferior).
- PreferredFlowDirection (PFD): Dirección preferencial del flujo, 0 implica flujo 100% horizontal, 1 implica flujo 100% vertical.
- Initial Z1 (IniZ1): Porcentaje de humedad inicial en estanque superior.
- Initial Z2 (IniZ2): Porcentaje de humedad inicial en estanque inferior.
- Factor Precipitación (FPp): Corrección respecto a precipitación extrapolada.

- Albedo LowerBound (ALB): Límite inferior del albedo. Porcentaje de luz reflejada por la superficie.
- Albedo UpperBound (AUB): Límite superior. del albedo. Porcentaje de luz reflejada por la superficie.
- Melting Point (MeltP): Punto de derretimiento, temperatura a la cual se derrite la nieve.
- Freezing Point (FreezP): Punto de congelamiento, temperatura a la cual se congela el agua líquida.

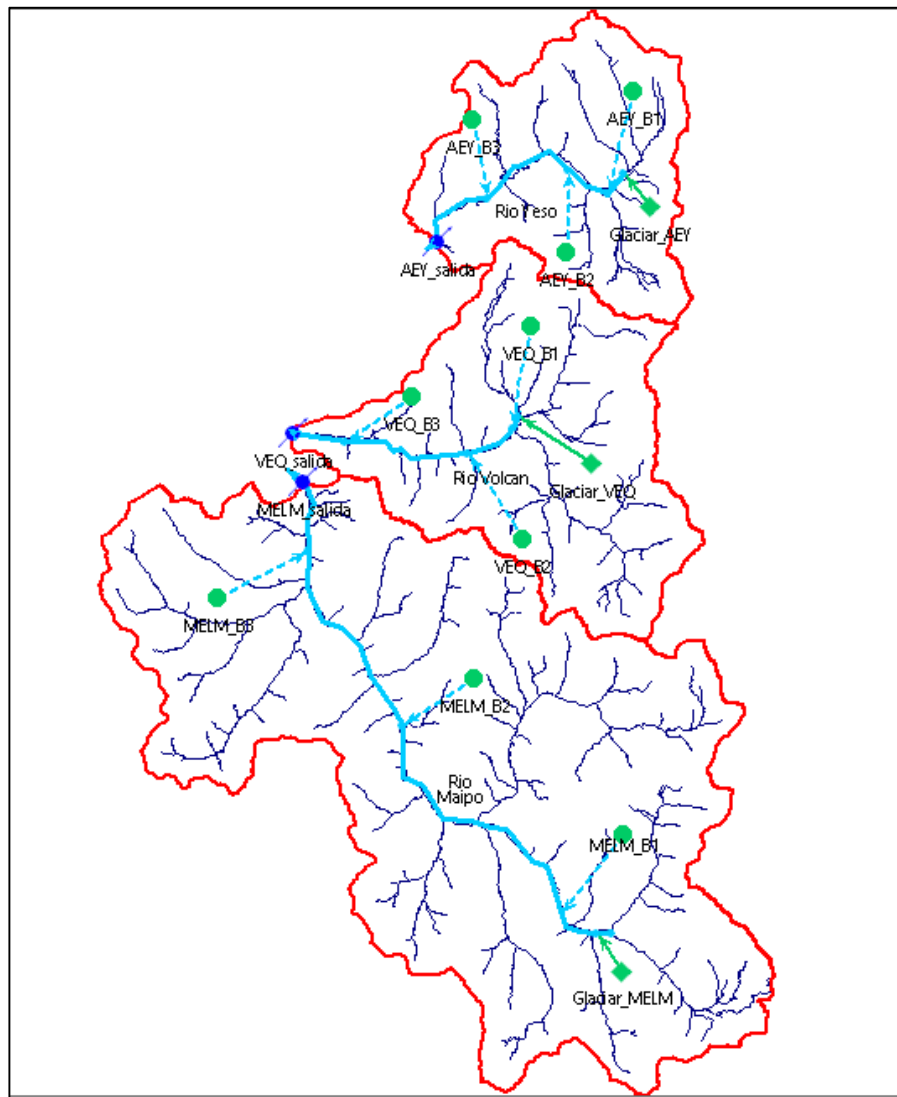


Figura 13: Esquema conceptual modelo WEAP

En cuanto a la validez del modelo, se utilizará como límites de bondad de ajuste, los siguientes valores en cada indicador, los cuales deben igualarse o superarse en forma simultánea (Moriassi et al., 2007):

- Nash-Sutcliffe ≥ 0.5 (Tanto para caudales como logaritmo de caudales)
- PBIAS $\pm 25\%$ (Tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados)
- $R^2 \geq 0.5$ (Cuantifica la fidelidad de la modelación).

5.1 Resultados de la calibración

A modo de cuadro resumen, se exponen los valores finales obtenidos para la calibración Abril 1982- Marzo 1998. En la Tabla 16 se observan los parámetros calibrados por cuenca y elevación, mientras que en la Figura 14 y Figura 15, hidrogramas y curvas de duración observados y simulados para las tres cuencas, respectivamente. Se observa, en general una sobreestimación de los caudales asociados a probabilidades de excedencia entre 10 a 50%.

Tabla 16. Parámetros calibrados del modelo hidrológico WEAP.

Parámetro	Unidad	Banda de elevación			Cuenca
		Alta	Media	Baja	
Kc	S.U	0	0.5	1.0	MELM
		0	0.5	0.8	VEQ
		0	0.5	1.0	AEY
SWC	mm	1000	2000	3000	MELM
		3000	3000	5000	VEQ
		2053	2053	2053	AEY
DWC	mm	2900	6900	9900	MELM
		2900	6900	9900	VEQ
		100	4900	9900	AEY
DC	mm/mes	1000	7000	7000	MELM
		1000	5000	5000	VEQ

		2000	2000	2000	AEY
PFD	S.U	0.8	0.6	0.5	MELM
		0.8	0.8	0.7	VEQ
		0.8	0.6	0.7	AEY
Ini Z1	[%]	7	7	7	MELM
		13	13	13	VEQ
		0	0	0	AEY
Ini Z2	[%]	5.0	3.0	4.0	MELM
		6.0	3.0	3.5	VEQ
		9.0	6.5	5.5	AEY
Epsilon	S.U	0.33	0.43	0.53	MELM
		0.43	0.43	0.53	VEQ
		0.56	0.56	0.66	AEY
RZC	mm/mes	807	807	807	MELM
		795	795	795	VEQ
		1190	1190	1190	AEY
Freez P	[°C]	-1.4	-1.4	-1.4	MELM
		-1.4	-1.4	-1.4	VEQ
		-1.4	-1.4	-1.4	AEY
Melt P	[°C]	14.0	14.0	14.0	MELM
		14.0	14.0	14.0	VEQ
		14.0	14.0	14.0	AEY
Humedad	[%]	50	50	40	MELM
		50	50	40	VEQ
		50	50	40	AEY

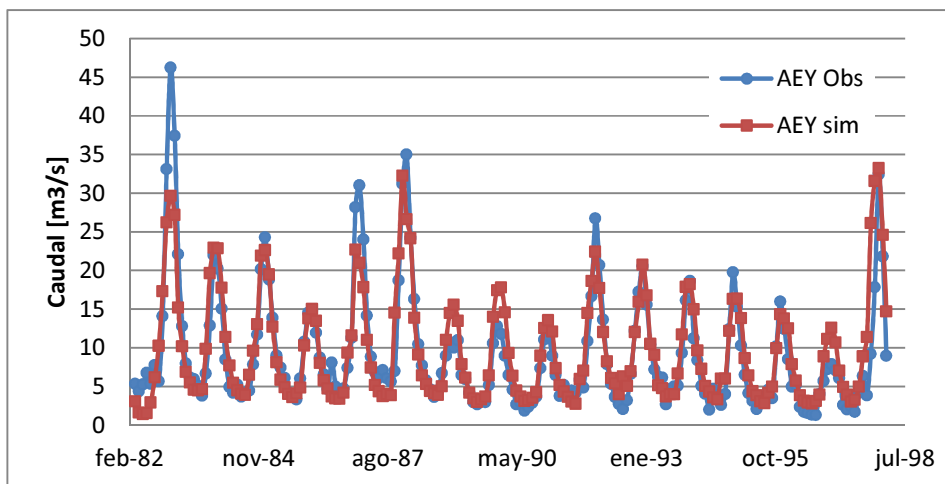
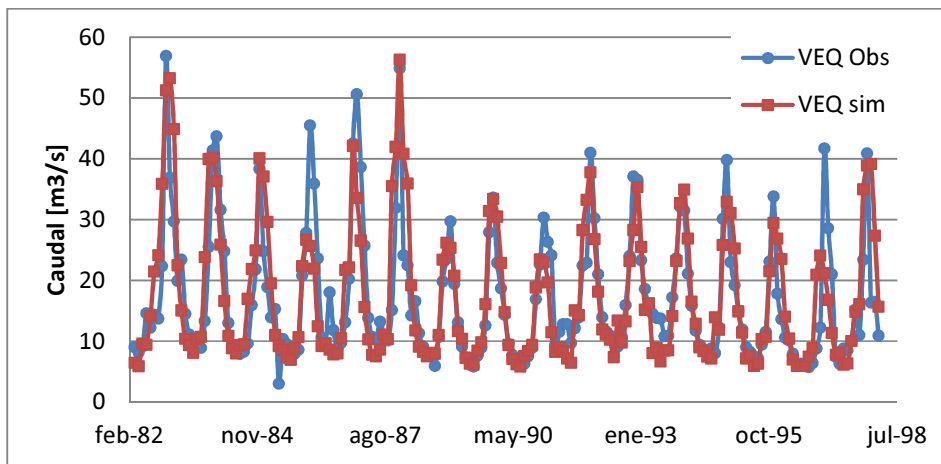
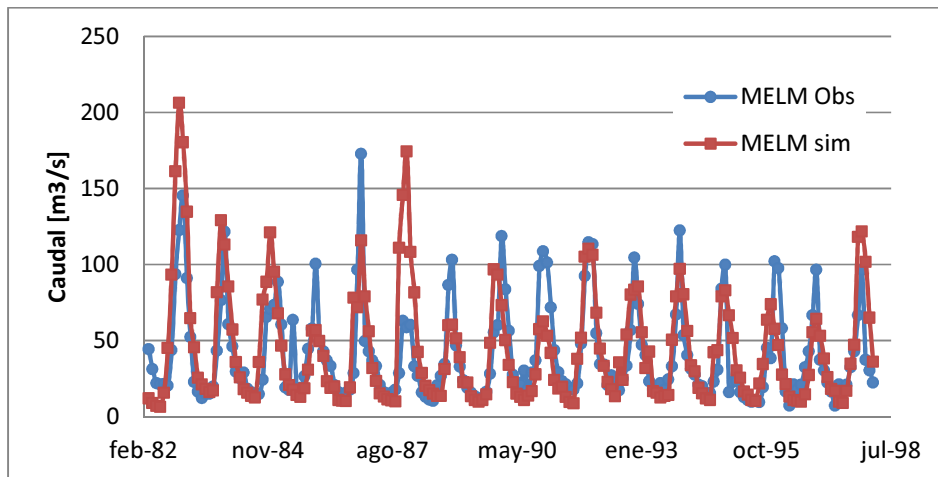


Figura 14. Hidrogramas calibración MELM, AEY, VEQ

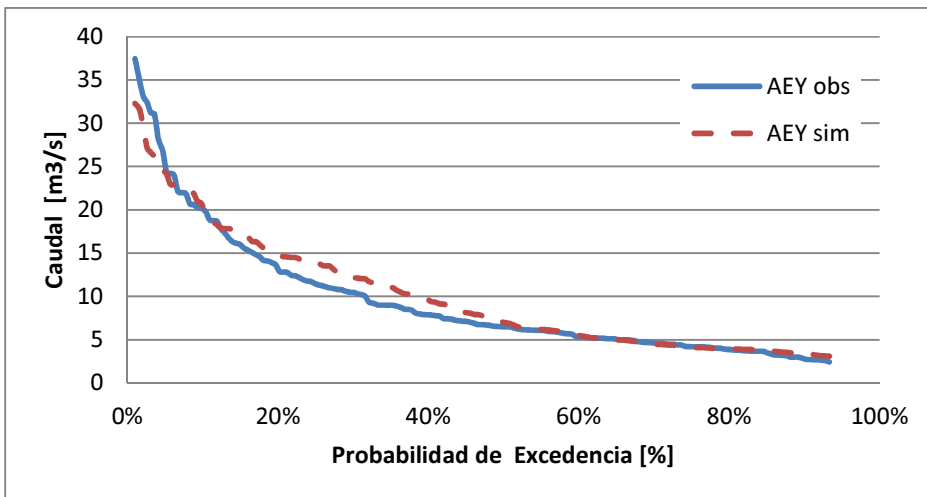
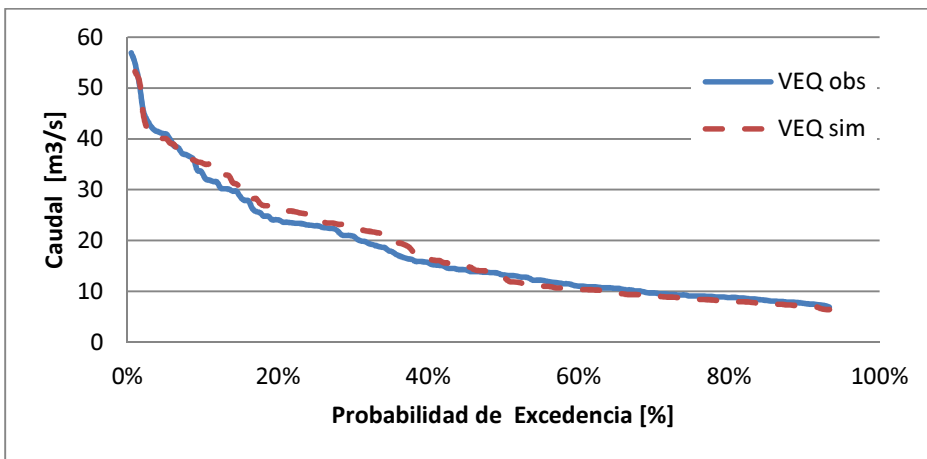
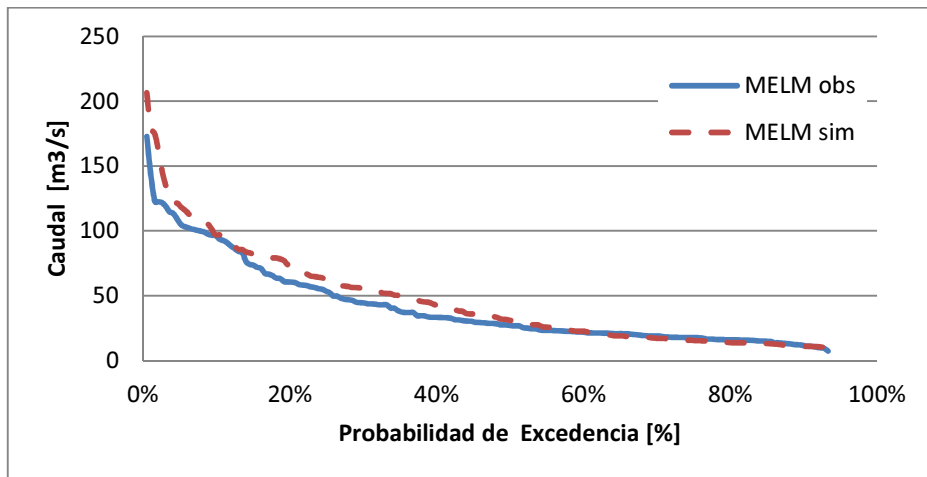


Figura 15. Curvas de duración calibración MELM, AEY, VEQ

Se analizó, además como criterio de calibración la evapotranspiración total potencial en la banda baja versus la registrada en la estación base, Pirque, información obtenida de la Dirección General de Aguas en el período de calibración (ver Figura 16), para así mantener los rangos en las entradas y salidas para un adecuado balance de masa.

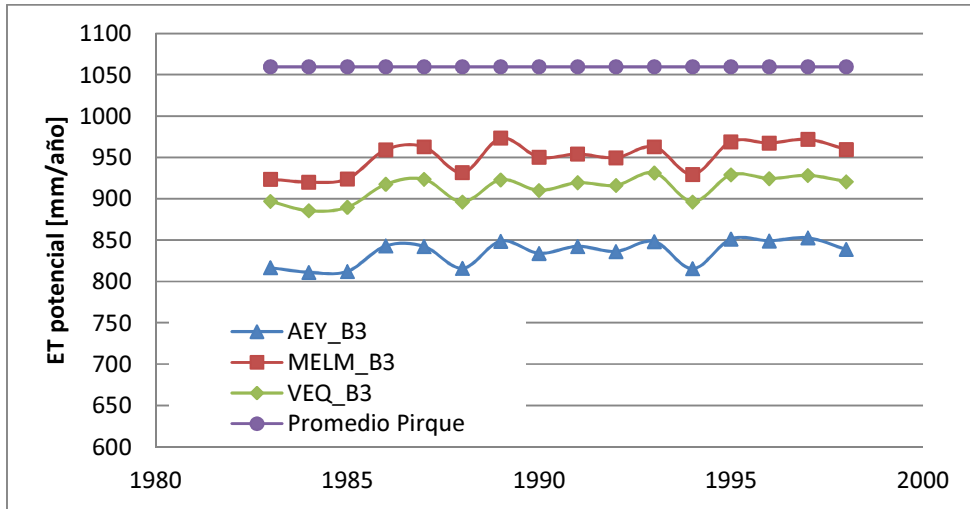
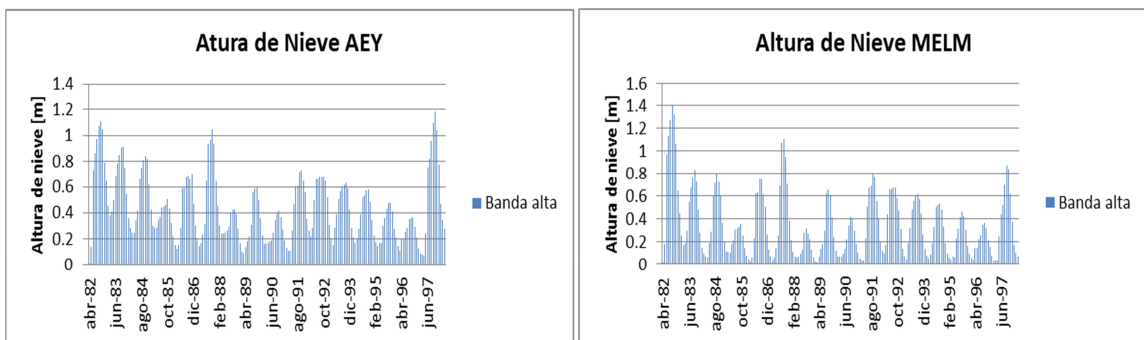


Figura 16. Evapotranspiración bandas bajas vs Pirque

El resultado obtenido de la Figura 16, es coherente, pues se tiene evapotranspiración con un orden de magnitud adecuado y menores que la evaporación de Pirque, lo que es correcto dada la mayor altitud de las bandas de elevación respecto a la estación meteorológica.

Otro parámetro relevante en la calibración es la acumulación de nieve, la cual debe arrojar resultados coherentes, como niveles máximos y mínimos de nieve.



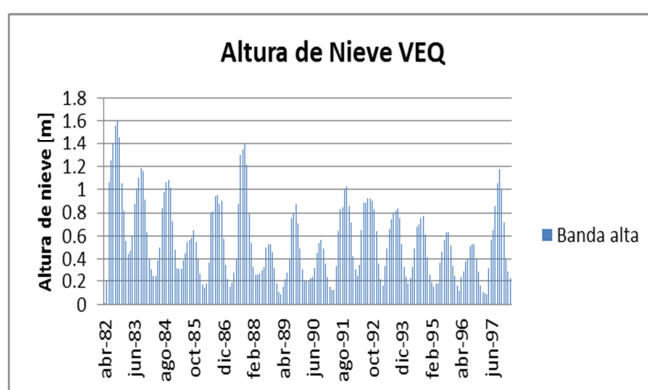


Figura 17. Altura de nieve en la banda alta de calibración, todas las cuencas.

Puede observarse que en las tres cuencas, aunque en mayor medida en la del río Yeso, se tiene un remanente de nieve en los meses de estiaje, lo que implica la formación de glaciación y una deficiencia de agua en el período de deshielo. No fue posible ajustar la calibración para evitar este fenómeno, por lo que se sugiere incluir un módulo de radiación, con tal de aumentar el derretimiento en la zona alta de las cuencas.

Se observa concordancia en los tiempos de deshielos y crecidas pluviales, sin embargo, algunas crecidas producto de los deshielos son subestimadas en sus peak, mientras que las crecidas pluviales son difíciles de reproducir fielmente, dada la discretización temporal de la calibración (mensual). Los indicadores de error, arrojan los resultados de la Tabla 17.

Tabla 17. : Indicadores de error calibración cuencas

Cuenca	N-S	Ln N-S	R ²	PBIAS [%]
MELM	0.5	0.6	0.5	-3.3
VEQ	0.7	0.7	0.7	-0.3
AEY	0.8	0.8	0.8	-5.9

5.2 Resultados Validación

Con el fin de corroborar que la calibración reproduce de manera aceptable los sucesos reales, se realiza una validación para el período Abril 1998- Marzo 2004, período que posee años húmedos, secos y normales. Resultados se exponen en las Figura 18 y Figura 19.

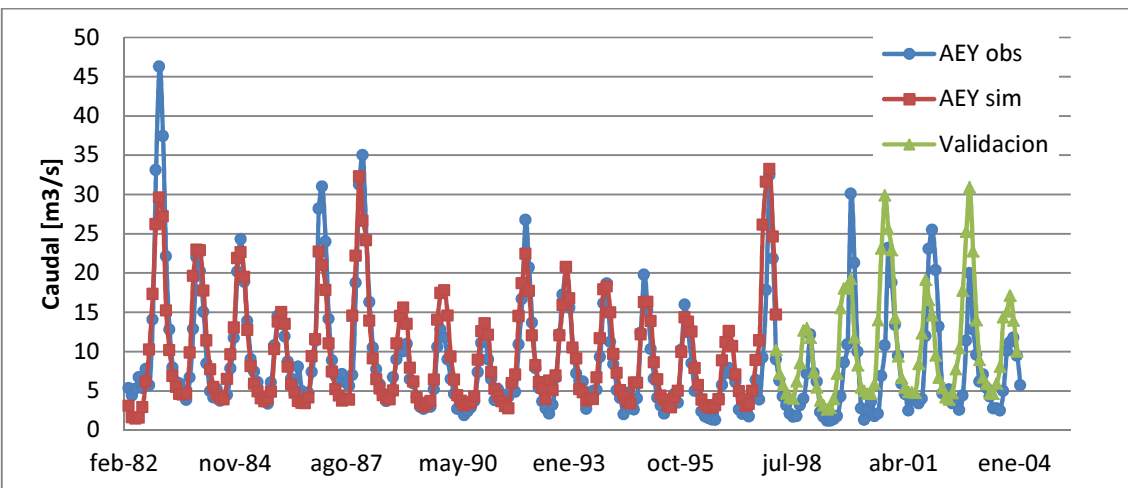
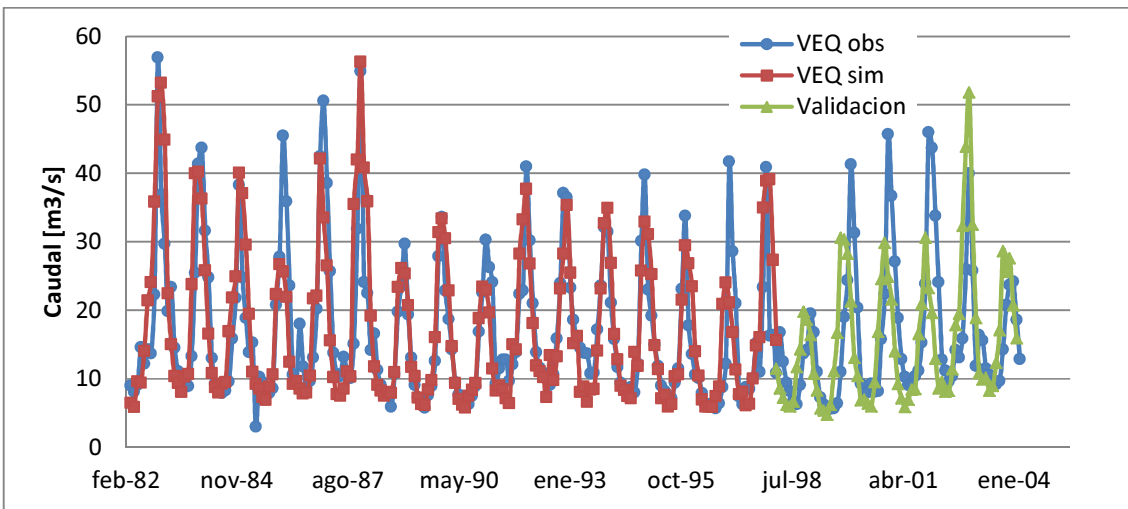
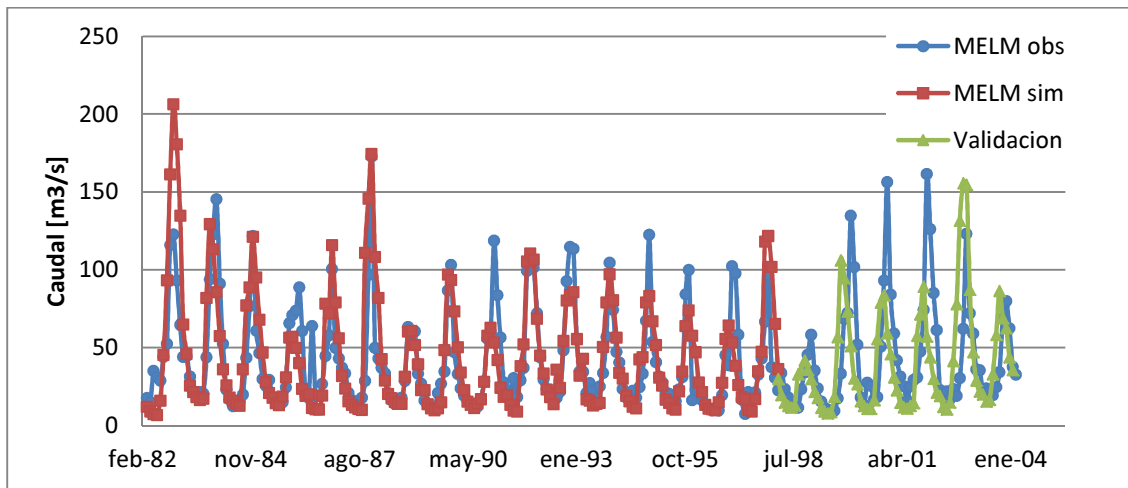


Figura 18. Hidrogramas validación MELM, VEQ, AEY

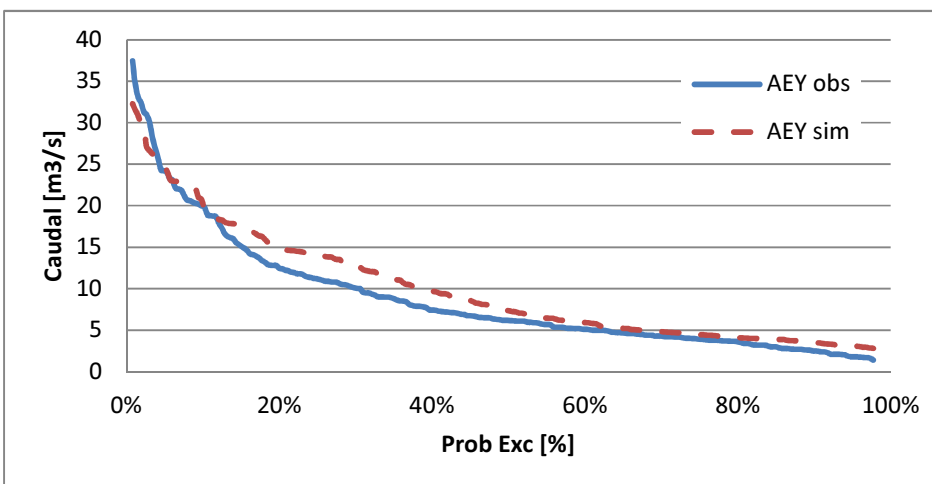
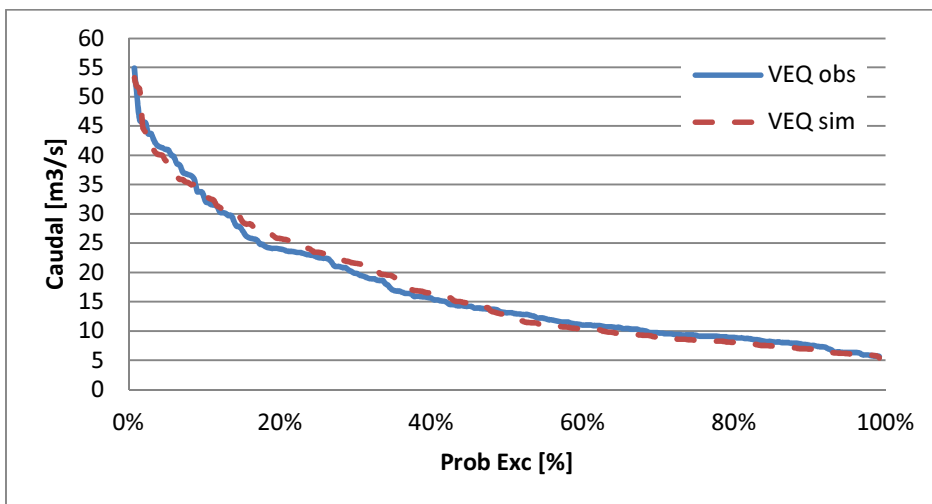
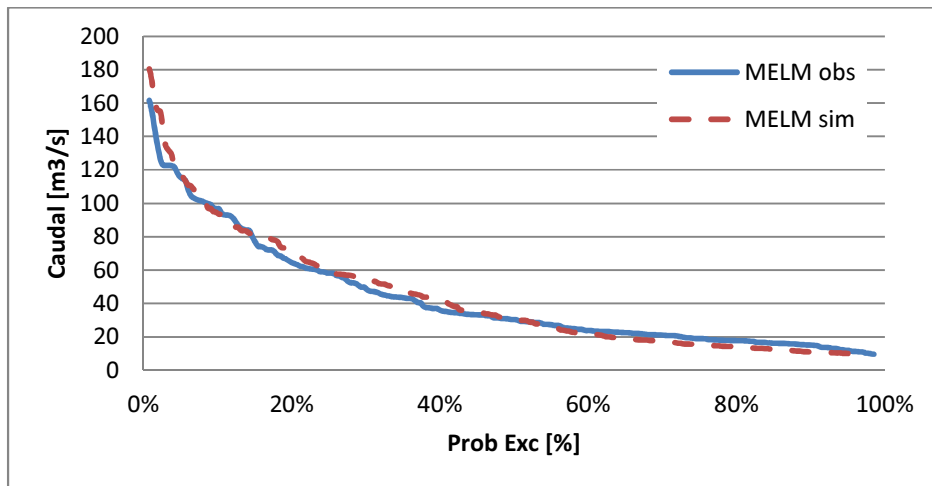


Figura 19. Curvas de duración, validación MELM, VEQ, AEY

De manera análoga se obtienen los valores de los indicadores, que se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Indicadores de error, validación del modelo

Cuenca	N-S	Ln N-S	R²	PBIAS [%]
MELM	0.5	0.7	0.6	0.8
VEQ	0.6	0.7	0.6	1.2
AEY	0.7	0.7	0.7	-17.2

Dado que los indicadores de error se encuentran dentro del rango de bondad de ajuste permitido tanto para la calibración como para la validación del modelo, se aceptará esta calibración, que permitirá continuar con la simulación futura para el período 2040-2070.

CAPÍTULO VI: ELECCIÓN Y ESCALADO DE RESULTADOS DEL MODELO CLIMÁTICO

Tal como se mencionó en el CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA, se utilizarán los resultados de precipitación y temperatura, de un modelo a definir de circulación global como input en la simulación con WEAP.

El próximo paso a seguir, es la definición del modelo climático a utilizar. Actualmente hay cerca de treinta instituciones¹⁰ diferentes que están desarrollando modelos climáticos para los nuevos escenarios RCP, se seleccionará por tanto, aquel con resultados para la zona geográfica y que represente de mejor manera la estacionalidad del lugar y la climatología en el período de línea base. Bajo las consideraciones mencionadas anteriormente, se optó por utilizar el modelo Mk-3.6 perteneciente a la institución CSIRO-QCCE.

6.1 Especificaciones Mk-3.6

Modelo desarrollado por dos instituciones Australianas en conjunto, Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation y Queensland Climate Change Centre of Excellence, el cual cumple con los estándares del proyecto del CMIP5¹¹. Es una actualización del Mk-3.5, con incorporación de la dinámica e interacción de aerosoles en la atmósfera. Posee una resolución de 1.9°x1.9° en la atmósfera y de 1.25°x1.25° en el océano con 19 y 20 capas verticales en la atmósfera y océano, respectivamente.

El modelo posee resultados para los escenarios RCP 2.6, 4.6 y 8.6, para variables de temperatura, precipitación, humedad atmosférica, radiación, velocidad del viento, entre otros. Estos resultados corresponden a 10 series alternativas equiprobables, lo que genera un espectro de variabilidad al tomar los valores medios y extremos. Para el caso de las simulaciones futuras de este proyecto de título, se utilizarán las proyecciones de temperaturas medias mensuales y precipitación mensual.

6.2 Escalado de las variables meteorológicas

Dada la cantidad de información que deben manejar los modelos climáticos para cubrir el globo completo, no es posible obtener información detallada a escala más fina o nivel de cuenca (como se contaba la metodología PRECIS-RGM para los escenarios más antiguos, SRES¹²), por lo tanto es necesario realizar un escalado espacial y temporal de las proyecciones de las variables a utilizar.

¹⁰<http://cmip-pcmdi.llnl.gov>

¹¹ Coupled Model Intercomparison Project 5

¹² Special Report on Emission Scenarios

6.2.1 Escalado espacial

Este escalamiento se realiza bajo el supuesto de que aquellos puntos de información que están más cercanos al punto de interés tendrán mayor preponderancia que aquellos que están más lejanos, de esta manera se adopta un escalamiento proporcional al inverso cuadrado de la distancia al punto de interés. La distancia de cada punto del cuadrante a la estación base (ver son: $d_1=129.9$ km, $d_2=111.3$ km, $d_3=159.4$ km y $d_5=143.6$ km (ver Figura 20).

$$\sum Variable\ escalada_i = \frac{\sum variable\ sin\ escalar_i \frac{1}{dist\ Pirque_i^2}}{\sum \frac{1}{dist\ Pirque_i^2}} \quad (11)$$

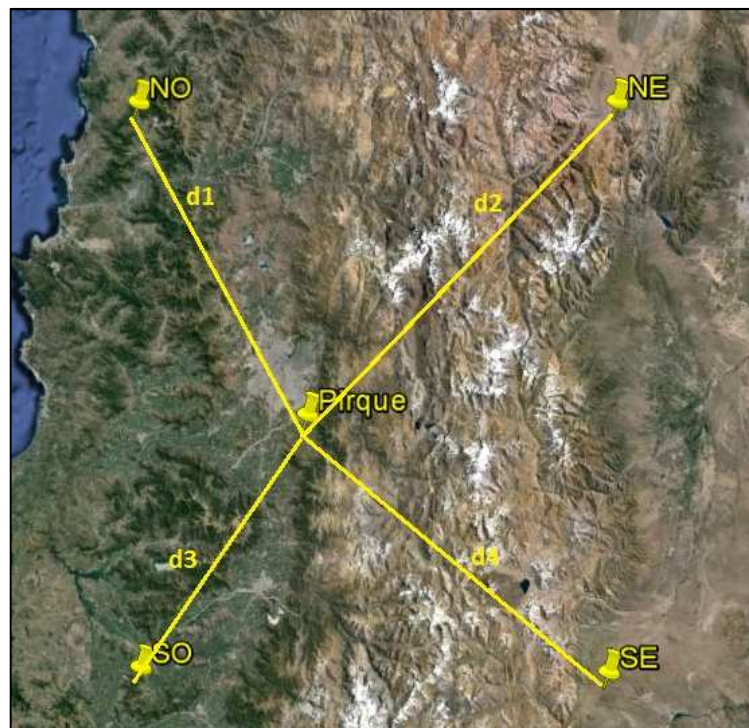


Figura 20. Cuadrante correspondiente a estación Pirque. NO corresponde al vértice noroeste del cuadrante, NE al noreste, SO al suroeste y SE al sureste. Fuente: Google Earth.

6.2.2 Escalado temporal

Con el propósito de representar de manera más fiel las proyecciones de las variables, es necesario realizar un ajuste de funciones de transferencia entre los datos proyectados en el período de línea base para el punto de interés, estación base Pirque, con respecto a los datos registrados por la estación, esto se obtiene al ordenar los valores por probabilidad de excedencia y ajustar posteriormente, una curva, de esta manera se disminuye el sesgo entre los datos.

Debe mencionarse que para ciertos datos de precipitación que escapan de la tendencia en sus extremos (valores *outliers*), no fueron considerados en el ajuste de las funciones de transferencia por sobreestimar con la extrapolación, estos datos escalados.

Para el caso de la temperatura, el escalado se realizó a nivel mensual para cada serie equiprobable o “esemble¹³”, mientras que para la precipitación se agrupó a los meses de estiaje (Diciembre-Marzo) para tener mayor cantidad de datos no nulos y poder generar un mejor ajuste.

En resumen, se tendrán 10 escalados por período, mes o temporada seca según sea Precipitación o temperatura, estas funciones de transferencia se consideran invariantes en el tiempo, y serán utilizadas por tanto en el procesamiento de los datos futuros.

A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 21 y Figura 22 resultados del escalado temporal de precipitación y temperatura (ver anexo para información completa).

Una vez terminado el proceso de escalado tanto espacial como temporal, se cuenta con la serie de datos meteorológicos para el período de línea base y proyección futura para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. El resto de las variables involucradas en el modelo WEAP, como humedad, velocidad del viento, uso de suelo, entre otros, se considerarán invariantes. Este supuesto es bastante fuerte y podría ser estudiado en un análisis posterior, para una representación más fiel y completa de la variabilidad hidrológica en la cuenca.

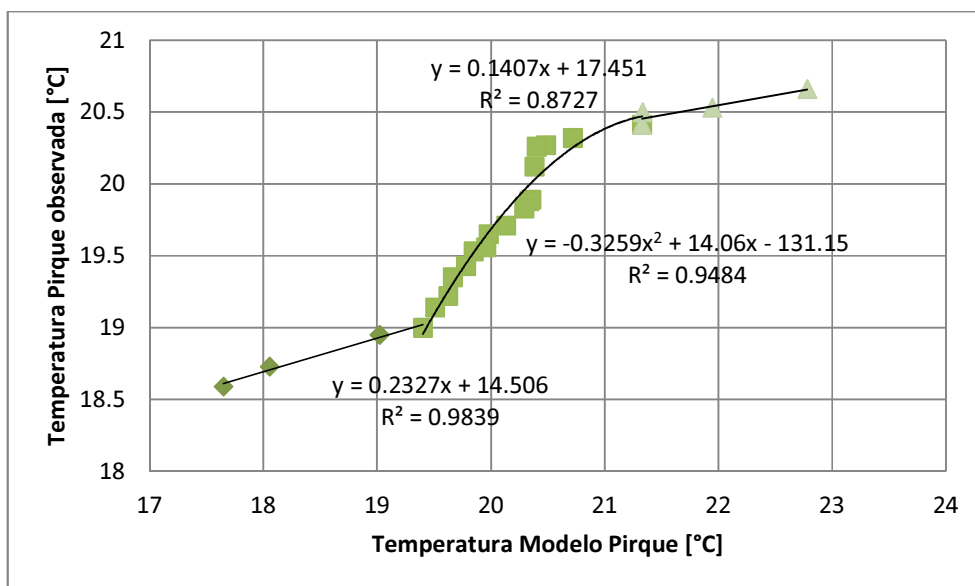


Figura 21. Escalado temporal Enero serie 2

¹³ Cada uno de los diez essembles viene dado por el nombre: R1,...,R10.

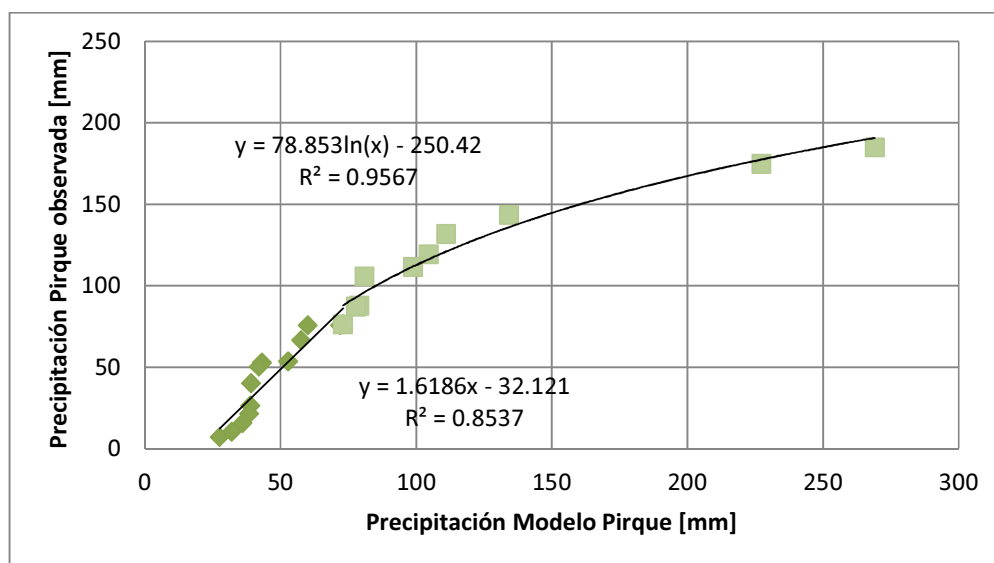


Figura 22. Escalado temporal Mayo serie 5

6.3 Análisis de proyecciones meteorológicas escaladas

En esta sección, se presenta la variación de la precipitación y temperatura en el período de simulación futura 2040-2070, en contraste con los registros para el período de línea base. Las proyecciones de las forzantes meteorológicas son de gran importancia pues es el input principal para el modelo hidrológico.

6.3.1 Temperatura

Para corroborar un escalado adecuado de la temperatura, se contrasta el período de línea base (1982-2004) registrado en la estación versus las proyecciones del período histórico para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Como puede observarse en la Figura 22, antes del escalado temporal se tiene una subestimación de los datos bajo 18 °C, lo cual se corrigió como puede observarse en la Figura 24. Se ha removido el sesgo de los datos para cada una de las series R1 a R10 y dado que estas series se mantienen en los escenarios futuros, pueden usarse las correcciones para la simulación futura.

Esta metodología pretende afinar el proceso de escalado, ya que anteriormente se realizaba un ajuste único para todas las series equiprobables, lo que tendía a generar mayor dispersión en los puntos extremos, al incluir la variabilidad de las series equiprobables, situación que al tener un escalado por serie se minimiza.

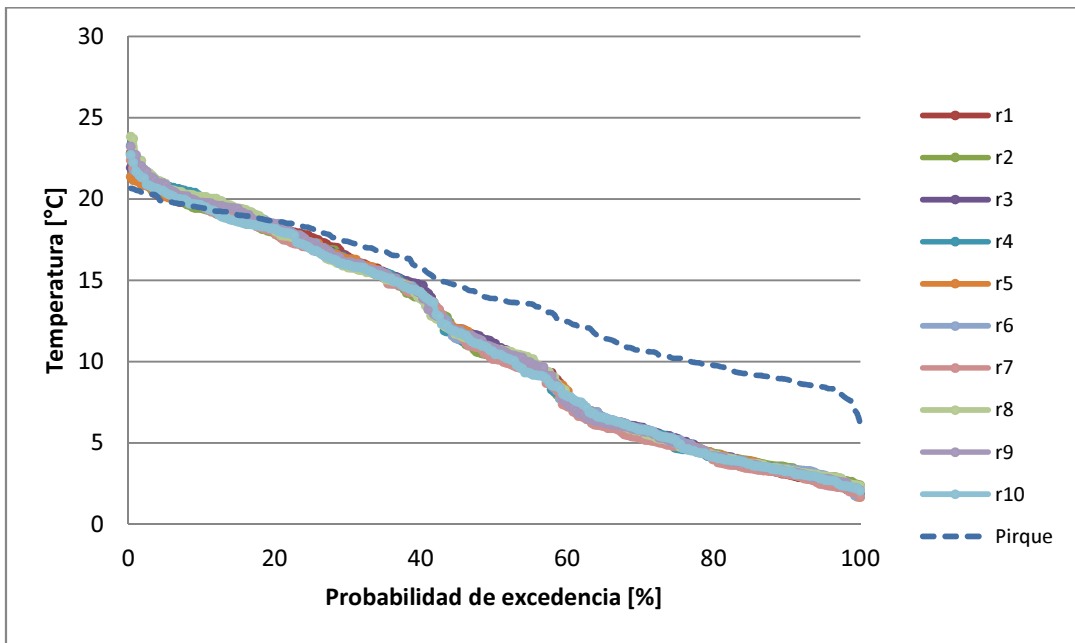


Figura 23. Curvas duración temperatura pre escalado temporal

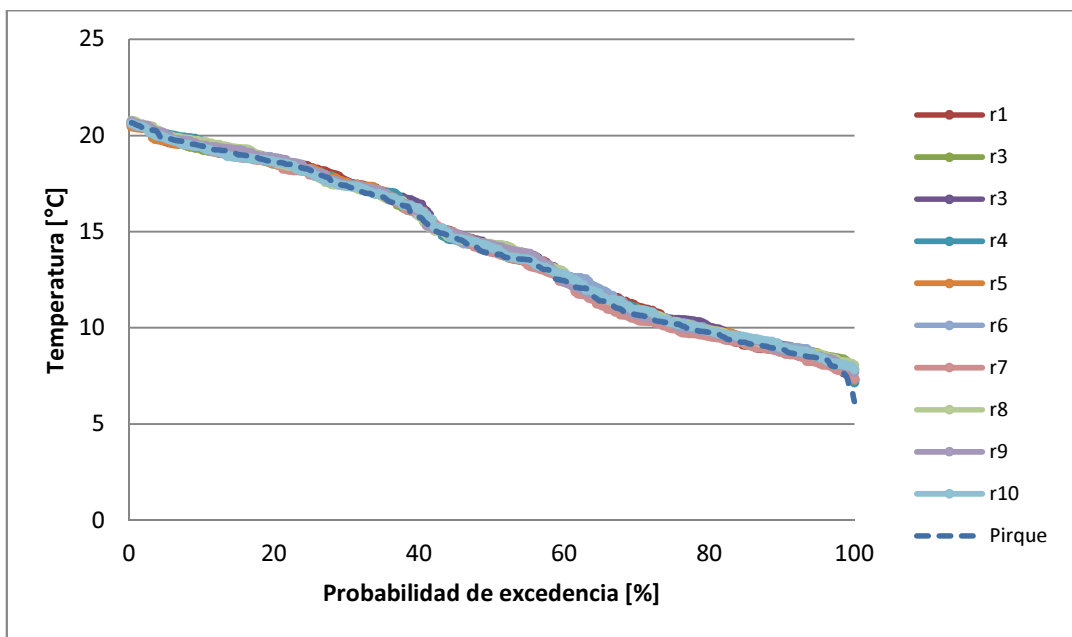


Figura 24. Curvas duración temperatura post escalado temporal

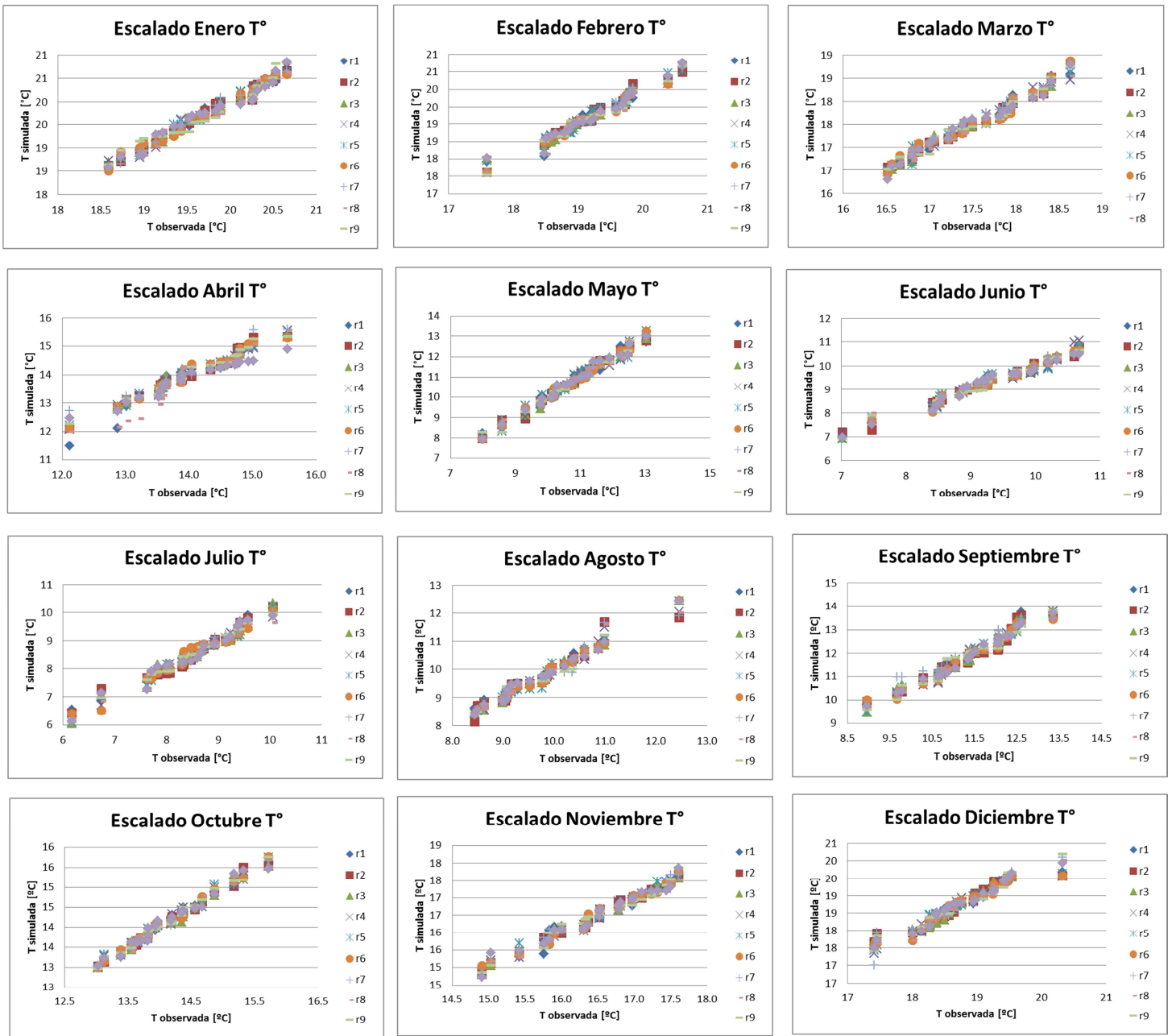


Figura 25. Escalado de datos históricos de temperatura. Línea Base

Con las relaciones entre temperatura observada y simulada para cada una de las series, como se presenta en la Figura 25, puede obtenerse ya las proyecciones futuras y su variación. Las cuales se presentan, a continuación.

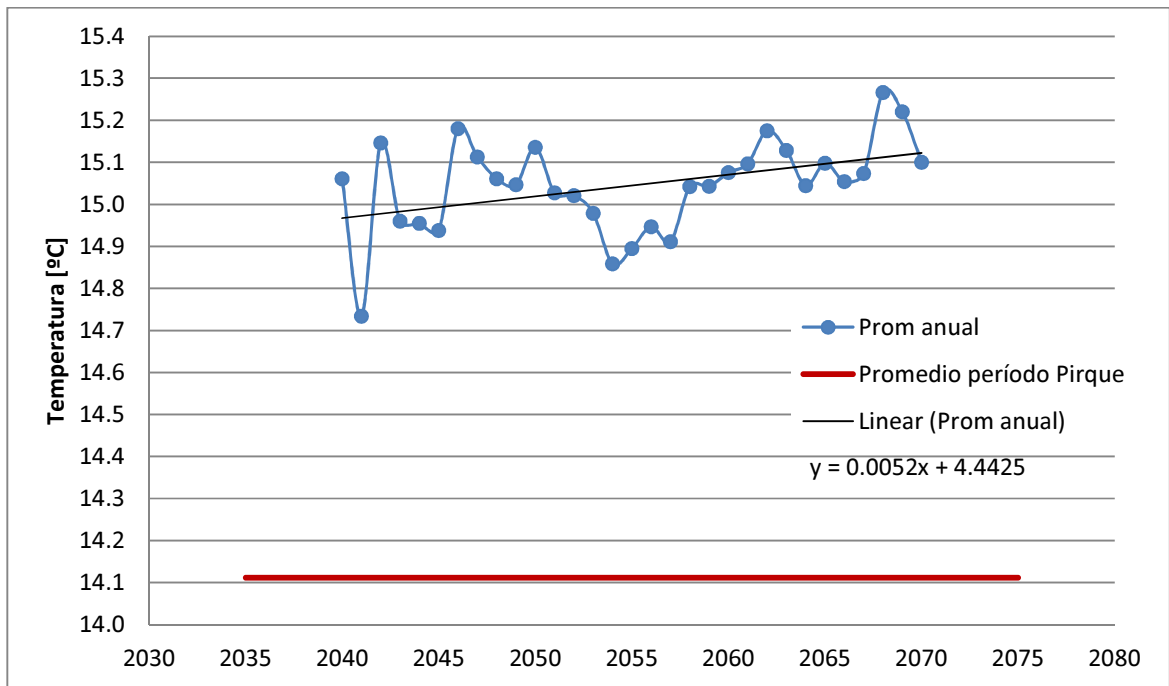


Figura 26. Temperatura promedio anual RCP 2.6 vs temperatura media en Pirque para el período de línea base.

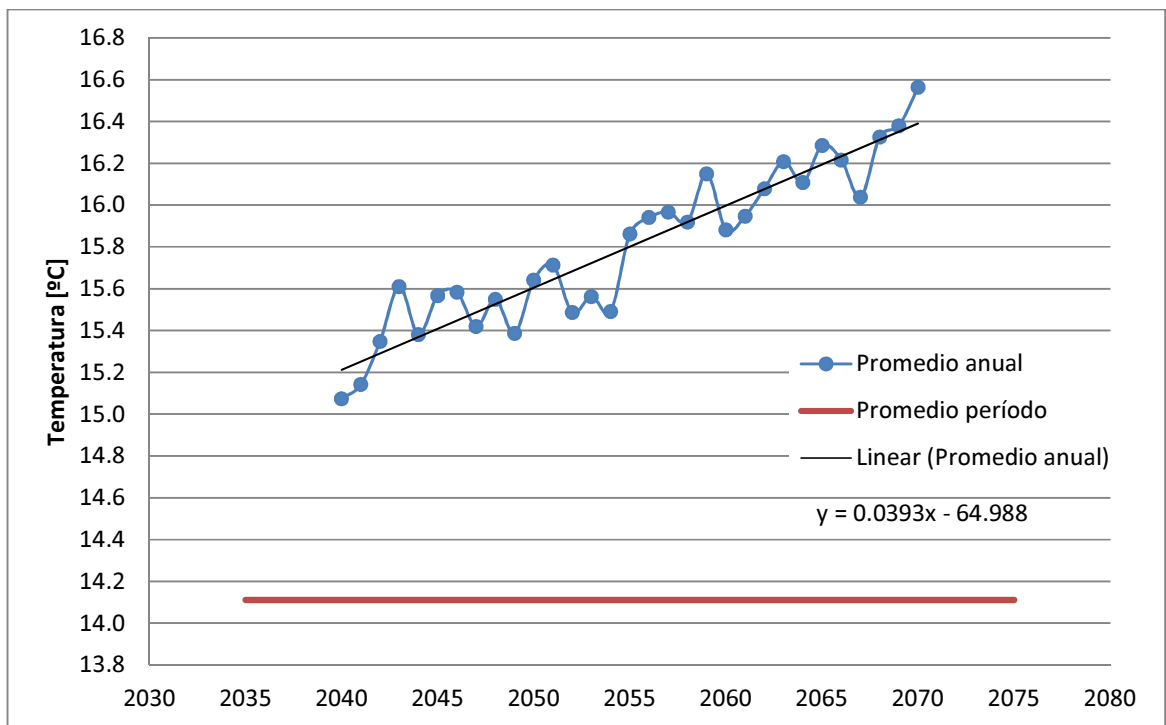


Figura 27. Temperatura promedio anual RCP 8.5 vs temperatura media en Pirque para el período de línea base.

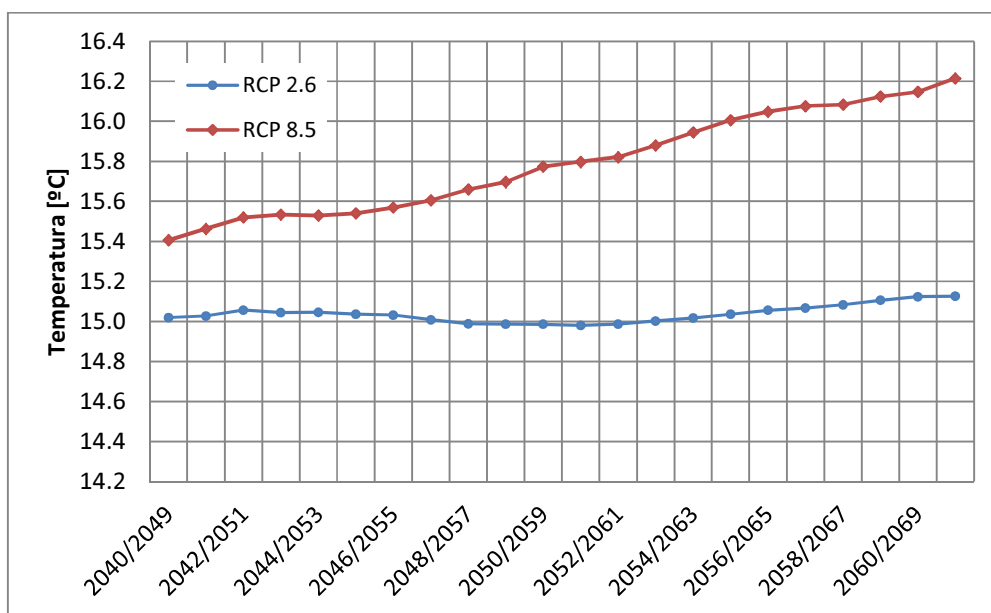


Figura 28. Media móvil decadal escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5

Puede observarse en la Figura 28, un aumento en la década de 2040-2049 de la temperatura para el RCP 2.6, luego una declinación para la década 2050-2059, para comenzar nuevamente un aumento desde el año 2060. Esto concuerda con la teoría del escenario 2.6, que tiene fluctuaciones y alcanza su peak de 3 [W/m²] antes del 2100, para luego comenzar a declinar.

En el caso del escenario 8.5, el aumento es sostenido en todo el período, lo que también es concordante con la teoría del escenario.

Para el período de estudio, ya puede observarse que para el año 2040 el punto de partida para ambos escenarios ya difiere, en el caso del escenario 2.6 la temperatura media anual es de 15.0 °C, mientras que para el 8.5 es de 15.1 °C en la estación base. Hacia el año 2060 se tienen temperaturas medias anuales de 15.1 °C y 16.6 °C, para los escenarios 2.6 y 8.5 respectivamente. Ambos valores en el término del período (2070) están por sobre el valor de temperatura media para el período de línea base, 14.1 °C, como se observa en las Figura 26 y Figura 27.

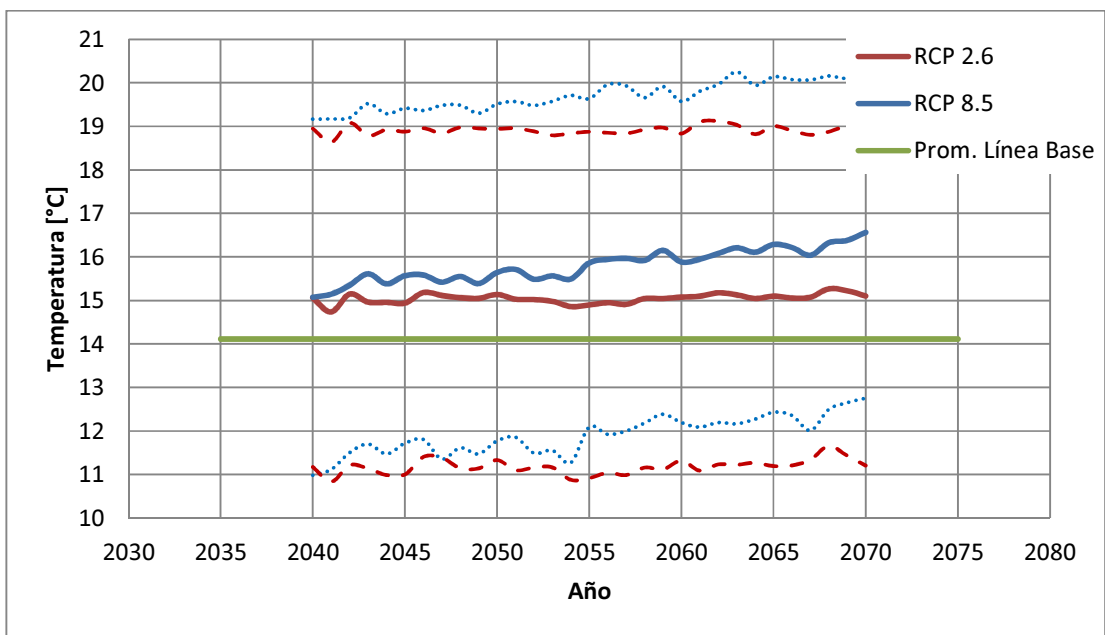


Figura 29. Contraste temperaturas medio anuales en Pirque, escenarios RCP 2.6, 8.5 y línea base. Líneas continuas indican promedio de series para cada escenario. Líneas punteadas indican la variabilidad de los valores según series.

La climatología se mantiene para la temperatura, como puede observarse en la Figura 30. Donde se tienen las temperaturas más bajas en el mes de Julio y máximos en el período de estiaje (Enero en la mayoría de los casos).

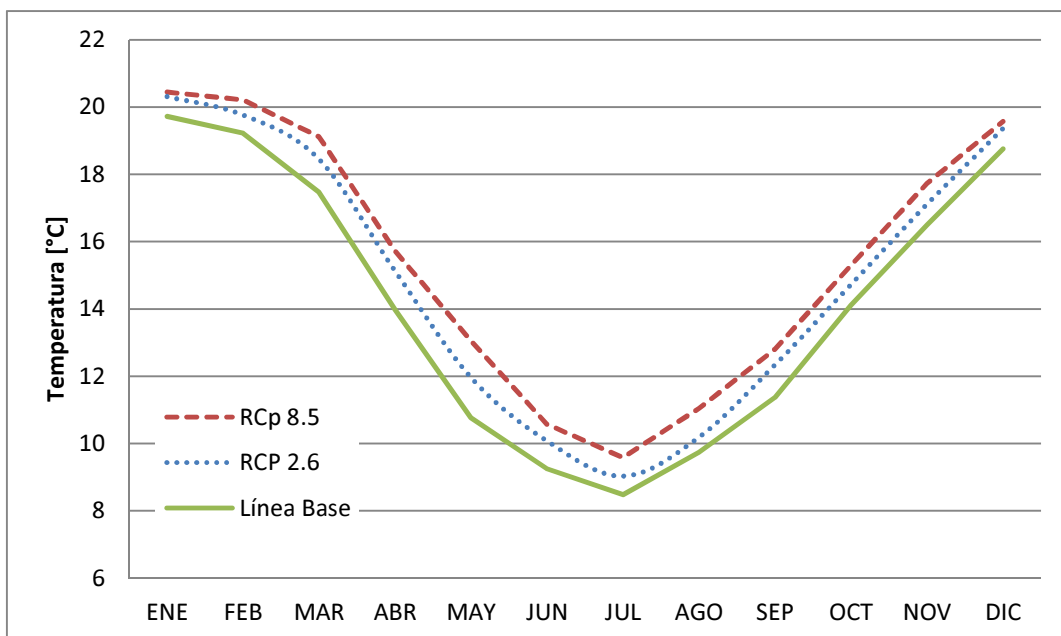


Figura 30. Temperatura media mensual Pirque, serie 4

6.3.2 Precipitación

El procedimiento realizado para escalar la precipitación es análogo al caso de la temperatura, salvo en la construcción de las funciones de transferencia. En las Figura 31 y Figura 32, se presentan las curvas de duración pres y post escalado temporal, respectivamente.

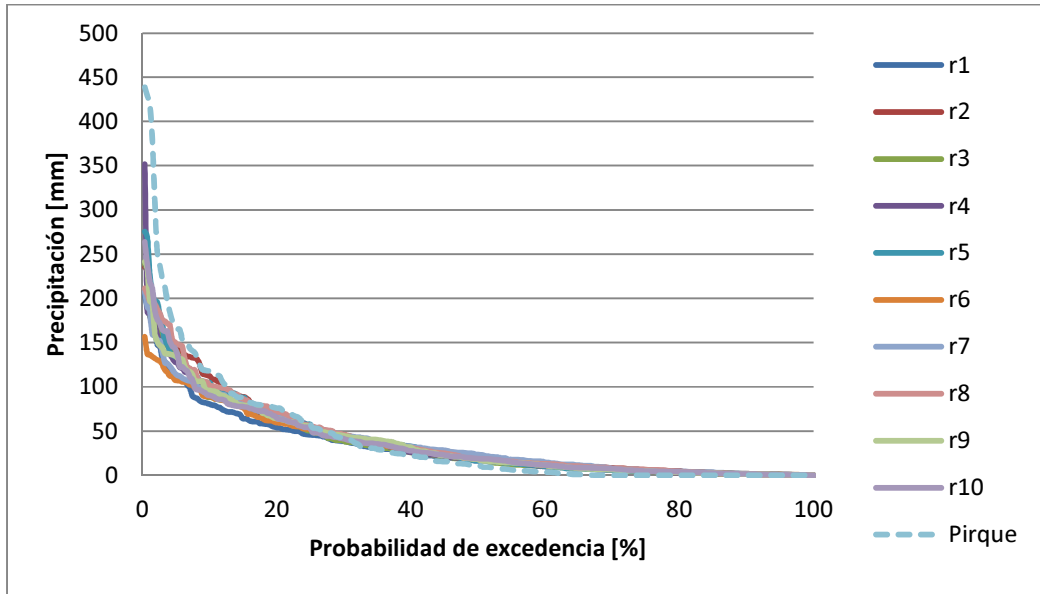


Figura 31. Curva duración precipitación pre escalado temporal en Línea Base.

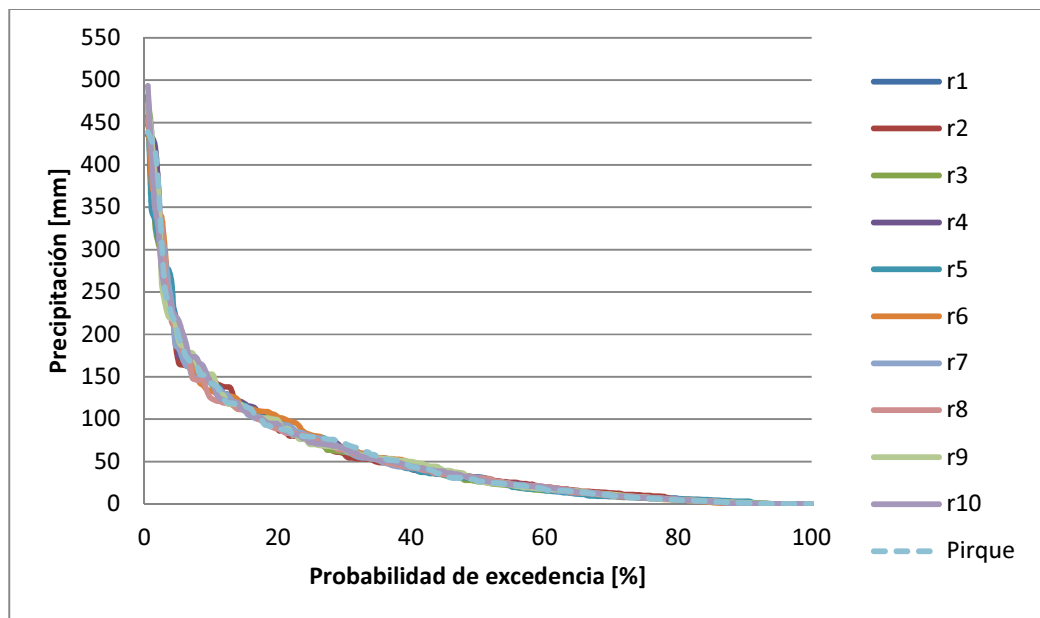


Figura 32. Curva duración precipitación post escalado temporal, en Línea Base.

Puede observarse, que el ajuste no es tan fino en el caso de la precipitación como lo es para la temperatura, esto se debe a que los datos de precipitación son discretos y hay menor cantidad de datos lógicamente (sólo días con precipitación aportan información), lo que genera una leve subestimación en los valores extremos de algunos meses, debe tenerse en cuenta al momento del análisis de los resultados.

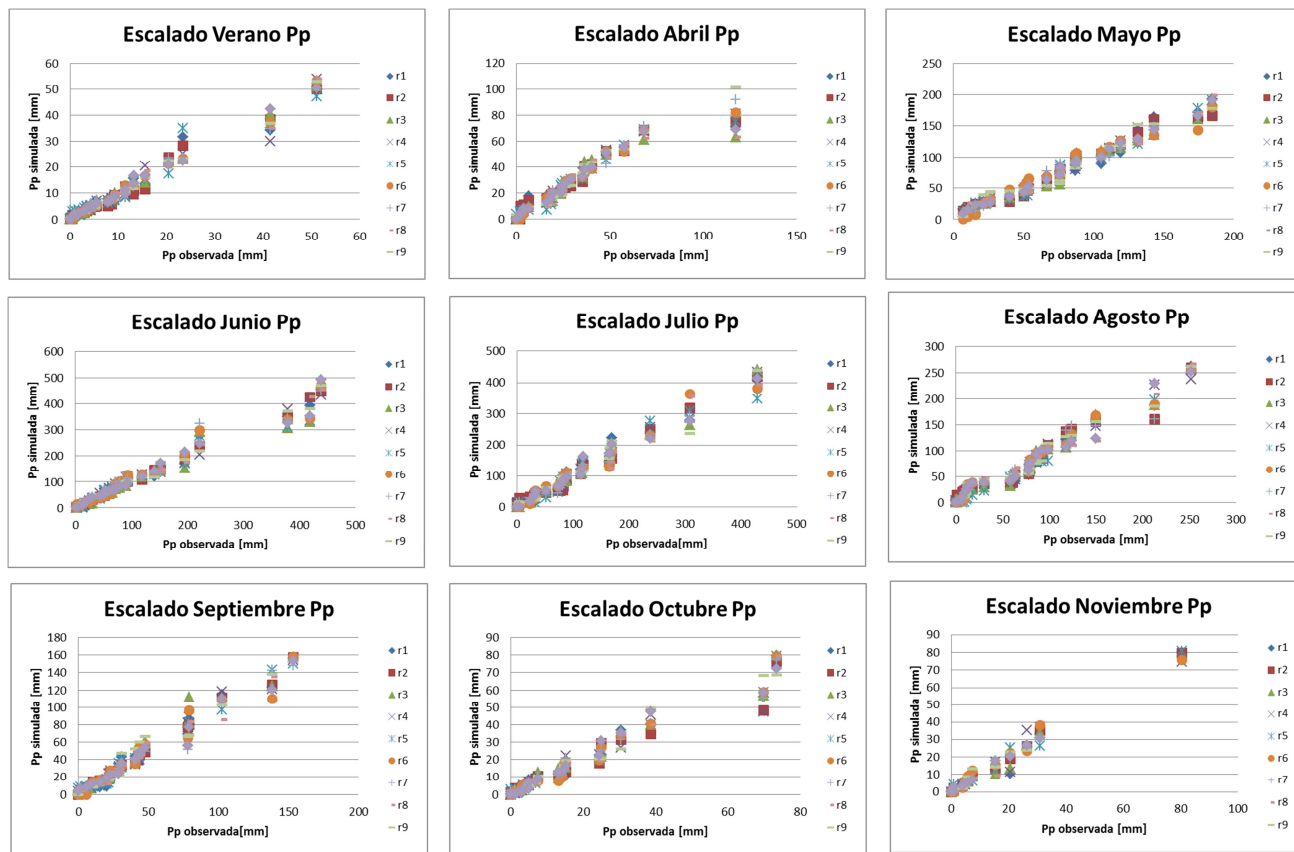


Figura 33. Escalado de datos históricos de precipitación. Línea Base.

En las Figura 34 y Figura 35, se exponen las precipitaciones anuales, con su respectiva variabilidad inherente a las series. Para ambos escenarios los montos de éstas varían año a año, sin una clara tendencia a la baja para el período de simulación, pero si disminuidas en monto promedio, respecto al período de línea base, como se muestra en la Figura 36 y Figura 37.

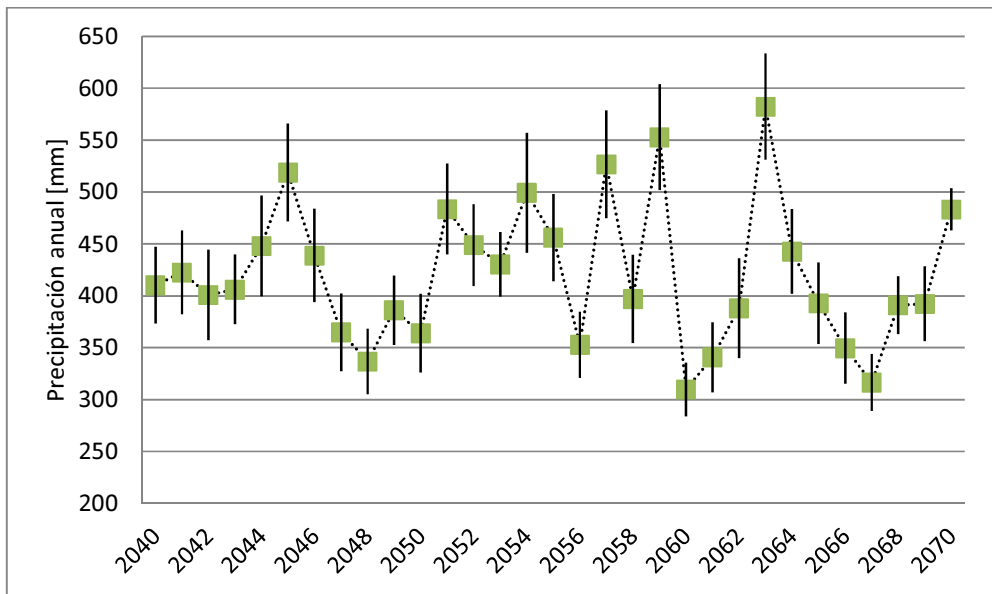


Figura 34. Precipitación promedio anual, escenario RCP 2.6, líneas negras indican intervalo de confianza.

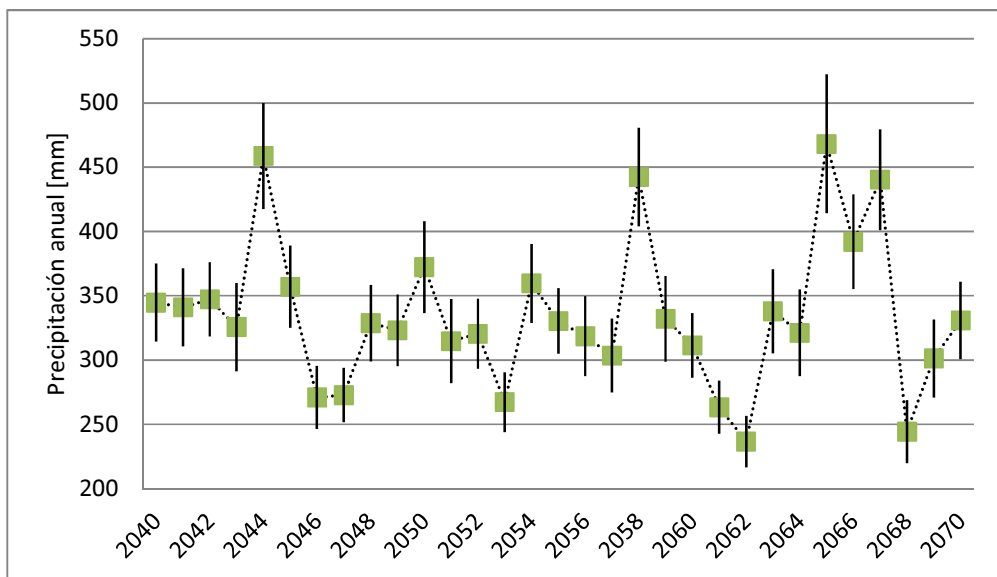


Figura 35. Precipitación promedio anual, escenario RCP 8.5, líneas negras indican intervalo de confianza.

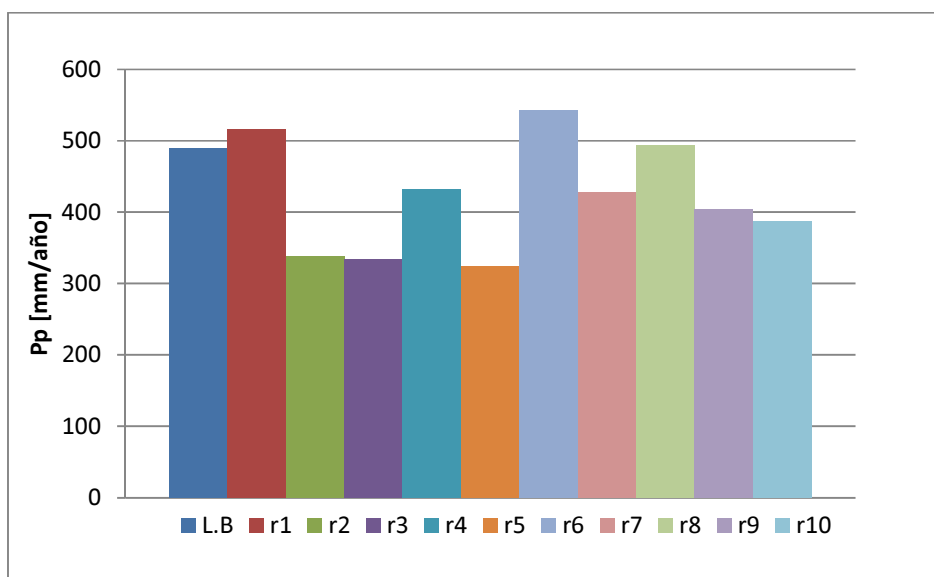


Figura 36. Precipitación anual promedio para escenario RCP 2.6 promedio período 2040-2070 vs promedio línea base (mm/año)

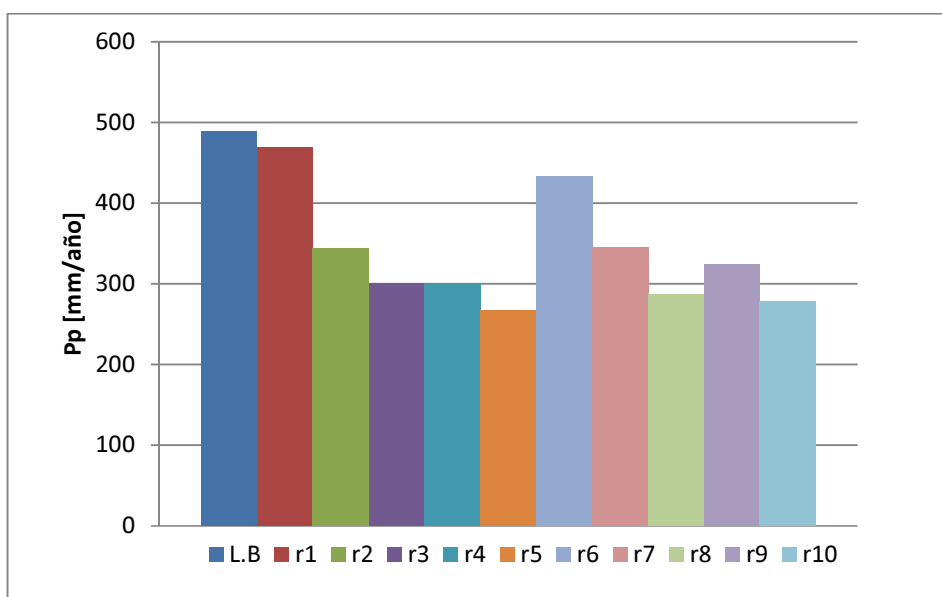
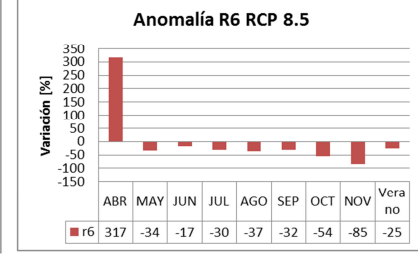
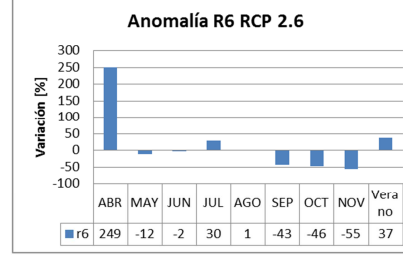
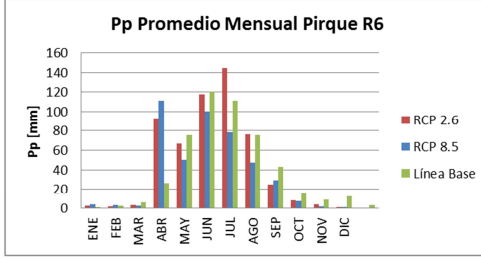
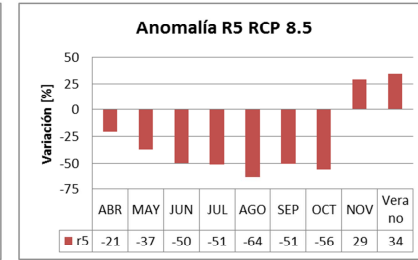
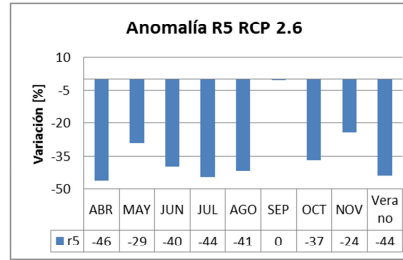
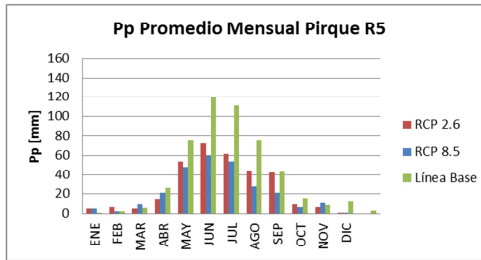
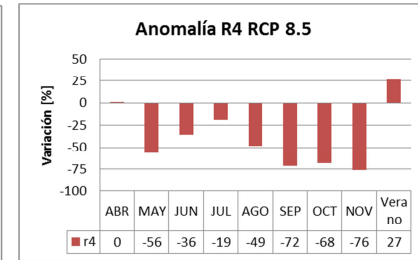
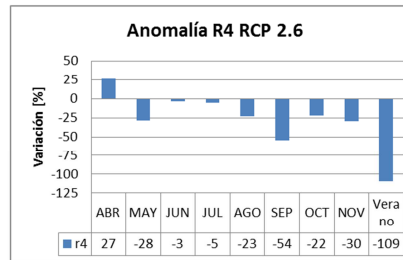
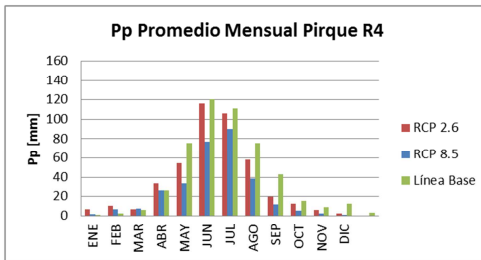
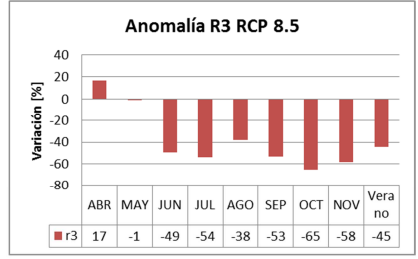
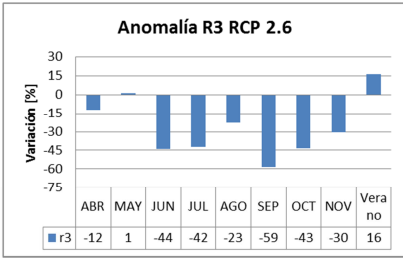
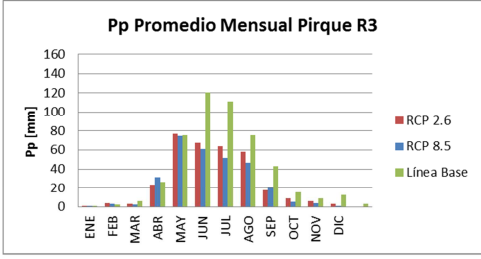
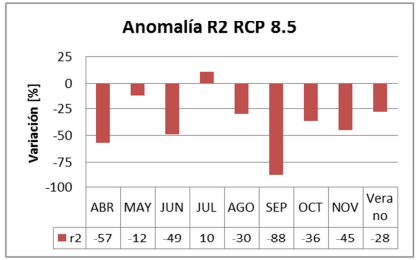
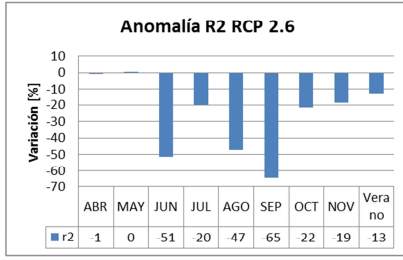
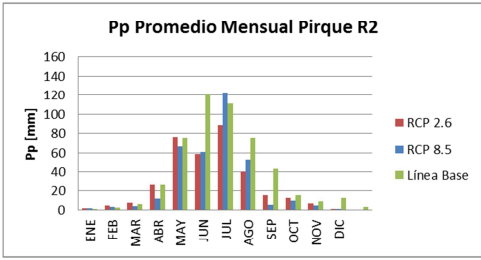
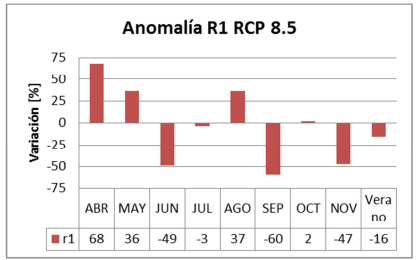
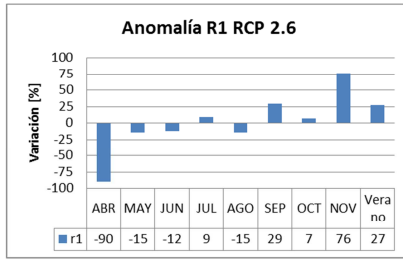
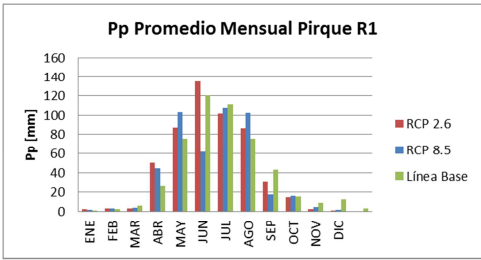


Figura 37. Precipitación anual promedio para escenario RCP 8.5 promedio período 2040-2070 vs promedio línea base (mm/año)

En la Figura 36 y Figura 37 **Error! Reference source not found.**, puede verse la variabilidad según serie, en el caso del escenario más conservador, se tienen tres series con aumento de precipitaciones (R1, R5 y R8), mientras que en el RCP 8.5, se espera disminución en todas las series.



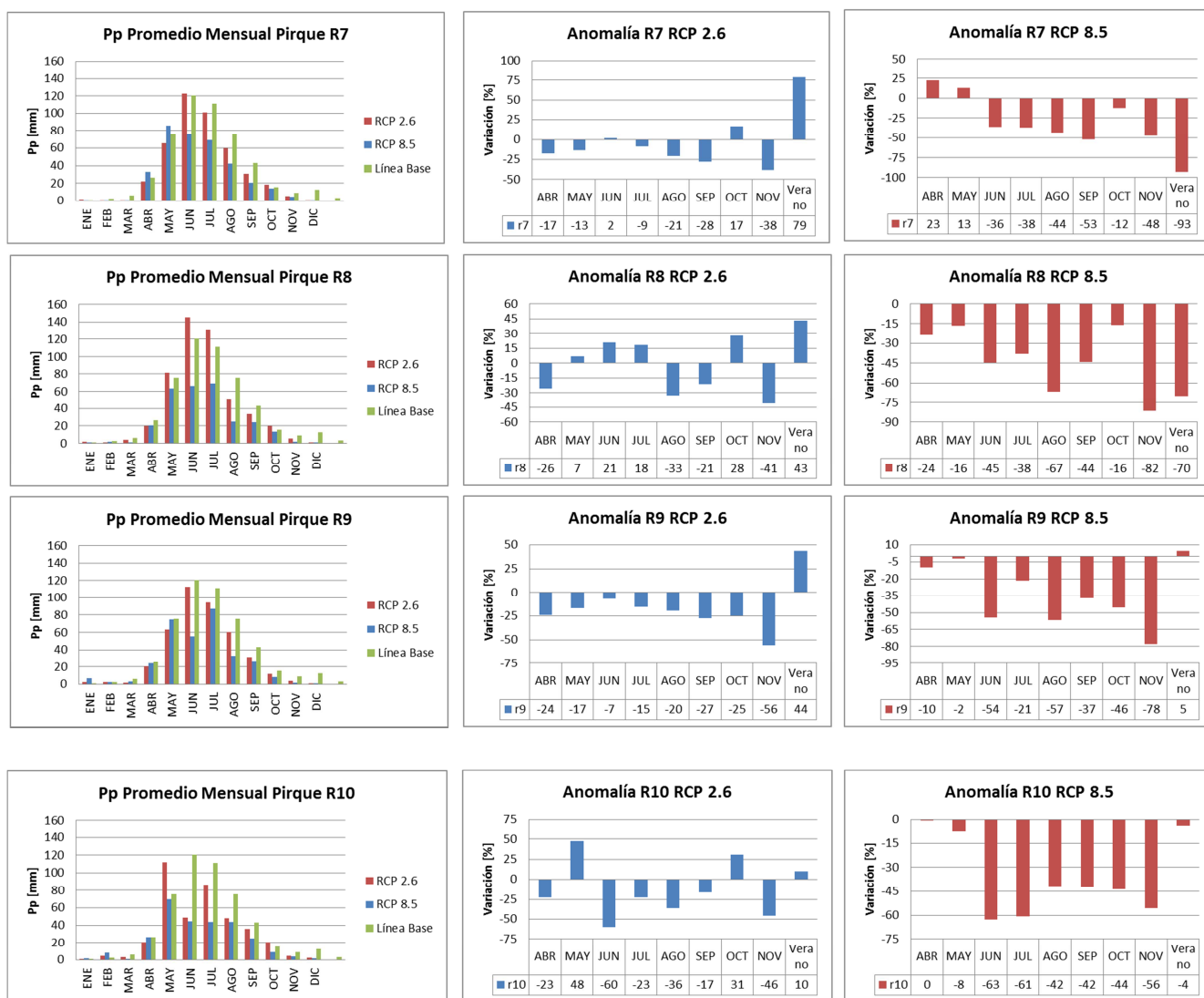


Figura 38. Distribución mensual de precipitaciones junto a anomalías respecto a línea base, RCP 2.6 y RCP 8.5

Como puede observarse en las anomalías de la Figura 38, hay ciertas proyecciones que escapan de la tendencia, estos valores son llamados *outlier*¹⁴, estos valores se producen por la excesiva extrapolación de precipitaciones proyectadas que están muy por sobre el monto máximo de precipitación registrada en la estación, con lo que necesariamente se produce una sobreestimación de la proyección, debido a la falta de registros cercanos en monto.

¹⁴ Valor atípico, que difiere del resto de la muestra, en comportamiento o monto.

Hay que tener especial consideración con los *outliers*, puesto que en una simulación hidrológica a nivel mensual, pueden implicar variaciones considerables en el volumen de agua proyectado, este efecto se analizará en el capítulo siguiente

A diferencia de la temperatura, en las proyecciones de precipitación la variabilidad entre escenarios es considerable, teniéndose ciertas series con comportamientos que difieren a la estacionalidad de la línea base. Para obtener resultados más representativos, se realizó un análisis estadístico en el cual se agruparon las series en tres poblaciones diferentes (Modo 1, Modo 2 y Modo 3) para cada escenario RCP. Como criterio de selección se utilizó: Análisis gráfico y prueba F de Fisher (ver Capítulo II, sección 2.3.3).

La agrupación realizada para el RCP 2.6 (ver Tabla 19), consiste en:

Modo 1, corresponde a las series R1, R6 y R8.

Modo 2, corresponde a las series R2, R3 y R5.

Modo 3, corresponde a las series R4, R7, R9 y R10.

Se tiene en el modo 1, las tres series con mayor precipitación media anual futura, con una distribución de precipitación similar a la estacionalidad de línea base, pero con ligero aumento proporcional en el mes de Abril. En el modo 2, se tienen las series con menor precipitación media anual futura y que siguen una distribución de dos peaks (Mayo y Julio). En el caso del modo 3, se presenta una disminución de la precipitación media anual futura, respecto a la línea base, pero manteniendo la estacionalidad (ver Figura 39).

Tabla 19. Medias y varianzas según comportamiento modal RCP 2.6

	Media [mm/mes]	Varianza [mm ² /mes]
Modo 1	42.8	9071
Modo 2	27.7	2024
Modo 3	34.4	4431

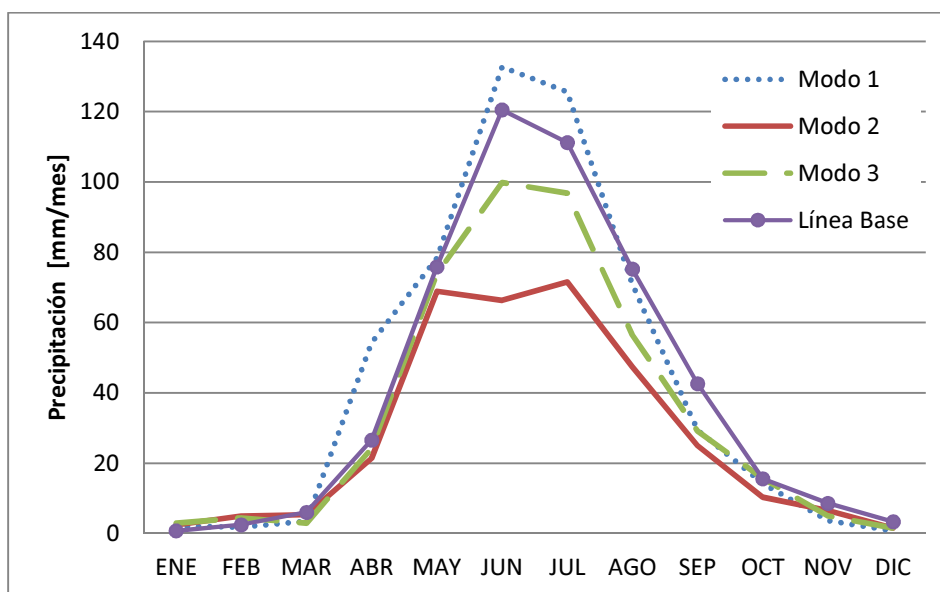


Figura 39. Precipitación promedio mensual RCP 2.6 según comportamiento

Para el escenario RCP 8.5, puede observarse en todos los modos, el monto total de las precipitaciones se ve disminuido, además de tenerse variaciones en la estacionalidad, las precipitaciones tienen a adelantarse, es decir, en el modo 1, se tiene un peak menor en el mes de abril y luego otro mayor en Julio. En el modo 2, el peak menor se sitúa en Mayo y el mayor en Julio. El modo 3, es aquel con la reducción más drástica de precipitaciones, teniéndose el peak en el mes de Mayo, pero decreciendo levemente el monto para Junio y Julio (ver Figura 40).

Análogamente para el RCP 8.5 (ver Tabla 20 para medias y varianzas):

Modo 1, corresponde a las series R1 y R6.

Modo 2, corresponde a las series R2, R3, R4, R7 y R9.

Modo 3, corresponde a las series R5, R8 y R10.

Tabla 20. Medias y varianzas según comportamiento modal RCP 8.5

	Media [mm/mes]	Varianza [mm ² /mes]
Modo 1	37.6	6537
Modo 2	26.9	3505
Modo 3	23.1	2004

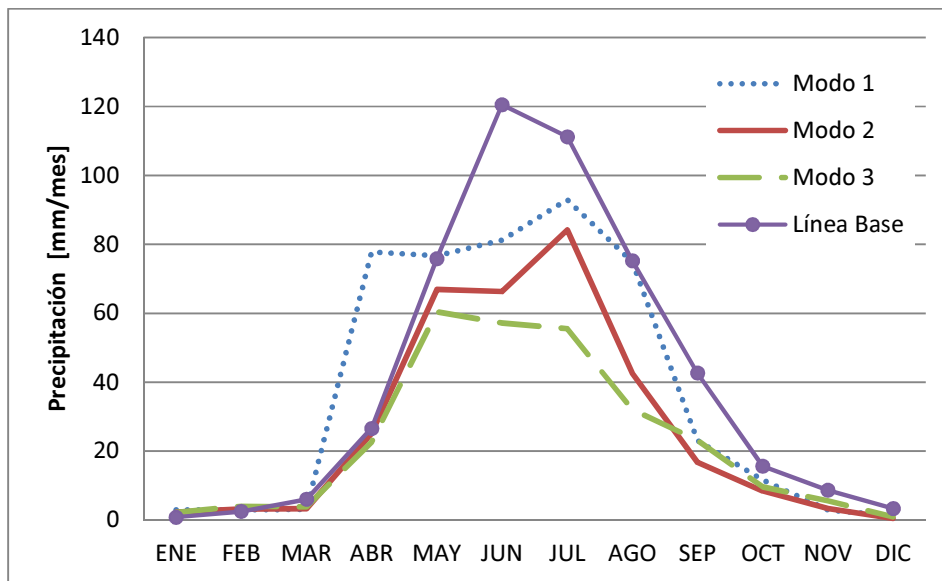


Figura 40. Precipitación promedio mensual RCP 8.5 según comportamiento

CAPÍTULO VII: PROYECCIONES DE CAUDAL, PERÍODO 2040 A 2070

7.1 Proyecciones de Caudales

Con las forzantes meteorológicas debidamente escaladas e interpoladas a la cota media de las bandas de elevación en el modelo hidrológico WEAP, se está en posición de obtener los resultados del modelo para el período de simulación futura. Cabe destacar que se ha considerado la tasa de retroceso glaciario constante y equivalente a la del período de línea base (1% del área anual) para las estimaciones del aporte por deshielo a nivel mensual, por su parte, también se ha considerado invariante el rendimiento unitario para glaciares, este supuesto supone que las series mantienen su estacionalidad, aun cuando se demostró que las precipitaciones presentan variaciones leves en la estacionalidad (ver sección 6.3.2 Precipitación).

A modo de síntesis, se expondrán los resultados de las diez series alternativas equiprobables, agrupadas en los comportamientos modales mencionados en la sección 6.3.2 Precipitación, para cada escenario respectivamente.

7.1.1 Escenario RCP 2.6

Considerando primero el escenario más conservador, con una reducción promedio de las precipitaciones para el período de simulación de 14 % respecto al monto de las precipitaciones en el período de línea base, con un máximo de 35% en reducción para la serie 5 y un 11% en aumento para la serie 6 en el período de simulación.

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, puede observarse el efecto de los *outliers* en las Figura 41, Figura 42 y Figura 43, donde se prevén crecidas para Junio-2044, Junio-2054 y Junio-2063 si se observan los valores del límite superior en las figuras, las cuales pueden ser sobreestimadas por el error asociado a los *outliers* en las precipitaciones.

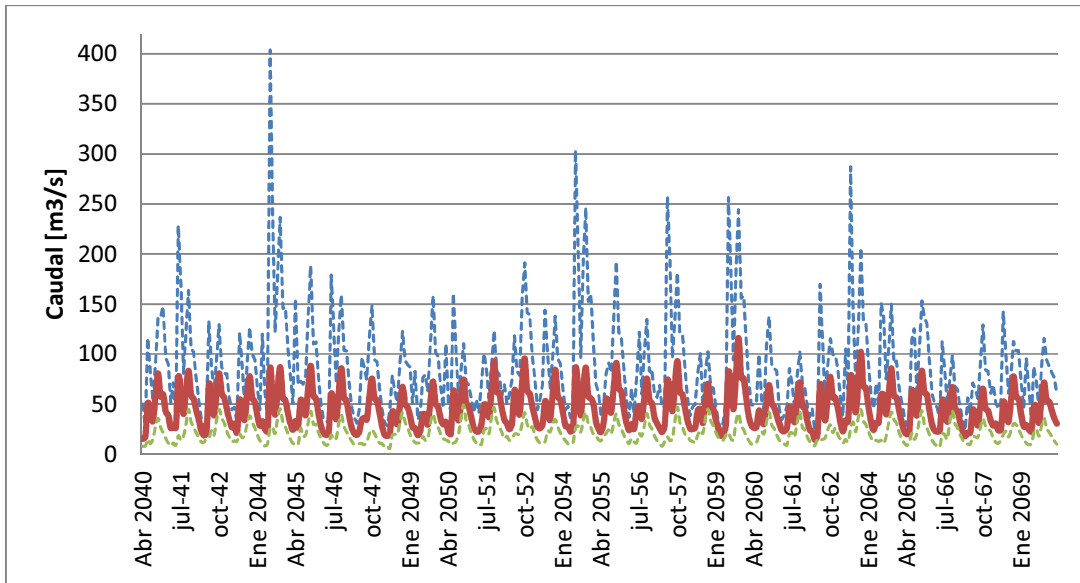


Figura 41. Serie de caudales futuros en cuenca MELM, escenario RCP 2.6. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.

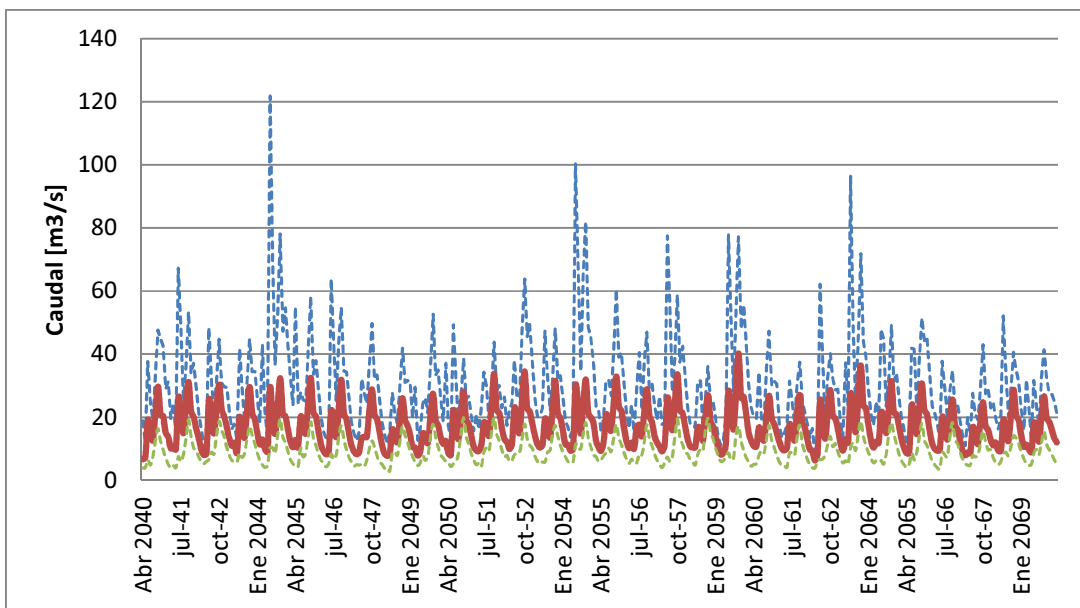


Figura 42. Serie de caudales futuros en cuenca VEQ, escenario RCP 2.6. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.

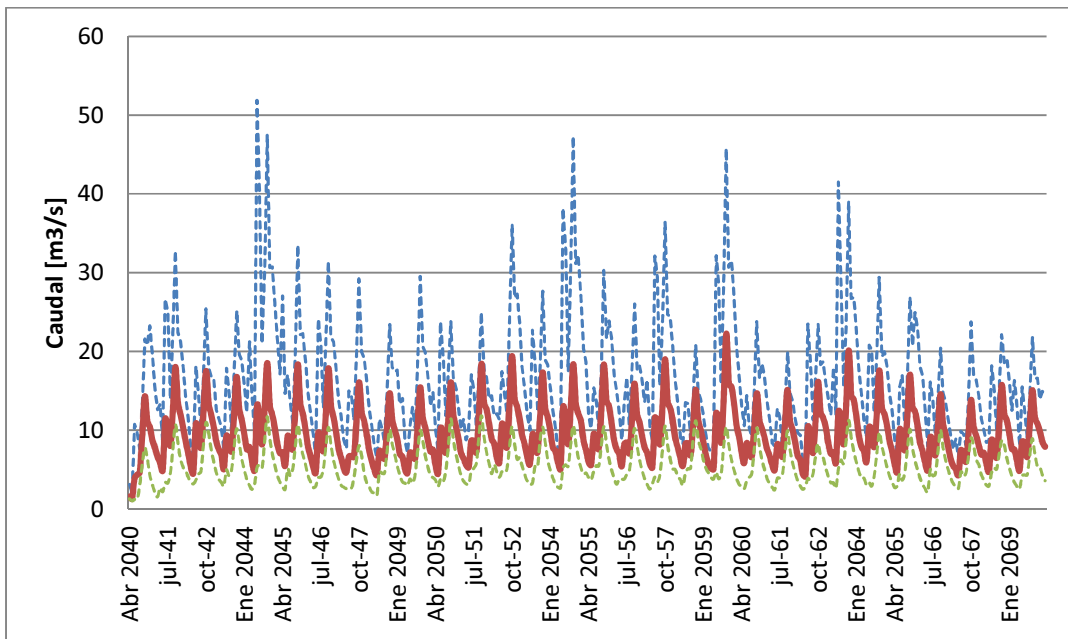


Figura 43. Serie de caudales futuros en cuenca AEY, escenario RCP 2.6. Líneas punteadas indican intervalo de confianza

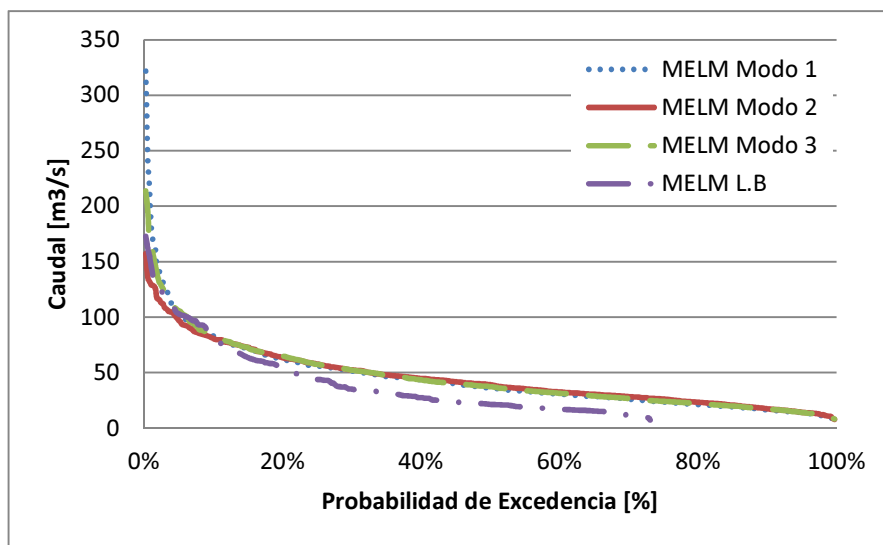


Figura 44. Curvas de duración cuenca MELM, escenario RCP 2.6, agrupadas según comportamiento modal.

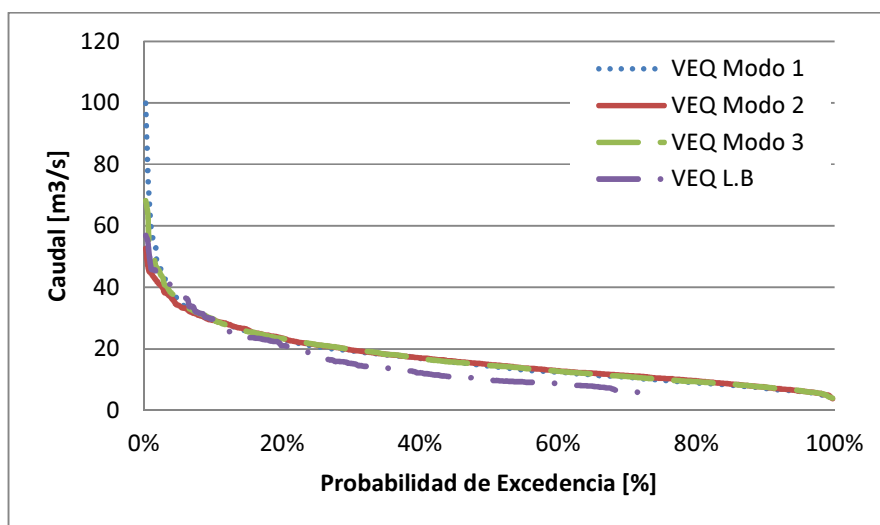


Figura 45. Curvas de duración cuenca VEQ, escenario RCP 2.6, agrupadas según comportamiento modal.

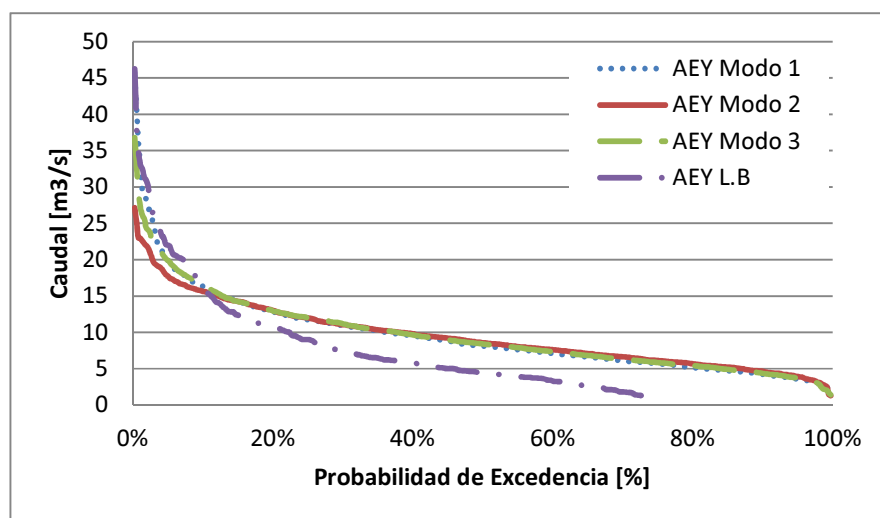


Figura 46. Curvas de duración cuenca AEY, escenario RCP 2.6, agrupadas según comportamiento modal.

Un cambio en la hidrología se desprende de las Figura 44, Figura 45 y Figura 46, donde en la mayoría de las series se tiene menores caudales para bajas probabilidades de excedencia con respecto a la línea base (a excepción de caudales muy altos que pueden provenir de outliers en la precipitación agrupadas generalmente en el comportamiento modal 1) y mayores caudales para altas probabilidades de excedencia, esto sugiere una tendencia a la homogenización del caudal, lo que implica un aumento del flujo base en los ríos, comportamiento de tendencia nivo-pluvial, a diferencia del régimen exclusivamente nival que se registra en los ríos para el período de línea base.

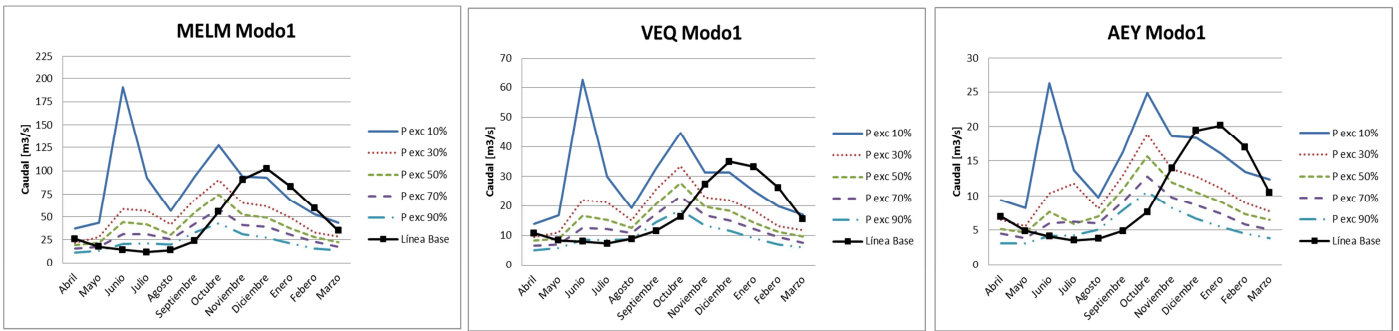


Figura 47. Curva variación estacional. Modo 1, RCP 2.6. En negro caudal medio mensual, línea base.

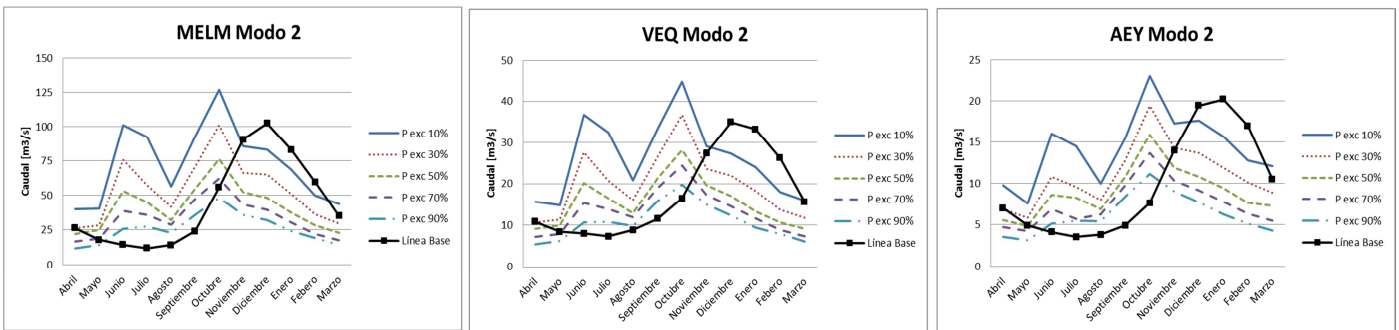


Figura 48. Curva variación estacional. Modo 2, RCP 2.6. En negro caudal medio mensual, línea base.

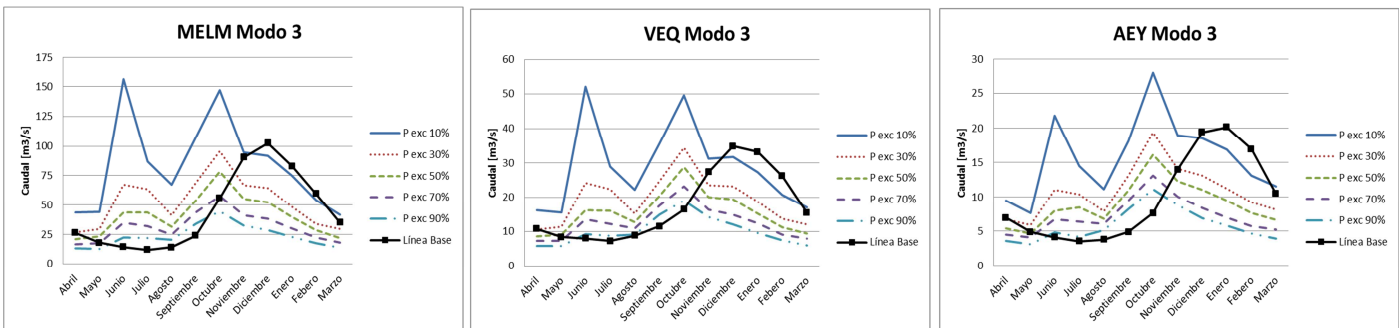


Figura 49. Curva variación estacional. Modo 3, RCP 2.6. En negro caudal medio mensual, línea base.

A través de las curvas de variación estacional, puede corroborarse el cambio en la hidrología de los ríos, en los que se pasa de un régimen netamente nival a uno mixto nivo-pluvial para los modos 2 y 3, mientras que un régimen pluvio-nival para el modo 1; con un adelanto en las crecidas nivales del mes de Diciembre a Octubre para los tres modos, producto del alza de temperaturas y un peak pluvial en el mes de Junio, como crecida invernal.

Tal como era de preverse, en el modo 1 se tienen las mayores crecidas invernales, mientras que en el modo 2, las menores, además de observarse el efecto de la estacionalidad de dos peak en las precipitaciones (Mayo, Julio), generando una curva más gradual como peak invernal.

A modo de contraste, se adjuntan las Figura 47, Figura 48 y Figura 49, en los que se puede observar el cambio en el régimen hidrológico de los tres ríos producto de la variación en las forzantes meteorológicas, precipitación y temperatura. Aun así, el monto del caudal medio en todos los ríos permanece casi invariante, aumentando ligeramente en el caso del río Maipo, este aumento debe responder a una entrada de agua no considerado en el balance de masa, en el período de línea base, como puede ser el efecto de derretimiento de nieves¹⁵ y de los valores *outliers* en las precipitaciones, esto puede ser especialmente relevante, dada la discretización temporal (mensual) implica una sobreestimación en un valor equivalente al volumen de todo un mes.

Se propone entonces una corrección del caudal medio, por la deficiencia en el aporte por deshielo en el período de calibración¹⁶.

$$Q_{\text{medio anual sin corrección}}_{MELM} : 44.7 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{\text{medio anual sin corrección}}_{VEQ} : 17.4 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{\text{medio anual sin corrección}}_{AEY} : 9.9 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

¹⁵ Recordar que en la calibración del modelo hidrológico, no se logró eliminar por completo el manto de nieve en la banda superior de las tres cuencas.

¹⁶ Corrección que se aplica también para contraste de caudales en escenario RCP 8.5

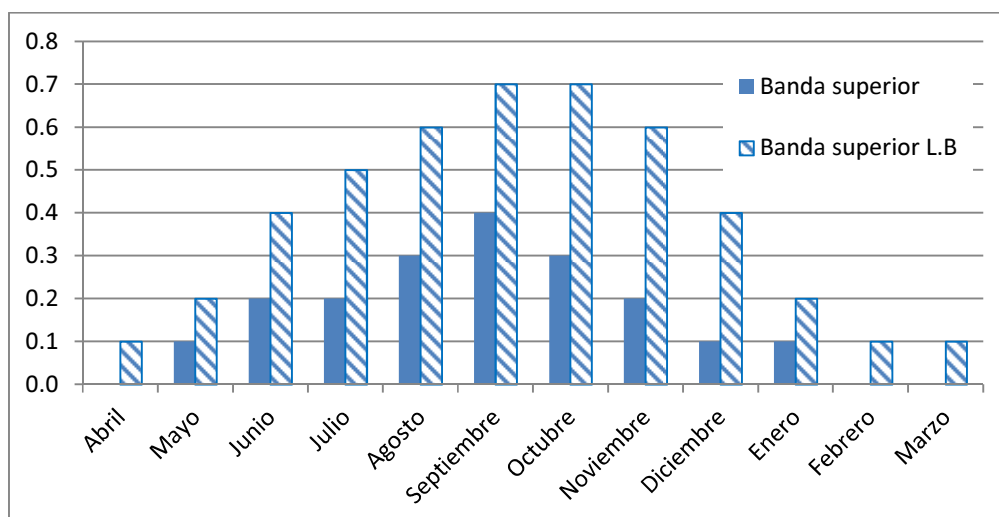


Figura 50. Contraste altura de nieve banda superior promedio de las tres cuencas.

Tal como se previó el remanente de nieve que no logró eliminarse en el período de línea base, genera un input extra de agua en los escenarios futuros (ver Figura 50), producto del aumento de las temperaturas, este efecto dificulta un análisis cuantitativo fino del volumen de agua futuro esperable. Para estimar el volumen extra de agua que debiese escurrir en el período de línea base, considerando deshielo total en las tres bandas de elevación (remanente 0 cm de nieve al comienzo del año hidrológico) y una densidad de nieve compactada de $850 \frac{kg}{m^3}$ según la literatura, lo que genera los aportes sintetizados en la Figura 51.

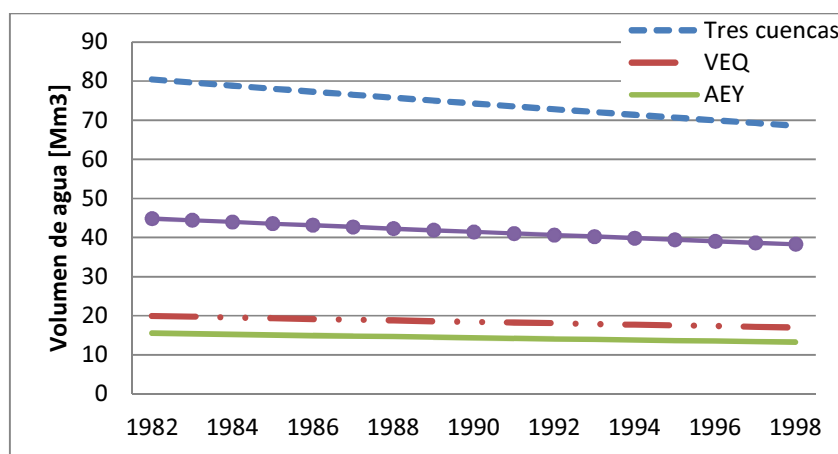


Figura 51. Deficiencia de agua estimada para cada año por falencia en deshielo modelo hidrológico. Línea Base

Se utilizará las expresiones (11) y (12) para corregir los caudales medios anuales, corregidos con el volumen extra que se espera con el derretimiento total de nieve en la banda superior.

$$Q_{\text{medio anual corregido}}: Q_{\text{medio sin corregir}} + \frac{\text{Volumen}_{\text{nieve remanente banda superior}}}{\Delta t_{\text{segundos en un año}}} \quad (11)$$

$$\text{Volumen}_{\text{nieve remanente banda superior}} = \frac{\text{Altura}_{\text{nieve remanente banda superior}}}{\rho_{\text{agua}}} \times \rho_{\text{nieve}} \times \text{Área}_{\text{glaciar}} \quad (12)$$

Con la corrección por aporte en deshielo, se obtienen disminuciones porcentuales en los caudales medios anuales para cada cuenca, con su respectiva disminución en volumen total anual acumulado:

$$Q_{\text{medio corregido}_{MELM}}: 45.7 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{\text{medio corregido}_{VEQ}}: 18.0 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{\text{medio corregido}_{AEY}}: 10.3 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Realizada la corrección de caudales medios anuales, se presentan las curvas de variación estacional en las Figura 52, Figura 53 y Figura 54. Por su parte el volumen total escurrido en las cuencas, posterior corrección, en la que se asume derretimiento total de nieve en la banda superior, se presenta en la Figura 55.

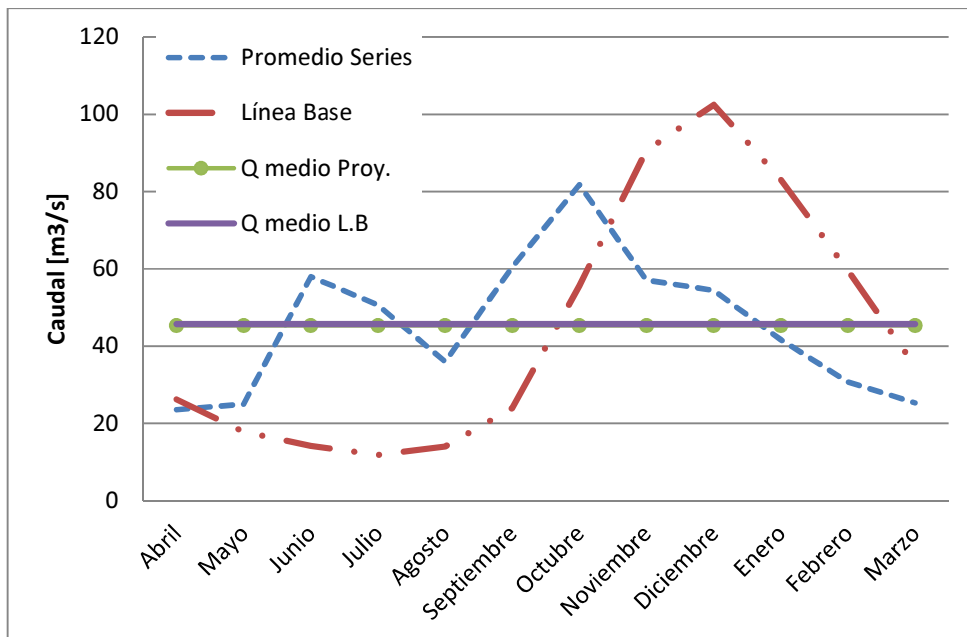


Figura 52. Contraste en Curvas de variación estacional y caudal medio MELM, RCP 2.6

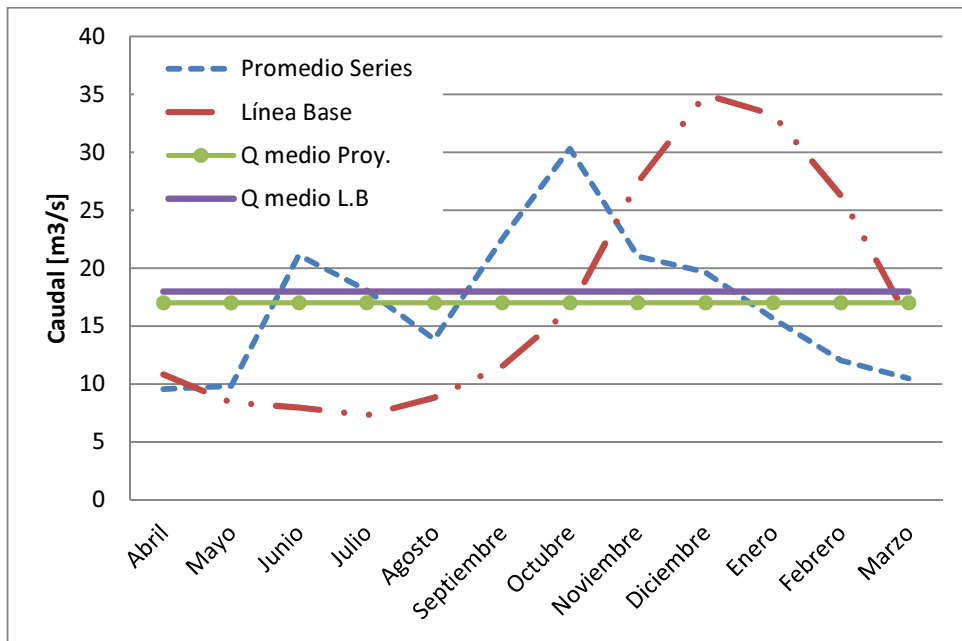


Figura 53. Contraste en Curvas de variación estacional y caudal medio VEQ, RCP 2.6

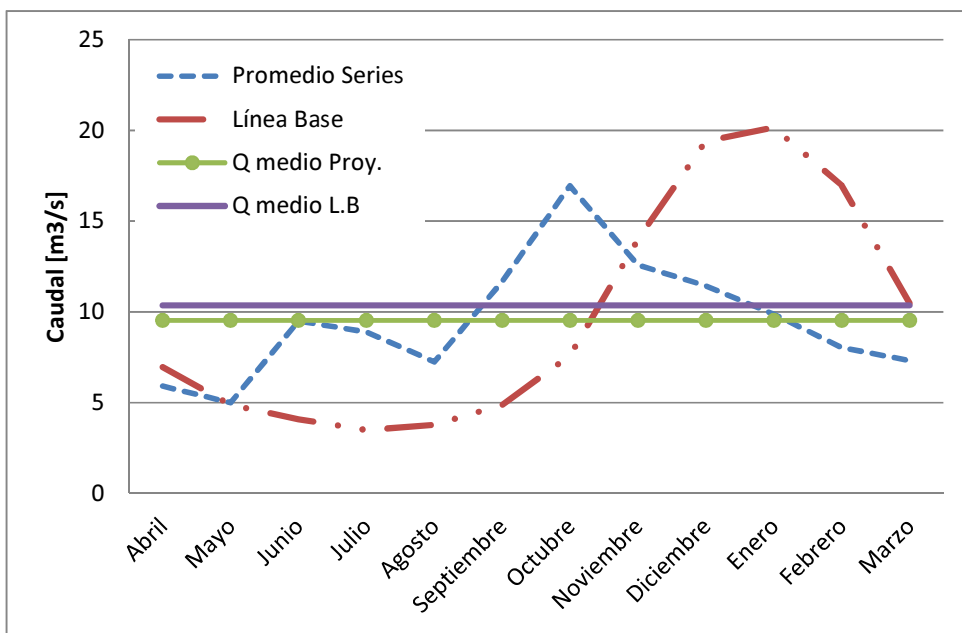


Figura 54. Contraste en Curvas de variación estacional y caudal medio AEY, RCP 2.6

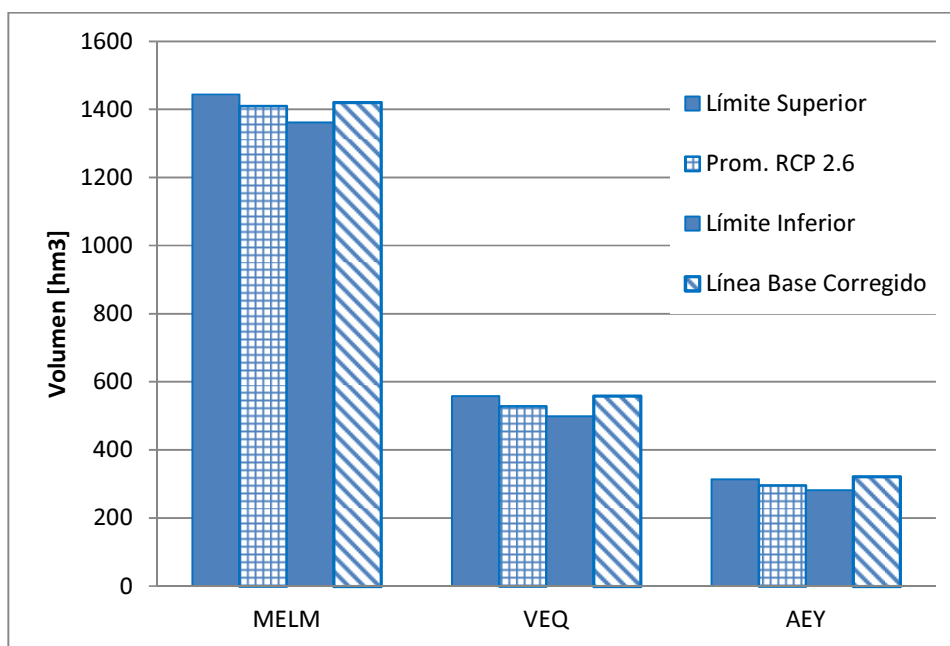


Figura 55. Contraste Volumen total escurrido anual, escenario RCP 2.6

7.1.2 Escenario RCP 8.5

Se procede de manera análoga a la sección 4.3.3.1, teniéndose una reducción promedio del monto de las precipitaciones de 32% como promedio anual, y un máximo de 45% de reducción para la serie R5 y un mínimo de reducción de 4% para la serie R1.

Nuevamente se puede apreciar el efecto de los *outliers* en la extrapolación de los montos de precipitación, al observar las Figura 56, Figura 57 y Figura 58, en crecidas ocurridas en los meses de Junio y Octubre, siendo la de mayor magnitud la de Junio de 2065.

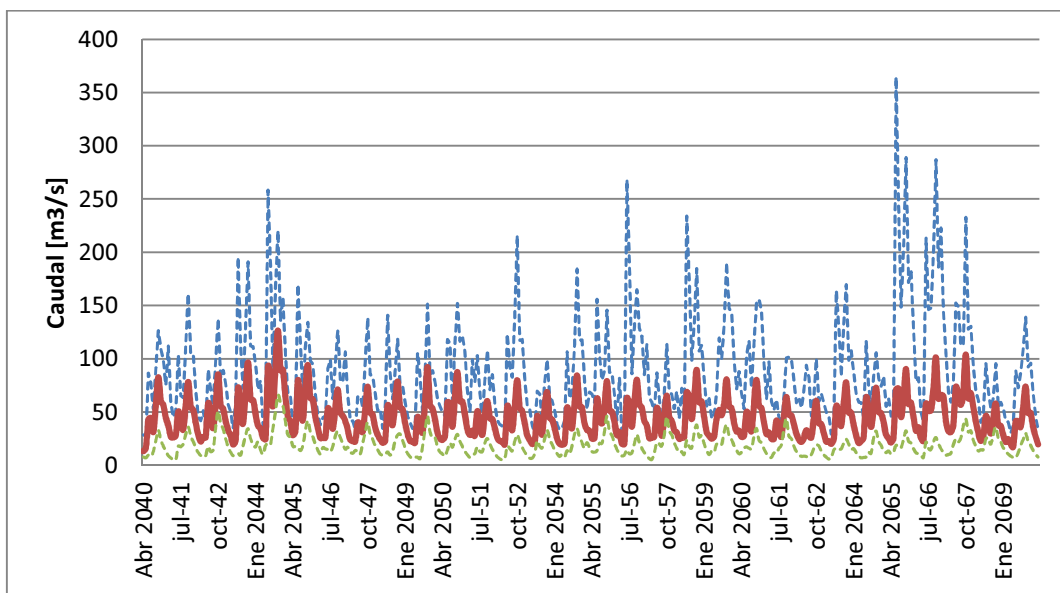


Figura 56. Serie de caudales futuros en cuenca MELM, escenario RCP 8.5. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.

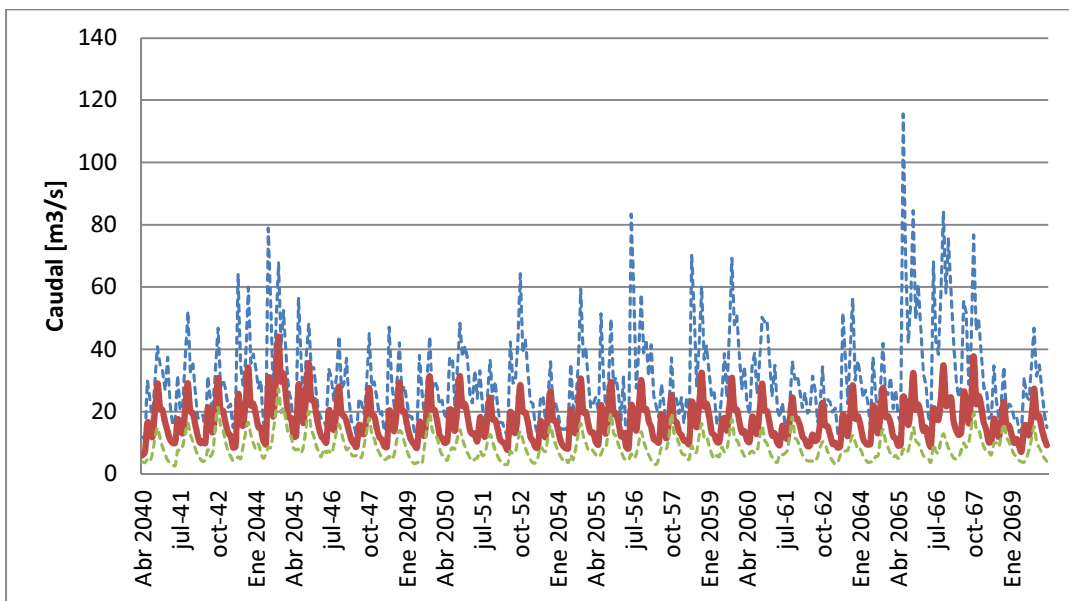


Figura 57. Serie de caudales futuros en cuenca VEQ, escenario RCP 8.5. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.

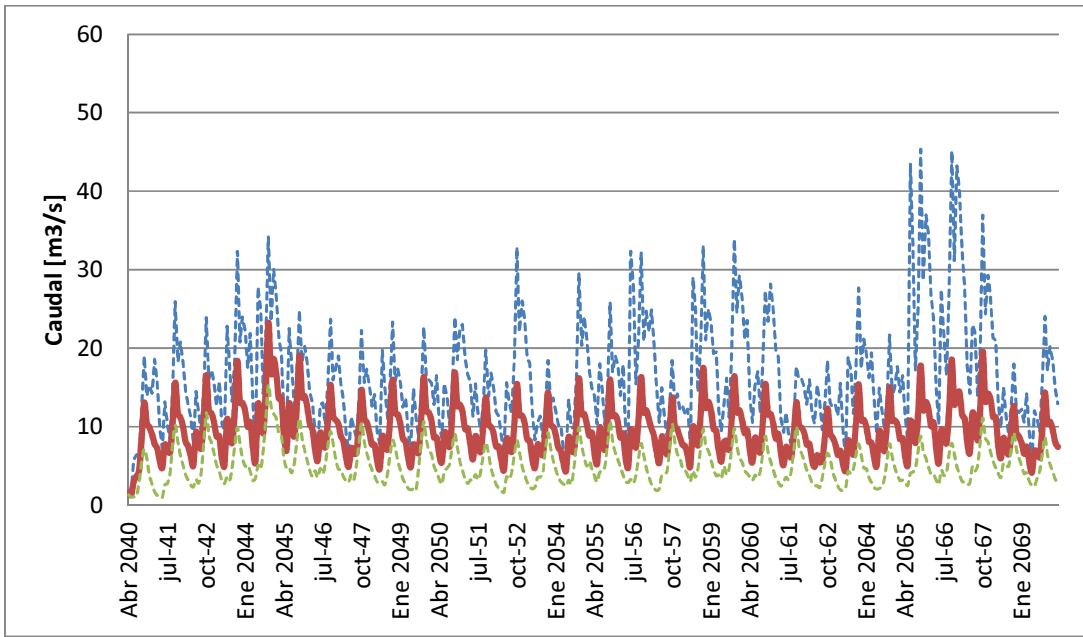


Figura 58. Serie de caudales futuros en cuenca AEY, escenario RCP 8.5. Líneas punteadas indican intervalo de confianza.

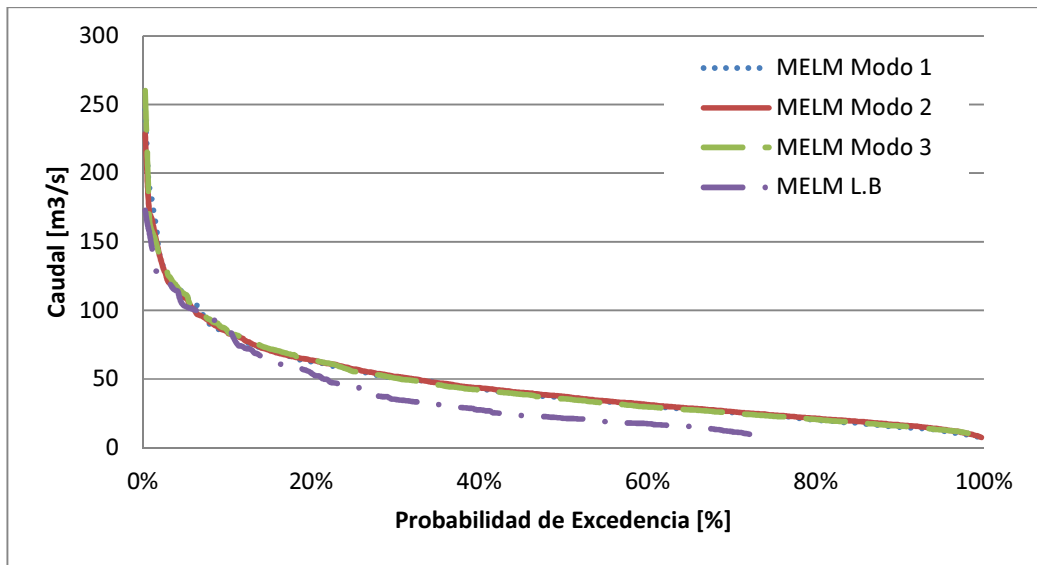


Figura 59. Curvas de duración cuenca MELM, escenario RCP 8.5, agrupadas según comportamiento modal.

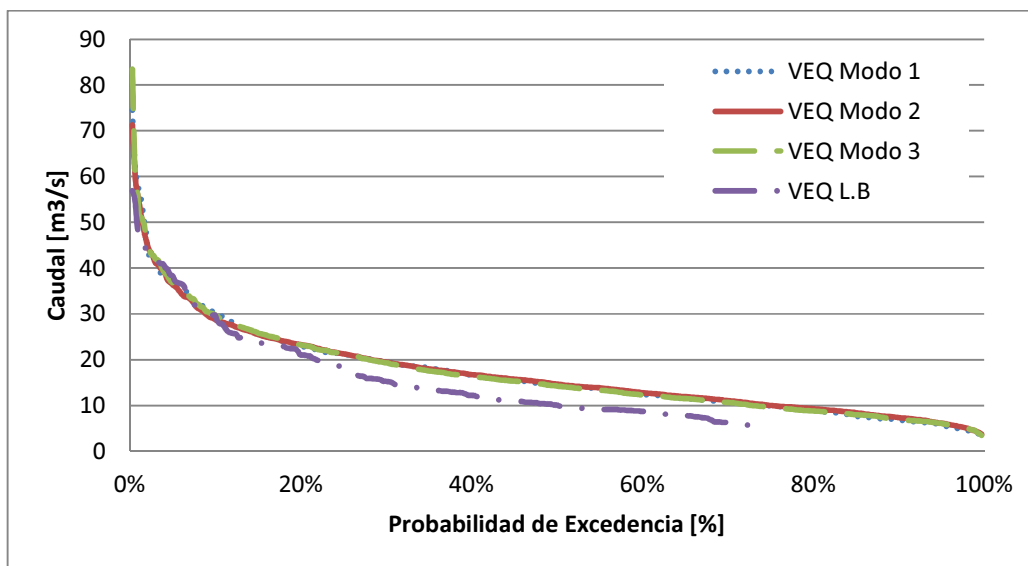


Figura 60. Curvas de duración cuenca VEQ, escenario RCP 8.5, agrupadas según comportamiento modal.

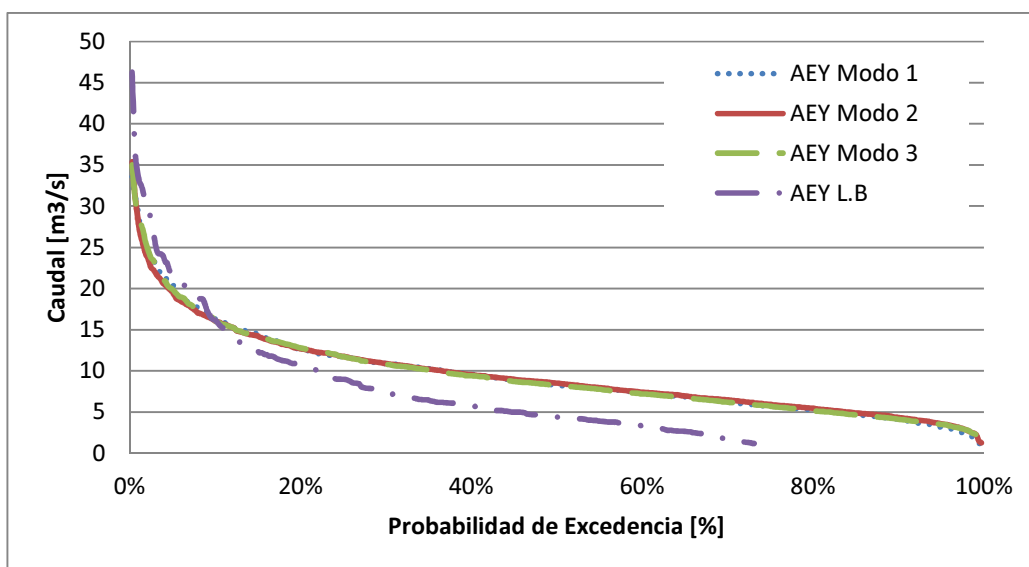


Figura 61. Curvas de duración cuenca AEY, escenario RCP 8.5, agrupadas según comportamiento modal.

De las Figura 60 y Figura 61, Se observan resultados análogos a los obtenidos para el escenario más conservador, pero la tendencia es más fuerte, donde se esperan mayores caudales para altas probabilidades de excedencia (a partir de 17%), lo que puede estar ligado al aumento en el caudal base, debido al cambio en el régimen hidrológico que puede observarse en las Figura 62, Figura 63 y Figura 64.

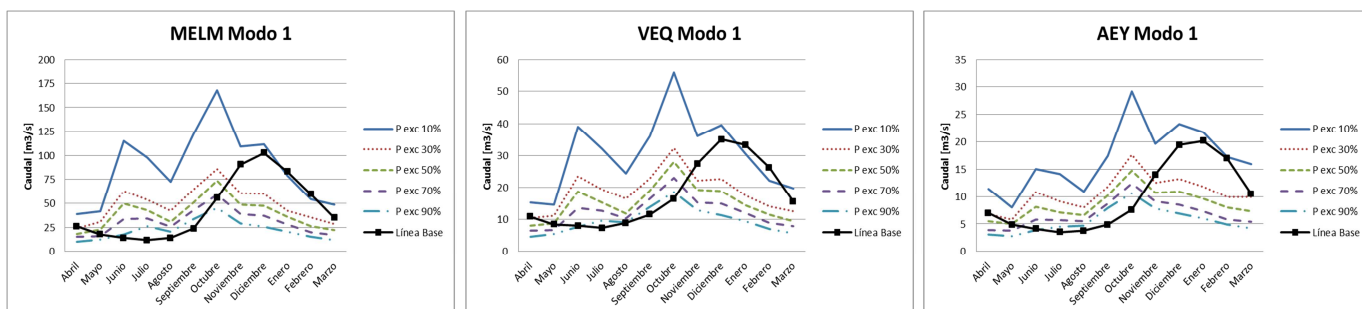


Figura 62. Curvas variación estacional Modo 1, escenario RCP 8.5. En negro caudal medio mensual, línea base.

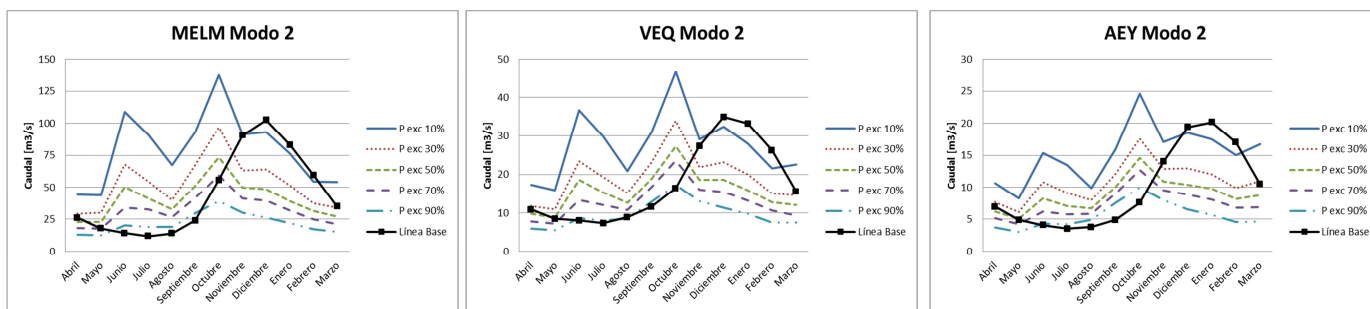


Figura 63. Curvas variación estacional Modo 2, escenario RCP 8.5. En negro caudal medio mensual, línea base.

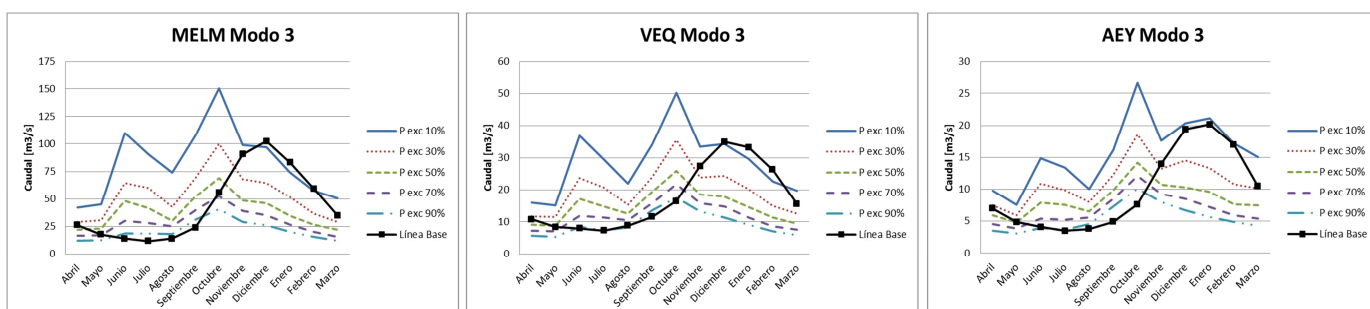


Figura 64. Curvas variación estacional Modo 3, escenario RCP 8.5. En negro caudal medio mensual, línea base.

Al igual que en el caso del escenario RCP 2.6, se prevé un marcado cambio en la hidrología de los tres ríos, esperándose para el caso futuro un régimen nivo-pluvial para los tres modos. Se observa concordancia con el comportamiento de las precipitaciones para cada modo, en la Figura 64, se esperan mayores caudales entre Noviembre en Enero, con respecto a los otros modos, esto responde a la disminución paulatina de las precipitaciones entre Mayo y Julio, además para probabilidad de excedencia del 50% del tiempo, se tienen menores caudales en el Modo 3, aquel modo con menor precipitación. Como se ha mencionado y se desprende a su vez de las Figura 65, Figura 66 y Figura 67, el régimen ha cambiado a nivo-pluvial, con leves disminuciones en el caudal medio anual para el período de simulación 2040-2070 (se ha incluido la corrección por derretimiento parcial de la línea de nieves en la banda superior). Se espera tener mayor

disponibilidad de recursos hídricos para los meses de invierno dado el aumento en precipitaciones líquidas respecto al período de línea base y consecuentemente menor disponibilidad en el período de deshielo (Octubre-Marzo). En cuanto al volumen escurrido anualmente en las cuencas en promedio se esperan disminuciones del volumen (ver Figura 68), sin embargo, al considerar el intervalo de confianza en su límite superior se tiene un volumen escurrido anual por sobre el promedio del período de línea base.

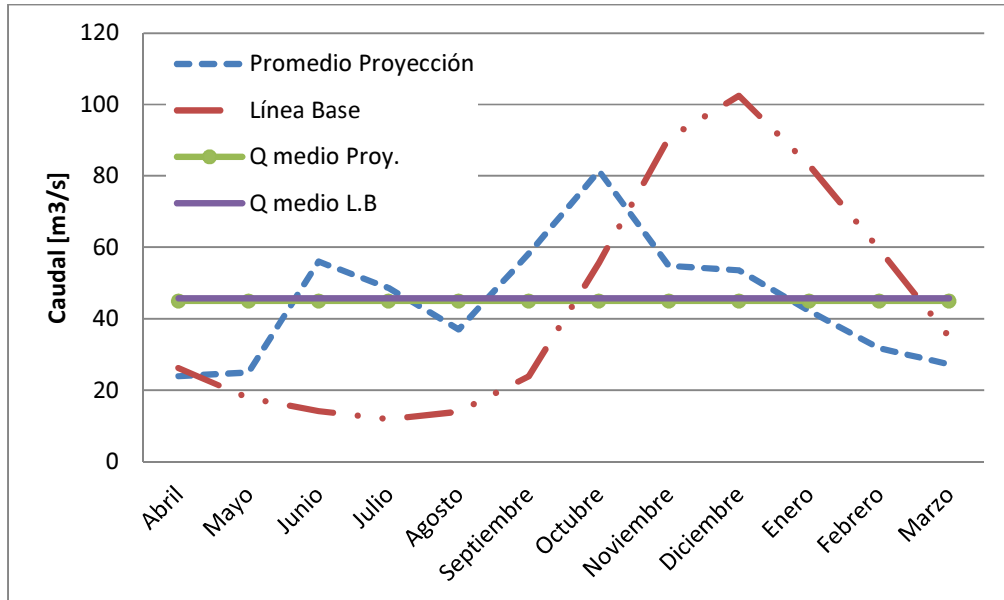


Figura 65. Contraste en Curvas de variación estacional promedio y caudal medio MELM, RCP 8.5

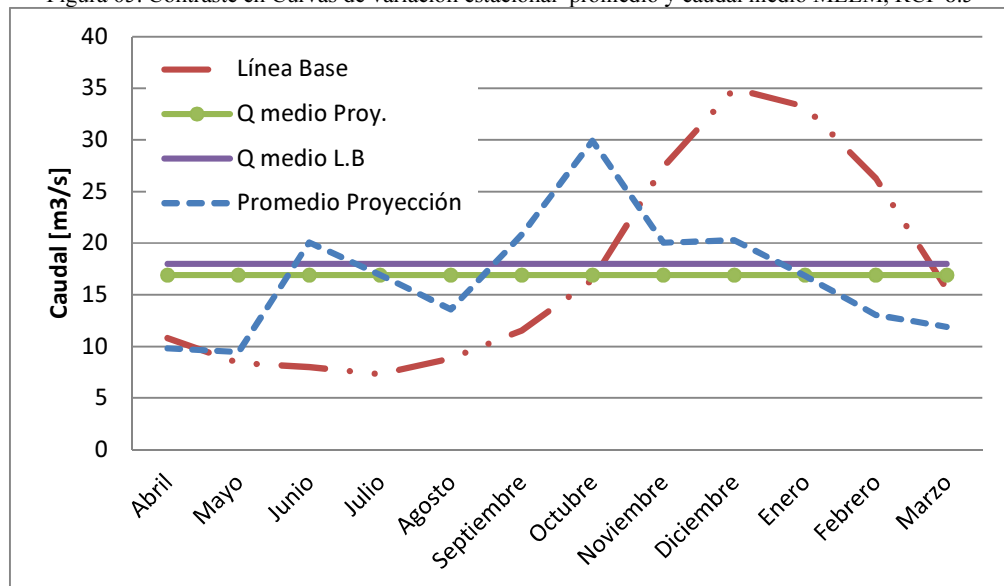


Figura 66. Contraste en Curvas de variación estacional promedio y caudal medio VEQ, RCP 8.5.

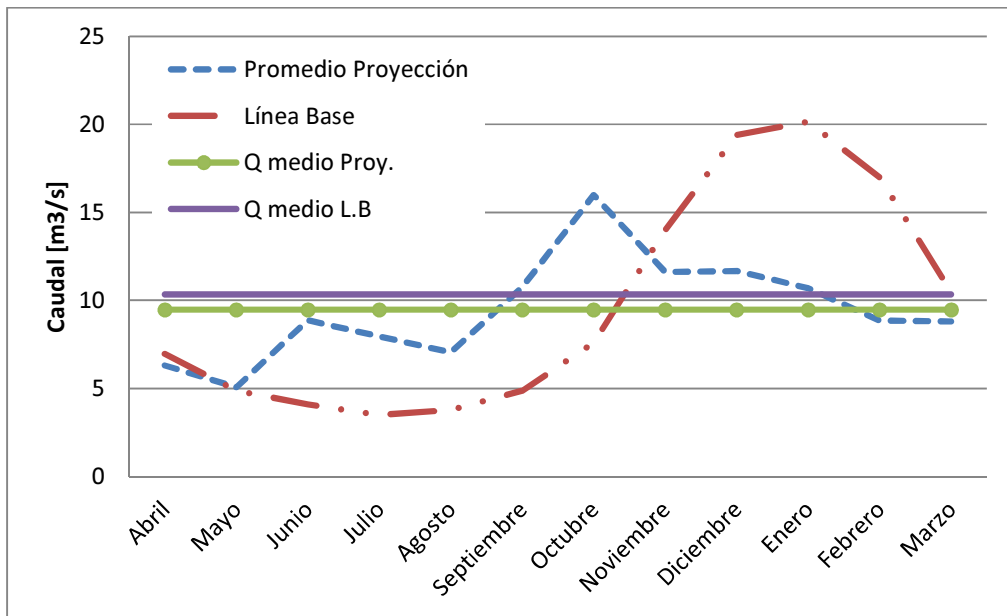


Figura 67. Contraste en Curvas de variación estacional promedio y caudal medio AEY, RCP 8.5.

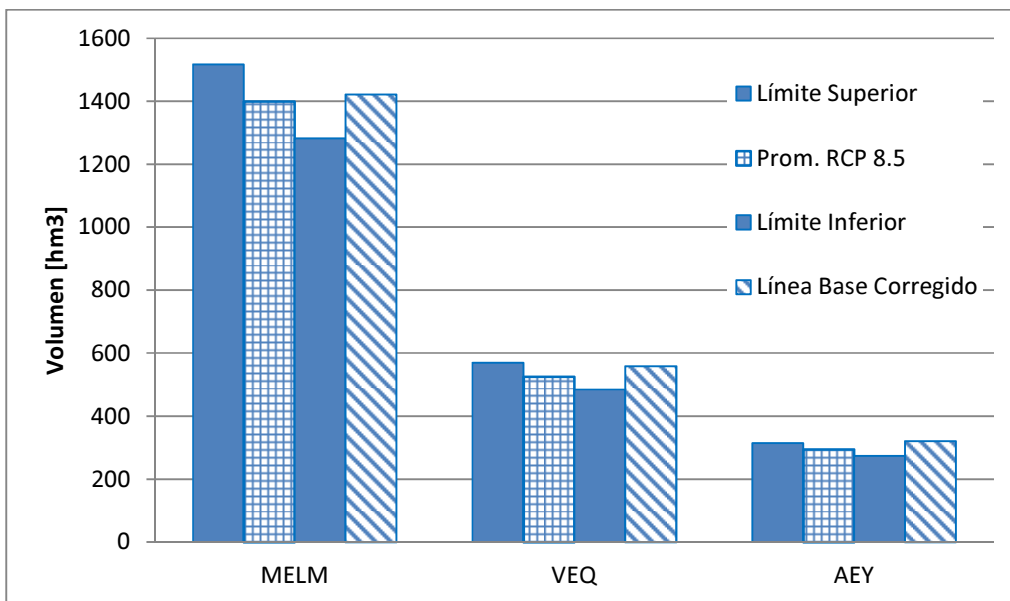


Figura 68. Contraste Volumen total escurrido anual, escenario RCP 8.5

7.2 Análisis y comparación entre escenarios

En la sección 7.1 Proyecciones de Caudales, pudo observarse la repercusión del cambio climático en la distribución del recurso hídrico a lo largo del año hidrológico y de manera aproximada cuantificar la variación y disminución del volumen total escurrido en el año, en promedio. Hay que remarcar el hecho de que la cuantificación de los valores es aproximada, dada la incertidumbre asociada, las falencias del modelo y del proceso de escalado de las forzantes meteorológicas (*outliers*, discretización temporal mensual, etc). En esta sección se realizará un análisis comparativo entre ambos escenarios extremos y con respecto al período de línea base.

En las Figura 69, Figura 70 y Figura 71, se tienen las curvas de variación estacional promedio contrastadas para ambos escenarios en el período de simulación futuro, 2040-2070. Puede notarse que el monto de los caudales peak disminuye en forma creciente según el área de la cuenca, teniéndose una variación casi nula para MELM entre escenarios RCP, mientras que la variación más pronunciada es para la cuenca del río Yeso. Lo anterior puede explicarse por la mayor influencia en los cambios de las forzantes meteorológicas y la capacidad de respuesta de una cuenca de menor tamaño. Sin embargo, para los tres ríos se tiene un aumento del caudal medio en el período estival para el escenario RCP 8.5, con respecto al RCP 2.6. Una respuesta a ese comportamiento puede ser el aumento en las precipitaciones estivales que se observan para el Modo 1 en ese escenario (ver Figura 40).

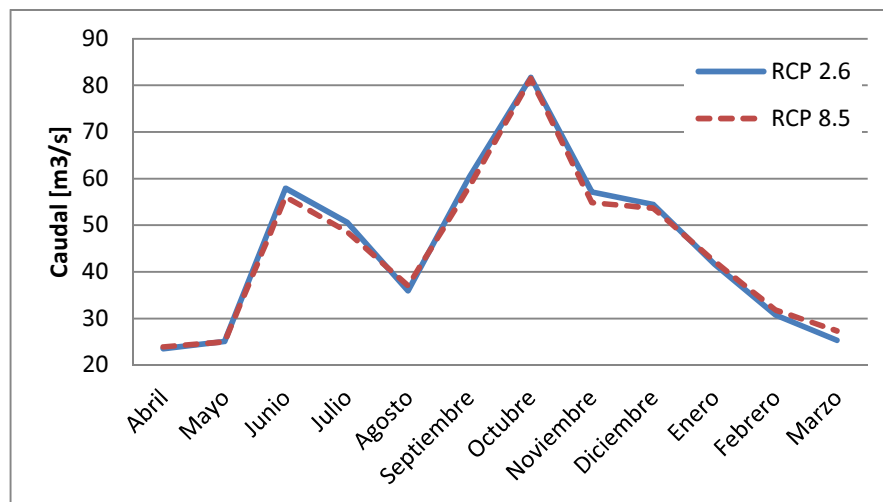


Figura 69. Contraste variación estacional promedio series MELM, ambos escenarios.

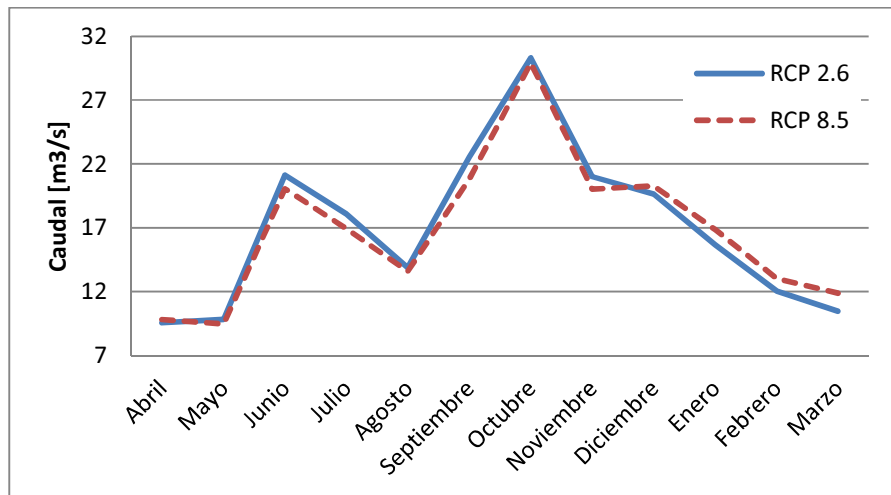


Figura 70. Contraste variación estacional promedio series VEQ, ambos escenarios.

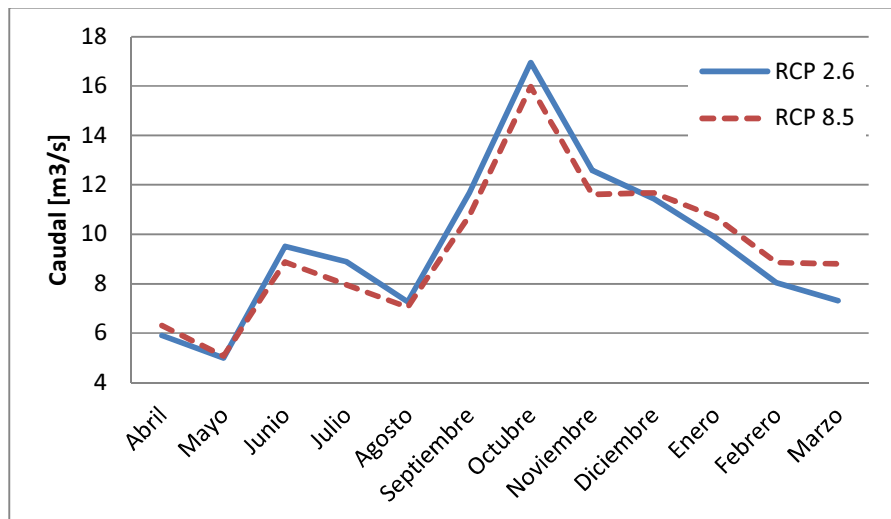


Figura 71. Contraste variación estacional promedio series AEY, ambos escenarios.

En las tablas siguientes (Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23), se sintetiza la información hidrológica para cada escenario respecto al período de línea base en las cuencas, mostrándose los valores medios, máximos y mínimos de las series proyectadas. Por su parte en las Figura 72, Figura 73 y Figura 74, puede observarse las variaciones porcentuales mensuales de cada escenario, respecto al período de línea base.

Tabla 21. Resumen hidrología de escenarios vs línea base MELM.

	RCP 2.6	RCP 8.5	Línea Base	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
MELM	Qm [m3/s]	Qm [m3/s]	Qm [m3/s]	Max[m3/s]	Max[m3/s]	Min[m3/s]	Min [m3/s]
Abril	23.5	23.9	26.2	28.2	29.2	27.1	25.6
Mayo	25.0	25.0	17.8	24.3	24.7	22.9	22.5
Junio	57.9	56.0	14.2	56.1	54.7	50.8	45.1
Julio	50.6	48.6	11.9	46.8	46.4	43.5	41.4
Agosto	35.9	37.0	14.0	35.8	38.0	34.2	34.1
Septiembre	60.4	58.3	23.9	53.5	53.4	50.7	50.6
Octubre	81.7	81.4	55.6	79.8	80.8	76.7	74.7
Noviembre	57.1	54.8	90.6	52.6	53.5	50.4	49.2
Diciembre	54.4	53.6	102.5	54.0	55.1	51.8	51.0
Enero	41.6	42.2	83.1	48.5	48.8	45.9	45.7
Febrero	30.7	31.8	59.5	38.6	39.2	36.9	36.2
Marzo	25.3	27.3	34.9	36.9	38.2	35.8	35.4

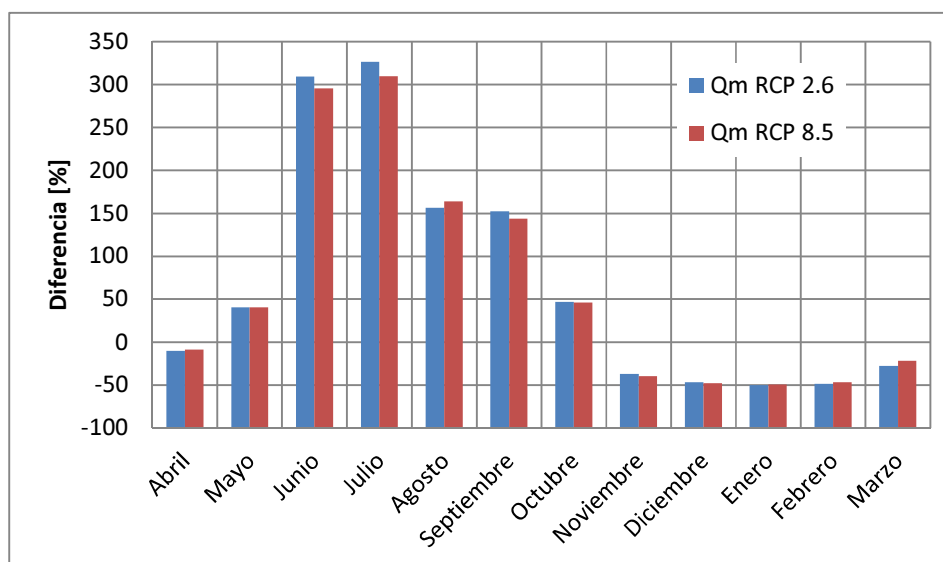


Figura 72. Variación porcentual de caudal medio mensual, escenarios vs línea base, MELM.

Tabla 22. Resumen hidrología de escenarios vs línea base VEQ.

	RCP 2.6	RCP 8.5	Línea Base	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
VEQ	Qm [m3/s]	Qm [m3/s]	Qm [m3/s]	Max m3/s]	Max [m3/s]	Min [m3/s]	Min [m3/s]
Abril	9.6	9.8	10.8	11.5	11.8	11.0	10.6
Mayo	9.8	9.5	8.4	9.3	9.5	8.9	8.7
Junio	21.1	20.1	8.0	19.7	19.7	18.2	16.9
Julio	18.1	16.9	7.3	16.0	16.1	15.0	14.6
Agosto	13.9	13.6	8.8	13.7	13.7	13.1	12.9
Septiembre	22.5	20.8	11.5	19.5	19.6	18.7	18.4
Octubre	30.3	29.9	16.4	29.3	29.6	28.3	27.8
Noviembre	21.0	20.0	27.4	18.3	18.6	17.8	17.5
Diciembre	19.6	20.3	35.0	19.7	19.9	18.9	18.5
Enero	15.7	16.9	33.2	18.6	18.9	17.6	17.5
Febrero	12.0	13.0	26.2	15.2	15.3	14.5	14.3
Marzo	10.5	11.9	15.6	16.4	16.6	15.7	15.3

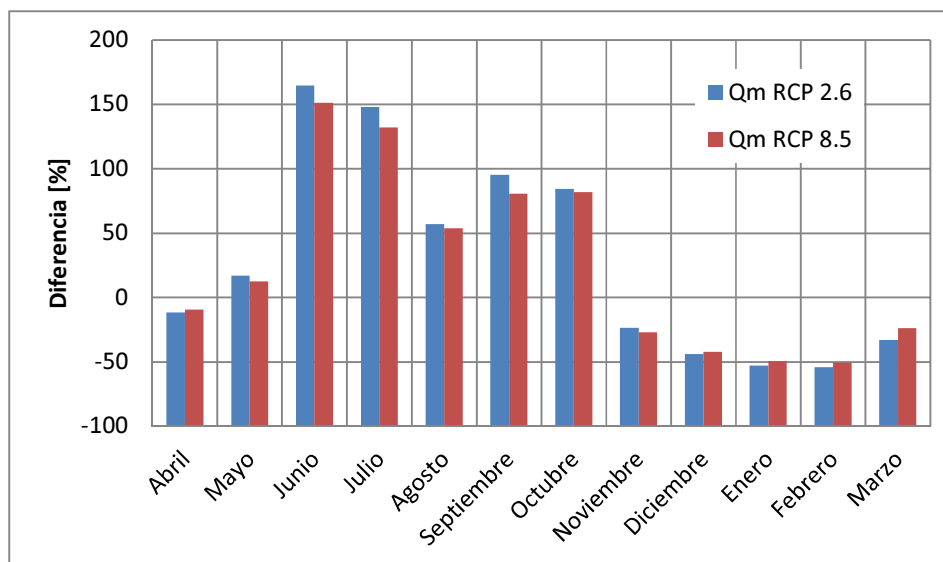


Figura 73. Variación porcentual de caudal medio mensual, escenarios vs línea base, VEQ.

Tabla 23. Resumen hidrología de escenarios vs línea base AEY.

	RCP 2.6	RCP 8.5	Línea Base	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
AEY	Qm [m3/s]	Qm [m3/s]	Qm [m3/s]	Max [m3/s]	Max [m3/s]	Min [m3/s]	Min [m3/s]
Abril	5.9	6.3	7.0	7.6	7.7	7.2	7.0
Mayo	5.0	5.1	4.9	5.6	5.7	5.3	5.1
Junio	9.5	8.9	4.1	9.1	9.1	8.4	8.0
Julio	8.9	8.0	3.5	7.6	7.7	7.1	6.9
Agosto	7.3	7.0	3.8	7.2	7.2	6.9	6.8
Septiembre	11.7	10.8	4.9	10.8	10.9	10.4	10.3
Octubre	16.9	16.0	7.6	15.4	15.6	14.9	14.7
Noviembre	12.6	11.6	14.0	11.4	11.5	11.1	10.9
Diciembre	11.4	11.7	19.4	10.4	10.5	10.0	9.8
Enero	9.9	10.7	20.2	10.3	10.4	9.8	9.7
Febrero	8.0	8.9	17.0	8.7	8.9	8.3	8.2
Marzo	7.3	8.8	10.5	11.4	11.5	10.8	10.6

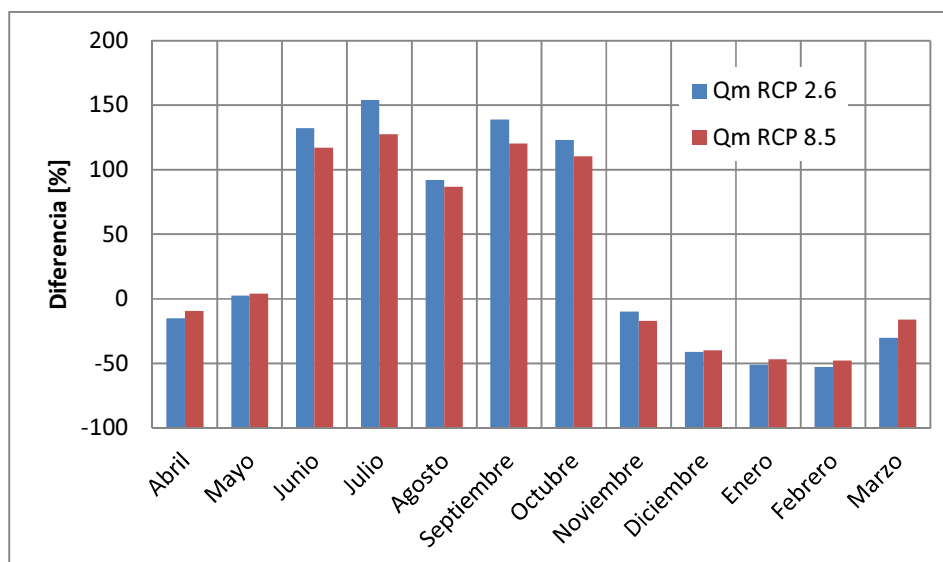


Figura 74. Variación porcentual de caudal medio mensual, escenarios vs línea base, AEY.

Si se considera solo las variaciones en el monto de las precipitaciones anuales, se observan diferencias entre series que llegan a ser casi de 200%, en la serie R2 RCP 2.6 con respecto a la serie R5 RCP 8.5, esto evidencia la gran incertidumbre asociada a las proyecciones y entre escenarios.

En la Figura 75, se adjunta a modo de resumen, las variaciones en el volumen escurrido anual promedio para el período de simulación y las anomalías respectivas a cada escenario, como promedio de todas las series con respecto al período de línea base.

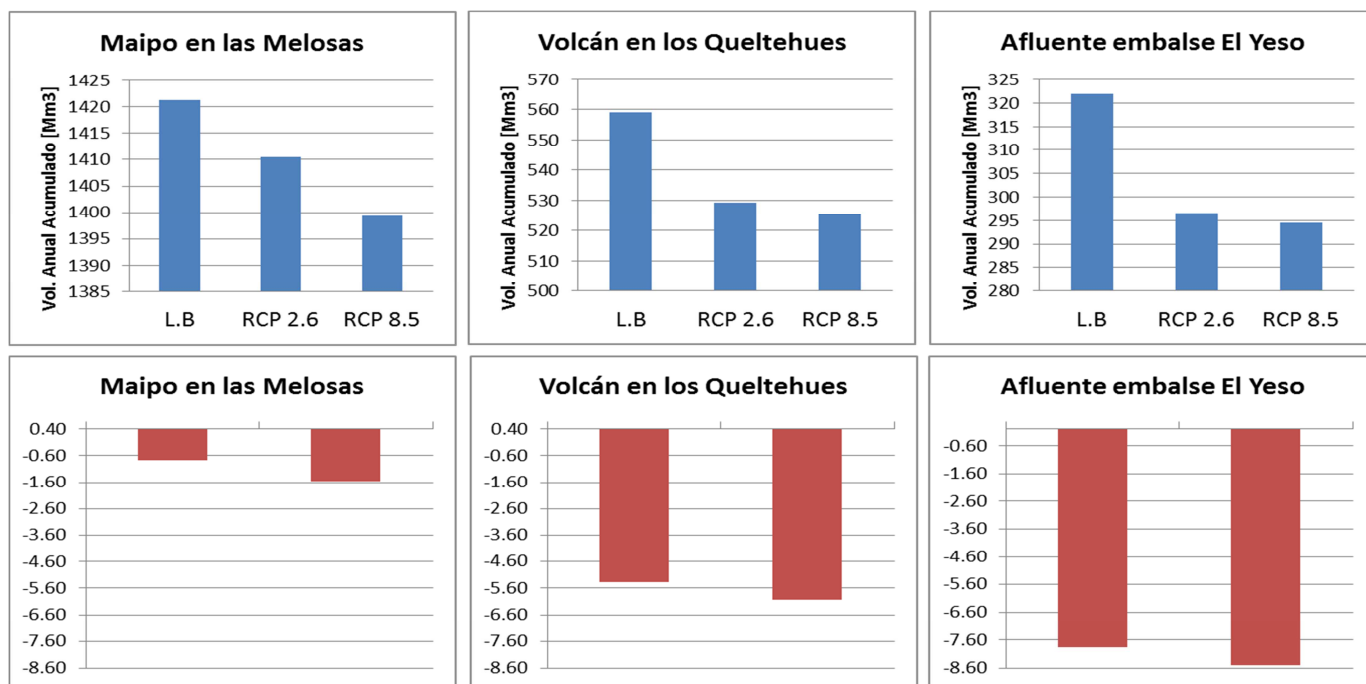


Figura 75. Cuadro resumen, volúmenes escurridos anuales y anomalías por escenario.

Se observa que la cuenca que se ve más afectada para el período de proyección es la del río Yeso, con una disminución de 8.5% del volumen anual para el escenario RCP 8.5 y 7.8% para el RCP 2.6. Sin embargo, la cuenca del Volcán es aquella con la mayor disminución del volumen escurrido anualmente, con una deficiencia anual promedio del orden de 30 y 34 [hm³], para los escenarios RCP 2.6 y 8.5, respectivamente. La deficiencia total anual promedio de las tres cuencas, es del orden de 66 y 83 [hm³], para el RCP 2.6 y 8.5, respectivamente.

Comparando estas deficiencias hídricas anuales totales de las tres cuencas con la capacidad del embalse El Yeso (253 hm³), se tiene que corresponden al 26% y 33% de dicho volumen, para cada escenario. Considerando las deficiencias solamente del afluente al embalse El Yeso, se tienen reducción del 10% y 11% del Volumen del Embalse anual para el período de análisis.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Con los resultados obtenidos y análisis realizado en este trabajo de título, es posible concluir lo siguiente:

Se logró implementar un modelo hidrológico de las cuencas, utilizando el software WEAP, logrando una calibración razonable, para el cual se sugieren ciertas mejoras: afinar la resolución temporal a escala diaria, de esta manera se permite representar más fielmente crecidas invernales que tienen menor duración temporal; incluir módulo de radiación para lograr deshielo total en todas las bandas y evitar el remanente en la banda superior, que induce a errores en la estimación del volumen anual escurrido y crecidas por deshielo; tener especial precaución en la construcción de los gradientes de precipitación y temperatura, dado que no hay información dentro de las cuencas analizadas, la extrapolación de dichas variables puede resultar en una sobreestimación del gradiente a grandes alturas lo que podría influir en el no derretimiento del manto nival en la banda superior; estudiar la veracidad de la aplicación de un gradiente lineal de temperatura para grandes alturas.

Dentro de los modelos de circulación global estudiados, el MK-3.6 tiene un comportamiento adecuado en estacionalidad y magnitud de las forzantes meteorológicas para el período histórico. El análisis de diez series alternativas da robustez a los resultados obtenidos, si el mecanismo de escalado de dichas variables es certero, de otra manera puede inducir a sobre y/o subestimación de las magnitudes. Si bien el modelo simula una serie de procesos atmosféricos que otros modelos más simples no poseen (como reacciones de aerosoles en la atmósfera), la resolución espacial es muy gruesa y abarca una zona similar a todo el país de oriente a occidente, lo que no permite incluir de manera precisa las anomalías de la geografía local. Se realizó un escalado espacial bastante básico ponderando por distancia al cuadrado los vértices del cuadrante correspondiente a la estación base Pirque, se recomienda desarrollar una metodología más precisa que incluya la orografía de la zona, en la se proyecte la topografía del cuadrante de estudio y se identifiquen zonas y puntos relevantes, como cambios de pendiente bruscos, cerros, laderas, orientación de las cuencas y así generar una malla de distribución de precipitación y temperatura en la que la ponderación de las forzantes, no venga dada solo por la cercanía al vértice, sino también por las singularidades de la zona (menor temperatura y mayor acumulación de nieve en caras sur, mayor precipitación en laderas de cerros, etc).

El escalado temporal para la temperatura responde de manera concordante a lo esperado y se considera, por tanto, exitoso; por su parte en el caso de la precipitación, al trabajarse con una escala mensual, la cantidad de datos es baja (especialmente en el período estival) y no se considera totalmente satisfactorio, debido a la sobreestimación de las magnitudes que puede generarse con la extrapolación de las funciones de transferencia construidas (valores *outliers*) al tenerse proyecciones de precipitación muy por sobre las registradas en la estación base Pirque. Lo anterior implica falencias a nivel de cuantificación de caudales en las simulaciones con WEAP, dado que éste es altamente sensible a las variables precipitación y temperatura. La inclusión de valores *outliers*, en conjunto con una discretización temporal mensual puede inducir a errores en crecidas tanto invernales como de deshielo que son representativas de todo un mes. Cabe

entonces preguntarse si las variaciones en la estacionalidad predichas por el modelo vienen dadas realmente por fenómenos de cambio climático o por falencias en los mecanismo de escalado tanto temporal como espacial.

Sin desmerecer las limitaciones en el escalado de las forzantes meteorológicas, se esperan aumentos proporcionales de temperatura a cada escenario RCP estudiado, manteniéndose la estacionalidad en la temperatura, con aumentos medios de 0.9 °C y 1.6 °C para el RCP 2.6 y 8.5, respectivamente. Estos aumentos concuerdan por los propuestos por el IPCC, 2013, de un rango de 0.4-1.6 para el RCP 2.6 y de 1.4-2.6 para e RCP 8.5. En el caso de la precipitación, no es tan evidente el cambio en el RCP 2.6, en el que se esperan leves aumentos en las series R1, R6 y R8, aun así se prevé una disminución promedio de 17% en las precipitaciones para el período de estudio. En el escenario RCP 8.5 las proyecciones son más dramáticas, pronosticándose disminuciones en todas las series alternativas de un promedio de 32%, con un máximo de 45% para la serie R5, equivalente a 267 mm/año en la estación Pirque, promedio para el período de simulación (El IPCC proyecta déficit de 10% RCP 2.6 y 20% RC 8.5, de las precipitaciones para la zona). Sumado a las disminuciones en las precipitaciones, se proyectan comportamientos disímiles en las diez series equiprobables futuras. Fue posible agrupar dichos comportamientos en tres tipos para cada escenario, teniéndose variaciones en la estacionalidad de mayor relevancia en el escenario RCP 8.5, en el que se identifica un comportamiento (Modo 1) con un período lluvioso entre Abril y Agosto, donde si bien esperan en volumen anual menor cantidad de precipitaciones, éstas tienen una tendencia más homogénea a lo largo de los meses mencionados (Precipitación casi invariante entre Abril y Agosto). En el caso del Modo 2 para el mismo escenario, el peak de precipitaciones se ve desplazado del mes de Junio actualmente, al mes de Julio. Para el Modo 3, se prevé una estacionalidad similar a la actual pero reducidas las precipitaciones en su monto. En el caso del RCP 2.6, los cambios no son tan abruptos, en el Modo 1 se esperan excedencias en las precipitaciones entre los meses de Abril Agosto, proyectándose aumentos de 100% de las precipitaciones en el mes de Abril y luego deficiencias a partir del mes de Septiembre, con un 50% de deficiencia para este mismo mes. La situación cambia en el Modo 2, donde se tiene una distribución casi homogénea de las precipitaciones entre los meses de Mayo y Agosto, pero con deficiencias comparativas en todos los meses del año, siendo la mayor en el mes de Junio de 45%. Finalmente, para el Modo 3, se proyecta una estacionalidad similar a la actual, con déficit entre los meses de Junio y Noviembre, siendo el mayor déficit de 18% para el mes de Junio.

Respecto a las proyecciones hidrológicas de las tres cuencas estudiadas, se prevé un cambio importante en el comportamiento de éstas, pasando de régimen netamente nival a un régimen mixto nivo-pluvial, en ambos escenarios y para todas las series (salvo dos series del RCP 2.6, con régimen pluvio-nival), con crecidas en los meses de Junio y Octubre, lo que implica además un adelanto en las crecidas de deshielo, producto del aumento en las temperaturas. Además se espera un aumento en los caudales mínimos entre Mayo y Octubre, y se proyectan deficiencias del orden del 50% durante el verano, lo que implica mayor escasez en el período seco.

Utilizando los volúmenes totales escurridos anuales, las reducciones medias para las tres cuencas son de 3% y 3.5%, para cada escenario, lo que equivale a un volumen del orden de 66 [hm³] y 83 [hm³], respectivamente, con disminuciones máximas de 7% y 11.5% respecto al período de línea base, equivalentes a 159 [hm³] para el RCP 2.6 y 262 [hm³] para el RCP 8.5, promedio para las tres cuencas. Las mayores deficiencias se esperan para la cuenca del río Yeso, con un déficit promedio de las series para el período de simulación de 7.8% y 8.5%, para los escenarios RCP 2.6 y 8.5, respectivamente.

Las repercusiones de los resultados son evidentes, si bien la cuantificación de caudales y volúmenes es aproximada, el cambio en la hidrología es inminente en la cuenca del Maipo, cuenca de gran relevancia en el abastecimiento de agua potable en Santiago y fuente de producción hidroeléctrica (Central Maitenes, Alfalfal I, Queltehues, Volcán), con proyectos de expansión como lo es el Alto Maipo impulsado por AES GENER S.A, que proyecta dos nuevas centrales Alfalfal II y Las Lajas, ubicadas en la cuenca del río Colorado, pero que captará aguas de dos puntos pertenecientes a la cuenca del río Volcán y Yeso (Bocatoma embalse El Yeso y La Engorda), en las que se proyectan reducciones medias de 5 [m³/s] para el río Volcán y 8 [m³/s] para el Maipo, dado que el recurso hídrico será trasvasiado a la cuenca del río Colorado, donde se proyectan las nuevas centrales (ver anexos Figura). Estas modificaciones en el caudal se sumarían a las repercusiones del cambio climático, lo que podría significar un fuerte impacto medio ambiental aguas abajo, punto en el que se sitúa la gran ciudad de Santiago, con más de 6 millones de habitantes, que se abastecen en gran medida de los aportes hídricos de esta cuenca, para uso potable, agrícola, industrial, entre otros.

Por otro lado, la deficiencia hídrica se presenta en los meses de estiaje, donde actualmente ya se tiene escasez. Es por tanto, de gran relevancia actuar de manera anticipada, implementando nuevas o mejorando la infraestructura existente, para embalsar los excedentes hídricos que se proyectan para los meses de invierno y así aumentar la disponibilidad en los meses de déficit. Podría estudiarse la variabilidad hidrológica en un horizonte temporal más cercano (2020-2040), para tener órdenes de magnitud para la implementación de proyectos en un plazo más cercano al del período analizado (2040-2070). Solo infraestructura no es suficiente para afrontar los desafíos futuros, en un país vulnerable hídricamente como Chile, programas de instrucción, consciencia social y legislaciones fuertes a los principales usuarios del agua son necesarias, más bien dicho, obligatorias de implementar en la sociedad chilena.

Por su parte el IPCC, en su reporte de Mitigación 2014, incluye una serie de ideas para potenciar la mitigación del efecto de los gases de efecto invernadero, entre las cuales se nombran:

Cooperación internacional en la implementación de medidas de mitigación, las políticas de mitigación deben ser transversales, dado que el efecto de los gases de efecto invernadero es transversal a su emisor. Desarrollo y difusión de tecnologías como un bien público.

Estrategias en la distribución de costos y beneficios, para el desarrollo e implementación de políticas de mitigación a nivel mundial. Evidencia sugiere que la percepción de equidad influencia el nivel de cooperación internacional.

Identificar los co-beneficios en la implementación de políticas de mitigación. Tener una perspectiva multi-objetivo podría potenciar y robustecer los objetivos, como protección del medio ambiente local, seguridad energética, entre otros.

Un gobierno con capacidad de respuesta a la temática medio ambiental, es un buen reflejo de su funcionamiento, determinación, capacidad de gobierno y seguridad para la nación.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Ahumada, F. (2012) Impacto del calentamiento global en zonas de inundación en isla de Maipo, Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Ayala, A. (2011) Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico en la laguna Laja. Tesis para optar al Grado de Magister en Recursos Hídricos y Medio Ambiente y memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Mardones, G. (2009) Implementación y uso del modelo Weap en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Mena, D. (2009) Análisis del impacto del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo Weap. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Zavala, T. (2013) Evaluación del impacto del cambio climático en centrales hidroeléctricas de la cuenca del alto Cachapoal, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Arnell, N. (1999) Climate change and global water resources, Universidad de Southampton, Reino Unido.

Collier M.A., Jeffrey S.J., Rotstayn L.D., Wong K.K-H., Dravitzki S. M. , Moeseneder C., Hamalainen C., Syktus J.I., Suppiah R., Antony J., El Zein A., Atif M., (2011) The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication, 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia.

Droogers,P., Immerzeel, W., Terink, W., Hoogeveen, J., Bierkens, M., Van Beek, L. &Debele, B., (2012) Water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050, Hydrology and Earth System Sciences 16.

Jeffrey, S., Rotstayn, L., Collier, M., Dravitzki, S., Hamalainen, C., Moesseneder, C., Wong, K., Syktus, J. (2011) The CSIRO-Mk3.6 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication, Queensland Climate Change Centre of Excellence, Queensland, Australia.

Knutti, R., Sedlacek, J. (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections, Institute for Atmospheric and Climate Change, Zurich, Suiza.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. & Veith, T. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.

Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, K., Rose, S., Van Vuuren, R., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J. & Wilbanks, T. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature* 463.

Shakun, J., Clark, P., He, F., Marcott, M., Mix, A., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Schmittner, A. & Brad, E. (2012) Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation, *Nature* 484.

Vargas, X., Gómez, T., Ahumada, F., Rubio, E., Cartes, M. & Gibbs, M. (2013) Water availability in a mountainous Andean watershed under CMIP5 climate change scenarios. *Cold and Mountain Region Hydrological Systems Under Climate Change: Towards Improved Projections*, Proceedings of H02m IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenbrg, Suecia.

Viner, D. (2000) *Modelling Climate Change*, Climate Research Unit, Reino Unido.

IPCC, (2013) *Cambio climático 2013: La Base de la Ciencia Física . Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Stocker, T.F, D. Qin. (directores de la publicación)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos.

IPCC, (2007) *Cambio climático: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*.

Dirección General de Aeronáutica (1980), Dirección Meteorológica de Chile, Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, *Anuarios Climatológicos*, década de 1980.

DGA (Dirección General de Aguas), (2004) Cuenca del Río Maipo, Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua, según objetivos de calidad.

DGF (Departamento de Geofísica, Universidad de Chile), (2012), El explorador eólico, Descripción y Manual de Uso.
<http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/info/Documentacion_Explorador_Eolico_V2_Full.pdf>

CMIP-Coupled Model Intercomparison Project – Overview, World Climate Research Programme. <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/index.html?submenuheader=0>>

AES GenerS.A <<http://www.aesgener.cl>>

SEI (2010), WEAP user manual.<http://weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf>

ANEXO 1: Funciones de Transferencia en Escalado de Forzantes

Funciones de transferencia construidas con la estructura $F(x) = Af(x) + Bg(x) + C$.

Con $f(x)$ y $g(x)$ funciones correspondientes al tipo de construcción que se tiene.

Tipo de función indica si la construcción es una función lineal, cuadrática o logarítmica.

Rango implica los límites en que es válida la función, pudiendo haber más de una segmentación por mes.

Tabla A1-1: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Enero	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	7.5245	-2.7042	0	log	19.6
R1	2.0241	-20.096	0	lineal	19.4
R1	0.4227	10.997	0	lineal	19.4
R2	0.1407	17.451	0	lineal	21
R2	-0.3259	14.06	-131.15	cuadra	19.4
R2	0.2327	14.51	0	lineal	19.4
R3	1.0424	-1.7042	0	lineal	20.8
R3	0.488	9.7955	0	lineal	20.8
R4	0.2075	15.897	0	lineal	20.8
R4	0.6591	6.1817	0	lineal	20.8
R5	0.3321	13.534	0	lineal	20.1
R5	0.2792	-9.9411	107.05	cuadra	20.1
R6	0.2473	15.196	0	lineal	20.5
R6	0.6652	6.5404	0	lineal	20.5
R7	0.4077	11.519	0	lineal	todo
R8	0.0499	19.411	0	lineal	21.7
R8	14.266	-23.379	0	log	21.7
R9	10.612	-12.324	0	log	todo
R10	9.5835	-9.0795	0	log	todo

Tabla A1-2: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Febrero	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	0.4771	10.099	0	lineal	17.8
R1	0.9517	1.6777	0	lineal	17.8
R2	0.2909	13.931	0	lineal	19.4
R2	1.0216	-37.77	367.81	cuadra	18.2
R2	-0.6791	24.36	-199.55	cuadra	18.2
R3	12.703	-18.468	0	log	todo
R4	0.5789	7.6267	0	lineal	21.4
R4	0.4835	9.5716	0	lineal	18.8
R4	-2.6755	99.955	-914.97	cuadra	18.8
R5	1.4789	-10.688	0	lineal	20.7
R5	0.5515	8.5648	0	lineal	20.7
R6	0.402	11.573	0	lineal	20.6
R6	0.087	-2.8195	40.962	cuadra	18.7
R6	-0.4646	17.54	-146.75	cuadra	18.7
R7	0.6139	7.3877	0	lineal	18.3
R7	-1.4777	53.426	-464.29	cuadra	18.3
R8	4.7524	-86.295	0	lineal	22.3
R8	0.0687	18.33	0	lineal	20.3
R8	0.4983	9.2926	0	lineal	20.3
R9	0.379	11.885	0	lineal	21.3
R9	-0.0355	1.9393	-5.192	cuadra	21.3
R10	0.6396	7.1179	0	lineal	todo

Tabla A1-3: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Marzo	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	0.6492	6.7857	0	lineal	16
R1	0.2244	13.349	0	lineal	16
R2	9.848	-9.9394	0	log	15.5
R2	0.2032	13.75	0	lineal	15.5
R3	0.7612	5.2325	0	lineal	todo
R4	0.7387	5.3574	0	lineal	15.4
R4	0.1326	14.598	0	lineal	15.4
R5	0.6067	7.4018	0	lineal	15.2
R5	0.1694	14.091	0	lineal	15.2
R6	0.654	6.7723	0	lineal	todo
R7	0.3251	12.632	0	lineal	16
R7	3.4718	-107.57	850.28	cuadra	15.4
R7	0.2738	12.73	0	lineal	15.4
R8	0.4447	10.576	0	lineal	16
R8	0.9407	2.6224	0	lineal	15.5
R8	0.1804	-4.9743	50.786	cuadra	155
R9	9.5853	-9.1965	0	log	15.8
R9	0.2963	12.222	0	lineal	15.8
R10	0.6082	7.8898		lineal	todo

Tabla A1-4: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Abril	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	0.6496	6.8271	0	lineal	9.7
R1	-1.6525	31.856	-140.5	cuadra	9.7
R2	0.4267	9.4784	0	lineal	9.9
R2	1.4404	-0.55	0	lineal	9.9
R3	0.8332	4.501	0	lineal	9.9
R3	-2.9138	57.389	-269.53	cuadra	9.9
R4	0.7393	6.1495	0	lineal	todo
R5	2.9212	-21.667	0	lineal	12.5
R5	0.1518	-2.8573	26.923	cuadra	9.5
R5	-2.1203	42.008	-194.47	cuadra	9.5
R6	0.3189	10.919	0	lineal	11.6
R6	0.7694	-15.848	95.131	cuadra	10
R6	2.0905	-37.646	181.55	cuadra	10
R7	6.0326	-0.1869	0	log	todo
R8	12.239	-15.424	0	log	11.4
R8	-0.3911	8.8267	-35.901	cuadra	11.4
R9	0.7744	5.416	0	lineal	11.4
R9	6.3849	-1.4408	0	log	11.4
R10	0.8017	5.306	0	lineal	11.1
R10	0.449	9.1083	0	lineal	11.1

Tabla A1-5: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Mayo	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	1.8206	-1.4952	0	lineal	6.9
R1	0.4453	7.6254	0	lineal	5.5
R1	1.601	1.3797	0	lineal	5.5
R2	1.3178	2.56	0	lineal	todo
R3	1.4607	1.3169	0	lineal	5.9
R3	2.3721	-4.0554	0	lineal	5.9
R4	1.2797	2.7669	0	lineal	5.5
R4	0.886	4.9198	0	lineal	5.5
R5	7.3153	-2.5452	0	log	5.6
R5	2.8386	-6.121	0	lineal	5.6
R6	6.8302	-1.609	0	log	5.5
R6	1.716	0.5985	0	lineal	5.5
R7	1.4493	2.1781	0	lineal	5.4
R7	-2.205	24.542	-58.13	cuadra	5.4
R8	1.0305	4.2928	0	lineal	5.4
R8	2.0781	-1.333	0	lineal	5.4
R9	1.3482	2.5902	0	lineal	5.7
R9	2.1957	-2.3338	0	lineal	5.7
R10	7.2265	-2.8139	0	log	5.9
R10	3.2931	-9.211	0	lineal	5.9

Tabla A1-6: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Junio	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	1.1961	4.9465	0	lineal	3
R1	0.1143	8.2071	0	lineal	2
R1	7.5437	-6.6467	0	lineal	2
R2	0.3355	8.72	0	lineal	4.1
R2	1.2954	4.67	0	lineal	3
R2	2.4634	1.29	0	lineal	3
R3	0.7746	6.35	0	lineal	2.7
R3	-1.7176	9.25	-3.89	cuadra	2.7
R4	3.2937	5.28	0	log	Todo
R5	3.5289	4.81	0	log	2.6
R5	4.1748	-2.60	0	lineal	2.6
R6	2.8633	5.58	0	log	2.6
R6	2.4929	2.06	0	lineal	2.3
R6	0.6654	5.97	0	lineal	2.3
R7	0.8495	6.33	0	lineal	2.4
R7	12.246	-20.86	0	lineal	2.4
R8	0.2255	9.29	0	lineal	4.7
R8	0.9667	5.76	0	lineal	2.9
R8	3.9151	-3.08	0	lineal	2.9
R9	0.8955	6.09	0	lineal	2.7
R9	3.415	-0.78	0	lineal	2.7
R10	1.309	4.43	0	lineal	2.8
R10	6.9664	-11.18	0	lineal	2.8

Tabla A1-7: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Julio	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	2.7769	5.84274	0	log	todo
R2	0.9081	5.42	0	lineal	todo
R3	2.3694	5.95	0	log	todo
R4	0.8227	6.12	0	lineal	1.7
R4	1.6564	4.78	0	lineal	1.7
R5	0.7023	6.42	0	lineal	1.6
R5	1.2803	5.34	0	lineal	1.6
R6	0.7468	6.33	0	lineal	1.7
R6	1.1842	5.62	0	lineal	1.7
R7	2.3309	6.53	0	log	1.6
R7	3.3775	1.99	0	lineal	1.6
R8	1.3086	4.70	0	lineal	1.8
R8	1.0409	5.44	0	lineal	1.8
R9	0.8949	5.93	0	lineal	1.9
R9	4.1162	-0.29	0	lineal	1.9
R10	2.5275	6.08	0	log	2
R10	1.5395	4.22	0	lineal	2

Tabla A1-8: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Agosto	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	3.5022	-6.5888	0	lineal	5
R1	0.8352	6.698	0	lineal	5
R2	6.5273	-21.48	0	lineal	4.9
R2	0.9136	6.24	0	lineal	4.9
R3	2.2911	1.12	0	lineal	4.2
R3	1.2368	5.22	0	lineal	2.7
R3	0.2582	7.91	0	lineal	2.7
R4	1.0275	5.61	0	lineal	4.6
R4	0.9303	6.24	0	lineal	2.5
R4	0.4017	7.56	0	lineal	2.5
R5	1.5155	3.64	0	lineal	4.6
R5	0.8939	6.44	0	lineal	2.7
R5	0.1683	8.14	0	lineal	2.7
R6	2.9508	-2.01	0	lineal	4.3
R6	1.5601	3.94	0	lineal	3
R6	0.1105	8.24	0	lineal	3
R7	2.3211	-0.59	0	lineal	4.9
R7	4.3591	4.26	0	log	2.8
R7	0.3998	7.45		lineal	2.8
R8	11.027	-40.18	0	lineal	4.6
R8	1.5438	3.80	0	lineal	3.2
R8	0.215	7.91	0	lineal	3.2
R9	3.3027	-5.13	0	lineal	4.8
R9	4.516	3.94	0	log	2.8
R9	1.8497	3.65	0	lineal	2.8
R10	10.826	-36.61	0	lineal	4.4
R10	5.9671	2.26	0	log	3
R10	1.8009	3.51	0	lineal	3

Tabla A1-9: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

	coeficientes				
Septiembre	A	B	C	Tipo	Rango [mm]
R1	1.2009	4.6237	0	lineal	todo
R2	1.0089	5.43	0	lineal	todo
R3	7.1539	-1.23	0	log	todo
R4	0.3338	10.22	0	lineal	6.6
R4	6.3909	0.41	0	log	6.6
R5	0.3903	9.72	0	lineal	6
R5	-1.0775	13.13	-28.02	cuadra	6
R6	3.3283	-11.19	0	lineal	7
R6	1.1557	4.19	0	lineal	7
R7	0.5996	8.64	0	lineal	6
R7	7.0609	-0.03	0	log	6
R8	0.8535	6.76	0	lineal	6.4
R8	7.9183	-2.35	0	log	6.4
R9	0.3683	9.98	0	lineal	6.4
R9	1.3767	3.31	0	lineal	6.4
R10	0.6926	7.69	0	lineal	6.5
R10	9.6014	-5.52	0	log	6.5

Tabla A1-10: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

Octubre	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	1.6979	-3.7752	0	lineal	11
R1	0.4443	-8.3573	52.86	cuadra	9.3
R1	0.7794	6.0029	0	lineal	9.3
R2	0.5915	8.51	0	lineal	11
R2	0.3164	-5.62	38.452	cuadra	8.8
R2	0.3246	10.55	0	lineal	8.8
R3	1.9956	-8.57	0	lineal	11.7
R3	0.4857	9.10	0	lineal	8.8
R3	0.4244	9.57	0	lineal	8.8
R4	0.2669	11.98	0	lineal	11.3
R4	0.1728	-2.99	26.52	cuadra	8.3
R4	1.608	0.22	0	lineal	8.3
R5	7.6329	-3.87	0	log	11.9
R5	0.0815	-1.24	18.22	cuadra	8.6
R5	1.5655	-0.08	0	lineal	8.6
R6	0.7046	7.22	0	lineal	11
R6	0.1985	-3.32	27.46	cuadra	8.4
R6	0.5472	8.94	0	lineal	8.4
R7	1.6963	-5.13	0	lineal	11.8
R7	0.0264	-0.06	11.92	cuadra	8.7
R7	0.8598	6.09	0	lineal	8.7
R8	0.621	7.89	0	lineal	11.2
R8	1.1821	1.51	0	lineal	10.2
R8	0.3573	10.13	0	lineal	10.2
R9	1.6989	-5.02	0	lineal	11.8
R9	0.5623	8.16	0	lineal	9.7
R9	0.2658	11.05	0	lineal	9.7
R10	1.1154	1.72	0	lineal	11.8
R10	0.4779	9.18	0	lineal	9.3
R10	-0.7339	13.56	-49.02	cuadra	9.3

Tabla A1-11: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

	coeficientes				
Noviembre	A	B	C	Tipo	Rango [mm]
R1	0.0721	16.255	0	lineal	15.9
R1	12.275	-16.601	0	log	15.9
R2	4.5405	4.84	0	log	15.4
R2	0.7309	5.76	0	lineal	15.4
R3	0.2857	12.60	0	lineal	15.7
R3	0.8898	3.06	0	lineal	15.7
R4	0.6074	7.52	0	lineal	13.3
R4	0.1776	12.92	0	lineal	13.3
R5	0.6631	6.67	0	lineal	13.6
R5	0.1017	13.89	0	lineal	13.6
R6	10.384	-11.33	0	log	todo
R7	8.6103	-6.73	0	log	13.4
R7	1.05	1.28	0	lineal	13.4
R8	0.6053	7.64	0	lineal	12.8
R8	2.2242	-13.22	0	lineal	12.8
R9	9.113	-7.96	0	log	13.2
R9	2.0549	-11.49	0	lineal	13.2
R10	0.8103	4.38	0	lineal	todo

Tabla A1-12: Funciones de transferencia escalamiento temporal temperatura

	coeficientes				
Diciembre	A	B	C	Tipo	Rango [mm]
R1	0.7747	4.2918	0	lineal	todo
R2	0.1949	15.79	0	lineal	18.7
R2	18.718	-35.39	0	log	18.7
R3	0.1229	17.03	0	lineal	19.5
R3	0.5261	9.13	0	lineal	19.5
R4	0.1081	17.37	0	lineal	19.1
R4	0.4598	10.51	0	lineal	19.1
R5	0.1187	17.16	0	lineal	19.3
R5	0.4892	9.99	0	lineal	19.3
R6	0.3634	12.01	0	lineal	todo
R7	8.727	-6.42	0	log	todo
R8	8.1734	-4.90	0	log	todo
R9	10.577	-12.00	0	log	todo
R10	10.252	-11.04	0	log	todo

Tabla A1-13: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Verano	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	10.484	-21.732	0	log	31
r1	1.4458	-31.465	0	lineal	31
R2	14.468	-34.23	0	log	28
R2	2.7993	-68.111	0	lineal	28
R3	11.554	-25.531	0	log	31
R3	1.4389	-29.902	0	lineal	31
R4	15.968	-34.787	0	log	22
R4	1.1167	-3.8686	0	lineal	22
R5	15.301	-35.504	0	log	28
R5	3.7719	-91.333	0	lineal	28
R6	0.6297	-7.7074	0	lineal	37
R6	2.6544	-81.564	0	lineal	37
R7	0.6315	-12.236	0	lineal	42
R7	3.5582	-132.53	0	lineal	42
R8	0.6465	-8.6349	0	lineal	37
R8	41.463	-131.36	0	log	37
R9	0.686	-5.8735	0	lineal	40.5
R9	1.9797	-57.324	0	lineal	40.5
R10	0.7522	-9.5861	0	lineal	36
R10	3.447	-101.95	0	lineal	36

Tabla A1-14: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Abril	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	4.6436	-99.037	0	lineal	26.7
R1	6.9369	2.4576	0	log	26.7
R1	1.1344	-13.341	39.09	cuadra	9
R2	103.81	-352.14	0	log	49
R2	1.1289	-10.769		lineal	49
R3	24.33	-43.787	0	log	Todo
R4	1.6381	-16.419	0	lineal	Todo
R5	1.2416	-15.274	0	lineal	42
R5	0.693	2.4006	0	lineal	42
R6	10.91	-293.08	0	lineal	30.4
R6	0.6852	14.812	0	lineal	30.4
R6	1.9281	-29.018	109	cuadra	11
R7	1.5392	-14.637	0	lineal	Todo
R8	1.2792	-10.823	0	lineal	Todo
R9	0.8808	0.7658	0	lineal	Todo
R10	0.731	11.78	0	lineal	25.5
R10	1.6529	-11.579	0	lineal	25.5

Tabla A1-15: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Mayo	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	1.5531	-1.9655	0	lineal	Todo
R2	1.0526	2.2591	0	lineal	Todo
R3	1.3463	-0.5741	0	lineal	Todo
R4	1.5493	-50.491	0	lineal	80
R4	2.7012	-130.29	0	lineal	80
R5	78.853	-250.42	0	log	73
R5	1.6186	-32.121	0	lineal	73
R6	1.6614	-34.762	0	lineal	Todo
R7	1.828	-53.337	0	lineal	51
R7	0.6136	3.4197	0	lineal	51
R8	0.928	8.62	0	lineal	Todo
R9	1.1148	-0.7972	0	lineal	Todo
R10	13.604	-861.25	0	lineal	72.7
R10	2.1552	-33.469	0	lineal	72.7

Tabla A1-16: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Junio	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	900.86	-4329.5	0	ln	146
R1	1.2797	-31.781	0	lineal	146
R2	5.842	-926.33	0	lineal	199
R2	1.2846	-37.390	0	lineal	199
R3	2.5135	-125.26	0	lineal	148
R3	1.2314	-25.606	0	lineal	148
R4	3.8457	-277.26	0	lineal	169
R4	1.4467	-39.023	0	lineal	169
R5	494.27	-2295.7	0	log	182
R5	1.2685	-45.783	0	lineal	182
R6	6.6672	-571.97	0	lineal	116
R6	1.7211	-52.104	0	lineal	116
R7	561.23	-2496.5	0	log	119
R7	1.8803	-82.116	0	lineal	119
R8	9.3799	-1391.8	0	lineal	170
R8	1.3213	-50.349	0	lineal	170
R9	540.25	-2474.7	0	log	135.6
R9	1.2036	-39.888	0	lineal	135.6
R10	3.1721	-344.03	0	lineal	163
R10	1.1029	-38.394	0	lineal	163

Tabla A1-17: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Julio	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	3.1467	-126.4	0	lineal	Todo
R2	7.4488	-856.75	0	lineal	136
R2	1.2922	-10.590	0	lineal	136
R3	3.1786	-291.65	0	lineal	138
R3	113.01	-395.79	0	log	138
R4	145.58	-420.75	0	log	104
R4	2.3708	-55.531	0	lineal	104
R5	2.4845	-61.622	0	lineal	120
R5	0.0334	-2.9141	79.60	cuadra	120
R6	10.164	-981.94	0	lineal	119
R6	2.1231	-59.237	0	lineal	119
R7	4.3402	-369.53	0	lineal	127
R7	115.12	-393.69	0	log	127
R8	4.1834	-427.72	0	lineal	146
R8	1.5561	-38.838	0	lineal	146
R9	2.0789	-63.803	0	lineal	Todo
R10	2.0624	-79.501	0	lineal	Todo

Tabla A1-18: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Agosto	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	850.86	-3564.4	0	log	77
R1	2.0381	-24.394	0	lineal	77
R2	372.23	-1681.10	0	log	132
R2	1.2224	-21.515	0	lineal	132
R3	486.74	-2170.7	0	log	122
R3	1.3795	-13.827	0	lineal	122
R4	5.4377	-515.24	0	lineal	122
R4	1.3288	-20.428	0	lineal	122
R5	5.1234	-457.63	0	lineal	120
R5	1.7028	-49.919	0	lineal	120
R6	437.6	-1856.1	0	log	102
R6	1.6749	-32.995	0	lineal	102
R7	5.3993	-349.56	0	lineal	90.6
R7	1.6264	-35.651	0	lineal	90.6
R8	1.4057	-30.993	0	lineal	Todo
R9	37.385	-3413.3	0	lineal	95
R9	1.9659	-56.722	0	lineal	95
R10	1.7264	-31.957	0	lineal	Todo

Tabla A1-19: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Septiembre	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	54.63	-110.22	0	log	61
R1	0.0336	-0.8154	11.77	cuadra	61
R2	114.98	-404.78	0	log	89
R2	0.0121	0.1185	-3.55	cuadra	89
R3	2.3002	-26.82	0	lineal	60
R3	0.0178	0.2883	1.04	cuadra	60
R4	45.025	-73.384	0	log	71
R4	0.0153	0.1341	2.23	cuadra	71
R5	7.2092	-271.7	0	lineal	49
R5	0.0336	-0.2296	7.08	cuadra	49
R6	323.97	-1206.2	0	log	56
R6	1.4601	-12.372	0	lineal	56
R7	3.3906	-214.03	0	lineal	85
R7	1.0812	-4.6507	0	lineal	85
R8	46.764	-64.122	0	log	52
R8	0.0339	-0.1609	3.90	cuadra	52
R9	2.0503	9.8987	0	lineal	45
R9	0.045	-0.5081	6.20	cuadra	45
R10	4.5152	-267.41	0	lineal	86
R10	1.3324	-4.221	0	lineal	86

Tabla A1-20: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Octubre	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	137.74	-371.14	0	log	19
R1	1.8918	-8.4498	0	lineal	19
R2	56.886	-140.67	0	log	27
R2	1.7056	-10.502	0	lineal	27
R3	77.164	-218.72	0	log	27
R3	1.4653	-10.762	0	lineal	27
R4	31.323	-54.111	0	log	24
R4	1.4853	-6.4439	0	lineal	24
R5	86.432	-260.22	0	log	30
R5	1.2076	-3.2078	0	lineal	30
R6	71.266	-193.32	0	log	24
R6	1.4199	-4.8275	0	lineal	24
R7	8.6384	-170.23	0	lineal	23
R7	1.5635	-6.9706	0	lineal	23
R8	37.422	-69.996	0	log	16
R8	2.2164	-10.484	0	lineal	16
R9	1.8404	-9.0861	0	lineal	Todo
R10	2.1351	-9.1102	0	lineal	Todo

Tabla A1-21: Funciones de transferencia escalamiento temporal precipitación

Noviembre	coeficientes			Tipo	Rango [mm]
	A	B	C		
R1	6.9483	-125.25	0	lineal	19.6
R1	1.7196	-12.876	0	lineal	19.6
R2	4.2426	-35.445	0	lineal	9.5
R2	1.2606	-6.82	0	lineal	9.5
R3	1.5127	-3.0533	0	lineal	Todo
R4	8.9975	-132	0	lineal	16
R4	1.6881	-8.804	0	lineal	16
R5	4.5336	-49.137	0	lineal	16.4
R5	1.7107	-6.5618	0	lineal	16.4
R6	1.5237	-8.6773	0	lineal	Todo
R7	19.749	-30.666	0	log	13.6
R7	0.2298	-1.9584	4.78	cuadra	3.6
R8	16.448	-20.342	0	log	13
R8	0.561	-7.6138	25.81	cuadra	13
R9	10.178	-4.0132	0	log	14
R9	0.3327	-4.9786	19.68	cuadra	14
R10	9.0299	-1.7391	0	log	11.6
R10	0.4912	-5.3765	14.69	cuadra	11.6

ANEXO 2: Resultados Test F-Fischer para selección comportamientos modales en precipitación

Tabla A2-1: Ejemplo resultado Test de Fischer R1-R6, RCP 2.6

t-Test: Paired Two Sample for Means		
	R1	R6
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	43.0	44.6
Variance	7561.8	12928.2
Observations	372	372
Pearson Correlation	0.20	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	371	
t Stat	-0.24	
P(T<=t) one-tail	0.40	
t Critical one-tail	1.65	
P(T<=t) two-tail	0.81	Correlación?
t Critical two-tail	1.97	Si

Tabla A2-2: Ejemplo resultado Test de Fischer R1-R8, RCP 2.6

t-Test: Paired Two Sample for Means		
	R1	R8
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	43.0	40.8
Variance	7561.8	6723.8
Observations	372	372
Pearson Correlation	0.28	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	371	
t Stat	0.41	
P(T<=t) one-tail	0.34	
t Critical one-tail	1.65	
P(T<=t) two-tail	0.68	Correlación?
t Critical two-tail	1.97	Si

Tabla A2-3: Ejemplo resultado Test de Fischer R2-R5, RCP 2.6

t-Test: Paired Two Sample for Means		
	R2	R3
	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Mean	28.2	27.8
Variance	1675.0	1713.3
Observations	372	372
Pearson Correlation	0.47	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	371	
t Stat	0.20	
P(T<=t) one-tail	0.42	
t Critical one-tail	1.65	
P(T<=t) two-tail	0.84	Correlación?
t Critical two-tail	1.97	Si

ANEXO 3: Proyecciones de Caudales por WEAP, ambos escenarios

Tabla A3-1: Proyecciones de caudal modelo hidrológico WEAP, RCP 2.6

RCP 2.6		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
R1	MELM	22.8	24.2	61.9	50.9	34.7	59.9	81.5	56.7	54.7	41.5	30.4	25.1
	VEQ	9.3	10.0	23.2	19.0	14.0	23.9	30.7	21.0	17.9	14.1	11.0	9.7
	AEY	5.7	4.8	9.9	9.0	7.2	11.6	17.0	12.6	11.5	9.8	7.9	7.1
R2	MELM	23.4	24.8	54.3	47.6	34.8	58.8	80.0	55.8	53.1	39.8	29.8	25.1
	VEQ	9.4	10.1	21.0	18.1	14.2	23.5	30.1	20.7	17.5	13.5	10.8	9.6
	AEY	5.7	4.9	9.0	8.5	7.1	11.5	16.7	12.5	11.2	9.5	7.7	6.9
R3	MELM	23.2	24.5	56.4	50.0	36.4	59.9	81.0	56.8	54.8	42.4	31.0	25.4
	VEQ	9.5	10.1	21.8	18.9	14.3	23.9	30.5	21.0	18.0	14.4	11.2	9.8
	AEY	5.8	5.0	9.3	8.8	7.2	11.7	16.9	12.7	11.5	9.9	8.0	7.1
R4	MELM	23.9	25.7	58.3	51.1	35.8	61.1	82.3	57.1	54.7	41.9	30.8	25.5
	VEQ	9.7	10.4	22.2	19.2	14.5	24.4	30.9	21.2	18.0	14.3	11.2	9.8
	AEY	5.9	5.1	9.6	9.1	7.3	11.9	17.1	12.8	11.5	9.9	8.0	7.1
R5	MELM	24.0	25.4	56.6	51.1	36.4	61.5	82.6	58.1	55.2	42.3	31.2	25.1
	VEQ	9.8	9.7	20.3	17.7	13.7	21.9	30.3	21.2	21.0	16.9	12.8	10.9
	AEY	7.0	5.3	9.2	8.3	7.2	11.0	16.2	11.6	11.0	10.4	8.8	9.5
R6	MELM	23.7	25.3	59.6	51.7	36.4	60.7	82.0	56.8	53.6	41.6	30.2	25.2
	VEQ	9.6	9.7	20.9	17.7	13.7	21.7	30.2	20.9	20.6	16.7	12.5	10.9
	AEY	5.9	5.0	9.8	9.2	7.3	11.9	17.1	12.7	11.4	9.8	7.9	7.0
R7	MELM	24.0	25.6	56.1	50.1	36.0	60.7	82.4	56.9	54.6	41.4	31.0	25.4
	VEQ	9.8	9.7	19.9	17.3	13.6	21.5	30.1	20.9	20.8	16.6	12.7	11.0
	AEY	5.8	5.0	9.3	8.8	7.2	11.7	17.2	12.8	11.6	9.9	8.0	7.1
R8	MELM	23.4	25.4	57.9	52.3	36.0	60.1	81.1	57.6	54.6	41.9	31.0	25.1
	VEQ	9.6	9.8	20.5	17.9	13.6	21.5	29.9	21.1	20.9	16.8	12.8	11.0
	AEY	5.8	5.0	9.6	9.1	7.3	11.8	17.0	12.8	11.5	9.9	8.0	7.1
R9	MELM	23.7	25.5	59.9	50.8	36.3	60.8	82.8	58.0	54.8	41.9	30.9	25.3
	VEQ	9.7	9.7	21.0	17.4	13.7	21.7	30.3	21.2	20.9	16.8	12.8	11.0
	AEY	5.8	5.0	9.8	9.1	7.3	11.9	17.2	12.9	11.6	9.9	8.0	7.1
R10	MELM	23.0	23.8	58.1	50.9	36.1	60.0	81.3	57.1	54.3	41.6	30.8	25.5
	VEQ	9.4	9.2	20.4	17.4	13.6	21.4	29.9	20.9	20.7	16.6	12.7	11.0
	AEY	5.7	4.9	9.5	9.0	7.3	11.8	17.0	12.7	11.5	9.8	8.0	7.1
Promedio Series	MELM	23.5	25.0	57.9	50.6	35.9	60.4	81.7	57.1	54.4	41.6	30.7	25.3
	VEQ	9.6	9.8	21.1	18.1	13.9	22.5	30.3	21.0	19.6	15.7	12.0	10.5
	AEY	5.9	5.0	9.5	8.9	7.3	11.7	16.9	12.6	11.4	9.9	8.0	7.3
Límite Superior	MELM	24.0	25.7	61.9	52.3	36.4	61.5	82.8	58.1	55.2	42.4	31.2	25.5
	VEQ	9.8	10.4	23.2	19.2	14.5	24.4	30.9	21.2	21.0	16.9	12.8	11.0
	AEY	7.0	5.3	9.9	9.2	7.3	11.9	17.2	12.9	11.6	10.4	8.8	9.5
Límite Inferior	MELM	22.8	23.8	54.3	47.6	34.7	58.8	80.0	55.8	53.1	39.8	29.8	25.1
	VEQ	9.3	9.2	19.9	17.3	13.6	21.4	29.9	20.7	17.5	13.5	10.8	9.6
	AEY	5.7	4.8	9.0	8.3	7.1	11.0	16.2	11.6	11.0	9.5	7.7	6.9

Tabla A3-2: Proyecciones de caudal modelo hidrológico WEAP según modos de comportamiento

RCP 2.6		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Q medio
Prom M1	MELM	23.3	25.0	59.8	51.6	35.7	60.2	81.5	57.1	54.3	41.7	30.5	25.2	45.5
	VEQ	9.5	9.8	21.5	18.2	13.8	22.4	30.3	21.0	19.8	15.9	12.1	10.5	17.1
	AEY	5.8	5.0	9.8	9.1	7.3	11.8	17.0	12.7	11.5	9.8	7.9	7.0	9.6
Prom M2	MELM	23.5	24.9	55.8	49.6	35.9	60.1	81.2	56.9	54.3	41.5	30.7	25.2	45.0
	VEQ	9.5	10.0	21.0	18.2	14.1	23.1	30.3	21.0	18.8	14.9	11.6	10.1	16.9
	AEY	6.1	5.0	9.2	8.5	7.2	11.4	16.6	12.2	11.2	9.9	8.2	7.8	9.5
Prom M3	MELM	23.6	25.0	58.8	50.9	36.1	60.6	82.1	57.4	54.6	41.8	30.8	25.4	45.6
	VEQ	9.6	9.8	21.2	18.0	13.9	22.5	30.4	21.1	19.9	15.9	12.2	10.6	17.1
	AEY	5.8	5.0	9.6	9.0	7.3	11.9	17.1	12.8	11.5	9.9	8.0	7.1	9.6

Tabla A3-3: Proyecciones de caudal modelo hidrológico WEAP, RCP 8.5

RCP 8.5		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
R1	MELM	21.0	23.8	58.8	49.8	35.6	58.2	81.1	53.9	52.6	39.9	29.3	24.7
	VEQ	8.8	9.2	20.7	17.2	13.5	20.8	29.8	20.0	20.2	16.1	12.2	10.8
	AEY	5.8	4.8	8.9	8.0	7.0	10.6	15.9	11.5	11.8	10.6	8.7	8.1
R2	MELM	22.9	25.1	56.8	50.0	37.2	60.3	83.4	55.9	54.0	41.4	30.7	25.2
	VEQ	9.4	9.6	20.3	17.2	13.9	21.3	30.4	20.5	20.6	16.6	12.7	11.0
	AEY	6.1	5.0	8.8	8.0	7.1	10.9	16.3	11.8	12.1	10.9	9.0	8.3
R3	MELM	24.2	26.2	59.2	50.8	37.4	61.5	83.6	57.1	54.8	42.2	30.9	25.7
	VEQ	9.9	10.0	21.2	17.8	13.9	21.9	31.2	20.8	20.8	17.2	12.7	11.1
	AEY	6.3	5.2	9.2	8.3	7.2	11.0	16.6	11.9	12.2	11.2	9.1	8.4
R4	MELM	27.7	24.7	52.8	44.7	37.0	52.6	79.9	51.2	53.6	48.4	38.4	36.3
	VEQ	11.4	9.3	19.2	15.7	13.5	19.4	29.3	18.2	19.5	18.5	15.0	16.2
	AEY	7.5	5.6	8.9	7.5	7.1	10.7	15.4	11.3	10.3	10.2	8.7	11.3
R5	MELM	22.7	25.8	59.7	51.0	39.0	61.0	83.9	57.0	55.0	42.0	30.7	25.6
	VEQ	9.5	9.7	21.0	17.5	13.7	21.7	30.8	21.1	21.0	17.0	13.0	11.0
	AEY	6.1	5.0	9.2	8.3	7.1	10.9	16.5	12.0	12.3	11.2	9.2	8.4
R6	MELM	24.2	26.3	58.5	50.4	37.1	60.4	82.8	56.3	54.0	41.5	30.7	25.4
	VEQ	9.8	9.8	20.5	17.5	14.2	21.5	30.2	20.8	20.7	16.9	12.7	11.1
	AEY	6.3	5.1	9.2	8.3	7.2	11.0	16.3	11.8	12.1	11.0	9.0	8.3
R7	MELM	22.5	24.5	55.9	49.1	38.2	59.6	82.6	55.7	53.7	38.2	29.2	24.1
	VEQ	9.2	9.3	20.1	17.0	13.2	21.1	29.9	20.4	20.6	15.6	12.3	10.5
	AEY	5.8	4.8	8.7	7.9	6.9	10.7	16.1	11.7	12.1	10.6	8.7	8.0
R8	MELM	23.3	25.5	59.1	51.6	37.7	59.5	82.2	56.4	54.1	41.7	30.8	25.1
	VEQ	9.6	9.6	21.0	18.2	13.7	21.3	30.0	20.8	20.8	16.7	13.0	10.9
	AEY	6.2	5.0	9.2	8.4	7.1	10.9	16.1	11.8	12.1	11.0	9.2	8.3
R9	MELM	27.5	23.6	48.9	43.0	35.3	52.7	76.3	51.0	52.8	47.4	38.0	36.2
	VEQ	11.3	9.1	18.1	15.1	13.3	19.0	28.5	17.9	19.1	18.1	14.7	15.8
	AEY	7.4	5.4	8.5	7.3	7.0	10.6	15.1	11.2	10.1	10.0	8.5	11.0
R10	MELM	22.8	24.4	50.4	45.7	35.3	57.3	78.2	53.7	51.3	39.4	29.2	24.4
	VEQ	9.3	9.1	18.6	16.1	13.1	20.3	29.0	19.9	19.6	15.8	12.0	10.5
	AEY	5.8	4.8	8.2	7.5	6.7	10.3	15.5	11.3	11.5	10.3	8.5	7.9
Promedio Proyección	MELM	23.9	25.0	56.0	48.6	37.0	58.3	81.4	54.8	53.6	42.2	31.8	27.3
	VEQ	9.8	9.5	20.1	16.9	13.6	20.8	29.9	20.0	20.3	16.9	13.0	11.9
	AEY	6.3	5.1	8.9	8.0	7.0	10.8	16.0	11.6	11.7	10.7	8.9	8.8
Límite Superior	MELM	27.7	26.3	59.7	51.6	39.0	61.5	83.9	57.1	55.0	48.4	38.4	36.3
	VEQ	11.4	10.0	21.2	18.2	14.2	21.9	31.2	21.1	21.0	18.5	15.0	16.2
	AEY	7.5	5.6	9.2	8.4	7.2	11.0	16.6	12.0	12.3	11.2	9.2	11.3
Límite Inferior	MELM	21.0	23.6	48.9	43.0	35.3	52.6	76.3	51.0	51.3	38.2	29.2	24.1
	VEQ	8.8	9.1	18.1	15.1	13.1	19.0	28.5	17.9	19.1	15.6	12.0	10.5
	AEY	5.8	4.8	8.2	7.3	6.7	10.3	15.1	11.2	10.1	10.0	8.5	7.9

Tabla A3-4: Proyecciones de caudal modelo hidrológico WEAP según modos de comportamiento

RCP 8.5		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Qm [m³/s]
Modo 1	MELM	22.6	25.1	58.7	50.1	36.4	59.3	82.0	55.1	53.3	40.7	30.0	25.0	44.9
	VEQ	9.3	9.5	20.6	17.4	13.9	21.1	30.0	20.4	20.4	16.5	12.5	10.9	16.9
	AEY	6.0	5.0	9.0	8.1	7.1	10.8	16.1	11.6	12.0	10.8	8.9	8.2	9.5
Modo 2	MELM	25.0	24.8	54.7	47.5	37.0	57.3	81.2	54.2	53.8	43.5	33.4	29.5	45.2
	VEQ	10.2	9.4	19.8	16.6	13.5	20.6	29.9	19.6	20.1	17.2	13.5	12.9	16.9
	AEY	6.6	5.2	8.8	7.8	7.1	10.8	15.9	11.6	11.4	10.6	8.8	9.4	9.5
Modo 3	MELM	22.8	25.1	55.0	48.3	37.2	59.2	81.1	55.3	53.2	40.7	29.9	25.0	44.4
	VEQ	9.4	9.4	19.8	16.8	13.4	21.0	29.9	20.5	20.3	16.4	12.5	10.7	16.7
	AEY	5.9	4.9	8.7	7.9	6.9	10.6	16.0	11.6	11.9	10.8	8.9	8.1	9.4

ANEXO 4: Esquema centrales proyectadas y existentes, proyecto Alto Maipo

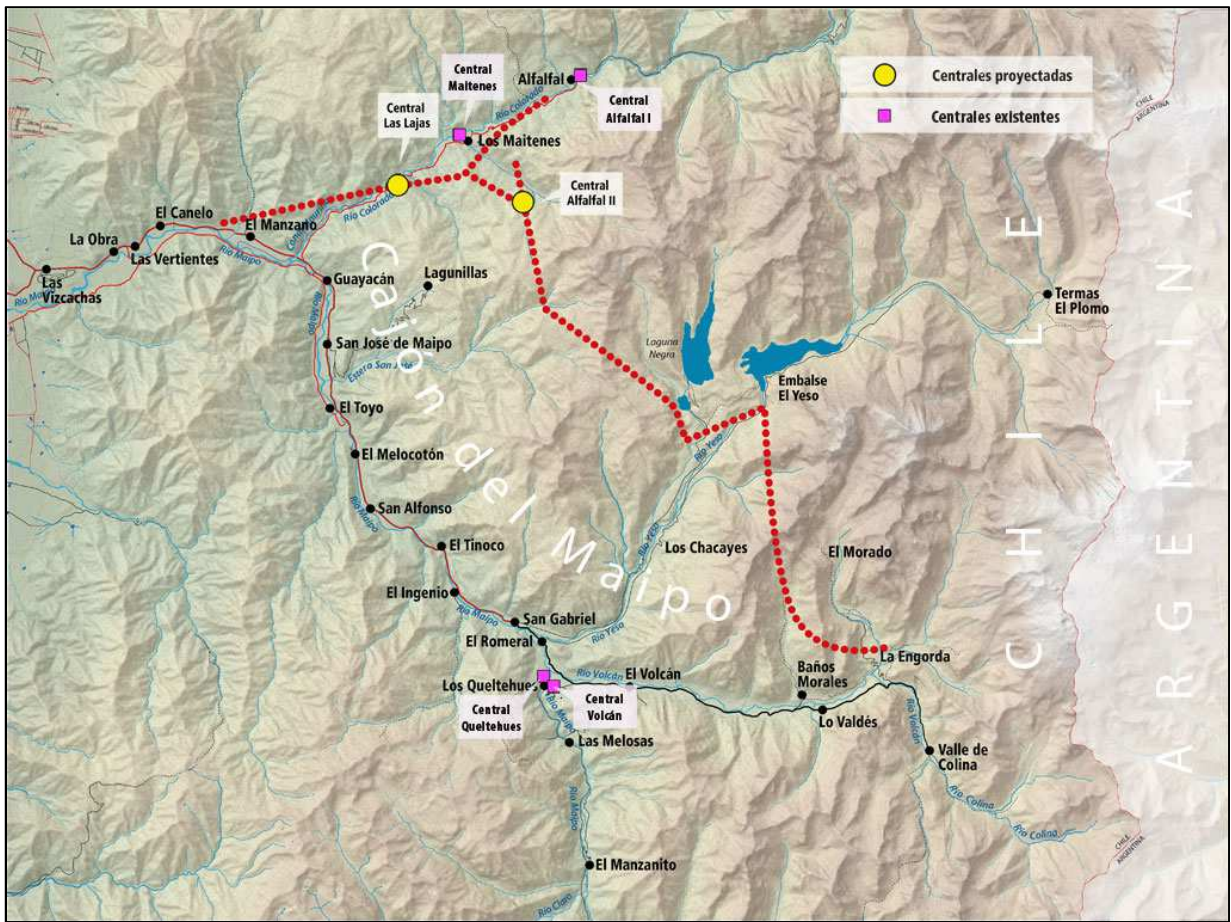


Figura A4-1: Esquema proyecto Alto Maipo, Fuente: AES GENER S.A