

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**CUANTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA Y SU EFECTO
SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL
RÍO MAIPO.**

PIA CAROLINA GARCIA PEÑA

Santiago, Chile
2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**CUANTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA Y SU EFECTO
SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL
RÍO MAIPO.**

**QUANTIFICATION OF WATER STORAGE SCENARIOS AND ITS EFFECT ON
WATER AVAILABILITY FOR IRRIGATION IN MAIPO'S RIVER WATERSHED.**

PIA CAROLINA GARCIA PEÑA

Santiago, Chile
2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**CUANTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA Y SU EFECTO
SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL
RÍO MAIPO.**

Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero en
Recursos Naturales Renovables

PÍA CAROLINA GARCÍA PEÑA

PROFESOR GUIA

Sr. Rodrigo Fuster G.
Ingeniero Agrónomo, M.Sc.

CALIFICACIONES

6,5

PROFESORES EVALUADORES

Sr. Luis Morales S.
Físico, Dr.

6,5

Sr. Ricardo Marchant S.
Ingeniero Agrónomo, M.Sc.

6,0

Santiago, Chile.
2010

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
CONTEXTOS MUNDIAL	8
CONTEXTOS NACIONALES: VARIABILIDAD CLIMÁTICA	9
CONTEXTOS NACIONALES: DISPONIBILIDAD Y DEMANDAS	11
CONTEXTOS LOCALES: CUENCA DEL RÍO MAIPO	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
MATERIALES Y MÉTODOS	15
ÁREA DE ESTUDIO	15
MATERIALES	16
METODOLOGÍA	16
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	17
DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL DE AGUA PARA REGADÍO EN CONDICIONES NORMALES EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO	21
<i>Análisis de representatividad de estaciones pluviométricas</i>	21
<i>Determinación de estadística de precipitación sobre Zonas de Riego</i>	24
<i>Determinación de estadística de precipitación sobre Cuencas Laterales y Aportes Naturales</i>	27
<i>Determinación de estadística de caudal sobre Cuencas Laterales y Aportes Naturales</i>	29
<i>Incorporación de información base</i>	31
ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO, EN DOS ESCENARIOS DE RESTRICCIÓN HÍDRICA ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO Y AL DESARROLLO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO	32
<i>Construcción de los escenarios específicos</i>	32
EVALUACIÓN DE LA SATISFACCIÓN DE LAS DEMANDAS DE AGUA PARA REGADÍO EN CONDICIONES NORMALES DE LA CUENCA	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL DE AGUA PARA REGADÍO EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO	39
ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	45
DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO EN ESCENARIO OPERATIVIDAD DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA	51
IMPACTO VARIACIÓN DE SATISFACCIÓN DE DEMANDAS DE LOS CULTIVOS POR ZONAS DE RIEGO, ENTRE ESCENARIO BASE Y CAMBIO CLIMÁTICO	56
IMPACTO VARIACIÓN DE SATISFACCIÓN DE DEMANDAS DE LOS CULTIVOS POR ZONAS DE RIEGO, ENTRE ESCENARIO BASE E INCLUSIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO	60
CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	66
APÉNDICES	69
APÉNDICE I: DETERMINACIÓN DE ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN SOBRE LAS ZONAS DE RIEGO	69
APÉNDICE II: DETERMINACIÓN DE ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN SOBRE APORTES NATURALES Y CUENCAS LATERALES	74
APÉNDICE III: CAUDALES MEDIOS MENSUALES OBTENIDOS PARA APORTES NATURALES Y CUENCAS LATERALES DE RÉGIMEN PLUVIAL	81

ANEXOS.....	83
ANEXO I: DESCRIPCIÓN MODELO MAGIC	83

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETOS UTILIZADOS POR EL MODELO MAGIC-MAIPO...	18
CUADRO 2. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS PRESENTES EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO, CHILE.....	22
CUADRO 3. EJEMPLO PORCENTAJES DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SOBRE LAS ZONAS DE RIEGO DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO, CHILE.	25
CUADRO 4. EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CÁLCULO DE LAS PRECIPITACIONES.....	26
CUADRO 5. EJEMPLO PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (MM) ENTRE LOS AÑOS 1960 Y 2005 POR ZONA DE RIEGO.	26
CUADRO 6. EJEMPLO DE PORCENTAJES DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SOBRE CUENCAS APORTANTES DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO, CHILE. .	28
CUADRO 7. EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CÁLCULO DE LAS PRECIPITACIONES.....	29
CUADRO 8. EJEMPLO DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (MM) ENTRE LOS AÑOS 1960 Y 2005 POR SUB-CUENCA APORTANTE.....	29
CUADRO 9. EJEMPLO DE CAUDAL MEDIO MENSUAL (M ³ /S) POR CUENCA APORTANTE.....	31
CUADRO 10. MODIFICACIÓN DE DATOS DE ENTRADA DEL MODELO.....	32
CUADRO 11. MODIFICACIÓN DE DATOS DE ENTRADA EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	34
CUADRO 12. RELACIÓN ENTRE DEMANDA Y OFERTA EN PERIODO ESTIVAL PARA SITUACIÓN ACTUAL.....	40
CUADRO 13. FRACCIÓN DE SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA POR ZONA DE RIEGO EN SITUACIÓN ACTUAL.....	42
CUADRO 14. RELACIÓN DE DEMANDA DE AGUA SUPLIDA POR ZONA DE RIEGO EN PERIODO ESTIVAL PARA EL ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	46
CUADRO 15. FRACCIÓN DE SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	48
CUADRO 16. FRACCIÓN DE LA DEMANDA SUPLIDA POR ZONA DE RIEGO EN PERIODO ESTIVAL EN ESCENARIO DE INCLUSIÓN CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	51
CUADRO 17. FRACCIÓN DE SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA EN ESCENARIO DE INCLUSIÓN CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	54
CUADRO 18. COMPARACIÓN INDICADOR DE SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA MEDIA EN TEMPORADA ESTIVAL ENTRE SITUACIÓN ACTUAL Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	58
CUADRO 19. VARIACIÓN PORCENTAJE DE SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA ENTRE ESCENARIOS BASE Y CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	61
CUADRO 20. PORCENTAJES DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SOBRE LAS ZONAS DE RIEGO.....	70

CUADRO 21. COEFICIENTES POR ESTACIÓN PARA CÁLCULO DE PRECIPITACIONES POR ZONA DE RIEGO	72
CUADRO 22. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL POR ZONA DE RIEGO	73
CUADRO 23. PORCENTAJES DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SOBRE LOS APORTES NATURALES	75
CUADRO 24. PORCENTAJES DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SOBRE LAS CUENCAS LATERALES	76
CUADRO 25. COEFICIENTES POR ESTACIÓN PARA CÁLCULO DE PRECIPITACIONES POR APORTES NATURALES	78
CUADRO 26. COEFICIENTES POR ESTACIÓN PARA CÁLCULO DE PRECIPITACIONES POR CUENCAS LATERALES	78
CUADRO 27. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL POR APORTE NATURAL	79
CUADRO 28. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL POR CUENCA LATERAL	79
CUADRO 29. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PARA CUENCAS APORTANTES	81
CUADRO 30. OBJETOS MODELO MAGIC	84
CUADRO 31. ESTRUCTURA DE SALIDA DE DATOS MAGIC. BALANCES GLOBALES	90

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE LA VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESTACIONALMENTE (CONAMA, 2006A)	10
FIGURA 2. DISMINUCIÓN DEL ÁREA ANDINA CAPAZ DE ALMACENAR NIEVE, PRODUCTO DEL AUMENTO DE LA TEMPERATURA (CONAMA, 2006)	11
FIGURA 3. DEMANDA ACTUAL USO CONSUNTIVO Y NO CONSUNTIVO A NIVEL PAÍS (DGA, 2007C)	12
FIGURA 4. DEMANDA FUTURA USO CONSUNTIVO Y NO CONSUNTIVO A NIVEL PAÍS (DGA, 2007C)	12
FIGURA 5. ÁREA DE ESTUDIO CUENCA RÍO MAIPO (DGA, 2008)	15
FIGURA 6. DIAGRAMA DE SIMULACIÓN DEL MODELO MAGIC	20
FIGURA 7. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS (DGA, 2009)	23
FIGURA 8. POLÍGONOS DE THIESSEN GENERADOS CON LAS 22 ESTACIONES APORTANTES A LAS ZONAS DE RIEGO	24
FIGURA 9. ESQUEMA DE TRANSPOSICIÓN ZONA DE RIEGO V/S ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS (DGA, 2008)	25
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE CUENCAS LATERALES, APORTES NATURALES Y TIPO DE RÉGIMEN (DGA, 2009)	28
FIGURA 11. DIAGRAMA CONCEPTUAL MODELO MPL (DGA, 2005)	30
FIGURA 12. VISUALIZACIÓN MODELO MPL	31
FIGURA 13. VARIACIÓN EN RÉGIMEN DE CUENCAS APORTANTES Y LÍNEA DE NIEVE	35

FIGURA 14. ESQUEMA CONCEPTUAL DE LA INCLUSIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO.....	36
FIGURA 15. UBICACIÓN DE LOS NODOS PRESENTES EN LOS TRAMOS A ESTUDIAR. (DGA, 2008).....	37
FIGURA 16. COMPARACIÓN ENTRE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE V/S CAUDAL TOTAL DEMANDADO PARA LA ZONA DE RIEGO ZR-01	41
FIGURA 17. COMPARACIÓN ENTRE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE V/S CAUDAL TOTAL DEMANDADO PARA LA ZONA DE RIEGO ZR-39	41
FIGURA 18. PORCENTAJE DE DEMANDA SUPLIDA EN ÉPOCA ESTIVAL POR ZONA DE RIEGO EN SITUACIÓN ACTUAL.....	43
FIGURA 19. PORCENTAJE DE ZONAS DE RIEGO POR CATEGORÍA DEL INDICADOR DE SATISFACCIÓN	44
FIGURA 20. SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA POR ZONA DE RIEGO, EN SITUACIÓN ACTUAL.....	45
FIGURA 21. COMPARACIÓN ENTRE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE V/S CAUDAL TOTAL DEMANDADO PARA LA ZONA DE RIEGO ZR-14 EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	47
FIGURA 22. COMPARACIÓN ENTRE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE V/S CAUDAL TOTAL DEMANDADO PARA LA ZONA DE RIEGO ZR-39 EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	47
FIGURA 23. PORCENTAJE DE DEMANDA SUPLIDA EN ÉPOCA ESTIVAL POR ZONA DE RIEGO, EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	49
FIGURA 24. PORCENTAJE DE ZONAS DE RIEGO POR CATEGORÍA DEL INDICADOR DE SATISFACCIÓN, PARA SITUACIÓN CON CAMBIO CLIMÁTICO.....	49
FIGURA 25. SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA POR ZONA DE RIEGO, EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	50
FIGURA 26. COMPARACIÓN ENTRE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE V/S CAUDAL TOTAL DEMANDADO PARA LA ZONA DE RIEGO ZR-25 EN ESCENARIO DE INCLUSIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO	53
FIGURA 27. COMPARACIÓN ENTRE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE V/S CAUDAL TOTAL DEMANDADO PARA LA ZONA DE RIEGO ZR-39 EN ESCENARIO DE INCLUSIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO	53
FIGURA 28. PORCENTAJE DE DEMANDA SUPLIDA EN ÉPOCA ESTIVAL POR ZONA DE RIEGO, EN ESCENARIO DE NUEVAS CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	54
FIGURA 29. PORCENTAJE DE ZONAS DE RIEGO POR CATEGORÍA DEL INDICADOR DE SATISFACCIÓN, PARA SITUACIÓN CON INCLUSIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	55
FIGURA 30. SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA POR ZONA DE RIEGO ESCENARIO CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	55
FIGURA 31. COMPARACIÓN DE CAUDAL TOTAL DISPONIBLE ENTRE ESCENARIO BASE Y ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO	56
FIGURA 32. COMPARACIÓN CAUDAL TOTAL DEMANDADO ENTRE ESCENARIO BASE Y ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO.....	57
FIGURA 33. SATISFACCIÓN DEMANDA ENTRE ESCENARIO BASE Y ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO.....	57

FIGURA 34. VARIACIÓN DE LA SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA ENTRE ESCENARIO BASE Y ESCENARIO CAMBIO CLIMÁTICO	59
FIGURA 35. CAUDAL TOTAL DISPONIBLE ENTRE ESCENARIO BASE Y ESCENARIO CENTRAL HIDROELÉCTRICA	60
FIGURA 36. SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA ENTRE ESCENARIO BASE Y ESCENARIO CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	62

RESUMEN

Los recursos hídricos a nivel mundial son cada vez más escasos, afectando a todos los continentes y a más del 40% de la población del planeta. Dentro de los usos consuntivos, el sector agrícola es el que consume la mayor cantidad de agua dulce disponible a nivel mundial. En Chile y el mundo hay gran incertidumbre en relación a la disponibilidad futura del agua, como consecuencia de la variabilidad climática y el explosivo incremento de las poblaciones, lo que supone una intensificación de la competencia por este escaso recurso. Por este motivo es indispensable realizar una gestión eficiente de los recursos hídricos comprendiendo el funcionamiento hidrológico de las distintas cuencas y sus problemáticas.

La cuenca del río Maipo presenta la más alta concentración poblacional e industrial del país, la cual ha tenido un aumento explosivo en las últimas décadas, esto ha generado demandas cada vez mayores sobre los recursos hídricos por parte de los diversos sectores, especialmente en los sectores de riego y generación hidroeléctrica.

En el presente estudio se analizó la respuesta de la cuenca del Río Maipo frente al problema de la escasez del recurso hídrico, considerando los efectos de escenarios de cambio climático y de aumento de la demanda hidroeléctrica sobre la satisfacción de la demanda de riego. Esto se logró mediante la utilización de modelos de simulación hidrológicos operacionales que realizan un balance de agua a través de los elementos superficiales y subterráneos existentes en la cuenca. En este caso, el modelo MAGIC-Maipo fue especialmente diseñado y actualizado por la DGA, describiendo topológica y físicamente las principales características de la cuenca. Con este tipo de modelación es posible simular distintos escenarios para una misma cuenca variando los parámetros de entrada y de salida del modelo, logrando comparar la situación actual con las situaciones futuras.

Los resultados permiten reconocer para el escenario de cambio climático, una disminución de la satisfacción de las demandas de agua para regadío en el 76% de los sectores de riego, haciendo más restrictivas las condiciones en comparación con la situación actual. Sin embargo, no ocurre lo mismo para el escenario de inclusión de centrales hidroeléctricas, principalmente debido a que las captaciones de agua se realizan en la parte alta de la cuenca, no afectando a las zonas de riego.

Palabras Claves: Recursos hídricos, modelo MAGIC-Maipo, cambio climático, central hidroeléctrica, zonas de riego.

ABSTRACT

Maipo River's watershed has the highest concentration of population and industry in the country, within an explosive increase these last decades. This has generated larger water requirements in different areas, specially those concerning irrigation and hydroelectric supply.

The present study analyzes Maipo River's watershed answer to the water scant problem, considering the effects of climatic changes and the raise of water demand for irrigation. This is developed through the use of hydrologic simulation models, which are based on water balance procedures through deep and shallow elements of the watershed. In this case MAGIC-Maipo model was designed and updated by the DGA, describing physically and topographically the main features of the watershed. With this type of model, it is possible to simulate several scenarios for a watershed, changing the parameters of the model, comparing the current situation, with the ones in that may occur in the future.

The results showed for the climate change scenario, a 76% decrease in water demand satisfaction for irrigating, restricting the irrigating area conditions comparing with the current situation. However, for hydroelectric plants scenario it occurs a different situation, because they are installed in the high part of the watershed, and it doesn't affect irrigating areas.

Key Words: Water resources, MAGIC-Maipo model, climate change, hydroelectric power station, irrigation areas.

INTRODUCCIÓN

CONTEXTO MUNDIAL

Los recursos hídricos a nivel mundial son esenciales para toda forma de vida en la tierra. Son además un factor clave en la climatización y regulación de las condiciones ambientales que hacen posible la vida en nuestro planeta. El 97,5% del agua del planeta es salada encontrándose en océanos y mares, el 2,5% restante corresponde a agua dulce, mayoritariamente almacenada en glaciares y aguas subterráneas. Sólo el 0,007% se encuentra en condiciones de fácil acceso en ríos y lagos disponible para los distintos usos humanos, esa pequeña porción es un recurso fundamental para el desarrollo de cualquier civilización. (UNESCO, 2006).

La escasez de agua afecta a todos los continentes y a más del 40% de la población de nuestro planeta. Se estima que para el año 2025, 1.800 millones de personas vivirán en países o regiones con una drástica falta de agua, y dos tercios de la población mundial podrían encontrarse en franca situación de escasez del recurso (FAO, 2007).

Según el primer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo (UNESCO, 2003), el sector agrícola es el que absorbe la mayor cantidad de agua dulce disponible a nivel mundial. Más de las dos terceras partes del agua extraída de los ríos, lagos y acuíferos del mundo se utilizan para el riego, incluso en algunos países en desarrollo, el consumo de agua para riego puede llegar hasta un 95%.

A medida que las poblaciones se expandan y las economías crezcan, la competencia por este escaso recurso se intensificará, y con ella, también los conflictos entre los distintos usuarios del agua. Es por este motivo que se vuelve indispensable realizar una gestión adecuada y eficiente de los recursos hídricos en cada país, y para ello es necesario conocer y comprender el funcionamiento hidrológico de las distintas cuencas, para así poder tomar las mejores decisiones en el quehacer de las naciones respecto del cuidado y aprovechamiento de sus propios recursos (FAO, 2007).

CONTEXTO NACIONAL: VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Existe una gran incertidumbre en relación a la disponibilidad futura del agua, como consecuencia de la variabilidad climática. En Chile y el mundo se están realizando numerosos estudios para tratar de predecir cuales serán los efectos que causará el cambio climático para las diferentes zonas climáticas del mundo.

De acuerdo a los pronósticos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), los cambios observados y proyectados de la temperatura superficial de la atmósfera y de los patrones de precipitación, generarán consecuencias de diversa índole, siendo más agudos en las zonas vulnerables. En este sentido, Chile es considerado un territorio social, económica y ambientalmente vulnerable al cambio climático, ya que cumple con la tipificación de vulnerabilidad contemplada en el artículo 4.8 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, de poseer zonas costeras bajas; zonas áridas y semiáridas; áreas susceptibles a la deforestación o erosión, a los desastres naturales, a la sequía y la desertificación; áreas urbanas altamente pobladas y contaminadas, y ecosistemas frágiles. Por ello, gran parte de las consecuencias previstas por el IPCC podrían ocurrir o estar ya sucediendo en el país (CONAMA, 2006b).

Según los pronósticos del IPCC, los rendimientos agrícolas disminuirán en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales, pero también en las zonas templadas si la subida de la temperatura es de más de unos grados, se prevé también, un proceso de desertificación de zonas continentales interiores, impactos que podrían provocar, como mínimo, perturbaciones en el aprovechamiento de la tierra y el suministro de alimentos. (IPCC, 2007).

De acuerdo con el estudio de análisis de vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático en Chile de los sectores agricultura, recursos hídricos y silvicultura (CONAMA, 2008), la actual y compleja situación de los recursos hídricos se agudizaría, siendo más significativo aún en las cuencas donde existe una mayor presión sobre el recurso hídrico.

Con respecto a la situación de las precipitaciones, éstas exhibirían una disminución que podría llegar a un 20-25% del total anual en la zona central del país (CONAMA, 2008) lo que puede hacer suponer un aumento de la aridez en la Región Metropolitana. Además, a consecuencia de la menor pluviometría las cuencas navales podrían registrar también una disminución de la escorrentía (DGA, 2008).

Por otra parte, según el estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI (CONAMA, 2006a), hace notar que en la estación invernal todo el territorio nacional comprendido entre 30 y 40°S verá disminuidas sus precipitaciones. Tales disminuciones pluviométricas se suman a la elevación de la isoterma cero para ofrecer un cuadro particularmente preocupante en las regiones Centro y Centro Sur. Como es posible de visualizar en la figura 1, donde se señala en color marrón los sectores del territorio nacional en que las precipitaciones disminuyen en un 15% o más respecto del clima actual, el color verde representa aquellas áreas donde la precipitación aumenta en igual porcentaje. Es importante mencionar que esta es una representación simplificada de los resultados del estudio y para las estaciones extremas del año.

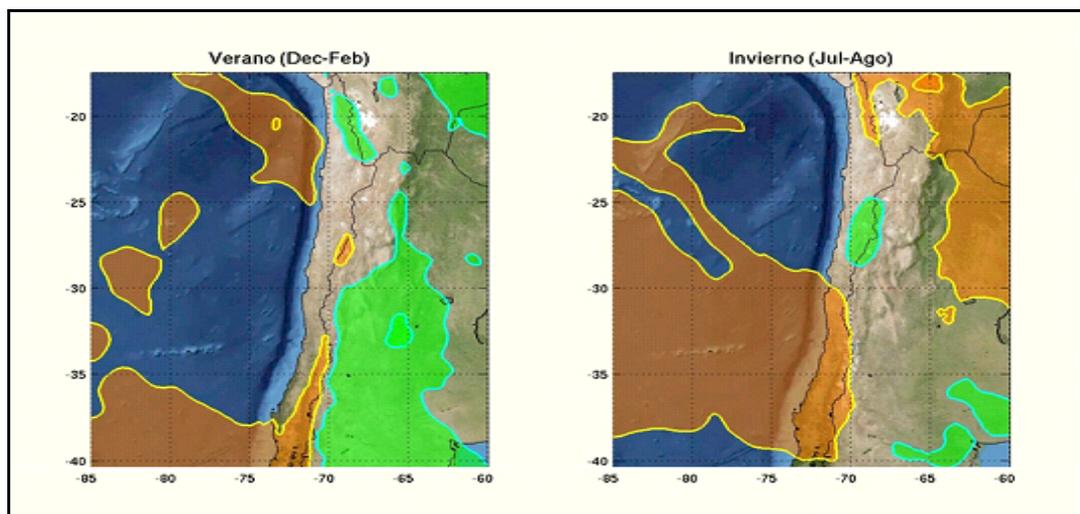


Figura 1. Esquema de la Variación de la Precipitación Estacionalmente (CONAMA, 2006a).

Por otro lado, las temperaturas presentarían un alza entre 2 a 4 °C, en las latitudes medias, lo cuál podría modificar variables secundarias relevantes para el desarrollo de la agricultura, como las heladas, las horas de frío, la ocurrencia de días cálidos. Asimismo, inclusive en el evento de que no exista modificación en el régimen de precipitación, como consecuencia del aumento de la temperatura del aire, se produciría el ascenso de la línea de nieves y un derretimiento más acelerado de éstas, con el consiguiente aumento de los caudales en el período invierno-primavera y una disminución en verano-otoño, justamente cuando la escasez es más aguda (CONAMA, 2006a).

En la figura 2, se puede apreciar la reducción del área andina capaz de almacenar nieve, proyectada por el estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, donde la línea de color azul representa la simulación del clima actual y la de color rojo el escenario futuro para la zona central y centro-sur a lo largo de los meses del año.

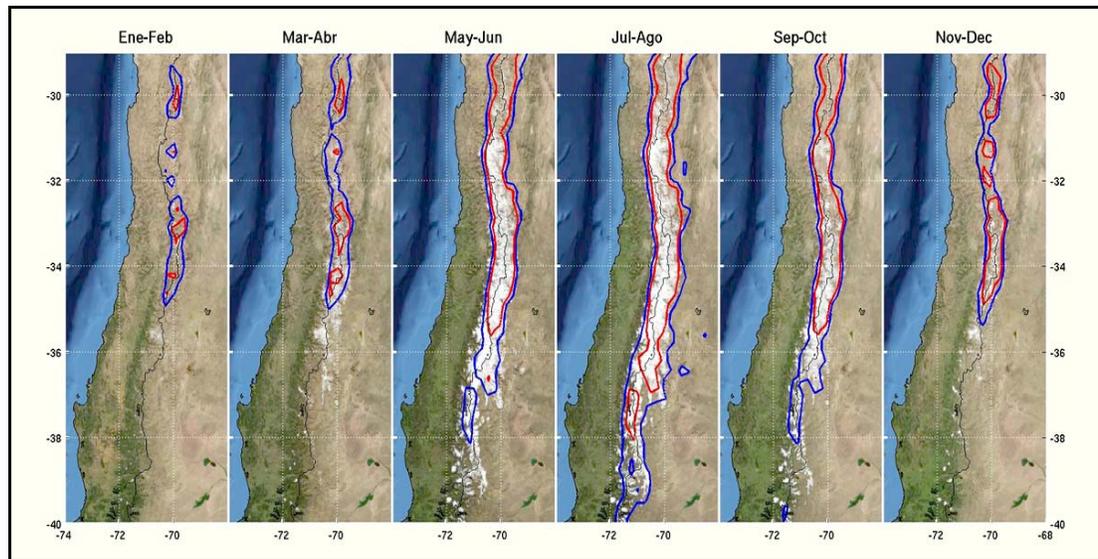


Figura 2. Disminución del área andina capaz de almacenar nieve, producto del aumento de la temperatura (CONAMA, 2006).

El cuarto reporte del IPCC señala que existe una clara evidencia de que los cambios en el clima ya están ocurriendo, por ejemplo los graves episodios recientes de tormentas, inundaciones y sequías parecen demostrar que los modelos informáticos que predicen "episodios climáticos extremos", están en lo cierto y que entre otros efectos se producirá un aumento tanto en la frecuencia, como en la intensidad de estos eventos extremos, lo que se traducirá en más y peores desastres socio-naturales (IPCC, 2007). Los extremos meteorológicos como sequías y lluvias intensas han estado presentes desde siempre en la historia de Chile, causando graves daños en la agricultura, actividad de gran importancia para a zona central especialmente (Aldunce y González, 2009).

CONTEXTO NACIONAL: DISPONIBILIDAD Y DEMANDAS

En cuanto a la disponibilidad, Chile es un país con abundancia de recursos hídricos superficiales, los cuales se encuentran distribuidos irregularmente encontrando zonas de gran abundancia en la zona sur y otras de escasísima disponibilidad en las regiones del norte (Matus, 2004).

Con respecto a las demandas a nivel nacional, se estima que el uso del agua en el país alcanza un valor aproximado a los 2000 m³/s de caudal continuo, de los cuales el 67,8 % corresponde a usos no consuntivos, mayoritariamente del área energética, mientras que el 32,2 % corresponde a usos consuntivos. Entre los usos consuntivos el riego presenta el

78 % con un caudal medio de 546 m³/s. El uso doméstico equivale al 6 % de los usos consuntivos, con unos 35 m³/s, y es utilizado para dar abastecimiento al 98 % de la población urbana y aproximadamente al 80 % de la población rural concentrada. Los usos mineros e industriales representan el 16 % del uso consuntivo total. Lo anterior puede verse reflejado en la Figura 3 (DGA, 2007c).

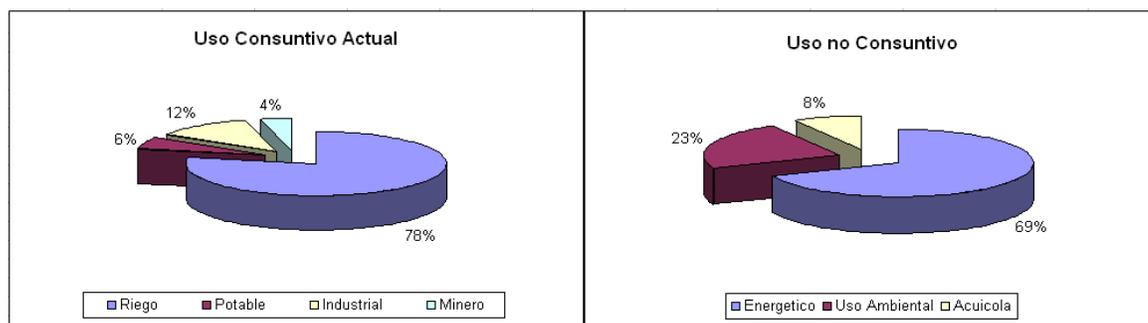


Figura 3. Demanda Actual Uso Consuntivo y No Consuntivo a nivel País (DGA, 2007c).

Según la Política Nacional de Recursos hídricos, Chile ha experimentado un sostenido crecimiento económico y desarrollo social, el cual ha generado demandas cada vez mayores sobre los recursos hídricos por parte de los diversos sectores. Sin ir más lejos entre las regiones I y Metropolitana los requerimientos superan ampliamente el caudal disponible, situación que se agrava dado que en la zona central habita más del 50% de la población de Chile (DGA, 1999).

La DGA ha efectuado una proyección de las demandas para un período de 25 años, de acuerdo a esa estimación, los requerimientos para los usos mineros e industriales aproximadamente se duplicarán. El uso doméstico se mantendrá constante, mientras que las demandas para los usos agrícola disminuirían. En el caso de los usos hidroeléctricos aumentarán restando recursos para los usos ambientales y acuícolas. Estas proyecciones se aprecian en la figura 4 (DGA 2007c).

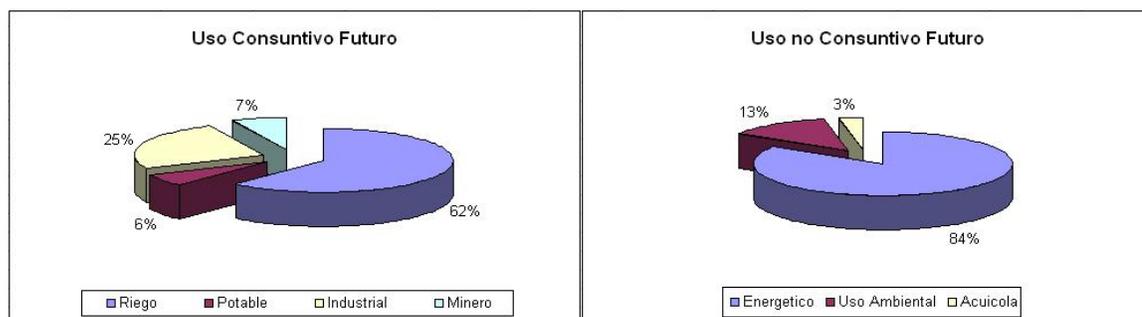


Figura 4. Demanda Futura Uso Consuntivo y No Consuntivo a nivel País (DGA, 2007c).

CONTEXTO LOCAL: CUENCA DEL RÍO MAIPO

La cuenca del río Maipo presenta un clima típicamente mediterráneo, de allí la importancia del recurso superficial en su desarrollo agrícola, actividad que se concentra en las zonas de riego (ZR), las cuales abarcan una superficie aproximada de 128.500 hectáreas (INE, 2007). Estas zonas son abastecidas en un 90% por el río Maipo, el cual recorre alrededor de 250 Km. desde su nacimiento hasta que desemboca en el océano Pacífico (DGA, 2003).

Esta cuenca, presenta la más alta concentración poblacional e industrial del país, la cual ha ido en un aumento durante las últimas décadas, esto ha generado demandas cada vez mayores sobre los recursos hídricos por parte de los diversos sectores, especialmente en los sectores de riego y generación hidroeléctrica (DGA, 2005). A esta presión sobre los recursos hídricos se le suma un proceso de cambio climático a nivel global que sugiere que las condiciones hidrológicas van a sufrir modificaciones importantes (CONAMA, 2008).

Así es como las obras hidroeléctricas, son un elemento de estrés dentro del sistema, ya que, como se mencionó anteriormente, este sector productivo toma cada vez más fuerza en la cuenca del río Maipo, provocando que la demanda de agua para este fin, esté en aumento. Es por esta razón, que es importante considerar cuáles serían los efectos que pueda tener la inclusión de un nuevo proyecto hidroeléctrico en la disponibilidad del recurso.

El presente estudio busca analizar la respuesta de la cuenca del Río Maipo frente al problema de la escasez del recurso hídrico, considerando los efectos de escenarios de cambio climático y de aumento de la demanda hidroeléctrica sobre la satisfacción de la demanda de riego.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Cuantificar los efectos de escenarios de escasez sobre la disponibilidad del recurso hídrico para la demanda de agua de riego en la cuenca del Río Maipo

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Determinar la disponibilidad actual de agua para regadío en condiciones normales en la cuenca del Río Maipo.
- 2.- Estimar la disponibilidad de agua de riego, en escenarios de restricción hídrica asociados al Cambio Climático y al desarrollo de un proyecto hidroeléctrico.
- 3.- Evaluar la satisfacción de las demandas de agua para regadío en los diferentes escenarios de escasez planteados.

MATERIALES

- Software de Sistema de Información Geográfica, ArcView 3.2, ArcGis 10.
- Datos mensuales de 54 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Maipo, series estadísticas de 55 años de registro desde 1960 a 2005.
- Datos mensuales de 19 estaciones fluviométricas ubicadas en la cuenca del río Maipo.
- Modelo Analítico, Genérico e Integrado de Cuenca MAGIC – MAIPO (DGA) y base de datos DGA

METODOLOGÍA

Para conocer el comportamiento hidrológico general de la cuenca, existen modelos de simulación hidrológicos operacionales, los cuales están basados en procedimientos que realizan un balance de agua a través de los elementos superficiales y subterráneos que componen el sistema hídrico simulado.

Para modelar el comportamiento del agua en la cuenca se utilizó el modelo MAGIC-Maipo, desarrollado por la DGA, actualizado y redefinido en términos topológicos y de las principales características físicas de la cuenca, por el “Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca de Río Maipo. Etapa II. Actualización del modelo de operación del sistema y Formulación del Plan. Addendum Modelo MAGIC Maipo”.

Con este tipo de modelación es posible simular distintos escenarios para una misma cuenca variando los parámetros de entrada y de salida del modelo, lo que permite determinar el comportamiento del sistema bajo las condiciones que el operador requiera estudiar, en este caso para generar los escenarios de variabilidad climática y de operación de nuevas centrales hidroeléctricas.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo MAGIC (Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas) es analítico por la utilización de fórmulas matemáticas para relacionar las distintas variables y elementos involucradas en la simulación, es genérico, porque puede ser aplicado a cualquier cuenca siempre que se disponga de la información necesaria, y es integrado porque abarca tanto la parte superficial como subterránea de la cuenca analizada. De esta manera se cuenta con un entorno de simulación hidrológica, que contempla una gran variedad de usos y manejos de los elementos constituyentes del sistema.

MAGIC está diseñado para trabajar con objetos los cuales pueden comunicarse, intercambiar información, y colaborar unos con otros, lo que permite adecuarse a las características definidas de cada cuenca hidrográfica. En este caso para realizar la simulación del balance hídrico en la cuenca, MAGIC utiliza 14 objetos que forman parte del sistema hídrico de una cuenca y que describen el entorno de simulación¹. A estos objetos se le asocian 56 tablas que definen los parámetros de cada uno. Estos objetos se describen en el cuadro 1.

¹Véase Anexo 1, donde se hace una mayor descripción de los objetos utilizados por el modelo, de las tablas asociadas a cada uno ellos y del funcionamiento interno del modelo, sin embargo para una explicación acabada debe ser consultado el manual de referencia técnica de MAGIC, DGA 2005.

Cuadro 1. Descripción de los Objetos utilizados por el modelo MAGIC-Maipo.

N°	Objeto	Descripción
1	Acuíferos	Embalses subterráneos, vinculados a distintos objetos tanto para recibir como para bombear caudal
2	Aporte Natural	Estadística de caudales medios mensuales
3	Canales	Tramos de canales, utilizados para distribuir agua a las zonas de riego
4	Centrales Hidroeléctricas	Centrales de pasada que demandan un caudal mensual en un punto para luego devolverlo en otro punto dentro de la cuenca
5	Cuencas Laterales	Aportes intermedios al sistema, también correspondiente a caudales medios mensuales
6	Captación Puntual	Zonas de demanda de caudal mensual, sujeto a la disponibilidad en el punto de captación
7	Descarga Puntual	Aporte mensual de caudal desde cualquier objeto aportante en cualquier punto del sistema.
8	Embalses	Obra de regulación de caudal con entradas y salidas controladas
9	Nodos	Elemento de conexión entre objetos, asociado a los caudales mensuales de ellos
10	Pozos	Demanda de caudal a los acuíferos y lo deriva al sistema superficial
11	Caudal Ecológico	Caudal mínimo permanente establecido para cada tramo de río
12	Ríos y Tramos de Ríos	Conductor de caudal, vinculado al acuífero subyacente
13	Zonas de Riego (ZR)	Demanda consuntiva de agua dependiente del tipo de cultivo, eficiencia de riego, necesidades netas mensuales, etc. Vinculada a pozos, tramos de río y canales con varias entradas y salidas.
14	Sectores Urbanos	Consumo de agua potable

Fuente: Elaboración propia en base a información recopilada del manual de referencia técnica del modelo (DGA, 2005b).

Para la cuenca del río Maipo, el Modelo MAGIC está representado por una topología base compuesta por 20 acuíferos, 20 aportes naturales, 117 elementos de canal, 7 centrales hidroeléctricas, 45 cuencas laterales, 19 captaciones puntuales, 23 descargas puntuales, 5 embalses, 156 nodos, 119 pozos, 152 tramos de ríos, 17 caudales ecológicos, 46 zonas de riego y 5 sectores urbanos.

La simulación hidrológica de la cuenca del río Maipo al interior del modelo se lleva a cabo desde aguas arriba hacia aguas abajo, iterando en ciclos mensuales dentro de los cuales se consideran todas las interacciones entre los distintos objetos. En cada iteración, el caudal total afluente a cada nodo se reparte de acuerdo a la asignación preestablecida para cada objeto. En la figura 6 se muestra un diagrama del funcionamiento interno del modelo.

De esta forma, cada objeto utilizado en la topología del modelo es capaz de representar los distintos tipos de demandas o flujos existentes, cuyos resultados corresponden a los balances hídricos generales de la cuenca tanto a nivel de nodos, como a nivel de acuíferos, embalses y sectores de riego.

Para efectos de este trabajo resulta de mayor importancia el funcionamiento de las zonas o sectores de riego, las cuales representan a un conjunto de cultivos con necesidades netas mensuales específicas a cada uno, abastecidos por determinados métodos de riego, las cuales están vinculadas a objetos tanto a nivel superficial como subterráneos desde donde reciben distintos tipos de flujos afluentes.

A nivel superficial, la primera fuente de abastecimiento la constituyen las precipitaciones, tanto en el área cultivada como no cultivada. Las otras fuentes superficiales son los canales matrices y/o derivados que transportan el agua destinada al riego junto con los derrames y/o excesos provenientes de otras zonas de riego existentes aguas arriba. Por su parte a nivel subterráneo, cada zona de riego está ligada a un acuífero, a través de los pozos y sus caudales de bombeo desde el acuífero hacia la zona de riego y de las percolaciones desde esta última hacia el acuífero.

MAGIC, en cada zona de riego determina primero el caudal total afluente en forma superficial y la fracción de la demanda total que es suplida por dicho caudal afluente. Posteriormente calcula el caudal bombeado desde el sistema subterráneo y la fracción de dicho caudal que evapotranspira dentro de la misma, y la diferencia se considera como caudal sobrante que continua escurriendo hacia aguas abajo. Con el aporte del sistema subterráneo se calcula la demanda finalmente suplida, la seguridad de riego, el caudal de retorno superficial hacia otras zonas y el caudal de percolación hacia el sistema subterráneo. Finalmente, calcula, la fracción de las precipitaciones caídas sobre la zona de riego que se transforma en escorrentía directa hacia el sistema superficial y la fracción de la misma que se transforma en percolación profunda hacia la napa subterránea. Así es como se obtiene el caudal total disponible considerando todos los afluentes, reusos y pérdidas del sistema.

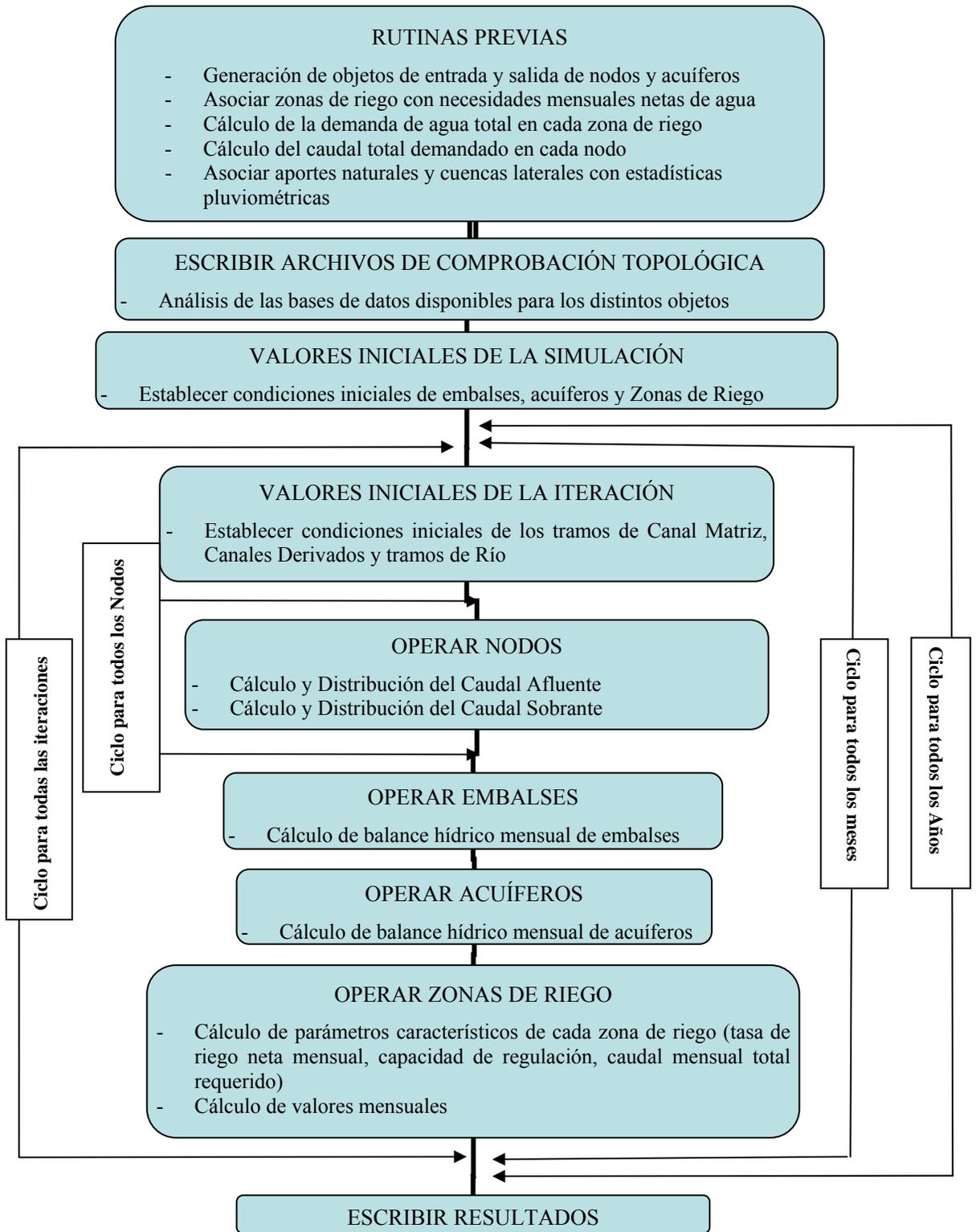


Figura 6. Diagrama de Simulación del Modelo MAGIC.

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL DE AGUA PARA REGADÍO EN CONDICIONES NORMALES EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

La simulación con el modelo MAGIC-Maipo, se realizó utilizando como información de entrada, las bases de datos de los parámetros que describen a cada uno de los objetos del sistema, extraídos del Addendum MAGIC Maipo (DGA, 2007), donde se reestablece y mejora el modelo en términos topológicos y se actualizan los parámetros físicos propios de la cuenca.

La información hidrológica, tanto pluviométrica como fluviométrica media mensual, se obtiene del Estudio “Caracterización de la Precipitación Mensual y de los Aportes Naturales para el Modelo de Operación Superficial del Plan Director de la Cuenca del Río Maipo” (Montt, 2006), adaptando la estructura de las bases de datos del modelo, con el fin de ampliar la red de estaciones pluviométricas (de 14 a 54 estaciones dentro de la cuenca del Maipo), otorgando una mayor cobertura espacial especialmente en la parte alta de la cuenca.

Para la construcción de la base de datos, fue necesario en primera instancia analizar las estaciones pluviométricas existentes para la región y definir su localización espacial dentro del área de estudio, con el fin de seleccionar aquellas con representatividad tanto espacial como en calidad y cantidad de datos registrados de precipitaciones. En segundo lugar se determinó la estadística de precipitación sobre cada zona de riego, cuenca lateral y aporte natural. El periodo de tiempo que comprenden las series es de 55 años, desde el año 1950 al 2005.

Análisis de representatividad de estaciones pluviométricas.

Primero se realizó una revisión del listado de las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio de Montt (2006), el cual caracteriza, rellena y simula las precipitaciones para toda la cuenca, utilizando las series de estadísticas hidrológicas de 54 estaciones presentes en la cuenca y sus alrededores. En el citado estudio, se clasificaron las estaciones en tres tipos según la extensión y periodo de registro, en estaciones tipo 1 aquellas con más de 40 años completos de datos, tipo 2 con 10 o más años y tipo 3 aquellas con menos de 10 años de mediciones.

Las estaciones se ubican en la Planicie Costera, la Cordillera de la Costa, el Valle Central y la Cordillera de los Andes hasta los 2500 metros de altitud, representando la variabilidad climática y de precipitaciones de la cuenca del río Maipo (Montt, 2006). La lista completa

de las estaciones se muestra en el Cuadro 2. Por su parte, la localización geográfica de ellas se presenta en la figura 7.

Cuadro 2. Estaciones Pluviométricas presentes en la cuenca del río Maipo, Chile.

Nº	Estaciones Pluviométricas	Nº	Estaciones Pluviométricas
1	Angostura en Valdivia de Paine	27	Mallarauco
2	Antupirén	28	Melipilla
4	Caleu	29	Peñaflor
5	Campus San Joaquín U.C.	30	Pirque
6	Carmen de las Rosas	33	Ramón Quebrada
7	Cerrillos de Leyda	34	Rincón de Los Valles
8	Cerro Calán	35	Río Mapocho en Los Almendros
9	El Vergel	36	Río Mapocho Rinconada de Maipú
10	El Yeso Embalse	37	Rungue Embalse
11	Estero Puangue en Ruta 78	38	San Alfonso
12	Fundo Marruecos	40	San Gabriel
13	Huechún Andina	41	San José Retén
14	Huenchún Embalse	43	Terraza Oficinas Centrales DGA
15	Ibacache Alto	44	Til-Til
16	La Dehesa	46	Batuco Retén
17	La Ermita Bocatoma Central	47	La Florida
18	La Obra Recinto Emos	48	Los Cerrillos
19	Laguna Aculeo	49	Queltehues DMC
20	Las Bateas Fundo	50	San Jose de Maipo DMC
21	Las Dos Puertas Fundo	51	Santiago Quinta Normal
22	Las Melosas	52	Santo Domingo
24	Los Guindos	53	Tobalaba
25	Los Panguiles	54	Valle Hermoso
26	Maitenes Bocatoma		

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de estadística de precipitación sobre Zonas de Riego

A través del álgebra de mapas se obtiene el porcentaje de la superficie que abarca cada estación sobre las zonas de riego, posibilitando el descarte de 19 estaciones, las cuales no afectan a las zonas de riego debido a su lejanía, ya sea por encontrarse en la parte alta de la cuenca o en las periferias. Con las 22 estaciones aportantes a las zonas de riego se generaron nuevamente los polígonos (Figura 8), esta intersección arrojó una tabla que contiene los porcentajes de influencia o factor de ponderación de la estación sobre la zona de riego.

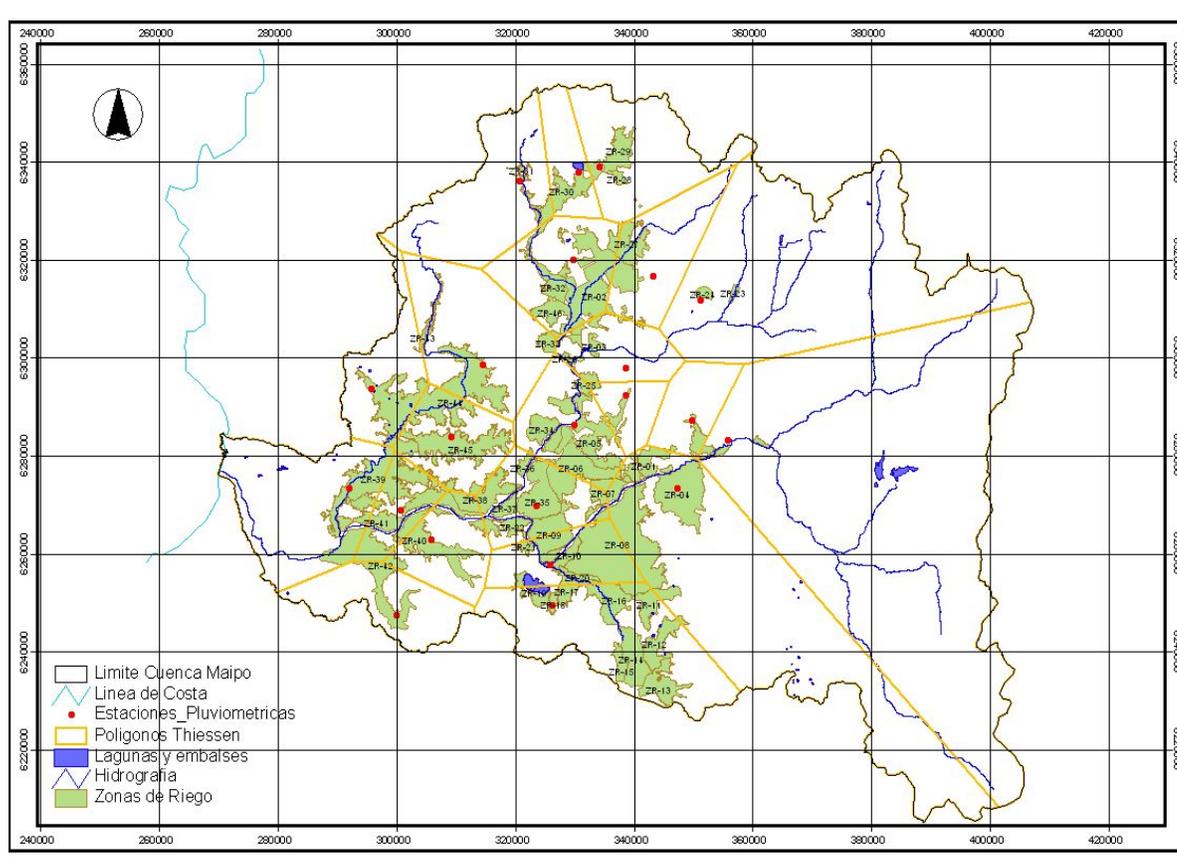


Figura 8. Polígonos de Thiessen generados con las 22 estaciones aportantes a las zonas de riego.

Finalmente de las 46 zonas de riego, 16 son representadas por una sola estación, 17 por 2 estaciones, 10 por 3 estaciones y 3 zonas de riego por 4 estaciones. Un ejemplo de ello se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Ejemplo porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas sobre las zonas de riego de la cuenca del río Maipo, Chile.

Cod_ZR	Estaciones Pluviométricas utilizadas para el análisis																			Total			
	P01	P06	P09	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P18	P19	P24	P25	P27	P28	P30	P44	P46	P47		P48	P51	P54
ZR-03																					100%	100%	
ZR-11													68%							32%			100%
ZR-25						67%								12%							22%		100%
ZR-39			7%		40%												9%	43%					100%

Fuente: Elaboración Propia

Así, con los porcentajes de influencia de cada estación sobre las zonas de riego, se utilizó la técnica de transposición de precipitaciones, la que en su forma más tradicional establece que la precipitación de un sector de riego cualquiera, puede ligarse a la estadística de precipitaciones de la o las estación(es) pluviométrica(s) incidente(s) en ella.

En la figura 9 se presenta un ejemplo donde tres estaciones influyen sobre una misma zona de riego y la lógica con que se pondera (DGA, 2008).

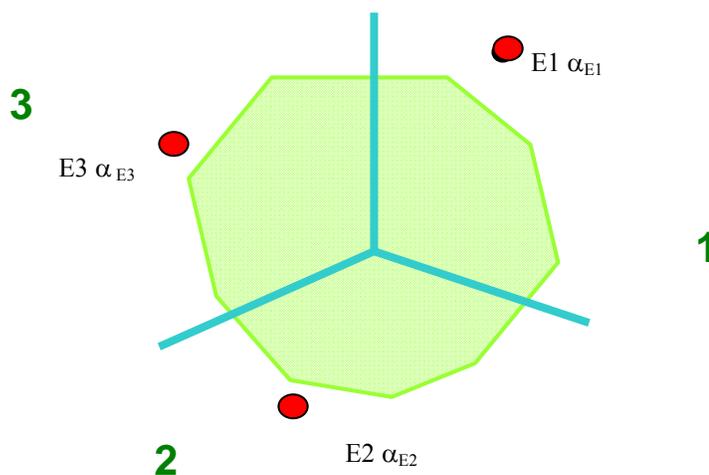


Figura 9. Esquema de transposición zona de riego v/s estaciones pluviométricas (DGA, 2008).

Donde:

E: Estación pluviométrica influyente

α : Porcentaje de influencia de cada estación

Donde la precipitación en la zona de riego (P_i) está representada por el efecto combinado de las estaciones que influyen en ella, correspondiendo a la estadística de precipitación de la o las estaciones influyentes (P_E), multiplicada por el coeficiente de cada estación, el cual a su

vez está dado por el porcentaje de influencia (α) multiplicado por la razón entre la precipitación media del lugar (P_{ZR}) y la precipitación media de la estación (P_E).

$$P_i = \sum \text{Coef} * P_E$$

$$\text{Con Coef} = \alpha * (P_{ZR} / P_E)$$

A continuación, se presenta un ejemplo de esto para el caso de 4 zonas de riego escogidas para mostrar las diferentes posibilidades. En el Apéndice I, se muestran las tablas completas resultado de este procedimiento.

Cuadro 4. Ejemplo de estimación del coeficiente de cálculo de las precipitaciones.

Zona de Riego	Est # 1				Est # 2			Est # 3			Est # 4			
	Cod_ZR	P_{ZR}	P_{E1}	% $_{E1}$	Coef	P_{E2}	% $_{E2}$	Coef	P_{E3}	% $_{E3}$	Coef	P_{E4}	% $_{E4}$	Coef
ZR-03	290	306	100	0,95										
ZR-11	470	366	67,9	0,87	449	32,1	0,33							
ZR-25	300	254	66,8	0,79	306	21,7	0,21	369	11,5	0,09				
ZR-39	400	281	43,1	0,61	244	40,4	0,66	308	9,1	0,12	452	7,3	0,06	

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, el coeficiente calculado para cada estación, es multiplicado por la estadística de precipitación media mensual de la o las estaciones. Ejemplo zona de riego 11, es el resultado de la sumatoria de coeficiente 0,87 multiplicado por la estadística de precipitación media mensual de la estación Est #1 (para este caso Los Panguiles), sumado al coeficiente 0,33 multiplicado por la estadística de precipitación media mensual de la estación Est # 2 (para este caso La Florida).

En el cuadro 5 se presenta para las mismas zonas utilizadas para los ejemplos anteriores, el resultado final de este procedimiento, el cual corresponde a la precipitación media mensual por zona de riego. Que se presenta en extenso para todas las zonas de riego en el apéndice 1.

Cuadro 5. Ejemplo precipitación media mensual (mm) entre los años 1960 y 2005 por zona de riego.

Cod_ZR	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
ZR-03	16,2	46,6	73,4	67,3	44,9	22,3	9,6	7,7	2,0	0,5	0,6	4,0	295,2
ZR-11	17,4	72,5	107,3	97,4	65,8	35,8	12,6	9,9	2,4	1,1	1,0	4,7	428,0
ZR-25	14,6	42,0	77,6	69,8	41,7	20,9	9,4	6,5	0,6	0,3	0,2	4,2	287,6
ZR-39	21,9	73,2	106,2	109,8	59,7	29,2	14,4	9,7	2,5	0,6	1,5	5,3	405,1

Fuente: Elaboración Propia

Esta estadística promedio mensual generada para cada zona de riego, es utilizada por el modelo como un insumo básico para calcular la precipitación efectiva caída sobre cada sector de riego.

Determinación de estadística de precipitación sobre Cuencas Laterales y Aportes Naturales

Se utilizó el mismo método aplicado para obtener la precipitación media por sector de riego, para cada una de las 45 cuencas laterales (CL) y los 20 aportes naturales (AN) que componen el sistema. Los aportes de estas cuencas se utilizan como entrada para los modelos de precipitación-escorrentía y nivo-pluvial inserto en el mecanismo interno de MAGIC, los cuales utilizan las estadísticas de precipitación además de otros parámetros (humedad del suelo, evapotranspiración potencial, radiación solar, etc.) para generar los caudales medios mensuales de aquellas CL y AN que no tienen un control fluviométrico (Estación fluviométrica). De estas 65 cuencas aportantes 19 tienen un régimen nivo-pluvial y las restantes corresponden a cuencas pluviales, lo cual puede verse en la Figura 10.

Para este caso, al igual que en el anterior, se trabaja sólo con las 41 estaciones con las que fueron generados los polígonos de Thiessen y se intersectan con los objetos denominados CL y AN. Con esto se obtuvo la representatividad de las estaciones pluviométricas sobre las cuencas aportantes y finalmente la estadística de precipitación media mensual para cada una de ellas.

Cabe destacar que de las 65 cuencas aportantes analizadas, 19 son representadas por una estación, 29 por 2 estaciones, 13 por 3 estaciones, 9 cuencas por 4 estaciones y sólo una (CL 01) queda representada por 7 estaciones.

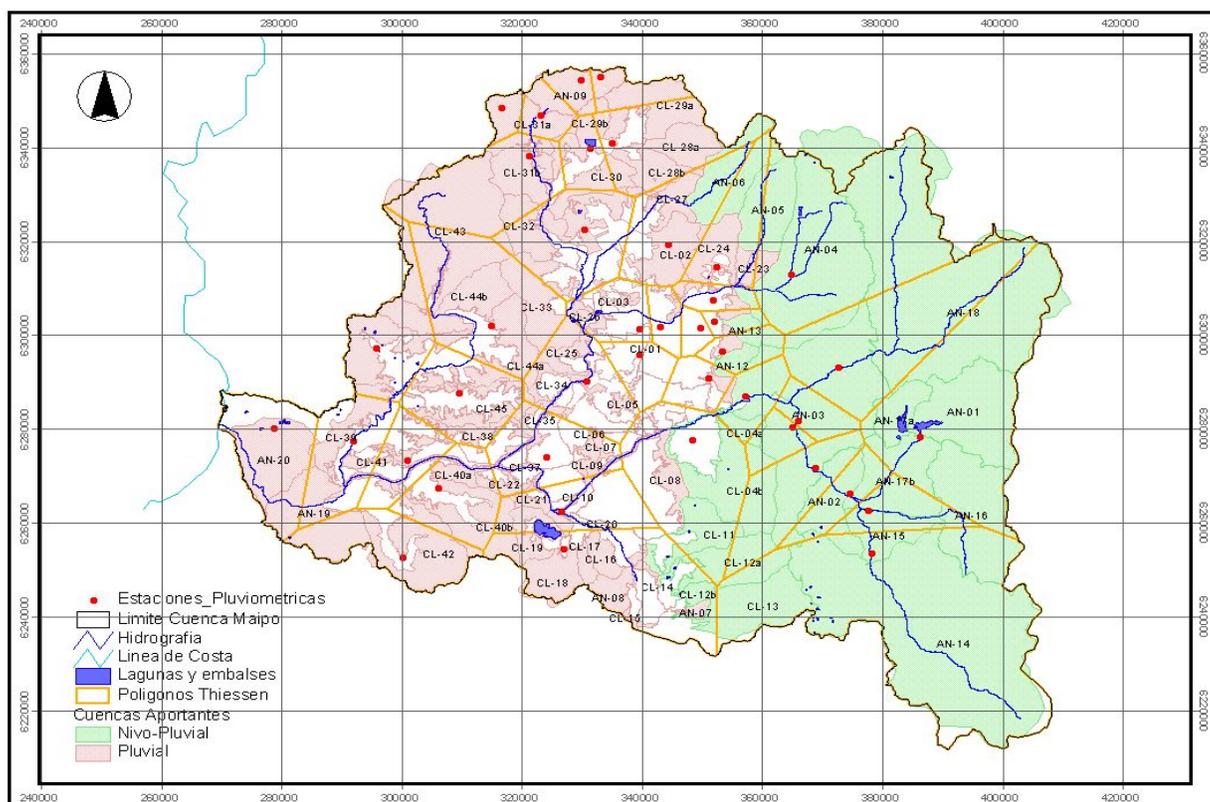


Figura 10. Distribución Geográfica de Cuencas Laterales, Aportes Naturales y Tipo de Régimen

En el cuadro 6 se presenta un ejemplo de los porcentajes de influencia de las estaciones sobre aportes naturales y cuencas laterales y en el cuadro 7 los coeficientes que permiten calcular la precipitación para cada una. Los cuales son presentados en extenso en el Apéndice II.

Cuadro 6. Ejemplo de porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas sobre cuencas aportantes de la cuenca del río Maipo, Chile.

Cuenca Aportante	%	Est # 1	%	Est # 2	%	Est # 3	%	Est # 4
AN-7	100	P19						
AN-20	90	P07	10	P38				
AN-9	46	P20	24	P32	30	P33		
AN-19	12	P06	25	P10	24	P21	39	P24
CL-10	100	P01						
CL-17	35	P01	65	P19				
CL-33	19	P03	16	P11	65	P25		
CL-29b	25	P12	45	P13	16	P20	14	P32

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 7. Ejemplo de estimación del coeficiente de cálculo de las precipitaciones.

Cuenca Aportante		Est # 1			Est # 2			Est # 3			Est # 4		
Codigo	Pp (mm)	P _{E1}	α_{E1}	Coef	P _{E2}	α_{E2}	Coef	P _{E3}	α_{E3}	Coef	P _{E4}	α_{E4}	Coef
AN-7	650	598	100	1,08									
AN-20	420	420	90	0,9	405	10	0,14						
AN-9	320	331	46	0,44	306	24	0,25	376	30	0,25			
AN-19	420	420	12	0,12	292	25	0,36	495	24	0,20	542	39	0,30
CL-10	460	400	100	1,15									
CL-17	500	400	35	0,44	598	65	0,54						
CL-33	310	281	19	0,21	244	11	0,21	366	65	0,55			
CL-29b	290	254	25	0,28	263	45	0,5	331	16	0,14	306	14	0,13

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente se obtienen las precipitaciones medias mensuales de cada cuenca aportante cuyo ejemplo se presenta en el cuadro 8. Las precipitaciones medias mensuales se utilizan para calcular el caudal aportado por cada sub cuenca al sistema.

Cuadro 8. Ejemplo de precipitación media mensual (mm) entre los años 1960 y 2005 por sub-cuenca aportante.

Cuenca Aportante	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
AN-7	30,5	114,2	181,6	194,8	95,7	48,1	12,9	10,3	0,7	0,1	0,7	4,9	694,6
AN-20	22,0	76,4	101,1	101,3	65,1	32,7	12,4	7,5	2,4	1,0	0,4	5,5	427,8
AN-9	12,1	48,8	77,4	81,1	51,0	20,9	6,7	5,9	0,7	0,3	0,2	2,6	307,8
AN-19	19,7	80,1	98,4	107,1	64,7	34,3	10,5	7,6	2,3	0,1	0,6	4,7	430,2
CL-10	69,7	40,9	76,2	133,7	98,0	24,8	3,5	45,5	0,0	0,0	0,0	12,7	505,1
CL-17	64,9	32,5	66,1	117,9	97,4	26,0	4,8	46,2	0,0	0,0	0,0	10,8	466,7
CL-33	11,5	51,4	77,5	71,2	45,5	21,3	8,1	6,3	1,5	0,4	0,7	3,1	298,4
CL-29b	12,1	41,6	73,1	71,5	42,2	19,8	7,7	6,4	0,7	0,2	0,1	3,2	278,5

Fuente: Elaboración Propia.

Determinación de estadística de caudal sobre Cuencas Laterales y Aportes Naturales

El Modelo MAGIC tiene incorporado en su sistema operativo un modelo para simular los caudales de las cuencas con régimen pluvial (modelo MPL), asumiendo que parte de la lluvia escurre superficialmente en forma inmediata, del remanente, parte se infiltra hasta que la humedad del suelo alcanza la capacidad de campo y el agua en exceso escurre superficialmente. Por otra parte, del agua que infiltra, una fracción percola al acuífero subterráneo, hasta que este acuífero se satura. Desde ese momento, el agua en exceso se suma a la escorrentía.

Teniendo los valores de la infiltración, precipitaciones y evapotranspiración se calculan los valores diarios de la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea instantánea al final del día. La escorrentía mensual se obtiene sumando los valores diarios de la escorrentía. El proceso se repite para todos los meses del período de análisis. En la figura 11 es posible apreciar el funcionamiento conceptual del modelo MPL.

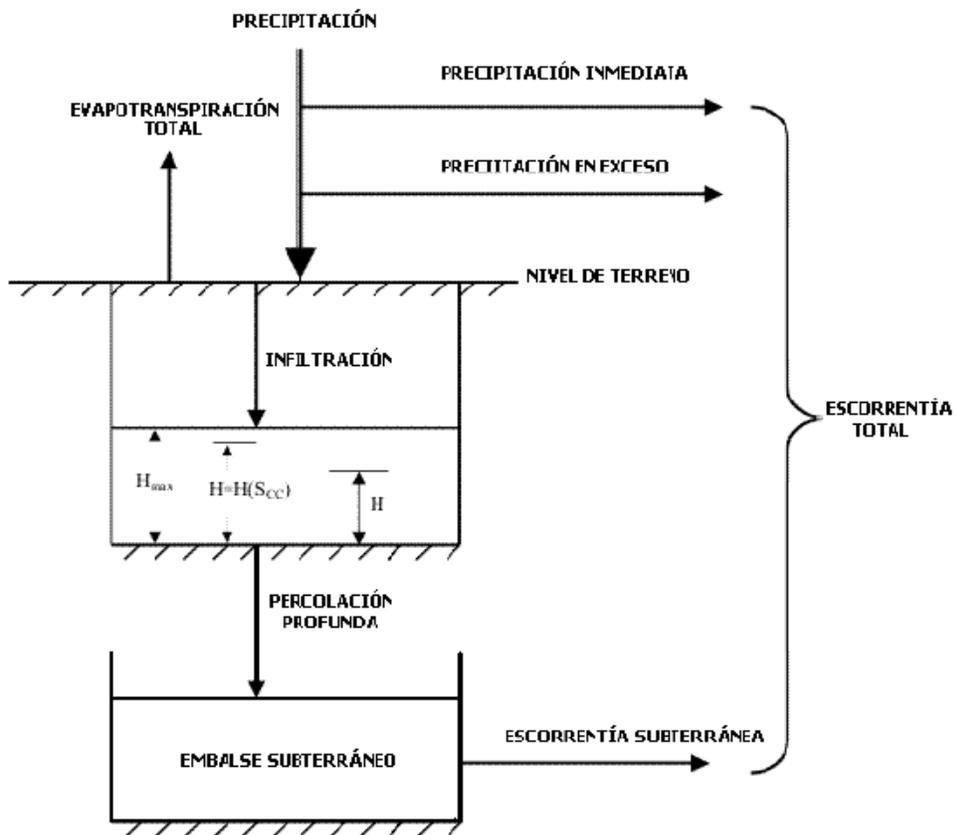


Figura 11. Diagrama conceptual modelo MPL (DGA, 2005).

Para generar la estadística de caudales mensuales se ejecuta el programa para las 46 cuencas aportantes de régimen pluvial, las cuales tienen asociados datos de precipitación, evaporación, caudales observados y otros parámetros como la humedad relativa del suelo, radiación solar, superficie, etc. En la Figura 12 es posible visualizar la ventana de simulación del aporte natural AN-07, en el cálculo de su caudal medio mensual. En el Cuadro 9 se presentan ejemplos de aportes naturales y cuencas laterales con sus respectivos caudales medios mensuales. El cuadro con la estadística promedio, de caudales medios mensuales arrojados por el modelo MPL para las cuencas de régimen pluvial se presenta en el Apéndice III.

MQM win v1.0 : Simulación de Caudales Medios Mensuales

Directorio de ubicación de la cuenca actual:
G:\Modelacion\Hidrología Estocástica\MPL CL+AN\AN_07

Archivo de Parámetros :
parámetros.dat

GOBIERNO DE CHILE
Ministerio de Obras Públicas
Dirección General de Aguas
Depto. de Estudios y Planif.

Desea obtener Qds como vector (.qmv) ?
 Desea salidas mensuales detalladas (.smd) ?
 Desea salidas diarias detalladas (.sdd) ?
 Desea comparar Qms con Qmo (.s-o) ?

Simular Graficar Ver .qms Ver .smd ? Acerca de Salir

Datos de la Cuenca

Nombre de la Cuenca :
CUENCA río Lliu Lliu

Archivos De Datos

Precipitaciones Diarias :
Lluvia.pmm

Evaporaciones Mensuales de Bandeja :
Evaporación.evm

Caudales Medios Mensuales Observados :
Q observados.qmo

Parámetros

Cisy [°/1] 1.000 Scs [°/1] 0.573
 Cevap [°/1] 1.000 Scrit [°/1] 0.318
 FC [°/1] 6.000 Smin [°/1] 0.155
 Alfa [°/1] 3.00 Hmax [mm] 295.00
 Pmin [°/1] 0.090 Área [km2] 14.100
 K emb subt. [día] 45.00

Periodo de Simulación

Años de Simulación 56
 Mes de Partida 4

Condiciones Iniciales

Sini [°/1] 0.0100
 EZini [m3/s] 0.0010

Figura 12. Visualización modelo MPL.

Cuadro 9. Ejemplo de caudal medio mensual (m^3/s) por cuenca aportante.

Cuenca Aportante	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
AN-7	19.59	126.98	502.17	685.10	414.90	280.64	147.28	76.88	36.64	18.01	9.79	7.47
AN-20	251.64	923.30	2819.04	4341.54	4291.29	2970.49	1533.60	791.03	387.34	191.08	97.55	101.90
AN-9	72.76	269.37	782.67	1338.09	1012.68	724.99	354.42	193.76	85.93	42.08	22.23	25.43
AN-19	229.78	951.19	2533.34	4601.20	4556.63	3155.17	1623.45	847.18	414.51	196.76	107.53	98.92
CL-10	15.09	103.70	290.10	744.33	358.45	242.75	121.49	69.29	35.05	14.75	7.88	5.52
CL-17	32.39	176.86	664.50	1188.70	713.76	481.78	244.55	131.83	63.85	30.61	16.55	12.45
CL-33	83.39	340.29	791.62	1109.26	1175.19	813.12	405.79	221.42	100.61	47.90	28.48	32.83
CL-29b	14.77	39.14	66.14	45.53	29.92	14.52	8.33	3.27	1.60	0.84	1.58	1.92

Fuente: Elaboración Propia.

Incorporación de información base

Obtenidos los datos de la actividad anterior, estos se incorporaron en las tablas que utiliza el modelo MAGIC como insumos para realizar la simulación hidrológica en la cuenca, específicamente se adapta la estructura de las bases de datos agregando aquellas estadísticas de precipitaciones y caudales medios mensuales.

De las 56 tablas originales que componen el modelo, se modificaron 6 de ellas que tienen relación con las estadísticas hidrológicas derivadas del proceso anterior. En el siguiente cuadro se describen aquellas tablas que fueron modificadas.

Cuadro 10. Modificación de datos de entrada del Modelo.

Nombre_Tabla	Descripción	Modificación
ESTAD_PP	Estadística pluviométrica. Precipitaciones medias mensuales, utilizadas en el modelo por las ZR.	Modificación de las estadísticas por incorporación de nuevas estaciones pluviométricas.
ESTAD_Q	Estadística Fluviométrica. Caudales medios mensuales, utilizados en el modelo por los AN y CL.	
ZR_AC_NNM	Necesidades netas mensuales de las áreas cultivadas por ZR	Actualización de los valores debido a modificación de las estadísticas de precipitación
ZR_ANC_NNM	Necesidades netas mensuales de las áreas no cultivadas por ZR	
ZR_CULT_PEF	Precipitaciones efectivas mensuales de cada una de las zonas de riego del sistema.	Actualización de los valores debido a modificación de las estadísticas de precipitación
ZR_PARAM	Parámetros que describen la zona de riego, específicamente Estación Pluviométrica asociada.	Estaciones de precipitación asignadas por análisis con polígonos de Thiessen

Fuente: Elaboración Propia. A partir de información del Addendum Estocástico DGA,2009.

Luego de modificar las tablas de las bases de datos que usa el MAGIC se simuló el balance mensual para los distintos objetos. Para obtener la disponibilidad y demandas de agua para regadío, se utilizaron los resultados generados por el modelo para las 46 zonas de riego, cuyos datos son arrojados en caudales medios mensuales por todos los años de simulación, en este caso desde 1950 a 2004. Se promediaron estos datos para obtener finalmente los caudales medios mensuales disponibles y demandados en cada sector de riego. Con lo cual fue posible calcular el porcentaje de la satisfacción de las demandas por cada zona de riego.

ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO, EN DOS ESCENARIOS DE RESTRICCIÓN HÍDRICA ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO Y AL DESARROLLO DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO.

Construcción de los escenarios específicos

Los escenarios buscan establecer diferentes condiciones de escasez en la cuenca del río Maipo, en esta actividad se proponen dos escenarios de restricción hídrica.

1. Escenario de cambio climático: se modifican algunos parámetros de las bases de datos de entrada del modelo, en base al estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, (CONAMA 2006), entre los cuales suponen en forma simplificada, las siguientes modificaciones climáticas para la zona central del país.
 - a) Disminución de las precipitaciones en un 20% promedio para toda la zona central.
 - b) Aumento de la temperatura en 2° C en la costa, en 3° C en depresión intermedia y precordillera y en 4° C para la parte alta de la cuenca.

Las precipitaciones mensuales fueron reducidas en un 20% para cada una de las cuencas aportantes, al igual que las estadísticas de las estaciones pluviométricas, modificando así la precipitación asociada a cada zona de riego. Al reducir las precipitaciones se debieron recalcular los caudales medios mensuales en cada cuenca aportante, así como también las necesidades netas mensuales de los cultivos en cada zona de riego.

Se aumentaron las temperaturas influyendo en dos elementos del modelo, el incremento en altura de la isoterma 0° C, que según los cálculos realizados, subiría desde una posición en los 1.900 a los 2.545,5 metros (DGA, 2008) lo que implica una modificación en el régimen de escurrimiento de 5 cuencas, que pasan de ser nivo-pluviales a pluviales. Por otro lado un aumento de la evaporación la cual fue calculada para cada cuenca dependiendo del régimen de éstas y cuyos valores recalculados son aplicados uniformemente a los meses de cada año de la serie.

Para determinar la evaporación de las cuencas nivo-pluviales, se utiliza la fórmula de Turc como referencia y a partir de la variación de 4°C de las temperaturas en la parte alta de la cuenca, se aplica un factor de corrección igual a 1,22. En el caso de las cuencas pluviales los factores de corrección se obtuvieron utilizando la fórmula de Ivanov como referencia, estos factores corresponden a 1,10 para las zonas bajas y de 1,15 para las zonas medias y medias-altas de la cuenca, en donde los cambios de temperaturas fueron 2°C y 3°C, respectivamente.

Cuadro 11. Modificación de datos de entrada en Escenario de Cambio Climático.

Nombre_Tabla	Descripción	Modificación
ESTAD_PP	Estadística pluviométrica. Precipitaciones medias mensuales, utilizadas en el modelo por las ZR.	Reducción de la Precipitación en un 20%
ESTAD_Q	Estadística Pluviométrica. Caudales medios mensuales, utilizados en el modelo por los AN y CL.	Aumento de temperatura, Aumento de evapotranspiración, Disminución de precipitaciones, Inclusión de nuevas cuencas de régimen pluvial
ZR_AC_NNM	Necesidades netas mensuales de las áreas cultivadas por ZR	Actualización de los valores debido a modificación de Precipitación efectiva
ZR_ANC_NNM	Necesidades netas mensuales de las áreas no cultivadas por ZR	
ZR_CULT_PEF	Precipitaciones efectivas mensuales de cada una de las zonas de riego del sistema.	Actualización de los valores debido a modificación de las estadísticas de precipitación

Fuente: Elaboración Propia.

Así, con estos parámetros ya recalculados, se adaptaron las bases de datos con las que se simuló nuevamente el balance hídrico de la cuenca. Se compara la variación de la nueva disponibilidad en cada zona de riego, con las del escenario base, estableciendo aquellos sectores que se ven más afectados por las condiciones del nuevo escenario.

En la Figura 13 se aprecian las cuencas aportantes que cambian de régimen nivo-pluvial a pluvial y el incremento en altura de la línea de nieve producto del aumento de la temperatura.

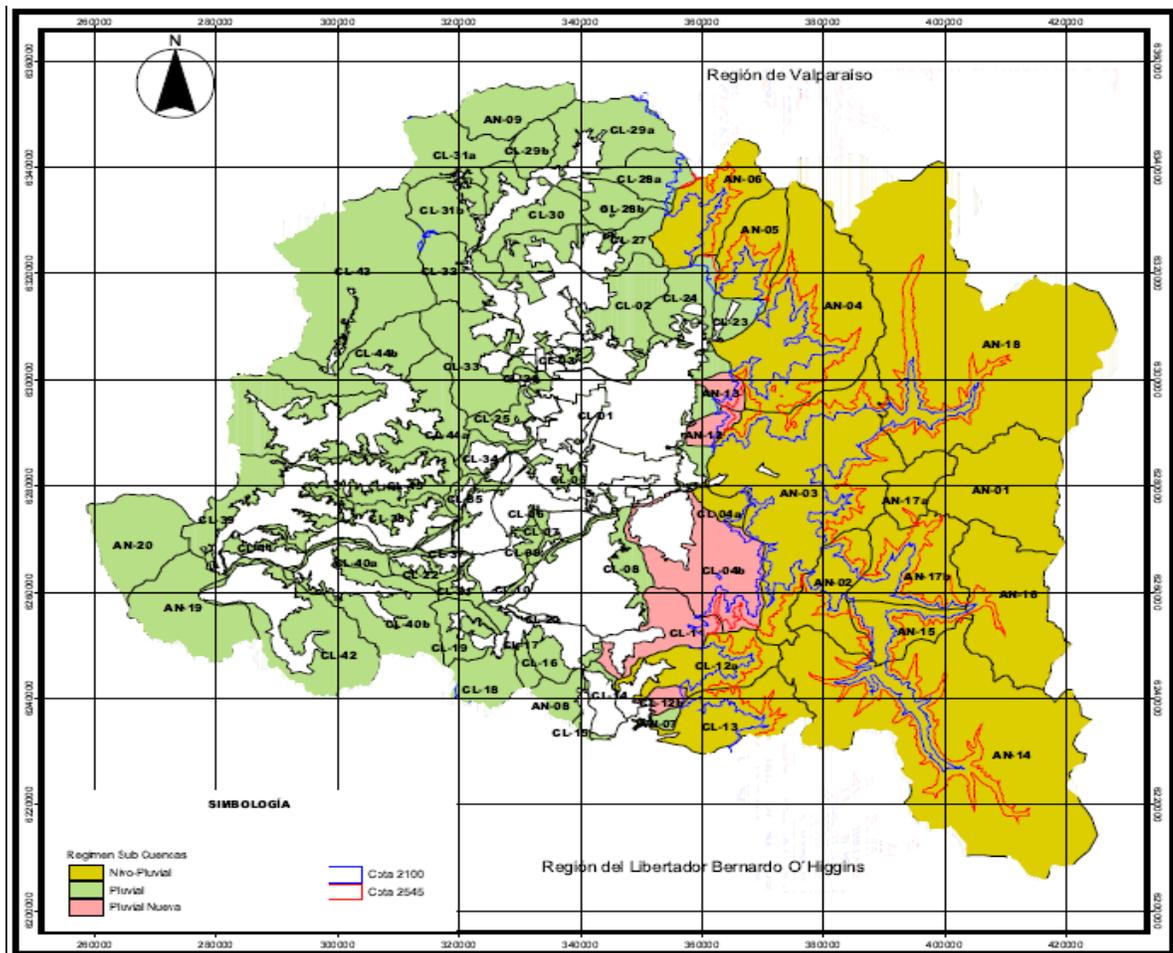


Figura 13. Variación en régimen de cuencas aportantes y línea de nieve.

2. Escenario de implementación de una nueva central de generación hidroeléctrica. En base a información de estudios de impacto ambiental de proyectos hidroeléctricos localizados en la cuenca del río Maipo y de acuerdo a la metodología establecida por el estudio de referencia (DGA 2008), se crea un escenario ficticio de dos centrales de pasada ubicadas en la parte alta de la cuenca del Maipo.

Como primer paso se ubicó el emplazamiento del proyecto dentro de la cuenca tanto espacialmente como topológicamente, respecto a la topología original del modelo.

De acuerdo a este escenario, la central “A” se localiza en la cuenca del río Colorado, aguas abajo de la actual Central Hidroeléctrica Alfalfal I. Esta central aprovechará principalmente las aguas provenientes de la zona alta del río Volcán y del embalse El Yeso, mientras que la central “B”, se ubica en las proximidades de la confluencia del río Maipo con el estero El Manzano, aprovechando las aguas que se generan en la central “A” y la central existente Alfalfal I, más aquellas provenientes de la captación de la hoya intermedia del río Colorado. Para lo anterior, el proyecto contempla la construcción de un total de 70 km. de túneles de

los cuales aproximadamente 60 km. corresponden a los túneles de aducción de ambas centrales y el resto lo constituyen las ventanas (túneles) de acceso a los túneles principales, los túneles de acceso a las cavernas de máquinas y los respectivos túneles de descarga de las centrales. En la Figura 14 se muestra un esquema de las obras.

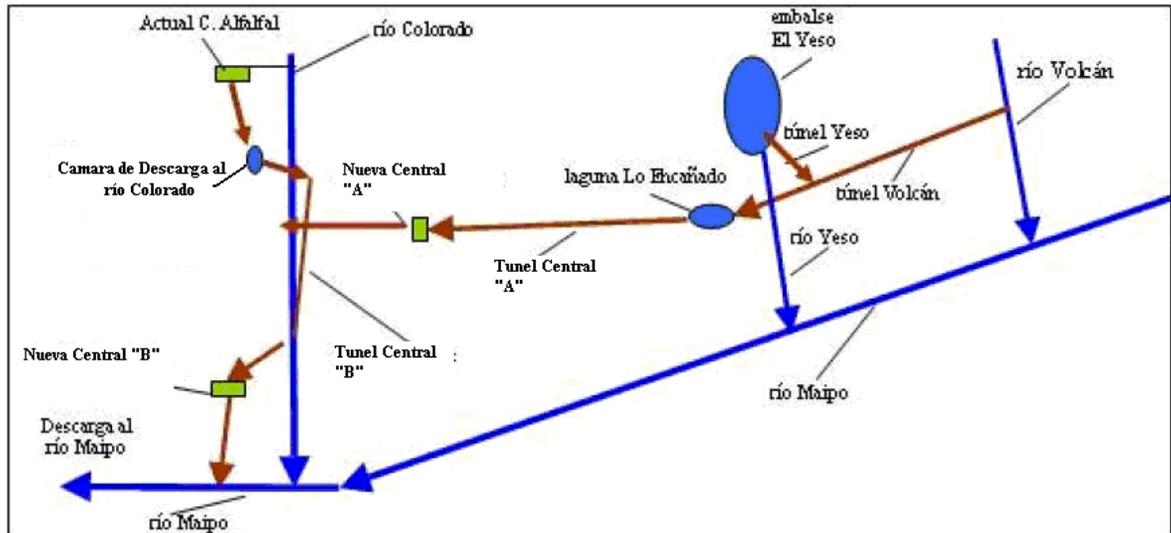


Figura 14. Esquema conceptual de la inclusión de un proyecto hidroeléctrico.

Se definieron topológicamente los nuevos elementos que entran en el sistema, como por ejemplo se identificó el nodo 10, ubicado aguas abajo del embalse El Yeso como punto de partida, y el nodo 20, ubicado aguas abajo de la devolución desde la central "B", como punto final para el análisis, además de 5 nodos donde se proyectan los distintos túneles de aducción y descarga (Ver Figura 15).

- Nodo 004: Representa el inicio del túnel Volcán.
- Nodo 158: Representa la llegada del túnel Volcán al río Yeso.
- Nodo 159 y 160: Se usan para representar el túnel Central "A."
- Nodo 161: Representa la devolución desde la nueva Central "B", al río Maipo.

Es importante tener en cuenta que el escenario contempla varios tramos que modifican en diferentes aspectos los caudales del río, por lo que se supone que en estos tramos es donde se verá la mayor variación de los caudales respecto de la situación sin proyecto o escenario base.

- Tramo 1: Río Volcán hasta confluencia con río Maipo. Incluye los Nodos 005, 004 y 003.

- Tramo 2: Río El Yeso hasta confluencia con río Maipo. Incluye los Nodos 010, 008 y 006.
- Tramo 3: Río Maipo aguas abajo del río Yeso hasta confluencia con el río Colorado. Incluye los Nodos 006, 011 y 013.
- Tramo 4: Río Colorado hasta confluencia con río Maipo. Contempla los Nodos 014, 016 y 013.
- Tramo 5: Río Maipo aguas abajo del Río Colorado. Conformado por los Nodos 018, 019 y 020.

Con esto se verificará si en aquellos sectores y tramos donde existe captación de agua se produce alguna variación que afecte la disponibilidad del recurso para los usos agrícolas de las zonas de riego cercanas a estos puntos de captación. En la figura 15 se muestra la ubicación de los nodos que componen cada tramo.

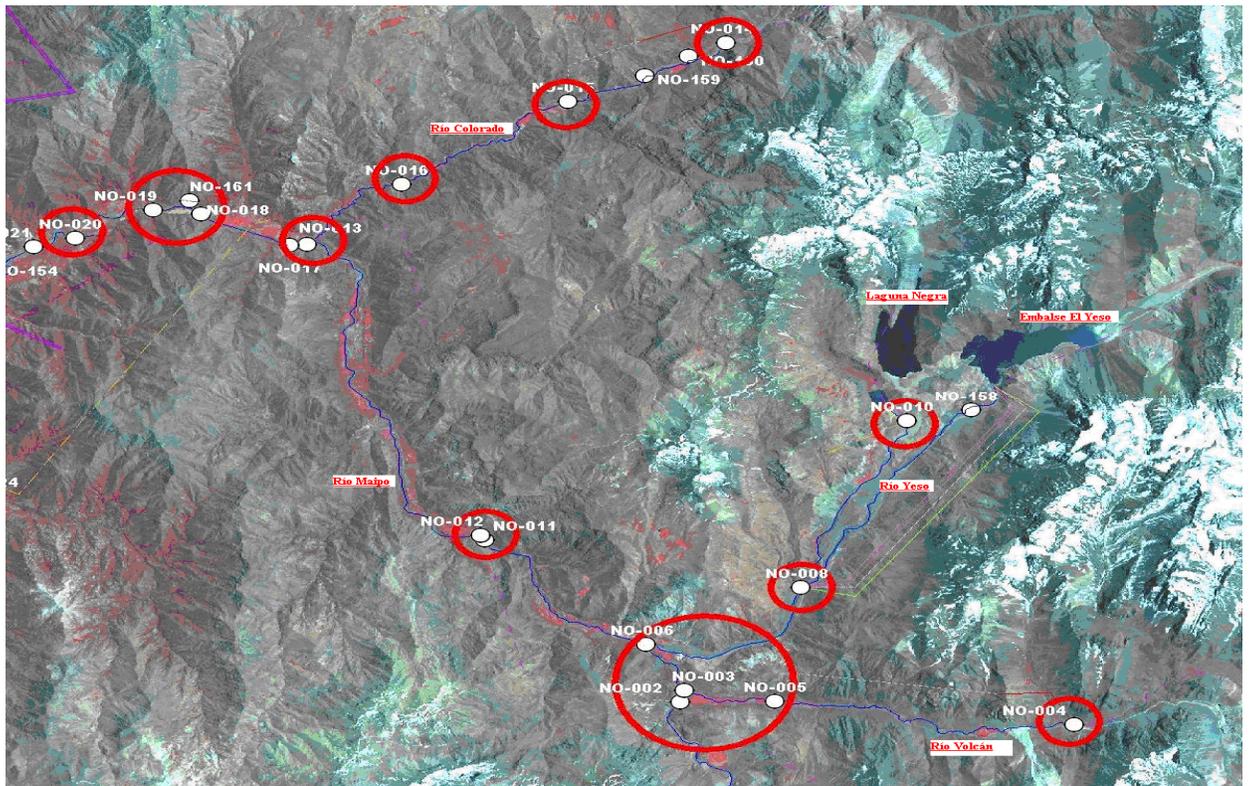


Figura 15. Ubicación de los Nodos presentes en los tramos a estudiar. (DGA, 2008).

EVALUACIÓN DE LA SATISFACCIÓN DE LAS DEMANDAS DE AGUA PARA REGADÍO EN CONDICIONES NORMALES DE LA CUENCA

El caudal total disponible, toma en cuenta los aportes provenientes tanto del sistema superficial, como del sistema subterráneo, y los posibles reusos de derrames y/o percolaciones dentro de la zona de riego y el caudal total demandado por la zona de riego es aquel que se requiere para satisfacer la demanda evapotranspirativa de todos los cultivos existentes en ella.

De esta forma, para cada zona de riego se compara la cantidad de agua disponible y la cantidad de agua demandada. Esto se expresa en términos porcentuales para evaluar la satisfacción de las demandas en cada zona de riego.

En base a esta última relación, se pueden identificar cuáles son las zonas de riego que satisfacen su demanda y cuales son aquellas que tienen un déficit de caudal que no permite satisfacer todas demandas necesarias para los cultivos en condiciones normales para la cuenca.

Finalmente, se definieron rangos de déficit para establecer una evaluación de grado de restricción hídrica con expresión cartográfica donde se identifican las zonas de riego distribuidas espacialmente dentro de la cuenca, diferenciadas por porcentaje de satisfacción de la demanda, para lo cual se utilizaron los rangos establecidos por el indicador del potencial agro-hidrológico (AHP). Este indicador marca la demanda de agua como la capacidad de una zona determinada de satisfacer las necesidades de un cultivo concreto, que exista en ella, mediante el cociente entre el agua consumida y la requerida. Este indicador puede mostrar, hasta qué punto y durante cuánto tiempo, es un terreno capaz de satisfacer la demanda de agua del cultivo que lo ocupa (Hispagua, 2010).

Los rangos utilizados por este indicador van de 0-1 y son los siguientes:

1,0 - 0,8: La escasez de agua del cultivo es sólo teórica, porque a las plantas se les suministra agua de forma continua e ilimitada.

0,8 - 0,5: La capacidad para satisfacer la demanda de agua de la zona sigue siendo continua, pero se va restringiendo progresivamente.

0,5 - 0,3: La escasez de agua empieza a ser alta, el suministro de agua a las plantas es periódico y restrictivo, y, como consecuencia, aparecen síntomas de estrés hídrico.

> a 0,3: Se produce un gran estrés hídrico, que causa considerables pérdidas de biomasa y, si esta situación se prolonga, también causa la muerte de la planta.

Luego para evaluar la satisfacción de las demandas de agua para riego en los distintos escenarios, se realizó una comparación por zona de riego entre el escenario base y el escenario de cambio climático y otra entre el escenario base y el escenario de introducción de un proyecto hidroeléctrico. Se analizó la variación del porcentaje de demanda suplida y finalmente se destacan aquellas zonas de riego que disminuyen la satisfacción de la demanda con respecto a la situación base, esto con el fin de evaluar si los nuevos escenarios planteados agudizan la situación actual de la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL DE AGUA PARA REGADÍO EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO.

Los resultados entregados por el modelo MAGIC se presentan a nivel mensual considerando el período estival de un año hidrológico que va desde abril a Marzo, sin considerar los meses de invierno (Mayo - Agosto) dado que la demanda en estos meses es nula por lo cual no tiene mayor incidencia en los resultados. Los resultados corresponden a la relación entre la disponibilidad de agua actual presente en cada zona de riego y la demanda correspondiente.

El Cuadro 12 presenta la diferencia entre el caudal (m^3/s) total disponible y el demandado para cada una de las zonas de riego, en la época estival, que es donde existen requerimientos de agua.

Cuadro 12.Relación entre demanda y oferta en periodo estival para situación actual.

COD_ZR	Abr	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Prom
ZR-01	0.48	0.16	1.00	1.48	1.79	1.80	1.52	0.99	1.15
ZR-02	2.59	3.14	0.67	-8.20	-15.77	-16.30	-11.45	-1.33	-5.83
ZR-03	0.21	0.24	0.07	-0.20	-0.40	-0.40	-0.27	0.01	-0.09
ZR-04	0.86	0.49	1.29	1.63	1.61	1.58	1.34	1.21	1.25
ZR-05	-0.91	-0.10	-1.49	-3.65	-5.35	-5.42	-4.63	-2.58	-3.02
ZR-06	0.86	1.34	0.61	-1.65	-4.48	-4.61	-3.19	-0.17	-1.41
ZR-07	-0.58	0.22	-1.05	-2.98	-4.63	-4.75	-4.02	-2.11	-2.49
ZR-08	0.45	1.97	0.64	-1.67	-7.90	-10.46	-9.28	-2.96	-3.65
ZR-09	0.49	0.37	0.80	-0.81	-2.01	-2.24	-1.57	0.00	-0.62
ZR-10	0.17	0.16	0.11	-1.03	-2.01	-2.16	-1.72	-0.50	-0.87
ZR-11	-0.07	0.23	-0.29	-0.96	-1.79	-2.14	-1.92	-0.99	-0.99
ZR-12	0.08	0.28	0.18	0.15	-0.29	-0.61	-0.62	-0.26	-0.14
ZR-13	0.05	0.09	0.19	0.28	0.28	0.22	0.20	0.11	0.18
ZR-14	0.36	0.61	1.09	1.39	1.31	1.05	0.92	0.67	0.92
ZR-15	-0.05	0.08	-0.09	-0.19	-0.33	-0.31	-0.23	-0.11	-0.15
ZR-16	-0.28	0.31	-0.71	-1.84	-2.64	-2.64	-2.22	-1.20	-1.40
ZR-17	0.13	0.16	0.19	-0.21	-1.00	-1.01	-0.52	0.24	-0.25
ZR-18	0.05	0.07	0.08	0.02	-0.29	-0.29	-0.10	0.10	-0.04
ZR-19	-0.27	-0.03	-0.64	-1.43	-1.99	-2.01	-1.66	-0.87	-1.11
ZR-20	-0.05	0.03	-0.12	-0.26	-0.36	-0.44	-0.48	-0.25	-0.24
ZR-21	-0.18	0.02	-0.37	-0.69	-0.95	-1.01	-0.90	-0.60	-0.58
ZR-22	-0.42	0.12	-1.10	-2.43	-3.19	-3.29	-2.92	-1.83	-1.88
ZR-23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZR-24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZR-25	0.58	0.59	1.04	0.86	0.31	0.30	0.64	1.18	0.69
ZR-26	-0.02	-0.01	-0.05	-0.11	-0.16	-0.16	-0.13	-0.07	-0.09
ZR-27	0.42	0.27	0.58	0.84	0.87	0.77	0.85	0.71	0.66
ZR-28	0.05	0.06	0.07	-0.15	-0.40	-0.42	-0.29	0.01	-0.13
ZR-29	0.16	0.33	0.05	0.05	-0.72	-0.82	-0.85	-0.37	-0.27
ZR-30	0.33	0.34	0.50	0.55	-0.39	-0.45	0.09	0.63	0.20
ZR-31	0.15	0.09	0.22	0.23	0.13	0.11	0.16	0.29	0.17
ZR-32	0.08	0.07	0.16	0.27	-0.03	-0.05	0.21	0.17	0.11
ZR-33	0.14	0.18	0.23	0.32	0.27	0.21	0.26	0.23	0.23
ZR-34	-0.38	-0.03	-0.74	-1.84	-2.89	-2.84	-2.17	-1.15	-1.51
ZR-35	0.71	0.93	0.11	-1.58	-4.86	-5.50	-3.87	-0.65	-1.84
ZR-36	-0.27	0.02	-0.56	-1.26	-1.76	-1.82	-1.55	-0.89	-1.01
ZR-37	0.08	0.15	-0.19	-1.30	-1.99	-2.03	-1.61	-0.59	-0.93
ZR-38	-0.01	0.36	-0.27	-0.51	-1.10	-1.19	-0.80	-0.45	-0.50
ZR-39	-0.93	0.77	-2.92	-8.31	-12.93	-12.05	-9.73	-4.50	-6.33
ZR-40	0.12	0.80	-3.35	-8.04	-10.29	-9.95	-8.55	-4.37	-5.45
ZR-41	0.15	0.49	-1.83	-4.97	-6.73	-6.36	-5.46	-2.81	-3.44
ZR-42	1.37	1.30	2.29	-0.77	-3.26	-2.75	-1.51	1.51	-0.23
ZR-43	0.14	0.11	-0.10	-0.55	-0.84	-0.82	-0.69	-0.28	-0.38
ZR-44	3.82	3.06	6.23	0.60	-2.97	-3.06	-0.80	4.46	1.42
ZR-45	1.36	1.22	1.80	1.01	-0.82	-1.40	-0.43	1.72	0.56
ZR-46	0.01	0.03	0.02	-0.03	-0.09	-0.09	-0.04	0.02	-0.02

El análisis comparativo entre caudal total disponible y caudal total demandado realizado por zona de riego, arroja que 32 zonas de riego mantienen un caudal demandado mayor que el disponible las cuales pueden apreciarse en el Cuadro 12 destacadas en color rojo, las restantes catorce zonas de riego muestran que el caudal demandando no supera al disponible lo cual permite satisfacer las necesidades netas de los cultivos.

En lo siguiente, se presentan como ejemplo los gráficos de las zonas de riego ZR-01 y ZR-39 para representar aquellas zonas que suplen la totalidad de sus demandas y aquellas que presentan déficit en función del caudal total disponible y el caudal total demandado.

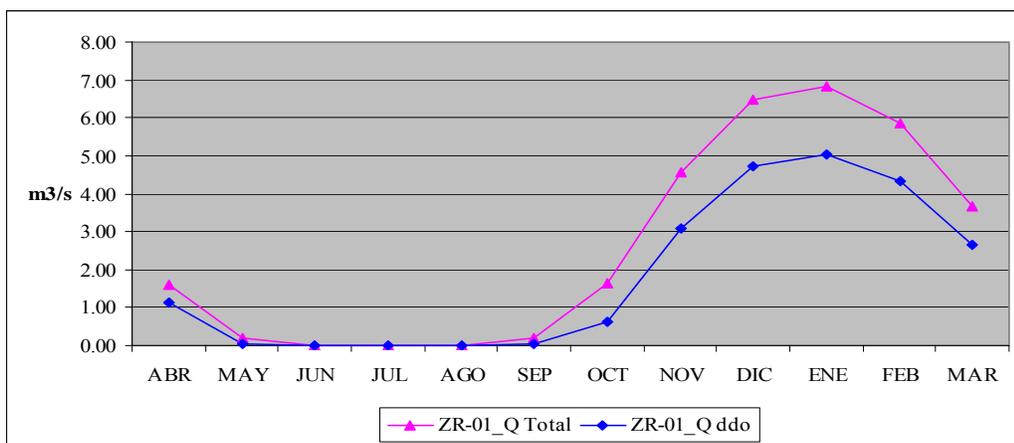


Figura 16. Comparación entre caudal total disponible v/s caudal total demandado para la zona de riego ZR-01

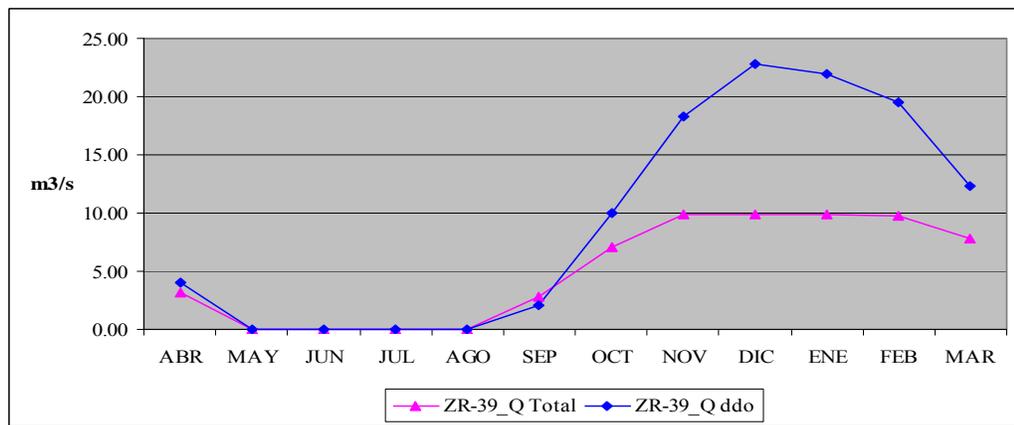


Figura 17. Comparación entre caudal total disponible v/s caudal total demandado para la zona de riego ZR-39

La zona de riego ZR-01 es representativa de 14 sectores de riego en donde se mantienen caudales disponibles mayores que los demandados a lo largo de prácticamente todos los meses del año. Es importante recordar que estos valores son caudales promedios mensuales de una serie de 55 años de estadística, por lo que el análisis no se basa en variaciones puntuales año a año. Por otra parte, la zona de riego ZR-39 representa a aquellos sectores donde el caudal demandado en la época estival supera al disponible en la zona.

A continuación se presenta el Cuadro 13 con la fracción de satisfacción de la demanda de cada zona de riego, que es resultado del promedio entre los meses entre Septiembre y Abril para cada zona de riego. Donde se destacan en aquellas zonas que satisfacen sobre el 80% de sus demandas en color celeste representando aquellas zonas que no presentan restricciones en términos hídricos, en color verde los sectores cuya capacidad para satisfacer sus demandas es continua pero se va restringiendo progresivamente, es decir aquellos entre un 50% y un 80%, en amarillo aquellas áreas que presentan una alta restricción hídrica cuyo promedio anual de satisfacción de las demandas va entre un 50% y un 30%, finalmente en color rojo se destacan aquellas zonas críticas para el desarrollo de cultivos agrícolas los cuales están sujetos a un gran estrés hídrico, ellas son las que satisfacen sus demandas en menos de un 30%.

Cuadro 13. Fracción de Satisfacción de la demanda por Zona de Riego en situación actual.

<u>COD_ZR</u>	<u>PROM_ESTIVAL</u>	<u>COD_ZR</u>	<u>PROM_ESTIVAL</u>
ZR-01	1.00	ZR-24	1.00
ZR-02	0.47	ZR-25	1.00
ZR-03	0.79	ZR-26	0.53
ZR-04	1.00	ZR-27	1.00
ZR-05	0.34	ZR-28	0.60
ZR-06	0.73	ZR-29	0.72
ZR-07	0.42	ZR-30	0.89
ZR-08	0.76	ZR-31	1.00
ZR-09	0.70	ZR-32	0.97
ZR-10	0.47	ZR-33	1.00
ZR-11	0.47	ZR-34	0.42
ZR-12	0.64	ZR-35	0.68
ZR-13	1.00	ZR-36	0.17
ZR-14	1.00	ZR-37	0.45
ZR-15	0.76	ZR-38	0.85
ZR-16	0.50	ZR-39	0.58
ZR-17	0.71	ZR-40	0.27
ZR-18	0.79	ZR-41	0.23
ZR-19	0.10	ZR-42	0.75
ZR-20	0.66	ZR-43	0.46
ZR-21	0.13	ZR-44	0.85
ZR-22	0.22	ZR-45	0.88
ZR-23	1.00	ZR-46	0.71

Fuente: Elaboración Propia.

Para visualizar cual es la satisfacción de las demandas de cada zona de riego se presenta el siguiente gráfico, que es resultado del promedio entre los meses entre Septiembre y Abril para cada zona de riego.

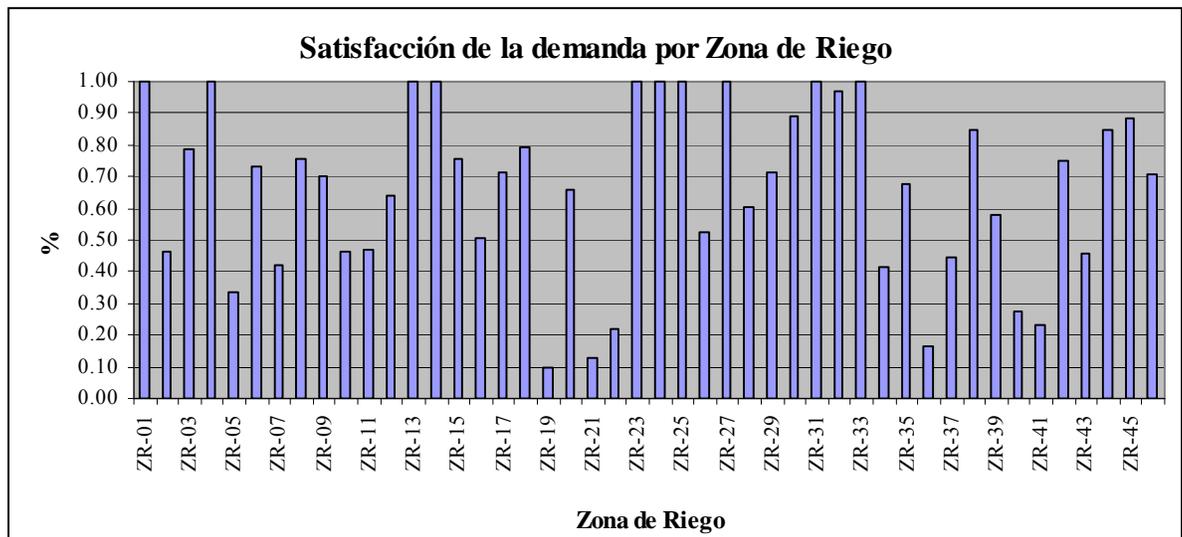


Figura 18. Porcentaje de demanda suplida en época estival por zona de riego en situación actual.

Para poder evaluar este resultado siguiendo la misma categorización anterior se estableció un indicador de satisfacción de la demanda, que va de uno a cuatro, siendo 1 aquellas zonas que satisfacen sobre un 80% las demandas de agua de regadío para el periodo estival, 2 para aquellas que oscilan entre los 50 y 80%, 3 para aquellas que van entre un 50% y un 30% y finalmente 4 corresponde a aquellas zonas críticas cuyo porcentaje de satisfacción de la demanda esta por debajo del 30% para este mismo periodo. En la figura 19 se presenta un gráfico de torta donde se expresa en porcentaje cada una de estas categorías.

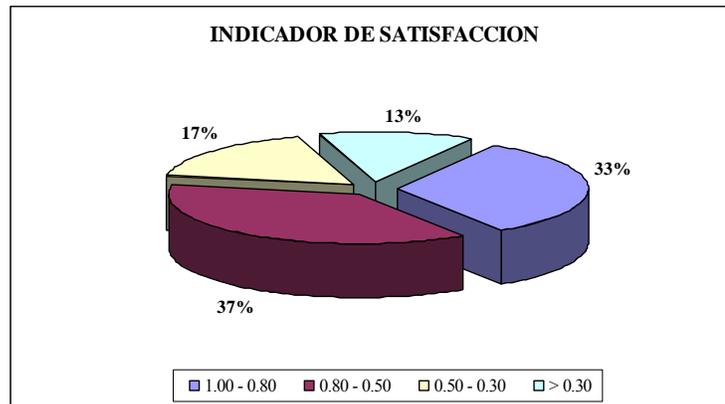


Figura 19. Porcentaje de zonas de riego por categoría del indicador de satisfacción

El resultado cartográfico del análisis de satisfacción de la demanda se presenta en la Figura 20 donde se visualizan aquellas zonas de riego en sus distintos rangos de acuerdo al indicador utilizado el cual se basa tal como se explica anteriormente en la satisfacción de las demandas.

En la cartografía se observa que la mayor superficie es representada por zonas donde la restricción es sólo teórica o levemente progresiva. Aquellas zonas de riego ubicadas al norponiente de la cuenca, cercanas a las localidades de Curacaví, Lampa, Batuco, que son abastecidas por los esteros Puangue y Lampa respectivamente, se visualizan con una alta capacidad para satisfacer las necesidades netas de los cultivos. También es posible notar que hacia la parte alta de la cuenca, en la confluencia del río Maipo y el río Colorado, existe otro sector con un alto grado de satisfacción de las demandas agrícolas, este comprende las localidades de San José de Maipo y Pirque, más abajo al sector de Alto Jahuel, Buin, Paine, comunas que se caracterizan por un alto desarrollo del sector agropecuario.

Espacialmente queda de manifiesto que la parte baja de la cuenca es la que representa la mayor vulnerabilidad ante fenómenos de escasez de agua, las zonas en rojo son aquellas que en la actualidad sufren un importante estrés hídrico, así como también aquellas zonas en amarillo que no logran suplir las necesidades netas mensuales de los cultivos presentes en estas zonas de riego ubicadas en su mayoría en sectores mayormente intervenidos cercanos a centros urbanos Colina, Melipilla, Isla de Maipo, Talagante, son algunas de las comunas agrícolas que se presentan con deficiencias a la hora de suplir demandas de agua para regadío.

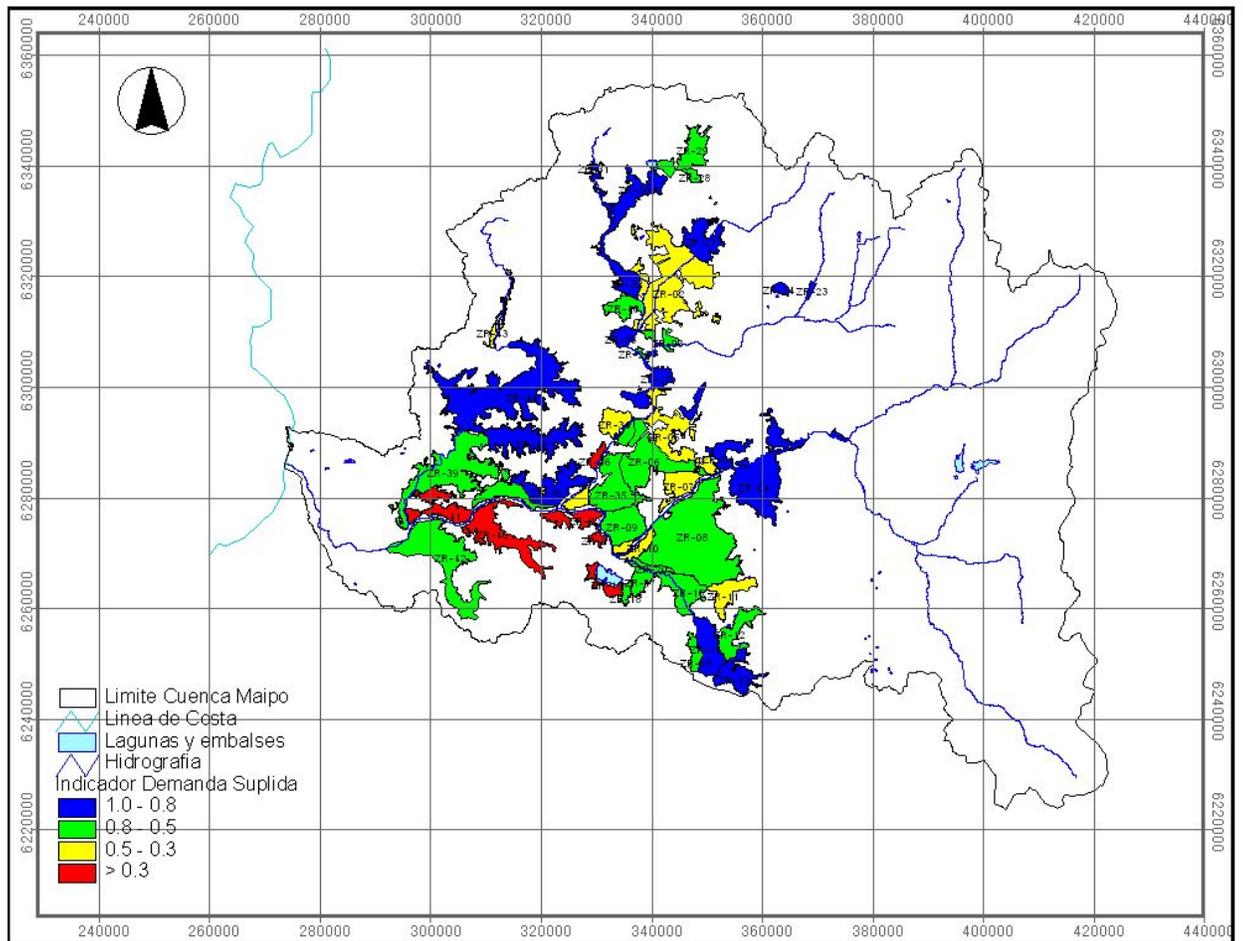


Figura 20. Satisfacción de la demanda por Zona de Riego, en situación actual.

ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Frente al escenario de cambio climático considerado en este trabajo, los resultados entregados por el modelo MAGIC tienen relación con la disponibilidad de agua en cada zona de riego, para las nuevas condiciones planteadas. Al igual que en análisis anterior se presentan cuadros con la relación entre los caudales medios mensuales disponibles por zona de riego en relación al caudal total demandado.

Cuadro 14.Relación de demanda de agua suplida por zona de riego en periodo estival para el escenario de Cambio Climático.

COD_ZR	ABR	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	PROM EST
ZR-01	-0.07	-0.13	-0.67	-0.34	-0.11	0.04	0.02	-0.05	-0.16
ZR-02	1.29	-0.02	-0.67	-11.84	-20.24	-20.74	-15.14	-3.42	-8.85
ZR-03	0.03	-0.03	-0.14	-0.53	-0.76	-0.74	-0.57	-0.20	-0.37
ZR-04	-0.69	-0.46	-1.08	-1.30	-1.36	-1.32	-1.17	-0.99	-1.05
ZR-05	-1.37	-0.68	-2.13	-4.49	-6.37	-6.51	-5.53	-3.32	-3.80
ZR-06	-0.41	-0.57	-1.05	-3.10	-6.19	-6.31	-4.65	-1.83	-3.01
ZR-07	-1.21	-0.56	-1.89	-3.92	-5.73	-5.82	-4.92	-3.00	-3.38
ZR-08	-1.54	-1.45	-2.76	-9.90	-16.06	-17.29	-16.16	-8.19	-9.17
ZR-09	-0.18	-0.30	0.13	-1.46	-2.76	-2.96	-2.20	-0.49	-1.28
ZR-10	-0.14	-0.15	-0.21	-1.65	-2.69	-2.78	-2.29	-0.93	-1.36
ZR-11	-0.24	-0.21	-0.61	-1.39	-2.24	-2.57	-2.28	-1.26	-1.35
ZR-12	-0.04	-0.18	-0.20	-0.34	-0.70	-0.89	-0.83	-0.39	-0.45
ZR-13	0.01	-0.03	0.06	0.10	0.08	0.06	0.08	0.04	0.05
ZR-14	0.19	0.03	0.27	0.24	0.30	0.29	0.30	0.22	0.23
ZR-15	-0.09	-0.16	-0.30	-0.44	-0.54	-0.47	-0.37	-0.23	-0.32
ZR-16	-0.59	-0.32	-1.11	-2.60	-3.53	-3.52	-2.98	-1.75	-2.05
ZR-17	-0.09	-0.15	-0.14	-0.77	-1.52	-1.49	-0.95	-0.23	-0.67
ZR-18	-0.04	-0.06	-0.08	-0.28	-0.62	-0.63	-0.38	-0.08	-0.27
ZR-19	-0.34	-0.14	-0.84	-1.76	-2.37	-2.37	-1.97	-1.09	-1.36
ZR-20	-0.16	-0.08	-0.27	-0.51	-0.65	-0.69	-0.66	-0.38	-0.42
ZR-21	-0.25	-0.08	-0.44	-0.85	-1.14	-1.18	-1.06	-0.72	-0.71
ZR-22	-0.70	-0.26	-1.45	-3.02	-3.90	-3.97	-3.53	-2.34	-2.40
ZR-23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZR-24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZR-25	-0.19	-0.28	-0.38	-0.89	-1.57	-1.59	-1.09	-0.47	-0.81
ZR-26	-0.04	-0.03	-0.08	-0.16	-0.21	-0.21	-0.18	-0.11	-0.13
ZR-27	0.12	-0.09	0.15	0.30	0.28	0.27	0.32	0.33	0.21
ZR-28	-0.04	-0.05	-0.06	-0.27	-0.53	-0.55	-0.40	-0.07	-0.25
ZR-29	-0.02	-0.10	-0.29	-0.30	-1.15	-1.26	-1.22	-0.69	-0.63
ZR-30	-0.10	-0.23	-0.13	-0.14	-0.97	-1.03	-0.41	-0.12	-0.39
ZR-31	0.07	-0.01	0.08	0.14	0.08	0.06	0.12	0.21	0.10
ZR-32	-0.04	-0.05	-0.08	-0.11	-0.25	-0.27	-0.10	-0.08	-0.12
ZR-33	-0.09	-0.14	-0.13	-0.21	-0.32	-0.33	-0.21	-0.13	-0.19
ZR-34	-0.65	-0.40	-1.05	-2.48	-3.91	-3.86	-2.97	-1.51	-2.10
ZR-35	-0.44	-0.73	-1.16	-4.35	-7.70	-8.10	-6.09	-2.01	-3.82
ZR-36	-0.43	-0.12	-0.74	-1.54	-2.09	-2.14	-1.83	-1.13	-1.25
ZR-37	-0.24	-0.14	-0.53	-1.70	-2.46	-2.48	-2.00	-0.90	-1.31
ZR-38	-0.46	-0.33	-0.88	-2.29	-3.32	-3.32	-2.59	-1.15	-1.79
ZR-39	-2.91	-2.11	-6.46	-11.99	-16.58	-15.45	-12.83	-8.18	-9.56
ZR-40	-0.88	-0.86	-4.73	-10.01	-12.53	-11.93	-10.33	-5.74	-7.13
ZR-41	-0.45	-0.36	-2.80	-6.25	-8.08	-7.59	-6.59	-3.72	-4.48
ZR-42	0.37	-0.17	1.00	-2.27	-5.00	-4.40	-3.04	0.45	-1.63
ZR-43	0.00	-0.10	-0.20	-0.70	-1.01	-0.99	-0.84	-0.40	-0.53
ZR-44	1.33	-0.22	3.27	-0.99	-5.22	-5.26	-2.68	3.04	-0.84
ZR-45	-0.04	-0.28	0.56	0.25	-1.74	-2.17	-1.15	0.56	-0.50

COD_ZR	ABR	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	PROM EST
ZR-46	-0.01	-0.03	-0.02	-0.06	-0.12	-0.13	-0.07	-0.01	-0.06

El análisis comparativo entre caudal total disponible y caudal total demandado en el escenario de cambio climático arroja que solo seis zonas de riego mantienen una oferta de agua mayor a la demandada por los cultivos, las otras cuarenta zonas de riego no lograrían satisfacer el caudal demandado por las necesidades netas de los cultivos.

En lo siguiente, se presentan como ejemplo los gráficos de las zonas de riego ZR-14 y ZR-39 en función del caudal total disponible y el caudal total demandado en el escenario de cambio climático.

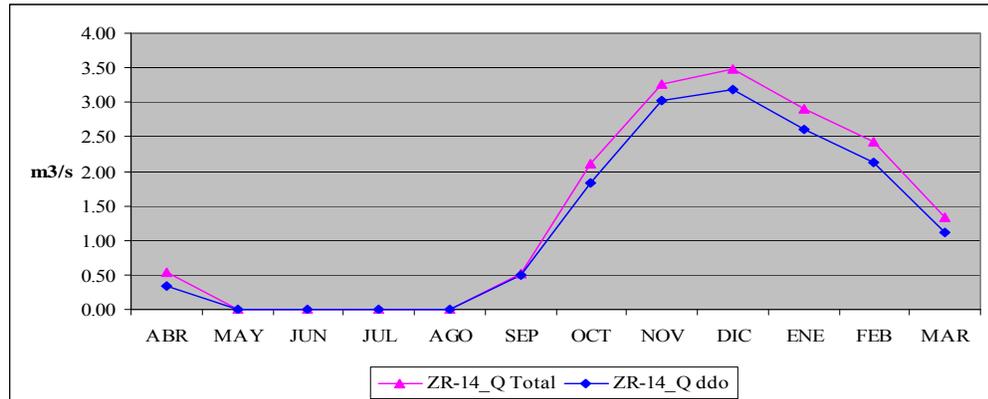


Figura 21. Comparación entre caudal total disponible v/s caudal total demandado para la zona de riego ZR-14 en escenario de cambio climático

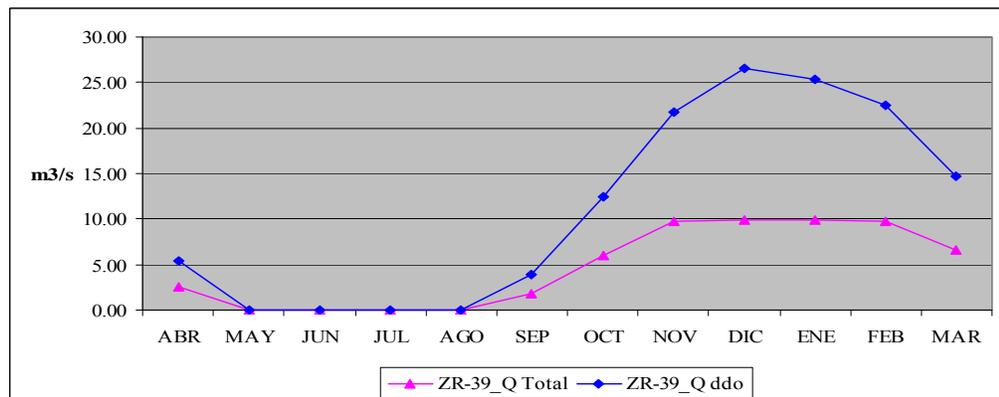


Figura 22. Comparación entre caudal total disponible v/s caudal total demandado para la zona de riego ZR-39 en escenario de cambio climático

El Cuadro 15 muestra la fracción de satisfacción de la demanda en época estival, para el nuevo escenario de cambio climático. El promedio estival se colorea al igual que para el caso de la situación actual en celeste, verde, amarillo y rojo dependiendo de la restricción hídrica de cada zona.

Cuadro 15. Fracción de Satisfacción de la demanda en escenario de Cambio Climático

COD_ZR	PROM EST	COD_ZR	PROM EST
ZR-01	0.76	ZR-24	1.00
ZR-02	0.54	ZR-25	0.72
ZR-03	0.72	ZR-26	0.37
ZR-04	0.76	ZR-27	0.77
ZR-05	0.23	ZR-28	0.66
ZR-06	0.68	ZR-29	0.73
ZR-07	0.31	ZR-30	0.85
ZR-08	0.58	ZR-31	0.88
ZR-09	0.59	ZR-32	0.84
ZR-10	0.47	ZR-33	0.84
ZR-11	0.38	ZR-34	0.27
ZR-12	0.64	ZR-35	0.58
ZR-13	0.67	ZR-36	0.14
ZR-14	1.00	ZR-37	0.39
ZR-15	0.58	ZR-38	0.56
ZR-16	0.40	ZR-39	0.44
ZR-17	0.65	ZR-40	0.32
ZR-18	0.69	ZR-41	0.30
ZR-19	0.05	ZR-42	0.68
ZR-20	0.43	ZR-43	0.48
ZR-21	0.11	ZR-44	0.81
ZR-22	0.18	ZR-45	0.84
ZR-23	1.00	ZR-46	0.68

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se presenta el siguiente gráfico, que es resultado del promedio de la satisfacción de la demanda entre los meses de Septiembre y Abril para cada Zona de Riego.

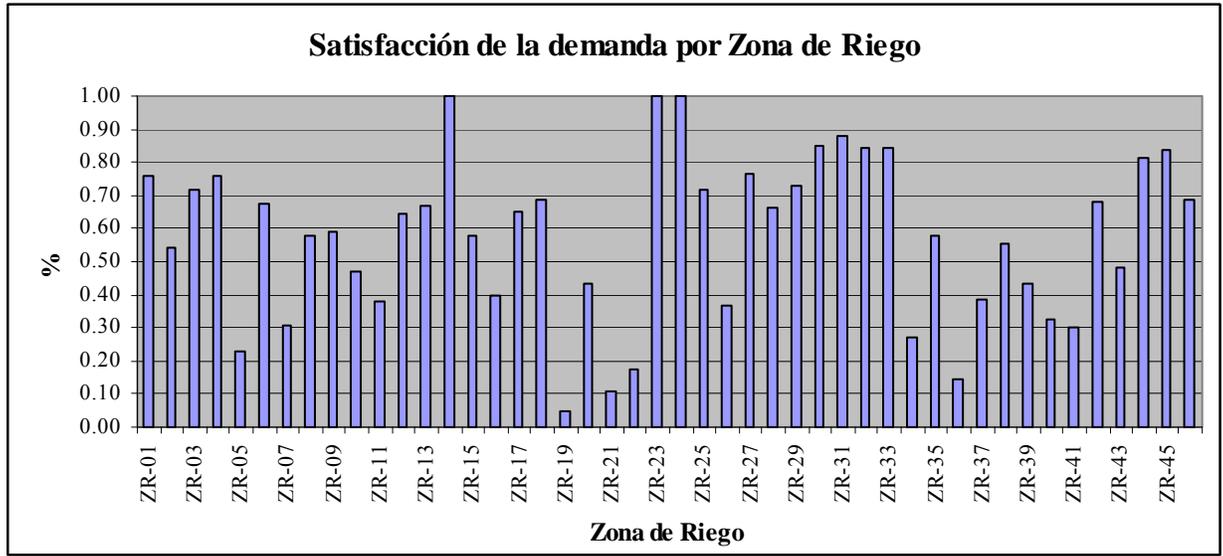


Figura 23. Porcentaje de demanda suplida en época estival por Zona de Riego, en escenario de Cambio Climático.

Dados los resultados obtenidos por el escenario de cambio climático, es posible observar una disminución para prácticamente todas las zonas de riego en la satisfacción de sus demandas a lo largo de toda la serie de tiempo y como un promedio mensual.

Al igual que lo realizado en condiciones normales de la cuenca, para poder evaluar este resultado se utilizó el mismo indicador de satisfacción de la demanda, que va de uno a cuatro. Luego se genera la cartografía para visualizar espacialmente que sectores de la cuenca se ven mas afectados por los cambios simulados en este escenario. La figura 24 muestra el grafico de torta de los porcentajes de las zonas de riego que representan a cada categoría. La figura 25 corresponde a la cartografía generada para el escenario de cambio climático.

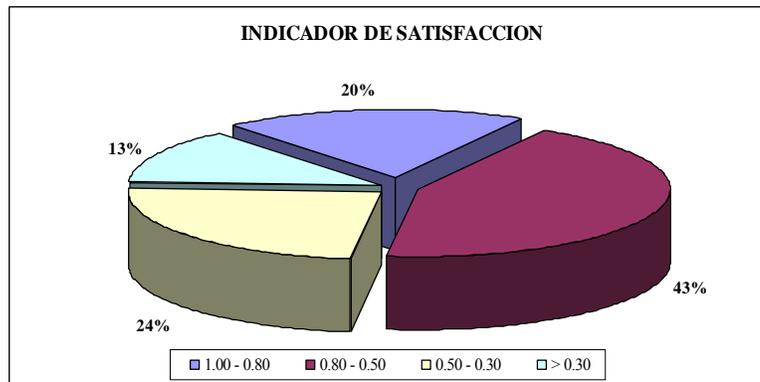


Figura 24. Porcentaje de zonas de riego por categoría del indicador de satisfacción, para situación con cambio climático

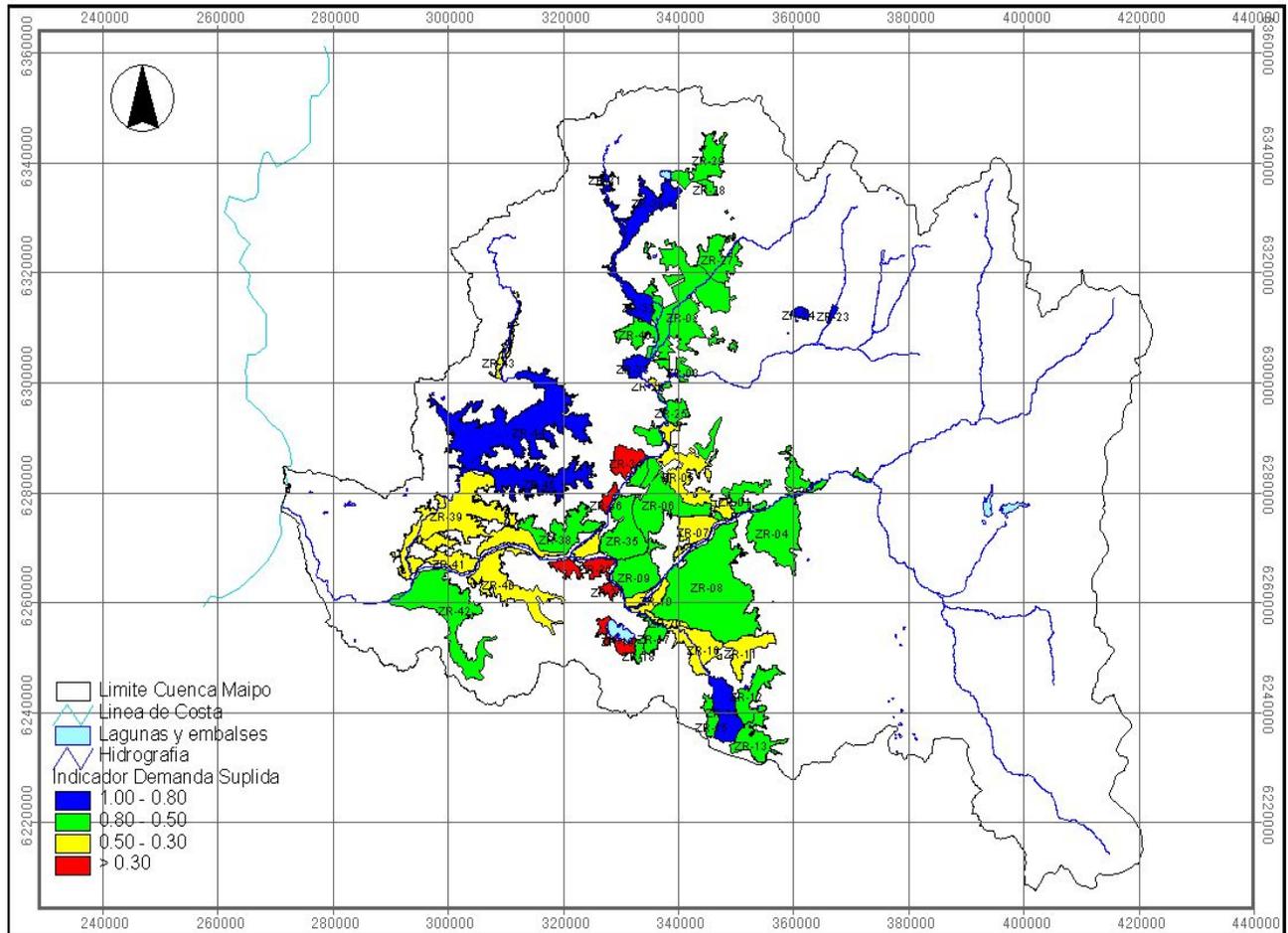


Figura 25. Satisfacción de la demanda por Zona de Riego, en escenario de cambio climático.

Espacialmente se puede apreciar un aumento de los sectores que tienen una restricción progresiva en la parte alta de la cuenca, sin embargo sigue siendo una buena condición para la agricultura de estas zonas de riego. La zona nor-poniente de la cuenca continúa manteniendo su condición de satisfacción de las demandas sobre un 80% donde el suministro de agua a los cultivos es continuo e ilimitado.

En este escenario queda de manifiesto que la parte baja de la cuenca es la que posee mayores restricciones en cuanto a la oferta del recurso, quedando representada en su mayoría por zonas con alta escasez, con un suministro de agua periódico y restrictivo, como por ejemplo las comunas de Melipilla, Pomaire, El Monte. En la parte media de la cuenca se visualizan zonas donde el estrés hídrico es inminente quedando representados por las localidades de Isla de Maipo, Laguna de Aculeo, Talagante, Peñaflor y Padre Hurtado.

Este escenario considera la reducción en un 20% de las precipitaciones caídas a lo largo de toda la serie de tiempo y una disminución del orden del 40% de los cálculos de caudales medios mensuales por cuenca aportante, por lo tanto se esperaba que los caudales disponibles en cada zona de riego tuvieran una variación mayor a la arrojada por el modelo, visualizando espacialmente una mayor restricción en las zonas de riego. La escasa variación puede deberse en parte a que las modificaciones realizadas en este escenario son muy generales no afectando a los demás objetos que entregan agua al sistema conformado por cada zona de riego. Pese a esto, es claro que se produce un cambio que vuelve más restrictivas las condiciones para los requerimientos de los cultivos con este nuevo escenario.

DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO EN ESCENARIO OPERATIVIDAD DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA.

Los resultados arrojados por el modelo MAGIC al introducir dentro de su topografía como nuevo objeto, una central hidroeléctrica que tiene asociadas modificaciones en las captaciones puntuales en ciertos tramos de río, se pueden observar en el cuadro 16.

Cuadro 16. Fracción de la demanda suplida por zona de riego en periodo estival en Escenario de Inclusión Central Hidroeléctrica

COD_ZR	ABR	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	PROM EST
ZR-01	0.48	0.16	1.00	1.48	1.79	1.80	1.52	0.99	1.15
ZR-02	2.59	3.16	0.63	-8.22	-15.79	-16.32	-11.46	-1.34	-5.84
ZR-03	0.21	0.24	0.06	-0.21	-0.40	-0.40	-0.27	0.01	-0.09
ZR-04	0.86	0.49	1.29	1.63	1.61	1.58	1.34	1.21	1.25
ZR-05	0.08	0.11	0.07	-0.03	0.02	0.08	0.04	0.08	0.06
ZR-06	0.86	1.34	0.61	-1.65	-4.48	-4.61	-3.19	-0.17	-1.41
ZR-07	-0.57	0.22	-1.05	-2.98	-4.63	-4.75	-4.02	-2.10	-2.49
ZR-08	0.46	1.98	0.65	-1.67	-7.89	-10.46	-9.28	-2.96	-3.65
ZR-09	0.49	0.37	0.80	-0.81	-2.01	-2.24	-1.57	0.00	-0.62
ZR-10	0.17	0.16	0.11	-1.03	-2.01	-2.16	-1.72	-0.50	-0.87
ZR-11	-0.07	0.23	-0.29	-0.96	-1.79	-2.13	-1.92	-0.99	-0.99
ZR-12	0.10	0.27	0.33	0.44	0.35	0.20	0.14	0.09	0.24
ZR-13	0.05	0.09	0.19	0.28	0.27	0.22	0.19	0.11	0.18
ZR-14	0.36	0.61	1.09	1.39	1.31	1.05	0.92	0.67	0.92
ZR-15	-0.04	0.08	-0.09	-0.19	-0.33	-0.39	-0.47	-0.16	-0.20
ZR-16	-0.28	0.31	-0.71	-1.84	-2.67	-2.64	-2.22	-1.20	-1.41
ZR-17	0.13	0.16	0.19	-0.21	-1.00	-1.01	-0.52	0.24	-0.25
ZR-18	0.05	0.07	0.08	0.02	-0.29	-0.29	-0.10	0.10	-0.04
ZR-19	-0.27	-0.03	-0.64	-1.43	-1.99	-2.01	-1.66	-0.87	-1.11
ZR-20	-0.04	0.03	-0.12	-0.26	-0.36	-0.44	-0.48	-0.25	-0.24
ZR-21	-0.18	0.02	-0.37	-0.69	-0.95	-1.01	-0.90	-0.60	-0.58

COD_ZR	ABR	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	PROM EST
ZR-22	-0.42	0.12	-1.10	-2.43	-3.19	-3.29	-2.92	-1.82	-1.88
ZR-23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZR-24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZR-25	0.58	0.59	1.04	0.86	0.31	0.29	0.64	1.18	0.69
ZR-26	-0.02	-0.01	-0.05	-0.11	-0.16	-0.16	-0.13	-0.07	-0.09
ZR-27	0.42	0.27	0.58	0.84	0.87	0.77	0.85	0.71	0.66
ZR-28	0.05	0.06	0.07	-0.15	-0.40	-0.42	-0.29	0.01	-0.13
ZR-29	0.16	0.33	0.05	0.05	-0.72	-0.82	-0.85	-0.37	-0.27
ZR-30	0.33	0.34	0.50	0.55	-0.39	-0.45	0.10	0.63	0.20
ZR-31	0.15	0.09	0.22	0.23	0.13	0.11	0.16	0.29	0.17
ZR-32	0.07	0.07	0.16	0.27	-0.03	-0.05	0.20	0.17	0.11
ZR-33	0.14	0.18	0.23	0.32	0.27	0.21	0.26	0.23	0.23
ZR-34	-0.38	-0.03	-0.74	-1.84	-2.89	-2.84	-2.17	-1.15	-1.51
ZR-35	0.70	0.93	0.11	-1.58	-4.86	-5.50	-3.87	-0.65	-1.84
ZR-36	-0.27	0.02	-0.56	-1.26	-1.76	-1.82	-1.54	-0.89	-1.01
ZR-37	0.08	0.15	-0.19	-1.30	-1.99	-2.03	-1.61	-0.59	-0.93
ZR-38	-0.01	0.36	-0.27	-0.51	-1.10	-1.19	-0.80	-0.44	-0.50
ZR-39	-0.93	0.77	-2.92	-8.31	-12.93	-12.05	-9.73	-4.50	-6.33
ZR-40	0.12	0.80	-3.35	-8.04	-10.29	-9.95	-8.55	-4.37	-5.45
ZR-41	0.15	0.49	-1.83	-4.97	-6.73	-6.36	-5.46	-2.81	-3.44
ZR-42	1.37	1.30	2.29	-0.77	-3.26	-2.75	-1.51	1.51	-0.23
ZR-43	0.15	0.13	-0.09	-0.54	-0.84	-0.82	-0.69	-0.28	-0.37
ZR-44	3.84	3.06	6.23	0.56	-3.00	-3.09	-0.84	4.43	1.40
ZR-45	1.36	1.22	1.80	1.02	-0.81	-1.39	-0.43	1.73	0.56
ZR-46	0.01	0.03	0.02	-0.03	-0.09	-0.09	-0.04	0.02	-0.02

Fuente: Elaboración Propia.

El análisis comparativo entre caudal total disponible y caudal total demandado en el nuevo escenario de inclusión de un proyecto hidroeléctrico, arroja que 16 zonas de riego suplen sus demandas de agua durante la época de riego, las 30 restantes tienen un caudal total disponible inferior a lo necesario para satisfacer las necesidades netas de los cultivos.

En lo siguiente, se presentan como ejemplo los gráficos de las Zonas de Riego ZR-25 y ZR-39 en función del caudal total disponible y el caudal total demandado.

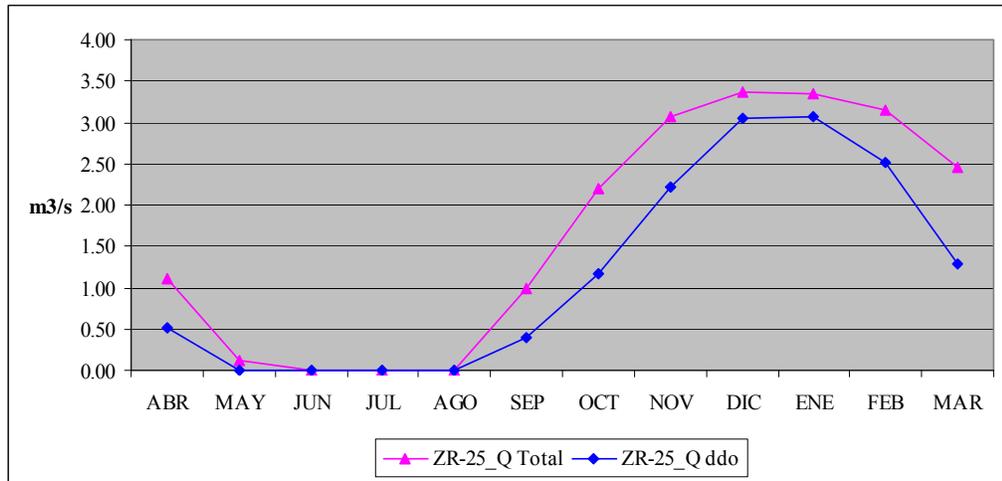


Figura 26. Comparación entre caudal total disponible v/s caudal total demandado para la zona de riego ZR-25 en escenario de inclusión de un proyecto hidroeléctrico

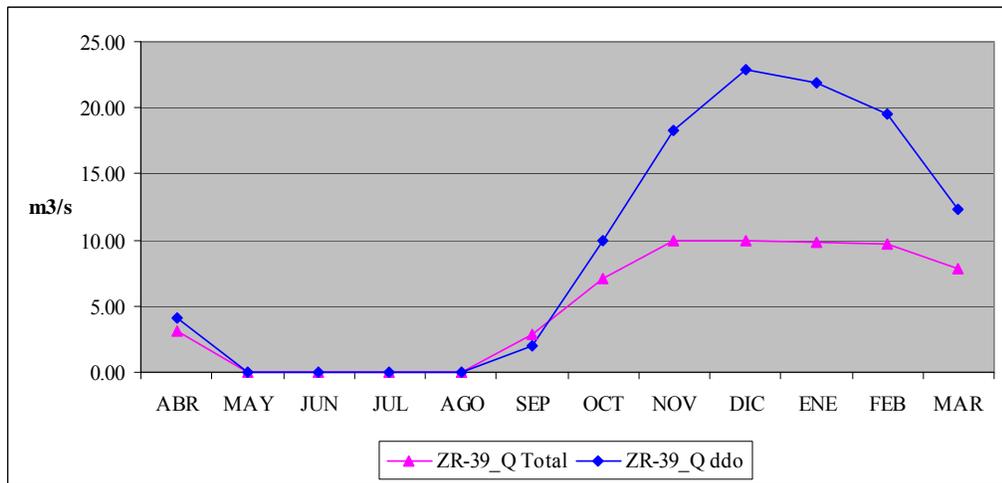


Figura 27. Comparación entre caudal total disponible v/s caudal total demandado para la zona de riego ZR-39 en escenario de inclusión de un proyecto hidroeléctrico

Al analizar todas las zonas de riego en este escenario sólo once zonas de riego tienen un caudal total disponible superior al caudal total demandado por las zonas de riego. A continuación se presenta el Cuadro 17 con la fracción de satisfacción de la demanda para el nuevo escenario.

Cuadro 17. Fracción de Satisfacción de la Demanda en Escenario de Inclusión Central Hidroeléctrica

COD_ZR	PROM EST	COD_ZR	PROM EST
ZR-01	1.00	ZR-24	1.00
ZR-02	0.46	ZR-25	1.00
ZR-03	0.79	ZR-26	0.53
ZR-04	1.00	ZR-27	1.00
ZR-05	0.98	ZR-28	0.60
ZR-06	0.73	ZR-29	0.72
ZR-07	0.42	ZR-30	0.89
ZR-08	0.76	ZR-31	1.00
ZR-09	0.70	ZR-32	0.97
ZR-10	0.47	ZR-33	1.00
ZR-11	0.47	ZR-34	0.42
ZR-12	1.00	ZR-35	0.68
ZR-13	1.00	ZR-36	0.17
ZR-14	1.00	ZR-37	0.45
ZR-15	0.68	ZR-38	0.85
ZR-16	0.50	ZR-39	0.58
ZR-17	0.71	ZR-40	0.27
ZR-18	0.79	ZR-41	0.23
ZR-19	0.10	ZR-42	0.75
ZR-20	0.66	ZR-43	0.46
ZR-21	0.13	ZR-44	0.85
ZR-22	0.22	ZR-45	0.88
ZR-23	1.00	ZR-46	0.71

Fuente: Elaboración Propia. A partir de los resultados arrojados por el Modelo

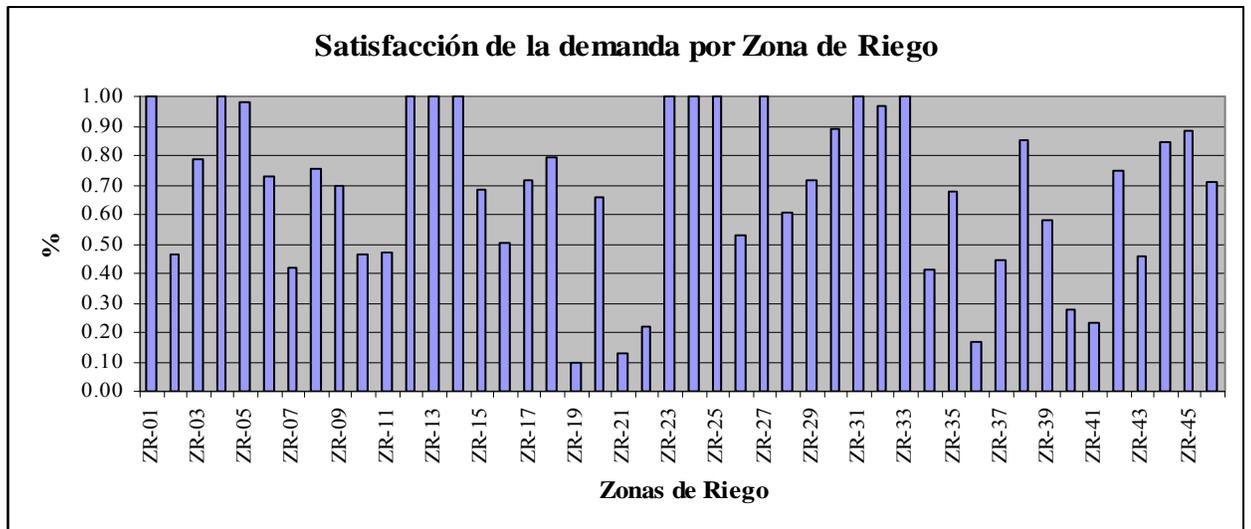


Figura 28. Porcentaje de Demanda Supleida en época estival por Zona de Riego, en escenario de nuevas central hidroeléctrica.

Al igual que en los resultados anteriores para poder evaluar este resultado se utilizó el indicador de satisfacción de la demanda utilizado en los escenarios anteriores.

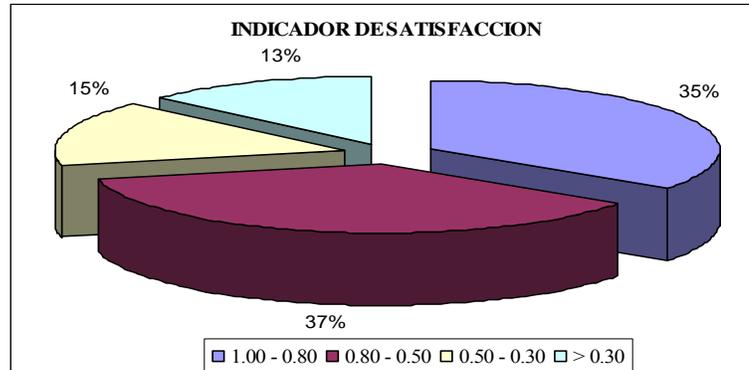


Figura 29. Porcentaje de zonas de riego por categoría del indicador de satisfacción, para situación con inclusión de centrales hidroeléctricas.

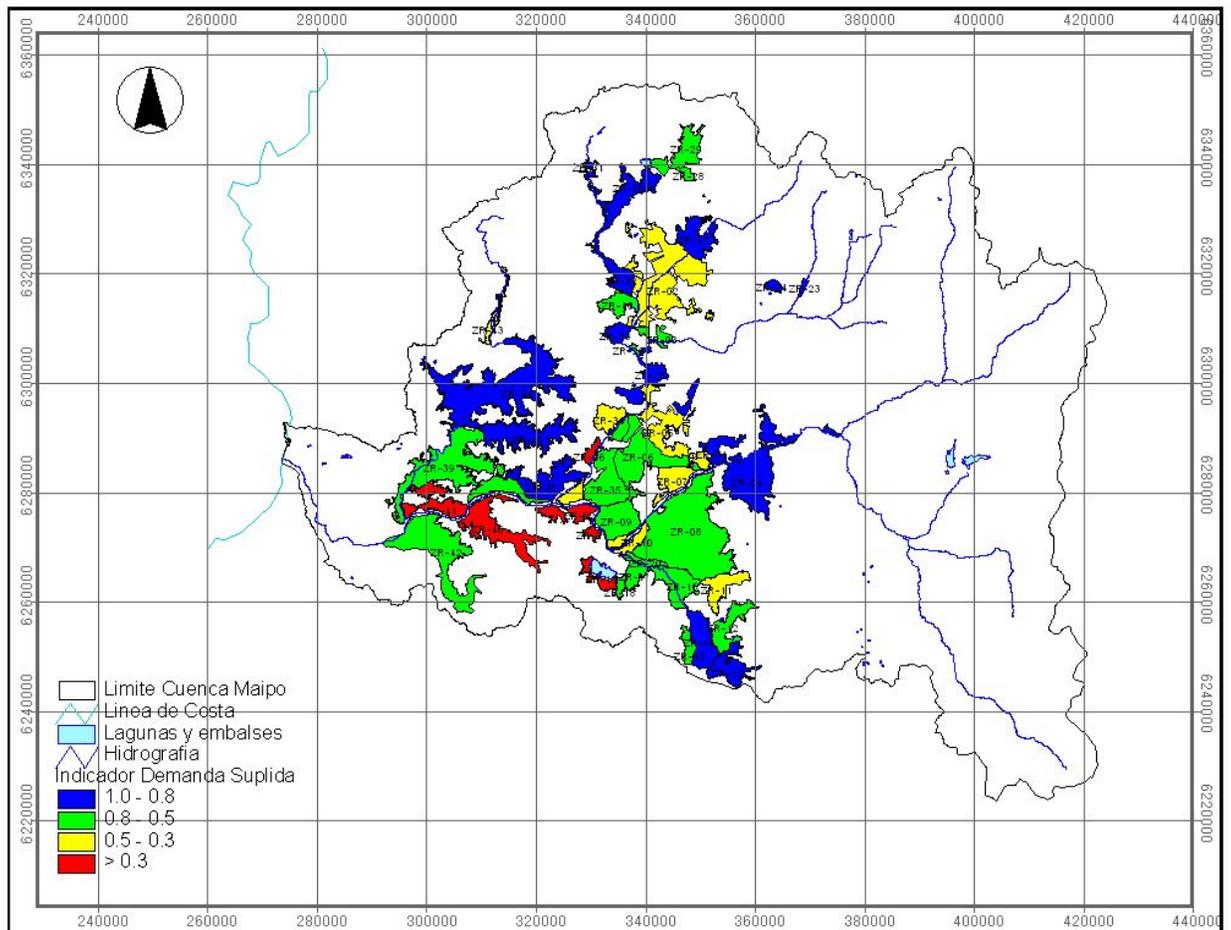


Figura 30. Satisfacción de la demanda por Zona de Riego Escenario central hidroeléctrica.

La ubicación de las obras de captación y túneles de conducción se encuentran en la parte alta de la cuenca por lo que no influiría en las zonas de riego que se ubican aguas debajo de la intervención provocada por la Hidroeléctrica. Si bien es cierto hay una disminución de caudales en los ríos en las zonas comprendidas entre las captaciones y las descargas, el efecto no se expande fuera de la zona de influencia del proyecto. Dado lo anterior, no es posible apreciar efectos notorios de este escenario sobre las condiciones actuales de la cuenca.

IMPACTO VARIACIÓN DE SATISFACCIÓN DE DEMANDAS DE LOS CULTIVOS POR ZONAS DE RIEGO, ENTRE ESCENARIO BASE Y CAMBIO CLIMÁTICO.

Realizada la comparación entre la situación actual y el escenario de cambio climático es posible observar una disminución del caudal total disponible en prácticamente todas las zonas de riego tal como lo muestra la Figura 31.

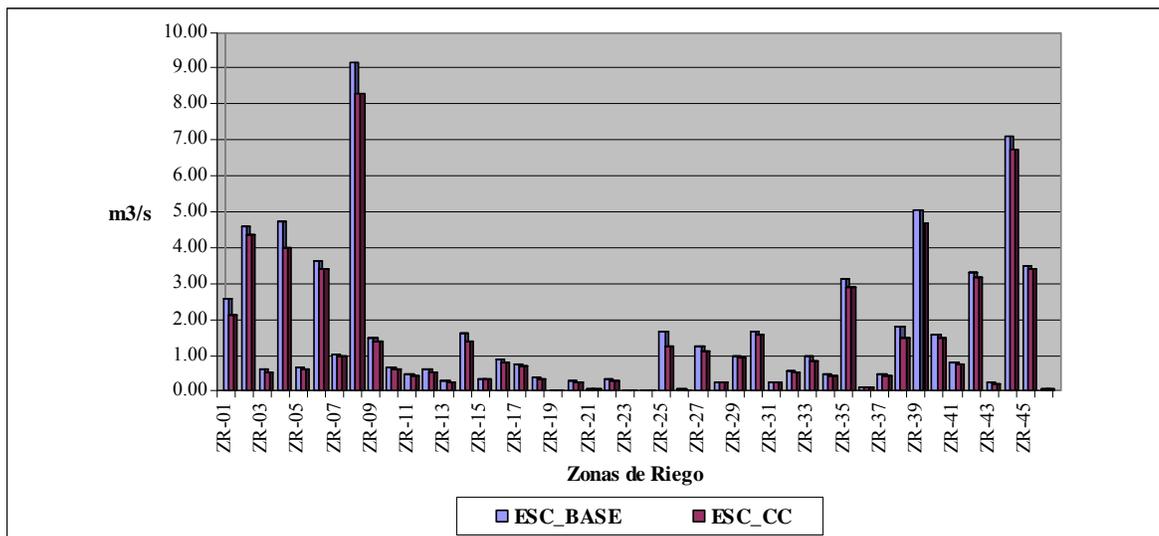


Figura 31. Comparación de caudal total disponible entre Escenario Base y Escenario Cambio Climático

Así mismo se puede apreciar un aumento del caudal total demandado, esto se debe a que las necesidades netas mensuales de los cultivos aumentan debido al aumento de temperatura y evapotranspiración requiriendo mayor cantidad de agua para satisfacer sus necesidades. En la Figura 29 se aprecia este aumento entre ambos escenarios para prácticamente todas las zonas de riego.

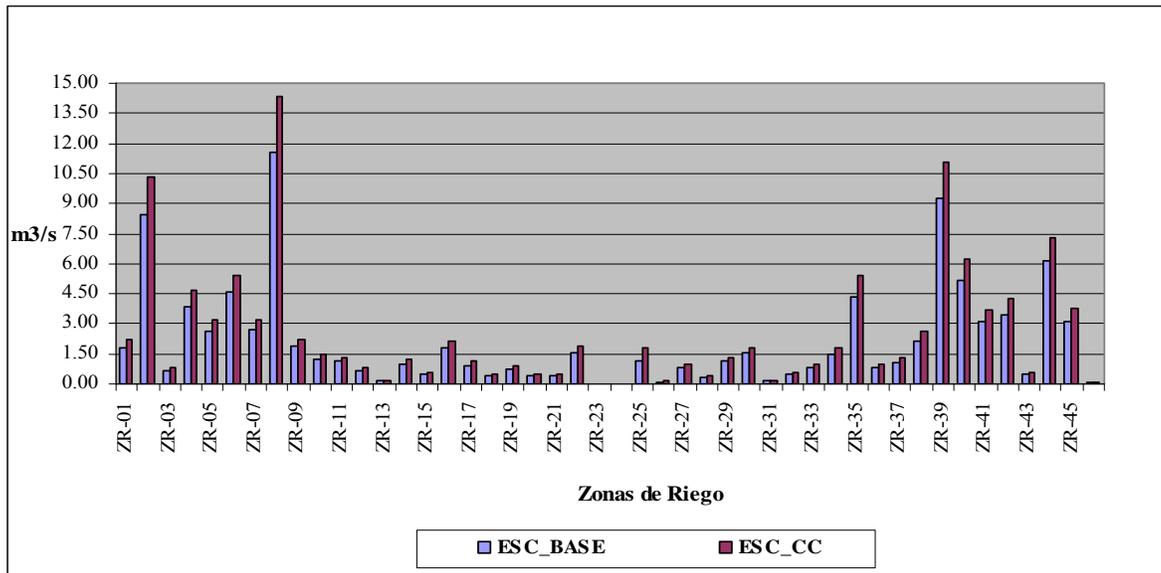


Figura 32. Comparación caudal total demandado entre Escenario Base y Escenario Cambio Climático.

Al disminuir el caudal total disponible y por su parte aumentar el caudal demandado, se produce una variación mayor sobre la satisfacción de las demandas. La Figura 30 muestra los resultados de la comparación de la satisfacción de la demanda para cada zona de riego en los escenarios situación actual y cambio climático.

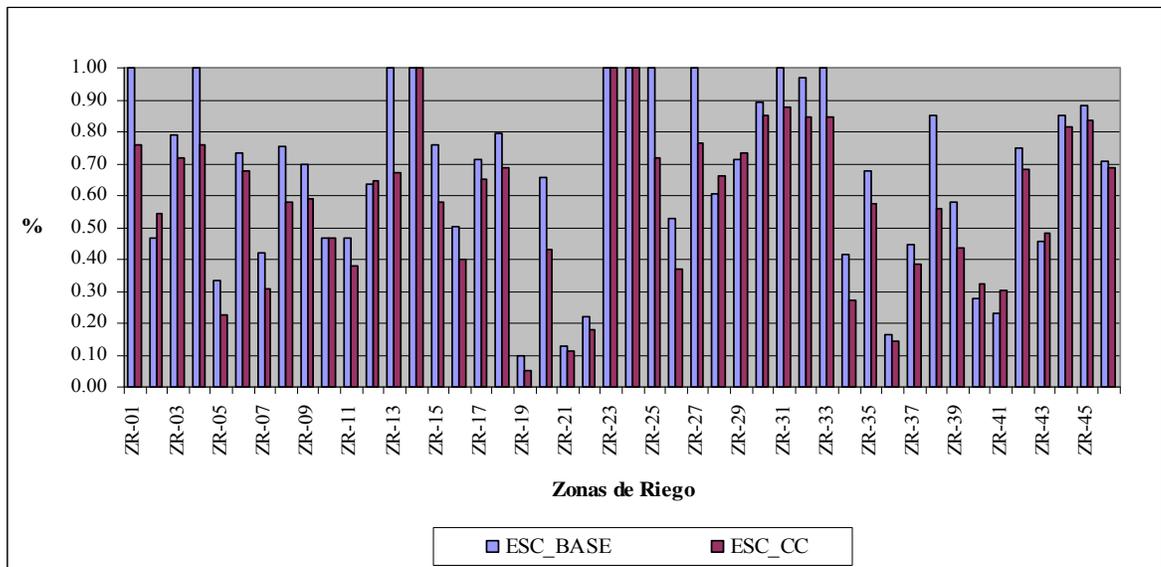


Figura 33. Satisfacción Demanda entre Escenario Base y Escenario Cambio Climático

Resulta interesante que en algunos sectores la satisfacción de la demanda aumenta, lo que se debe fundamentalmente al efecto de las cuencas nivo-pluviales que cambiaron de régimen, produciéndose un aumento en la escorrentía, lo que se traduce en mayor disponibilidad de agua en algunos sectores.

Siguiendo los análisis realizados anteriormente podemos observar aquellas zonas que sufren un cambio importante, mediante el indicador de satisfacción. De esto se desprende que catorce zonas de riego modifican sus restricciones, tal como se aprecia en el siguiente cuadro.

Cuadro 18. Comparación indicador de satisfacción de la demanda media en temporada estival entre situación actual y cambio climático.

Rango (%)	Indicador	Escenario Base		Escenario Cambio Climático	
		Cantidad de ZR	%	Cantidad de ZR	%
1.00 - 0.80	1	15	32.61	9	19.57
0.80 - 0.50	2	17	36.96	20	43.48
0.50 - 0.30	3	8	17.39	11	23.91
> 0.30	4	6	13.04	6	13.04

Fuente: Elaboración Propia.

De este análisis podemos desprender que quince zonas de riego modifican su rango del indicador, seis de ellas pasan del rango 1 a 2, es decir limitan progresivamente su satisfacción de las demandas netas de los cultivos, estas zonas corresponden a ZR: 01, 04, 13, 25, 27, 38. Cuatro quedan por debajo del 50% de satisfacción, en una condición de alta restricción para los cultivos, las zonas que se ven afectadas por esta variación son ZR: 16, 20, 26, 39. Luego se reconocen dos zonas que varían desde el indicador 3 a 4 pasando desde una alta restricción a una situación crítica donde el estrés hídrico provoca la muerte de los cultivos. Existen tres zonas de riego que mejoran sus condiciones la zona de riego ZR-02 aumenta de 3 a 2 y las zonas ZR-40 y ZR-41 suben de 4 a 3.

Esto se puede observar en la Figura 31, donde en celeste están representadas aquellas zonas que pasan de 1 a 2, en amarillo aquellas zonas que pasan de 2 a 3, en rojo aquellas más afectadas pasando de 3 a 4. También se visualiza verde la ZR-02 que aumenta de 3 a 2 y en naranja las zonas 40 y 41 pasando de una condición crítica de estrés hídrico a una condición de alta restricción con suministro restringido de agua.

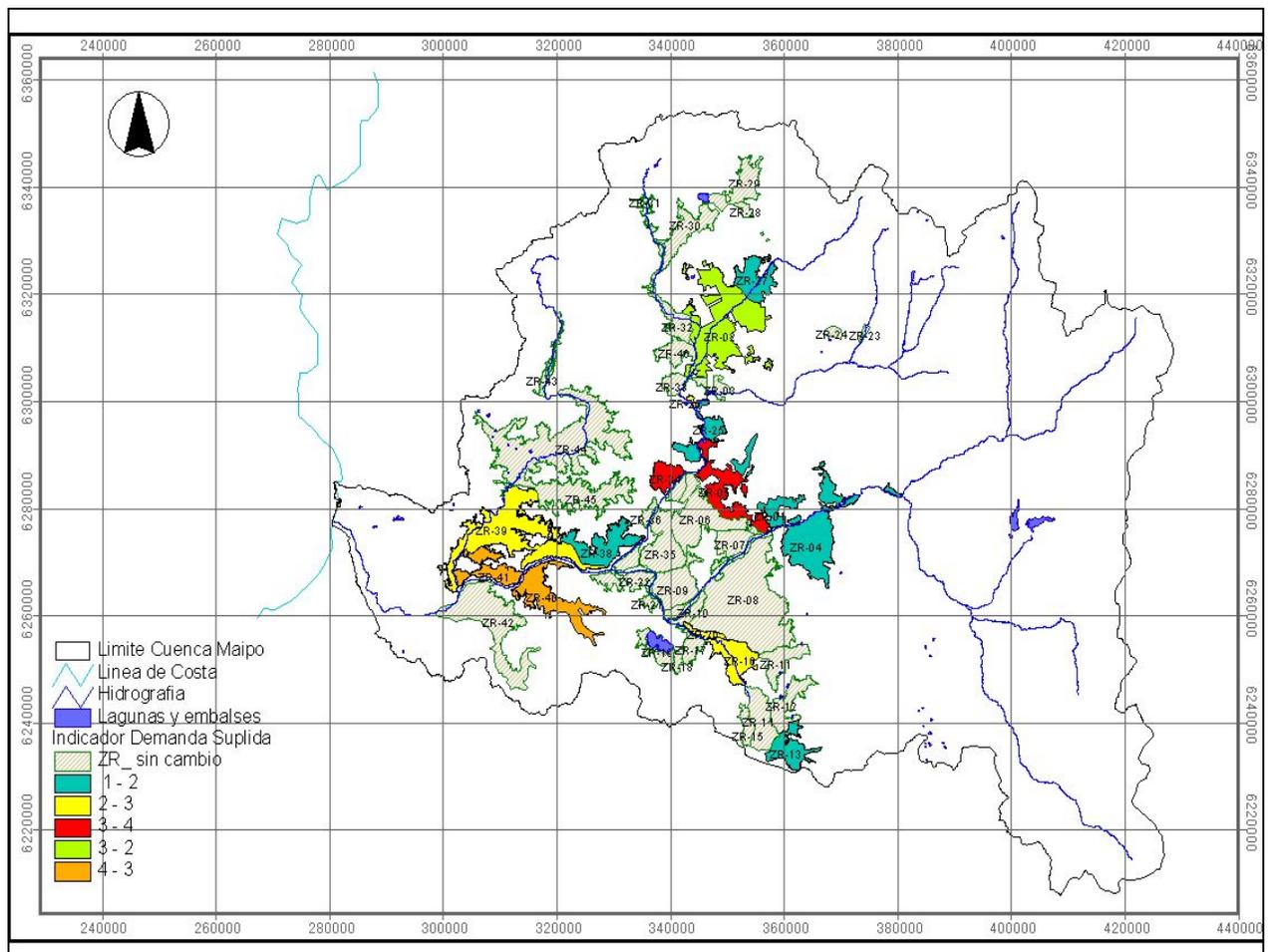


Figura 34. Variación de la Satisfacción de la Demanda entre Escenario Base y Escenario Cambio Climático

Esta cartografía permite visualizar cuales son los sectores donde se agudizan los problemas de escasez, principalmente la parte media y baja de la cuenca es donde se pueden apreciar los mayores cambios. Sin embargo es posible notar que muchas zonas se mantienen dentro del mismo rango de satisfacción de sus demandas, claramente con caudales disponibles disminuidos y demandas netas mensuales de sus cultivos superiores, pero sin el efecto de mayores cambios visuales ni espaciales.

IMPACTO VARIACIÓN DE SATISFACCIÓN DE DEMANDAS DE LOS CULTIVOS POR ZONAS DE RIEGO, ENTRE ESCENARIO BASE E INCLUSIÓN DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO.

Al igual que para el caso anterior se compara el caudal total disponible, el demandado y finalmente la satisfacción de las demandas de agua para regadío, entre el escenario base y lo resultado de la modelación con centrales hidroeléctricas, de esta comparación se obtiene un nulo cambio de las demandas de agua como es de esperarse dado que la inclusión de un proyecto hidroeléctrico no implica un cambio en las demandas de agua de la cuenca. Sólo se observan pequeños cambios en la oferta de agua, tal como se aprecia en la figura 32 donde en algunos casos como la ZR-02, ZR-15 y ZR-44 existe una disminución del 1%.

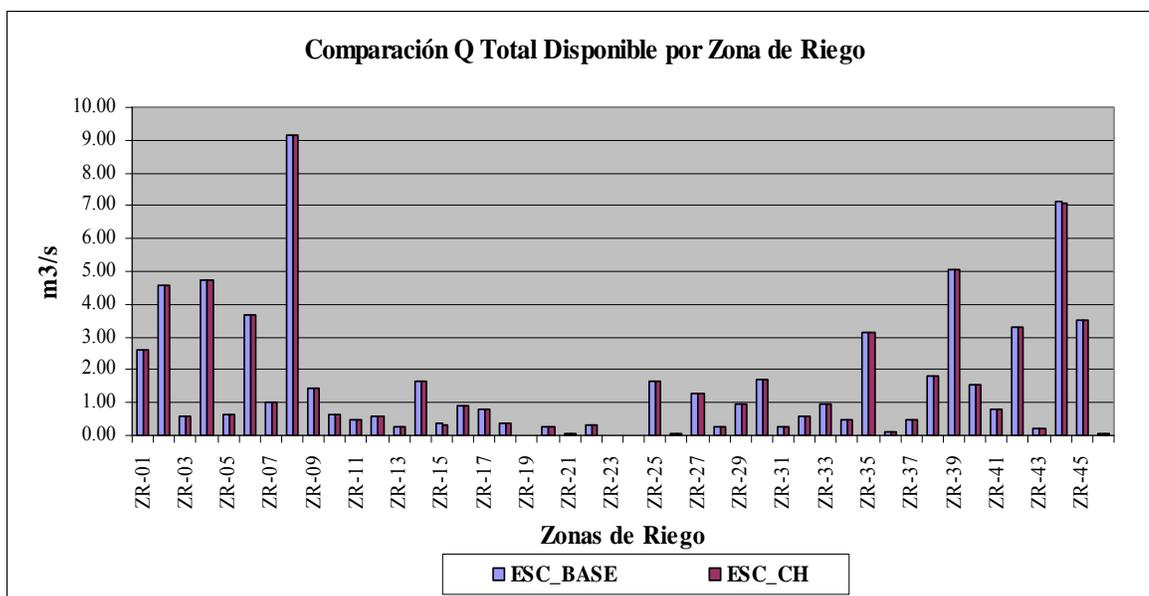


Figura 35. Caudal Total Disponible entre Escenario Base y Escenario Central Hidroeléctrica

Tal como se explicó anteriormente este escenario sólo influye en la inclusión de nuevos Nodos para captación y descarga de aguas en los tramos de río, lo que podría afectar la oferta del recurso en la cuenca, sin embargo la ubicación del proyecto en la parte alta de la cuenca no tiene mayor efecto sobre la disponibilidad de agua para regadío.

Con respecto a los caudales totales demandados, estos resultados son esperables ya que las modificaciones realizadas para este escenario no contemplan ningún tipo de cambio en las necesidades netas mensuales de los cultivos, ni cambios en temperaturas ni evapotranspiración potencial, por lo que se predecía la mantención de las demandas igual que en el escenario base.

En este caso, el Cuadro 19 muestra los resultados de la comparación de los escenarios, la variación en la satisfacción de las demandas y el coeficiente de impacto del cambio de la satisfacción de demandas de cultivos anual para el periodo de estiaje. Con este cuadro queda de manifiesto la escasa intervención que tiene la inclusión de centrales hidroeléctricas en la parte alta de la cuenca del Maipo sobre la satisfacción de las demandas de agua para riego, quedando en evidencia que sólo la ZR-15 denota una disminución análogamente por que disminuye su caudal total disponible.

Cuadro 19. Variación Porcentaje de Satisfacción de la Demanda entre Escenarios Base y Central Hidroeléctrica.

COD_ZR	% SATISFACCION DE LA DEMANDA		VARIACION	
	ESC_BASE	ESC_CH	m3/s	Ci
ZR-01	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-02	0.47	0.46	0.00	1.00
ZR-03	0.79	0.79	0.00	1.00
ZR-04	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-05	0.34	0.34	0.00	1.00
ZR-06	0.73	0.73	0.00	1.00
ZR-07	0.42	0.42	0.00	1.00
ZR-08	0.76	0.76	0.00	1.00
ZR-09	0.70	0.70	0.00	1.00
ZR-10	0.47	0.47	0.00	1.00
ZR-11	0.47	0.47	0.00	1.00
ZR-12	0.64	0.64	0.00	1.00
ZR-13	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-14	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-15	0.76	0.68	-0.07	0.90
ZR-16	0.50	0.50	0.00	1.00
ZR-17	0.71	0.71	0.00	1.00
ZR-18	0.79	0.79	0.00	1.00
ZR-19	0.10	0.10	0.00	1.01
ZR-20	0.66	0.66	0.00	1.00
ZR-21	0.13	0.13	0.00	1.00
ZR-22	0.22	0.22	0.00	1.00
ZR-23	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-24	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-25	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-26	0.53	0.53	0.00	1.00
ZR-27	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-28	0.60	0.60	0.00	1.00
ZR-29	0.72	0.72	0.00	1.00
ZR-30	0.89	0.89	0.00	1.00
ZR-31	1.00	1.00	0.00	1.00

COD_ZR	% SATISFACCION DE LA DEMANDA		VARIACION	
	ESC_BASE	ESC_CH	m3/s	Ci
ZR-32	0.97	0.97	0.00	1.00
ZR-33	1.00	1.00	0.00	1.00
ZR-34	0.42	0.42	0.00	1.00
ZR-35	0.68	0.68	0.00	1.00
ZR-36	0.17	0.17	0.00	1.00
ZR-37	0.45	0.45	0.00	1.00
ZR-38	0.85	0.85	0.00	1.00
ZR-39	0.58	0.58	0.00	1.00
ZR-40	0.27	0.27	0.00	1.00
ZR-41	0.23	0.23	0.00	1.00
ZR-42	0.75	0.75	0.00	1.00
ZR-43	0.46	0.46	0.00	1.00
ZR-44	0.85	0.85	0.00	1.00
ZR-45	0.88	0.88	0.00	1.00
ZR-46	0.71	0.71	0.00	1.00

Fuente: Elaboración Propia. A partir de los resultados arrojados por el Modelo

A continuación se presenta el gráfico correspondiente a este resultado, sin embargo podemos apreciar que no hay mayores variaciones entre un escenario y otro.

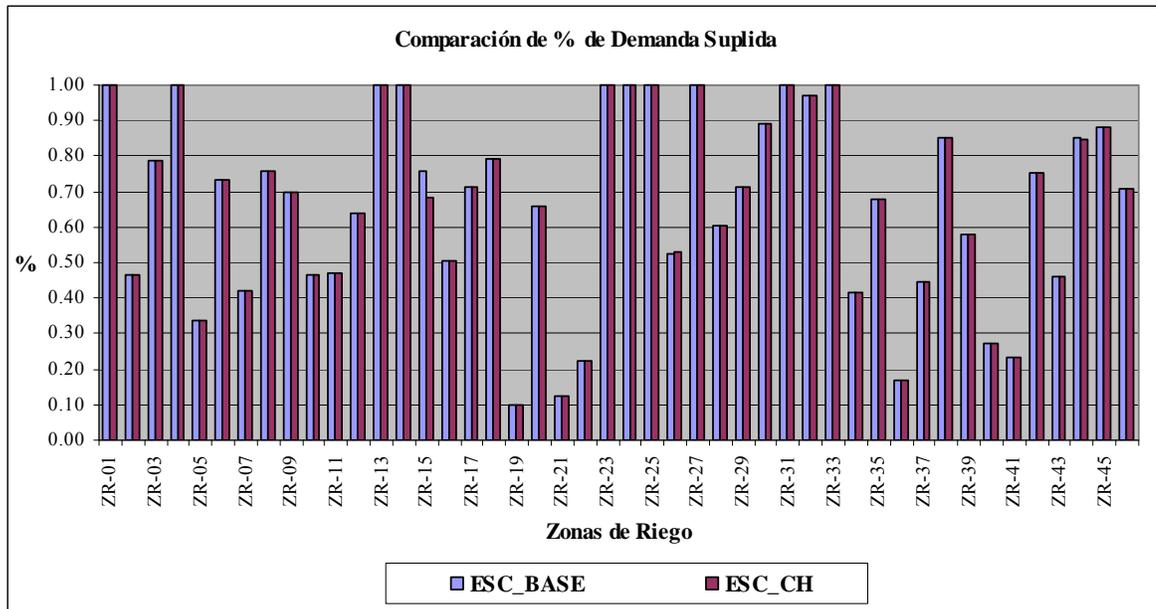


Figura 36. Satisfacción de la Demanda entre Escenario Base y Escenario Central Hidroeléctrica

Obteniendo este resultado se simplifica el siguiente análisis, dado que no existen variaciones significativas en las zonas de riego respecto al indicador de satisfacción lo que permite indicar que entre el escenario base y el escenario de inclusiones de centrales hidroeléctricas no existen diferencias posibles de apreciar espacialmente. Por lo que no se hace necesario generar una nueva cartografía para estos efectos.

CONCLUSIONES

El uso de modelos de simulación hidrológica como MAGIC, permite operar con balances generales el comportamiento de la cuenca, logrando una buena representatividad de la distribución de los recursos hídricos dentro de la misma, principalmente dado por la extensa cobertura de estaciones de medición y de datos disponibles para alimentar el modelo.

MAGIC, es una herramienta válida para balances en periodos mensuales o superiores, por lo que no permite obtener resultados de simulaciones diarias o específicas como por ejemplo crecidas o lluvias muy intensas que pudiesen influir en la satisfacción de las demandas, lo que limita su utilidad en estos determinados casos.

A través de la simulación de las condiciones hidrológicas actuales, es posible apreciar que la demanda agrícola no está satisfecha en gran parte de la cuenca, existiendo mayor problemática de escasez en la parte media y baja de la cuenca, lo cual puede deberse a la mayor intervención y crecimiento del entorno urbano y su consecuente alteración hacia el sistema hídrico. Con el uso de este modelo y de los sistemas de información geográfica es posible obtener una imagen de esta deficiencia en términos de magnitudes de déficit, posibilitando además su expresión espacial, lo que debiera ser útil para los tomadores de decisiones.

La utilización de este tipo de modelos de simulación facilita la construcción de escenarios específicos y con ello evaluar los posibles impactos que se esperarían que ocurriesen, esto se logra mediante el manejo de las bases de datos y la inclusión de información que se requiera para crear las situaciones diferenciales. Es así como este trabajo mostró que en un escenario de cambio climático las condiciones de escasez se agudizarían y por otro lado en el escenario de la introducción de una central hidroeléctrica como la simulada no presenta variaciones respecto de las condiciones normales.

El escenario de Cambio Climático propuesto en este trabajo, se limita a variaciones promedio de precipitación y temperatura pudiendo resultar bastante general o dejar de tomar en cuenta aspectos importantes, sin embargo el modelo arroja resultados que vuelven más críticas las condiciones en la cuenca, disminuyendo los caudales totales disponibles y a su vez aumentando las demandas netas mensuales de los cultivos produciendo una situación de mayor restricción hídrica en la cuenca.

Por otra parte el escenario de inclusión de un proyecto hidroeléctrico no tiene mayores repercusiones en las condiciones de disponibilidad de agua en las zonas de riego, dado que la mayor variación es sufrida en los tramos de río donde se emplaza el proyecto sin intervenir en áreas ajenas a las zonas de toma y descarga. Por lo tanto los resultados de caudales disponibles y satisfacción de las demandas en las zonas de riego no tienen mayores modificaciones con respecto a la situación base.

BIBLIOGRAFÍA

ALDUNCE, P.; GONZÁLEZ, M. 2009. Desastres Socio-Naturales Asociados al Clima con Efectos en la Agricultura y Medio Rural en Chile. Facultad de Agronomía. Universidad de Chile. Informe Borrador Final. Santiago, Chile. 117 p.

CONAMA. 1999. Primera Comunicación Nacional bajo la Convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 153 p.

CONAMA. 2006a. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. [en línea] <http://www.conama.cl/portal/1301/articles-39442_pdf_Estudio_texto.pdf> [consulta: 15-05-2008].

CONAMA. 2006b. Estrategia nacional de Cambio climático. Comité Nacional Asesor sobre Cambio Climático Global. [en línea] <http://www.sinia.cl/1292/articles-35209_estr_cc.pdf> [consulta: 15-05-2008].

CONAMA. 2008. Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos de Chile frente a Escenarios de Cambio Climático. Centro de Agricultura y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía, Universidad de Chile. Resumen Ejecutivo. Santiago, Chile. 7 p.

CONIC-BF. 2007. Bases para la Elaboración de un Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Maipo. Resumen Ejecutivo. Santiago, Chile. 47 p.

DGA. 1999. Política Nacional de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 58 p. [en línea] <http://www.dga.cl/otros/documentos/Politica_Recursos_Hidricos.pdf> [consulta: 12-08-2008].

DGA. 2003. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Maipo. Informe Técnico. S.D.T N°145. Santiago, Chile. 117 p.

DGA. 2004a. Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 201 p.

DGA. 2004b. Recursos hídricos en Chile, Desafíos para la Sustentabilidad, Programa Chile Sustentable. Santiago, Chile. 172 p. [en línea] <<http://www.dga.cl/otros/publicacioneslinea/archivos/caract3.pdf>> [consulta: 16-05-2008].

DGA. 2005a. MAGIC: Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas. Manual del Usuario. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 191 p.

DGA. 2005b. MAGIC: Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas. Manual Técnico. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 191 p.

DGA. 2007a. Bases para la formulación de un Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del río Maipo. Etapa I. Diagnóstico. AC Ingenieros consultores, Santiago, Chile.

DGA. 2007b. Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Maipo. Etapa II. Actualización del modelo de operación del sistema y Formulación del Plan. Adendum Modelo MAGIC Maipo. Luis Arrau del Canto Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego, Santiago, Chile.

DGA. 2007c. Actualización de la Situación Actual y Futura de los Recursos Hídricos. Zona II, V a XII y Región Metropolitana. Informe Final. AC Ingenieros consultores. Santiago, Chile. 985 p.

DGA. 2008. Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Maipo. Informe Final. Luis Arrau del Canto Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego, Santiago, Chile.

DGA. 2009. Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Maipo. Adendum Estocástico. Luis Arrau del Canto Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego. Santiago, Chile.

FAO. 2007. Afrontar la Escasez de Agua. Sala de Prensa, Entrevista con el Director General de la FAO, Dr. Jacques Diouf. [en línea] <<http://www.fao.org/Newsroom/es/focus/2007/1000521/index.html>> [consulta: 6-10-2008].

INE. 2007. Censo Agropecuario. [en línea] <<http://www.censoagropecuario.cl/>> [consulta: 06-05-2008].

HISPAGUA. 2010. Indicadores de Sequía. Sistema Español de información sobre el agua. [en línea] <<http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-10/INDICADORES-DE-SEQUIA.pdf>> [consulta: 19-05-2010].

MATUS, N. 2004. Recursos Hídricos en Chile: Desafíos para la Sustentabilidad. Programa Chile Sustentable. Santiago, Chile. [en línea] <<http://www.fnca.eu/fnca/america/docu/1628.pdf>> [consulta: 16-05-2008].

MONTT, J. 2006. Caracterización de la precipitación mensual y de los aportes naturales para el modelo de operación superficial del plan director de la cuenca del Río Maipo. Santiago, Chile. 96 p.

ONU/WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. 2003. Agua para todos, agua para la vida. In: 1^{er} Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. París, Nueva York y Oxford. 22 marzo 2003. UNESCO y Berghahn Books. pp. 576.

ONU/WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. 2006. El Agua, una responsabilidad compartida. In: 2^{do} Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. París, Nueva York y Oxford. 22 marzo 2006. UNESCO y Berghahn Books. pp. 600.

SINIA. 1999. La Ciencia del Cambio Climático. [en línea] <<http://www.sinia.cl/1292/article-37761.html>> [consulta: 26-05-2008].

APÉNDICES

APÉNDICE I: DETERMINACIÓN DE ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN SOBRE LAS ZONAS DE RIEGO

El Apéndice I presenta por extenso los resultados obtenidos a partir del procedimiento seguido para calcular la estadística media mensual sobre cada zona de riego, como primer paso se obtienen los porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas sobre las zonas de riego, mediante el método de los polígonos de Thiessen, el cual determina la influencia directa de 22 estaciones. En el Cuadro 23 se presentan dichos porcentajes.

De la misma manera se presentan en el Cuadro 24 los coeficientes de cada estación por zona de riego, estos coeficientes se calculan con el porcentaje de influencia obtenido con el método de los polígonos de Thiessen, multiplicado por la razón entre la precipitación media de la zona de riego y la precipitación media de la estación influyente. Este paso se realiza para posteriormente calcular la estadística de precipitación sobre la zona de riego, que mediante la técnica de trasposición de precipitaciones postula que la estadística de una determinada zona esta dada por el efecto combinado de la o las estaciones influyentes en ella, siendo el resultado de la sumatoria del coeficiente multiplicado por la serie estadística de la estación.

Finalmente en el Cuadro 25 se presenta un resumen con las zonas de riego y el valor promedio mensual de las precipitaciones, calculadas con el procedimiento anterior.

Cuadro 21. Coeficientes por estación para cálculo de precipitaciones por zona de riego

Zona de Riego		Est #1			Est #2			Est #3			Est #4		
Cod_ZR	P _{50%}	P _{50%}	α (%)	Coef									
ZR-01	380	449	44,1	0,374	598	28,2	0,179	369	19,6	0,02	542	8,0	0,056
ZR-02	300	454	72,5	0,479	270	20,3	0,225	306	7,2	0,071	-	-	-
ZR-03	290	306	100,0	0,948	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-04	480	449	94,2	1,007	542	5,8	0,052	-	-	-	-	-	-
ZR-05	340	254	81,7	1,094	449	13,1	0,099	369	5,1	0,047	-	-	-
ZR-06	360	254	61,5	0,872	292	34,3	0,423	449	4,2	0,034	-	-	-
ZR-07	390	292	41,3	0,551	449	35,6	0,309	254	23,1	0,355	-	-	-
ZR-08	450	400	50,4	0,568	449	44,5	0,446	366	5,1	0,063	-	-	-
ZR-09	440	292	55,2	0,832	400	44,8	0,494	-	-	-	-	-	-
ZR-10	470	400	100,0	1,177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-11	470	366	67,9	0,872	449	32,1	0,336	-	-	-	-	-	-
ZR-12	520	366	94,9	1,349	449	5,1	0,059	-	-	-	-	-	-
ZR-13	540	366	100,0	1,475	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-14	420	366	100,0	1,148	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-15	500	366	100,0	1,366	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-16	500	366	92,8	1,268	400	7,2	0,090	-	-	-	-	-	-
ZR-17	500	366	62,3	0,851	400	37,7	0,472	-	-	-	-	-	-
ZR-18	500	366	100,0	1,366	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-19	500	366	64,0	0,875	500	36,0	0,450	-	-	-	-	-	-
ZR-20	490	400	100,0	1,227	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-21	470	400	88,1	1,036	452	11,9	0,192	-	-	-	-	-	-
ZR-22	420	292	80,5	1,157	452	19,5	0,182	-	-	-	-	-	-
ZR-23	420	758	100,0	0,554	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-24	360	758	100,0	0,475	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-25	300	254	66,8	0,789	306	21,7	0,212	369	11,5	0,094	-	-	-
ZR-26	290	306	100,0	0,948	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-27	290	270	80,4	0,864	454	19,6	0,125	-	-	-	-	-	-
ZR-28	290	263	100,0	1,103	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-29	290	263	92,0	1,014	424	8,0	0,055	-	-	-	-	-	-
ZR-30	300	424	72,4	0,513	347	21,4	0,185	454	6,1	0,041	-	-	-
ZR-31	340	347	87,3	0,855	454	12,7	0,095	-	-	-	-	-	-
ZR-32	300	454	100,0	0,661	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-33	300	481	74,6	0,465	306	13,6	0,133	454	11,8	0,078	-	-	-
ZR-34	340	254	100,0	1,339	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-35	390	292	85,5	1,142	254	14,5	0,223	-	-	-	-	-	-
ZR-36	370	292	91,4	1,159	254	8,6	0,125	-	-	-	-	-	-

Zona de Riego		Est #1			Est #2			Est #3			Est #4		
Cod_ZR	P _{50%}	P _{50%}	α (%)	Coef									
ZR-37	400	292	100,0	1,370	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-38	390	292	56,4	0,753	452	25,4	0,219	308	18,2	0,231	-	-	-
ZR-39	400	281	43,1	0,613	244	40,4	0,663	308	9,1	0,118	452	7,5	0,066
ZR-40	400	454	78,0	0,691	281	22,0	0,313	-	-	-	-	-	-
ZR-41	400	244	51,2	0,839	281	48,8	0,695	-	-	-	-	-	-
ZR-42	380	403	41,0	0,387	281	25,9	0,350	244	25,8	0,401	452	7,3	0,062
ZR-43	400	481	90,7	0,755	481	9,3	0,077	-	-	-	-	-	-
ZR-44	380	481	38,2	0,302	481	34,8	0,275	308	27,0	0,333	-	-	-
ZR-45	380	308	100,0	1,234	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZR-46	300	454	100,0	0,661	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuadro 22. Precipitación media mensual por zona de riego

Cod_ZR	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Annual
ZR-01	11,3	36,8	55,5	57,0	60,3	58,4	49,6	26,5	11,7	3,7	2,8	3,5	377,0
ZR-02	14,5	51,6	74,9	70,7	46,0	21,7	8,6	5,6	1,5	0,4	0,5	3,6	299,5
ZR-03	16,2	46,6	73,4	67,3	44,9	22,3	9,6	7,7	2,0	0,5	0,6	4,0	295,2
ZR-04	23,8	68,0	97,5	89,1	72,4	49,9	27,4	17,7	5,6	3,1	1,8	6,1	462,4
ZR-05	16,5	45,8	86,9	77,2	46,0	24,2	11,4	7,4	0,5	0,5	0,2	4,7	321,2
ZR-06	18,5	56,8	86,4	84,4	49,8	27,7	10,9	7,1	1,1	0,3	0,1	5,0	348,1
ZR-07	20,8	66,0	86,2	87,3	56,4	33,9	13,0	8,8	2,2	0,8	0,4	5,3	381,0
ZR-08	20,5	75,0	106,9	123,8	70,6	41,6	11,9	13,0	4,8	1,1	0,9	4,1	474,3
ZR-09	21,7	86,2	100,0	128,9	68,7	40,5	8,3	9,9	4,6	0,0	0,2	4,4	473,4
ZR-10	19,2	85,6	121,1	165,7	78,1	43,7	5,6	13,7	6,8	0,0	0,6	2,6	542,7
ZR-11	17,4	72,5	107,3	97,4	65,8	35,8	12,6	9,9	2,4	1,1	1,0	4,7	428,0
ZR-12	16,1	81,1	121,4	110,4	71,0	35,7	10,5	9,1	2,2	0,6	0,9	4,5	463,4
ZR-13	16,0	84,3	126,6	115,2	73,4	36,4	10,2	9,0	2,2	0,5	0,9	4,6	479,3
ZR-14	12,5	65,6	98,5	89,6	57,1	28,3	7,9	7,0	1,7	0,4	0,7	3,5	372,8
ZR-15	14,9	78,1	117,3	106,6	67,9	33,7	9,4	8,4	2,1	0,5	0,9	4,2	443,8
ZR-16	15,3	79,0	118,1	111,6	69,0	34,6	9,2	8,8	2,4	0,4	0,8	4,1	453,4
ZR-17	17,0	83,0	121,6	132,9	73,7	38,5	8,1	10,7	4,0	0,3	0,8	3,7	494,2
ZR-18	14,9	78,1	117,3	106,6	67,9	33,7	9,4	8,4	2,1	0,5	0,9	4,2	443,8
ZR-19	16,9	82,7	121,4	131,7	73,4	38,3	8,2	10,6	3,9	0,3	0,8	3,7	491,9
ZR-20	20,0	89,2	126,3	172,7	81,5	45,6	5,8	14,3	7,1	0,0	0,6	2,8	565,8
ZR-21	20,1	87,0	118,0	159,6	77,1	43,6	6,3	13,1	6,4	0,0	0,5	3,1	534,7
ZR-22	22,5	82,7	88,8	105,0	60,2	36,5	9,9	7,1	3,6	0,0	0,1	5,2	341,9
ZR-23	14,0	49,0	85,7	79,3	56,0	30,1	14,2	10,9	2,0	0,4	0,7	4,4	346,7
ZR-24	12,0	42,0	73,4	68,0	48,0	25,8	12,2	9,4	1,7	0,4	0,6	3,8	297,2
ZR-25	14,6	42,0	77,6	69,8	41,7	20,9	9,4	6,5	0,6	0,3	0,2	4,2	287,6
ZR-26	16,2	46,6	73,4	67,3	44,9	22,3	9,6	7,7	2,0	0,5	0,6	4,0	295,2
ZR-27	14,8	52,1	72,5	69,9	47,6	23,6	9,7	6,3	1,8	0,2	0,5	3,9	303,0
ZR-28	11,7	43,6	73,2	75,1	40,0	20,2	7,6	7,4	1,0	0,2	0,3	3,3	283,5
ZR-29	13,3	50,8	75,1	73,0	43,9	25,4	8,3	4,0	0,7	0,2	0,3	3,1	298,1
ZR-30	13,3	50,8	75,1	73,0	43,9	25,4	8,3	4,0	0,7	0,2	0,3	3,1	298,1
ZR-31	17,1	51,6	74,7	73,4	48,6	26,1	11,0	7,0	2,1	0,6	0,8	4,6	317,8
ZR-32	13,9	51,2	74,8	70,2	44,7	20,5	7,9	5,0	1,3	0,4	0,4	3,4	293,7
ZR-33	15,1	43,0	68,3	66,9	44,5	24,2	9,8	7,1	2,1	0,4	0,8	3,2	285,5
ZR-34	16,6	44,5	89,3	78,7	45,1	23,0	11,1	7,0	0,2	0,3	0,1	4,7	320,4
ZR-35	21,5	76,4	82,4	94,7	56,8	34,2	10,0	6,8	2,5	0,0	0,0	5,3	390,7
ZR-36	20,6	74,2	76,8	90,1	54,2	33,0	9,3	6,4	2,5	0,0	0,0	5,1	372,2

Cod_ZR	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
ZR-37	22,5	82,8	81,0	97,9	59,1	36,5	9,8	6,8	2,9	0,0	0,0	5,5	404,7
ZR-38	23,0	75,7	85,8	103,9	54,0	31,9	8,8	6,1	3,1	0,1	0,7	4,7	301,8
ZR-39	21,9	73,2	106,2	109,8	59,7	29,2	14,4	9,7	2,5	0,6	1,5	5,3	405,1
ZR-40	17,3	62,6	96,0	105,0	50,1	26,9	9,3	7,3	4,7	0,3	0,7	3,5	80,3
ZR-41	21,0	73,6	109,6	108,7	62,1	29,8	15,6	10,6	2,5	0,6	1,3	5,5	440,8
ZR-42	17,3	65,6	96,8	95,8	55,0	27,0	11,7	8,1	2,2	0,4	0,8	4,4	361,3
ZR-43	19,9	54,1	86,5	86,1	58,2	33,3	14,1	9,6	3,0	0,5	1,1	4,2	370,8
ZR-44	23,0	58,1	80,2	88,0	51,8	30,2	13,8	7,4	2,4	0,6	1,5	5,0	361,9
ZR-45	34,2	79,3	89,3	123,8	48,9	26,6	8,0	3,9	0,9	0,3	3,6	5,3	423,9
ZR-46	13,9	51,2	74,8	70,2	44,7	20,5	7,9	5,0	1,3	0,4	0,4	3,4	293,7

APÉNDICE II: DETERMINACIÓN DE ESTADÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN SOBRE APORTES NATURALES Y CUENCAS LATERALES

El Apéndice II, presenta por extenso el resultado obtenido para la estadística media mensual sobre cada cuenca lateral y aporte intermedio, siguiendo el mismo procedimiento anteriormente expuesto, como primer paso se obtienen los porcentajes de influencia de las distintas estaciones pluviométricas que abarcan las cuencas laterales y aportes naturales, mediante el método de los polígonos de Thiessen, se determina que 39 de las 41 estaciones tienen una influencia directa sobre estos objetos del sistema. Las dos estaciones que no presentan aportes a las cuencas laterales ni a los aportes naturales son las estaciones de Los Cerrillos y Tobaralaba. En el cuadro 26 se muestra el resultado arrojado por este análisis, representando el porcentaje de influencia de cada estación sobre los 20 Aportes Naturales. Mientras que el cuadro 27 cumple la misma función para las 45 Cuencas Laterales.

En el Cuadro 28 se presentan los coeficientes calculados para cada estación por Aporte Natural, mientras que el Cuadro 29 lo hace para las cuencas laterales, estos coeficientes se calculan para las cuencas de régimen pluvial, quedando fuera de este procedimiento aquellas de tipo nivo- pluvial que en su totalidad corresponden a las cuencas de cabecera o aportes naturales.

Este paso se realiza para posteriormente calcular la estadística de precipitación sobre las diferentes cuencas aportantes al sistema. Finalmente en los Cuadros 30 y 31 se presenta el valor promedio mensual de las precipitaciones, para los aportes naturales de régimen pluvial y para las cuencas laterales, las cuales fueron calculadas con el procedimiento anterior.

Cuadro 23. Porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas sobre los Aportes Naturales

Cod_AN	Estaciones Pluviométricas influyentes para el análisis con Aportes Naturales																				Total					
	P02	P06	P09	P10	P12	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P24	P26	P30	P31	P32	P33	P34		P35	P36	P38	P42	
AN-01			100%																						100%	
AN-02													13%		6%				28%	53%						100%
AN-03								15%							41%				22%		22%				100%	
AN-04															8%											100%
AN-05						36%	64%																		100%	
AN-06					16%	34%	5%																	45%	100%	
AN-07										100%																100%
AN-08										100%																100%
AN-09											46%							24%	30%							100%
AN-12	83%							17%																		100%
AN-13	44%																									100%
AN-14														100%												100%
AN-15														41%		59%										100%
AN-16			56%											38%		6%										100%
AN-17a			100%																							100%
AN-17b			43%													36%					20%					100%
AN-18			28%			42%									30%											100%
AN-19	12%			25%							24%		39%													100%
AN-20	90%																							10%	100%	

Cuadro 24. Porcentajes de influencia de las estaciones pluviométricas sobre las Cuencas Laterales

Estaciones Pluviométricas influyentes para el análisis con Cuencas Laterales																																		
Cod_CL	P01	P02	P03	P04	P05	P07	P08	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P22	P24	P25	P27	P28	P29	P31	P32	P33	P34	P36	P37	P39	P40	P42	Total
CL-01		18%				20%									15%	9%								15%				16%	8%			100%		
CL-02			42%																											58%	100%			
CL-03																												100%				100%		
CL-04a																76%												24%				100%		
CL-04b																							58%			33%	9%					100%		
CL-05																	93%							7%									100%	
CL-06							39%				51%													10%									100%	
CL-07							81%			9%														11%									100%	
CL-08							5%																	95%									100%	
CL-09							100%																										100%	
CL-10	100%																																100%	
CL-11																		20%						80%									100%	
CL-12a																		15%		31%				22%			32%						100%	
CL-12b																																	100%	
CL-13																																	100%	
CL-14																																	100%	
CL-15																																	100%	
CL-16																																	100%	
CL-17	35%																																100%	
CL-18																																	100%	
CL-19	48%																																100%	
CL-20	100%																																100%	
CL-21	78%						22%																										100%	
CL-22	4%				33%		63%																										100%	
CL-23													53%	47%																			100%	
CL-24													90%																			10%	100%	
CL-25										94%																				6%			100%	
CL-26																														100%			100%	
CL-27											8%																					92%	100%	

CL-28a		100%																												100%				
Estaciones Pluviométricas influyentes para el análisis con Cuencas Laterales																																		
Cod_CL	P01	P02	P03	P04	P05	P07	P08	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P22	P24	P25	P27	P28	P29	P31	P32	P33	P34	P36	P37	P39	P40	P42	Total
CL-28b										90%																						10%	100%	
CL-29a										57%																43%								100%
CL-29b										25%	45%							16%								14%								100%
CL-30			20%							22%	48%																					10%	100%	
CL-31a				38%																						40%						22%	100%	
CL-31b																																100%	100%	
CL-32			72%																													28%	100%	
CL-33			19%							16%											65%													100%
CL-34										100%																								100%
CL-35							54%			46%																								100%
CL-36							75%			25%																								100%
CL-37							100%																											100%
CL-38							32%														68%													100%
CL-39								61%				13%										5%	20%											100%
CL-40a				86%																														100%
CL-40b	13%			63%													19%			5%														100%
CL-41								61%																										100%
CL-42				14%																	86%													100%
CL-43												11%										36%										52%	100%	
CL-44a												46%										38%	16%											100%
CL-44b												29%										71%												100%
CL-45							8%		6%																								87%	100%

Sub-Cuenca	Est 1				Est 2			Est 3			Est 4		
	P _{50%} (mm)	P _{50%} (mm)	α (%)	Coef									
CL-32	340	281	72,3	0,875	308	27,7	0,305	-	-	-	-	-	-
CL-33	310	366	65,0	0,550	281	18,8	0,207	244	16,2	0,206	-	-	-
CL-34	330	244	100,0	1,353	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CL-35	370	452	53,7	0,439	244	46,3	0,703	-	-	-	-	-	-
CL-36	360	452	74,8	0,596	244	25,2	0,372	-	-	-	-	-	-
CL-37	400	452	100,0	0,885	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CL-38	390	369	67,9	0,718	452	32,1	277	-	-	-	-	-	-
CL-39	400	292	61,4	0,842	403	20,3	0,202	424	13,2	0,125	369	5,0	0,055
CL-40a	380	454	86,3	0,723	403	13,7	0,129	-	-	-	-	-	-
CL-40b	450	454	63,4	0,628	598	18,6	0,140	400	13,0	0,146	-	-	-
CL-41	400	292	61,5	0,842	403	38,5	0,382	-	-	-	-	-	-
CL-42	420	542	86,2	0,668	454	13,8	0,128	-	-	-	-	-	-
CL-43	460	308	52,2	0,780	366	36,4	0,457	424	11,4	0,123	-	-	-
CL-44a	380	424	46,1	0,413	366	37,9	0,393	369	16,0	0,165	-	-	-
CL-44b	380	366	70,7	0,734	424	29,3	0,262	-	-	-	-	-	-
CL-45	380	369	86,7	0,893	452	7,8	0,065	244	5,5	0,086	-	-	-

Cuadro 27. Precipitación media mensual por Aporte Natural

Cod_AN	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
AN-07	30,5	114,2	181,6	194,8	95,7	48,1	12,9	10,3	0,7	0,1	0,7	4,9	694,6
AN-08	22,5	84,4	134,1	143,9	70,7	35,5	9,5	7,6	0,5	0,1	0,5	3,7	512,9
AN-09	12,1	48,8	77,4	81,1	51,0	20,9	6,7	5,9	0,7	0,3	0,2	2,6	307,8
AN-19	19,7	80,1	98,4	107,1	64,7	34,3	10,5	7,6	2,3	0,1	0,6	4,7	430,2
AN-20	22,0	76,4	101,1	101,3	65,1	32,7	12,4	7,5	2,4	1,0	0,4	5,5	427,8

Cuadro 28. Precipitación media mensual por Cuenca Lateral

Cod_CL	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
CL-01	38,1	12,9	46,1	84,7	58,7	43,5	5,6	80,4	0,0	2,5	0,0	20,6	393,1
CL-02	32,7	19,9	29,8	71,5	60,2	36,8	1,8	63,8	0,0	0,0	0,0	20,8	337,4
CL-03	32,8	13,7	36,9	79,6	46,7	19,8	1,4	49,2	0,0	0,0	0,0	18,6	298,7
CL-05	79,3	20,6	54,3	109,9	82,8	15,4	4,3	65,3	0,0	0,0	0,0	20,0	451,9
CL-06	71,9	22,7	56,4	102,7	77,1	14,9	3,3	58,8	0,0	0,1	0,0	17,6	425,5
CL-07	62,7	25,0	58,4	92,7	69,1	13,7	1,9	49,8	0,0	0,1	0,0	14,6	388,0
CL-08	33,6	21,7	48,2	92,5	78,1	31,2	5,6	72,4	0,0	0,6	0,0	14,7	398,7
CL-09	65,0	26,5	61,1	91,9	67,2	11,6	1,1	45,7	0,0	0,0	0,0	14,1	384,2
CL-10	69,7	40,9	76,2	133,7	98,0	24,8	3,5	45,5	0,0	0,0	0,0	12,7	505,1
CL-14	62,5	27,5	60,3	109,0	97,9	27,0	5,8	47,0	0,0	0,0	0,0	9,7	446,7
CL-15	58,9	25,9	56,9	102,8	92,4	25,5	5,4	44,3	0,0	0,0	0,0	9,2	421,4
CL-16	58,9	25,9	56,9	102,8	92,4	25,5	5,4	44,3	0,0	0,0	0,0	9,2	421,4
CL-17	64,9	32,5	66,1	117,9	97,4	26,0	4,8	46,2	0,0	0,0	0,0	10,8	466,7
CL-18	58,9	25,9	56,9	102,8	92,4	25,5	5,4	44,3	0,0	0,0	0,0	9,2	421,4
CL-19	21,9	34,8	69,3	123,2	99,2	26,2	4,6	46,8	0,0	0,0	0,0	11,4	482,6

Cod_CL	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Anual
CL-20	19,4	85,8	121,4	166,0	80,6	44,3	5,8	14,0	6,8	0,0	0,6	2,6	547,2
CL-21	19,2	81,7	118,7	154,5	74,8	40,9	6,5	12,4	6,6	0,0	0,5	2,8	518,5
CL-22	18,2	68,3	105,5	109,4	58,0	29,2	9,0	7,3	4,4	0,3	0,4	3,5	413,5
CL-23	21,8	59,9	91,2	79,2	60,1	37,7	22,8	11,5	3,4	1,4	0,7	6,5	396,1
CL-24	17,5	48,3	69,4	63,8	50,4	29,9	18,2	7,6	2,9	0,9	0,3	5,6	314,9
CL-25	18,4	63,6	103,2	94,8	58,0	27,1	12,7	8,6	2,3	0,2	0,4	4,2	393,6
CL-26	14,7	43,4	64,0	61,2	43,0	22,6	9,7	6,1	1,8	0,5	0,7	4,0	271,5
CL-27	14,8	51,6	74,1	69,6	49,2	24,2	10,4	6,6	1,8	0,2	0,6	4,0	307,0
CL-28a	14,5	39,1	79,5	68,6	40,8	20,4	9,8	6,2	0,2	0,2	0,0	4,1	283,5
CL-28b	14,6	40,7	79,2	68,9	41,9	20,9	9,9	6,3	0,3	0,2	0,1	4,1	287,3
CL-29a	12,7	40,0	74,7	67,9	42,0	19,9	8,3	5,7	0,5	0,2	0,0	3,2	274,9
CL-29b	12,1	41,6	73,1	71,5	42,2	19,8	7,7	6,4	0,7	0,2	0,1	3,2	278,5
CL-30	14,3	46,1	74,2	75,0	41,1	20,1	8,8	6,9	0,9	0,3	0,7	3,7	292,1
CL-31a	21,3	74,6	110,0	117,9	68,0	28,0	9,8	7,9	1,1	0,6	1,3	3,9	444,4
CL-31b	33,8	79,2	90,8	122,3	50,2	26,6	7,9	4,0	0,8	0,3	3,5	5,2	424,6
CL-32	19,0	59,1	74,7	85,3	44,2	21,0	11,1	7,3	1,4	0,6	2,1	4,6	330,3
CL-33	11,5	51,4	77,5	71,2	45,5	21,3	8,1	6,3	1,5	0,4	0,7	3,1	298,4
CL-34	19,8	68,9	112,1	102,9	62,5	29,0	13,6	9,3	2,5	0,2	0,4	4,5	425,7
CL-35	18,7	66,9	108,2	106,9	58,0	28,8	11,0	8,1	4,0	0,2	0,3	3,8	414,8
CL-36	16,9	61,2	98,5	100,8	51,8	26,5	9,0	7,0	4,3	0,1	0,3	3,2	379,7
CL-37	17,0	62,8	100,5	107,7	51,5	27,5	7,8	6,7	5,4	0,1	0,3	2,9	390,1
CL-38	13,9	60,8	97,8	96,7	55,6	26,4	7,8	7,6	2,0	0,0	0,3	4,6	373,5
CL-39	19,4	77,8	88,9	95,6	59,3	33,6	9,6	6,6	2,2	0,1	0,1	4,8	398,0
CL-40a	16,9	64,9	94,5	87,7	57,2	25,8	9,8	6,5	1,6	0,5	0,5	4,1	370,0
CL-40b	20,2	78,4	115,5	117,5	68,9	32,8	10,4	8,4	2,2	0,4	0,6	4,3	459,6
CL-41	19,3	77,3	87,3	93,9	58,5	32,6	9,4	6,8	2,3	0,1	0,2	4,8	392,3
CL-42	17,4	78,3	107,9	109,6	62,8	33,2	9,3	8,0	1,4	0,1	0,7	3,6	432,2
CL-43	28,5	85,6	111,0	125,7	63,3	32,5	9,6	5,9	1,3	0,3	2,5	5,1	471,4
CL-44a	13,5	63,2	95,4	88,6	56,0	29,0	8,6	5,6	0,9	0,2	0,4	3,6	364,8
CL-44b	12,5	61,9	93,2	84,4	54,9	27,6	8,0	5,8	1,2	0,3	0,5	3,2	353,5
CL-45	13,2	60,2	97,1	92,9	56,9	26,0	8,1	7,9	0,9	0,0	0,3	5,1	368,7

APÉNDICE III: CAUDALES MEDIOS MENSUALES OBTENIDOS PARA APORTES NATURALES Y CUENCAS LATERALES DE RÉGIMEN PLUVIAL

El Apéndice III, presenta el resultado del caudal promedio a nivel mensual obtenido para cada cuenca lateral y aporte natural de régimen pluvial, siguiendo el procedimiento explicado en el documento, utilizando el modelo MPL inserto en MAGIC el cual es alimentado con los datos de precipitación entre otros propios de cada cuenca aportante. Para generar la estadística de caudales mensuales se ejecuta el programa para las 46 cuencas aportantes de regimen pluvial cuyo resultado se presenta en el cuadro 32.

Cuadro 29. Caudales Medios Mensuales para Cuencas Aportantes

Cuenca Aportante	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
AN- 07	19.59	126.98	502.17	685.10	414.90	280.64	147.28	76.88	36.64	18.01	9.79	7.47
AN- 08	56.97	258.73	1118.49	1654.24	1091.84	732.04	371.55	194.63	91.51	45.18	24.52	20.07
AN- 09	72.76	269.37	782.67	1338.09	1012.68	724.99	354.42	193.76	85.93	42.08	22.23	25.43
AN- 19	229.78	951.19	2533.34	4601.20	4556.63	3155.17	1623.45	847.18	414.51	196.76	107.53	98.92
AN- 20	251.64	923.30	2819.04	4341.54	4291.29	2970.49	1533.60	791.03	387.34	191.08	97.55	101.90
CL - 01	78.96	173.59	608.16	1008.91	1018.57	751.47	385.65	199.66	96.50	52.59	30.00	36.77
CL - 02	173.42	587.96	1344.05	2386.40	2327.86	1561.94	799.47	423.16	194.09	91.19	55.55	66.23
CL - 03	5.98	15.46	29.16	44.80	41.53	31.46	14.76	8.14	3.54	1.83	1.23	2.40
CL - 05	10.48	30.22	161.09	214.07	180.48	127.44	69.48	35.86	17.54	8.79	4.77	4.94
CL - 06	15.66	52.84	210.49	332.87	275.70	185.82	97.86	51.43	25.78	11.40	6.14	5.62
CL - 07	23.91	85.45	294.47	510.75	398.84	267.38	136.11	72.20	38.38	16.09	8.62	7.88
CL - 08	51.73	132.34	478.96	724.53	775.67	550.44	287.38	153.16	73.26	34.47	20.35	18.17
CL - 09	16.59	63.77	222.59	388.88	296.98	196.41	99.47	52.83	28.60	12.02	6.40	5.61
CL - 10	15.09	103.70	290.10	744.33	358.45	242.75	121.49	69.29	35.05	14.75	7.88	5.52
CL - 14	3.97	17.98	106.26	113.19	79.87	58.57	31.00	16.54	7.70	4.29	2.42	1.85
CL - 15	0.76	2.70	26.59	17.49	15.66	12.77	6.97	3.83	1.77	1.08	0.64	0.49
CL - 16	50.56	239.67	1036.61	1498.04	970.79	654.99	335.44	175.89	82.70	41.08	22.40	18.10
CL - 17	32.39	176.86	664.50	1188.70	713.76	481.78	244.55	131.83	63.85	30.61	16.55	12.45
CL - 18	100.20	487.66	2156.12	3125.38	2148.42	1421.95	719.69	376.49	178.19	88.62	48.09	37.87
CL - 19	67.31	396.88	1399.25	2658.09	1534.32	1031.37	520.81	283.17	138.48	64.74	35.12	26.09
CL - 20	0.18	5.33	14.65	39.69	16.84	11.12	5.21	2.51	0.89	0.00	0.00	0.00
CL - 21	21.98	129.21	400.49	926.83	479.92	324.18	163.93	92.26	47.01	20.38	11.05	8.11
CL - 22	34.41	125.57	420.45	744.58	611.71	411.44	209.40	110.82	57.53	25.40	13.50	12.48
CL - 23	33.20	84.01	250.84	338.06	363.54	273.70	148.15	75.72	34.80	17.13	8.96	13.46
CL - 24	65.38	166.87	345.11	496.78	526.45	412.71	222.87	108.48	51.14	24.29	12.19	25.41
CL - 25	22.17	69.60	293.71	381.32	340.61	238.72	127.26	67.91	31.71	15.55	8.47	9.13
CL - 26	2.65	7.48	13.14	19.32	18.38	13.97	6.75	3.67	1.61	0.75	0.49	0.86
CL - 27	30.02	97.47	232.14	360.48	340.58	240.02	118.79	63.74	29.19	13.71	8.04	11.88
CL - 28a	17.79	44.43	151.93	289.84	193.91	126.06	63.08	33.60	13.59	7.00	3.53	6.64
CL - 28b	12.12	31.27	101.17	191.30	133.20	87.35	43.59	23.21	9.55	4.84	2.50	4.50
CL - 29a	46.85	137.75	401.84	686.12	439.25	292.43	145.38	79.41	31.75	15.83	7.93	15.48

Cuenca Aportante	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
CL - 29b	14.77	39.14	66.14	45.53	29.92	14.52	8.33	3.27	1.60	0.84	1.58	1.92
CL - 30	64.74	194.23	484.38	870.08	629.67	417.66	205.49	115.75	47.22	23.39	14.94	22.17
CL - 31a	63.58	240.62	866.72	1489.43	1142.70	728.24	363.16	192.67	89.90	45.16	26.39	22.48
CL - 31b	79.76	136.91	385.74	846.08	555.66	356.00	172.91	87.77	42.75	21.24	16.67	13.47
CL - 32	83.10	249.79	627.52	1246.83	1041.89	675.33	342.96	181.70	82.58	41.60	29.89	29.16
CL - 33	83.39	340.29	791.62	1109.26	1175.19	813.12	405.79	221.42	100.61	47.90	28.48	32.83
CL - 34	27.96	92.22	372.47	534.23	448.88	304.72	165.36	86.71	41.29	19.05	10.17	10.36
CL - 35	14.09	47.89	187.20	284.21	226.04	154.88	81.67	43.15	21.82	9.73	5.18	5.05
CL - 36	11.71	40.73	135.85	213.68	167.90	114.61	58.16	31.10	16.31	6.91	3.72	3.71
CL - 37	5.54	20.94	69.66	122.47	93.40	61.93	31.21	16.57	8.99	3.79	1.98	1.81
CL - 38	23.80	93.03	304.39	468.43	392.35	274.02	139.20	76.50	35.78	16.63	9.11	11.48
CL - 39	143.37	662.83	1326.19	2157.96	2269.66	1636.45	859.94	447.18	219.71	102.82	53.76	58.04
CL - 40a	3.71	12.89	35.82	56.18	58.41	40.14	20.41	10.67	5.09	2.48	1.33	1.44
CL - 40b	106.47	397.25	1433.68	2423.61	2069.99	1396.14	714.28	377.10	182.15	87.82	47.18	42.87
CL - 41	39.37	200.50	408.84	704.87	724.98	499.12	260.26	135.19	67.08	31.13	16.29	16.34
CL - 42	188.41	809.57	2780.00	4578.94	4383.58	2956.34	1502.18	793.41	377.64	183.80	101.82	81.95
CL - 43	614.84	2003.28	6525.76	11456.94	8473.83	5601.32	2849.17	1468.75	711.41	351.28	232.50	192.68
CL - 44a	194.50	814.98	2624.64	3820.43	3546.99	2460.69	1263.78	657.98	308.71	150.86	82.22	85.23
CL - 44b	55.51	246.21	782.42	1077.24	1038.38	724.29	371.75	195.47	92.53	44.95	24.83	24.21
CL - 45	63.47	272.92	989.87	1710.20	1474.36	963.33	496.27	267.69	123.07	59.54	32.03	36.71

ANEXOS

ANEXO I: DESCRIPCIÓN MODELO MAGIC

La plataforma MAGIC, acrónimo de Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas, es una plataforma de modelación hidrológica desarrollada por la DGA, y cuyas características se presentan en el Manual de Referencia Técnica MAGIC–DGA, 2005.

El modelo MAGIC, es analítico por la naturaleza de todas las relaciones matemáticas y computacionales involucradas en él, es genérico, porque puede ser aplicado a cualquier cuenca siempre que se disponga de la información necesaria, y es integrado porque abarca tanto la parte superficial como subterránea de la cuenca analizada.

El programa MAGIC está diseñado en lenguaje de programación Delphi 7.0, en este tipo de programación computacional, los programas son divididos en entes llamados *objetos* que pueden comunicarse, intercambiar información, y colaborar unos con otros, lo que la hace perfecta para la adecuada definición de cuencas hidrográficas.

En términos generales, para realizar la simulación del balance hídrico en la cuenca, MAGIC utiliza 14 objetos, cuyos atributos los definen parámetros que permiten caracterizarlos, los cuales se ingresan en una base de datos MS ACCESS, que contiene la topología de la red de simulación y una o más tablas para cada objeto que contienen los datos de entrada del modelo, alcanzando un número total de 56 tablas (en la versión 2.0 del MAGIC). Los diferentes objetos que definen el modelo MAGIC se presentan en el Cuadro 33. El detalle se puede encontrar en (<http://sad.dga.cl/manualesMGC>).

Cuadro 30. Objetos Modelo MAGIC

#	Código	Objeto
1	AC	Acuífero
2	AN	Aporte Natural
3	CA	Canal (matriz, tramos de canal, canales derivados)
4	CH	Central Hidroeléctrica
5	CL	Cuenca Lateral
6	CP	Captación Puntual
7	DP	Descarga Puntual
8	EM	Embalse
9	NO	Nodo (principal y secundario)
10	PO	Pozos
11	QE	Caudal Ecológico
12	TR	Río y Tramos de Río
13	ZR	Zonas de Riego
14	SU	Sectores Urbanos

Fuente: Manual de Referencia Técnica MAGIC–DGA, 2005

Como se mencionó anteriormente, cada uno de estos objetos tiene asociado una o más tablas en la base de datos de entrada y genera una o más archivos de textos como resultado de la modelación. Un aspecto importante es la comprobación topológica de la red de modelamiento y que se cumplan las restricciones de conexión asociadas a los objetos.

DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETOS

1. Acuíferos: Este objeto representa un embalse subterráneo existente en la cuenca. La identificación de cada acuífero pasa por la definición de su geometría y de sus parámetros elásticos. Cada acuífero puede estar vinculado a un río, canal, zona de riego y/o nodo, ya sea para recibir el caudal que percola desde dichos objetos, o bien, para bombear desde el relleno saturado un caudal que constituirá un afluente para dichos objetos.

Tablas asociadas

AC_PARAM: Parámetros físicos y geométricos de los acuíferos

AC_QZS: Caudales subterráneos de salida de los acuíferos

AC_QZV: Caudales de afloramiento totales de los acuíferos

AC_QZVE: Caudales de afloramiento en la sección de entrada de los acuíferos

2. Aporte Natural: Este objeto representa el aporte de caudal de una cuenca cabecera del sistema hacia su punto de salida, representado por un nodo del sistema. Este aporte corresponde a una estadística de caudales medios mensuales, la cual puede tener origen en las mediciones de una estación fluviométrica o nivométrica conocida, o bien, en los caudales generados a través de un modelo sintético apropiado al tipo de cuenca (pluvial, nival o nivo-pluvial).

Tabla asociada

AN_PARAM: Aportes naturales al sistema: número de nodo y estadística asociada

3. Canal Matriz y Derivado: El canal matriz corresponde a uno o más segmentos de arcos utilizado para distribuir agua a una zona de riego. Se caracteriza el segmento por eficiencia.

Por otra parte, un canal derivado es similar a la configuración de un canal matriz pero, su nodo final siempre será una zona de riego (ZR) y su nodo inicial, un nodo secundario.

Tablas asociadas

Canal Matriz

CA_TRAMOS: Parámetros que describen detalladamente a cada uno de los canales matrices: capacidad, eficiencia, longitud, acuífero asociado

CA_PARAM: Parámetros que describen, en forma general, a los canales matrices del sistema: nombre y objeto asociado

Canal Derivado

CA_DER: Parámetros que describen a los canales derivados: capacidad, eficiencia, longitud, acuífero asociado, y porcentaje captado del canal matriz

4) Central Hidroeléctrica: Este objeto corresponde a una central hidroeléctrica de pasada, el cual demanda un determinado caudal mensual a algún nodo del sistema y luego utiliza dicho caudal para generar energía eléctrica, devolviéndolo luego íntegramente (salvo por las pérdidas de conducción sufridas en el trayecto) a un nodo de restitución.

Tablas asociadas

CH_Param: Parámetros que describen a las centrales hidroeléctricas: caudal de diseño, rendimiento, altura bruta, potencia instalada, y número de unidades

CH_Q: Caudales a generar mensualmente por las centrales hidroeléctricas

5. Aporte Lateral: Este objeto representa el aporte de caudal de una cuenca intermedia o lateral del sistema hacia su punto de salida correspondiente a una o más cuencas o subcuencas ubicadas entre dos nodos consecutivos, descontando el área correspondiente a la o las zona (s) de riego que pudiesen existir entre dichos nodos. Este aporte corresponde a una estadística de caudales medios mensuales, la cual puede tener origen en las mediciones de una estación fluviométrica o nivométrica conocida, o bien, en los caudales generados a través de un modelo sintético apropiado al tipo de cuenca (pluvial, nival o nivo-pluvial).

Tabla asociada

CL_PARAM: Aportes intermedios al sistema, número de nodo y estadística asociada

6. Captación Puntual: Una captación puntual es un objeto que demanda un determinado caudal mensual en algún nodo del sistema, y cuyo caudal captado depende de la disponibilidad en dicho nodo. Además, parte del caudal captado percola hacia el sistema subterráneo y otra parte puede retornar a uno o más nodos del sistema superficial, lo cual se expresa a través de un coeficiente de retorno propio de cada captación puntual.

Tablas asociadas

CP_PARAM: Descripción de las captaciones puntuales: nodo ubicación, caudal, y acuífero asociado

CP_RETORNOS: Retornos desde las captaciones puntuales: código y fracción que retorna

CP_Q: Caudales a captar mensualmente desde las captaciones puntuales

7. Descarga Puntual: Este objeto representa una descarga de caudal en un punto cualquiera del sistema, lo cual se traduce en un aporte mensual de caudal en el nodo que representa dicho punto, independiente de la disponibilidad en dicho nodo.

Tablas asociadas

DP_PARAM: Descripción de las descargas puntuales: nombre y nodo de ubicación

DP_Q: Caudales descargados desde las descargas puntuales

8. Embalses: Este objeto representa una obra de regulación de caudal que se ubica en un nodo del sistema. El caudal de entrada a cada embalse está constituido por el caudal afluente al nodo donde se encuentra ubicado, y los caudales de salida son: entregas libres hacia un nodo, entregas para generación de energía al pie del embalse, entregas hacia un nodo para generación de energía, rebases, evaporación y percolación.

Tablas asociadas

EM_NODOS: Códigos de nodos abastecidos por embalses

EM_PARAM: Parámetros que describen cada uno de los embalses existentes: nombre, nodo asociado, volumen máximo, volumen muerto, volumen inicial, acuífero asociado, año y mes de inicio de operación.

EM_DEMGE: Caudales demandados para generación de energía por cada uno de los embalses existentes

EM_FV: Coeficientes polinomio cúbico para estimar infiltración del embalse en función del volumen embalsado

EM_CA: Curvas de alerta de los embalses

EM_QGENMAX: Caudales máximos mensuales desde embalses para generación

EM_QV: Coeficientes polinomio cúbico para estimar caudal máximo de entrega del embalse en función del volumen embalsado

EM_SALIDAS: Salida de los embalses.

EM_SVH: Coeficientes polinomio cúbico para estimar espejo de agua del embalse en función del volumen embalsado.

EM_TASEV: Tasas de evaporación mensual de cada embalse.

9. Nodo Principal y Secundario: El nodo principal es un elemento de conexión entre objetos donde existe un objeto que aporta un caudal mensual, ya sea permanente o eventual y un objeto que recibe este caudal. Tiene asociado los caudales mensuales. Los aportes pueden provenir de tramos de río, aportes naturales, hoyas intermedias, canales matrices, canal derivado, centrales hidroeléctricas, embalse, derrames, etc.

El nodo secundario es un nodo especial que permite distribuir el caudal de un canal a un canal derivado.

Tablas asociadas

NO_DIST: Distribución de derechos permanentes y eventuales en los nodos

NO_DIST_Q: Caudales demandados a los nodos

NO_PARAM: Caudales a partir de los que se reparte el caudal afluente en forma eventual
 EST_CALIB: Estaciones fluviométricas para la calibración del modelo
 ESTAD_PP: Estadísticas de precipitaciones de estaciones asociadas a zonas de riego
 ESTAD_Q: Estadísticas de caudales aportados por cuencas laterales, cuencas de entrada y caudales de estaciones para calibración

10. Pozo de Bombeo: Es un objeto que demanda un determinado caudal mensual a alguno de los acuíferos del sistema, para posteriormente transportarlo hacia una zona de riego o algún nodo del sistema superficial. El caudal mensual efectivamente bombeado desde el acuífero depende de la disponibilidad en dicho acuífero. Cada pozo de bombeo tiene asociado un uso específico, los cuales son definidos por el usuario. Los usos típicos son: riego, agua potable, minería e industrial. Si un determinado pozo se utiliza para riego, entonces el caudal bombeado, o una fracción de él, se utiliza para satisfacer la demanda de la zona de riego de destino del pozo. En cambio, cuando el pozo se utiliza para cualquier uso distinto del riego, el caudal bombeado sólo sale del sistema, no siendo necesario especificar un nodo de destino.

Tablas asociadas

PO_PARAM: Parámetros de los pozos: coordenadas, acuífero asociado, tipo de uso, y zona de riego asociada (cuando corresponde)

PO_Q: Caudales mensuales de bombeo nominal en los pozos

PO_USOS: Usos de pozos

11. Caudal Ecológico: Es un objeto denominado como especial dentro de MAGIC, ya que no aporta ni demanda caudal a ningún nodo del sistema. Este objeto tampoco representa a un objeto físico, sino que es un objeto abstracto que se ubica en un nodo perteneciente a cualquiera de los ríos del sistema, y en dicho nodo define un caudal mínimo mensual, el cual generalmente se basa sobre criterios ambientales, tal que permita la subsistencia natural de la biota original.

Cuando en un nodo se establece un determinado caudal ecológico a respetar, parte del caudal afluente a dicho nodo se “*reserva*”, de tal forma que no sea entregado a ninguno de los objetos que tienen porcentajes de distribución permanentes y/o eventuales sobre el nodo.

Una vez finalizada la operación normal del nodo donde se impone el caudal ecológico, es necesario conducir hacia aguas abajo el caudal ecológico reservado en el nodo. De esta forma, MAGIC busca el primer tramo de río que tenga como nodo de origen el nodo donde se ha impuesto el caudal ecológico.

Tabla asociada

QE_PARAM: Caudales ecológicos por tramos

12. Tramo de Río: Tiene la misma configuración de los canales pero sus nodos de inicio y fin son de tipo general. Topológicamente tiene un conector especial hacia el acuífero subyacente. El caudal afluente a un tramo de río lo constituye el caudal entregado por el nodo inicial del tramo, mientras que las salidas son las percolaciones del lecho de río y el caudal de salida el nodo final del tramo.

La operación mensual de cada tramo de río, depende del tipo de porcentaje de aprovechamiento, permanente y/o eventual, que dicho tramo posea sobre su nodo inicial. Primero se considera como afluente al tramo el caudal entregado por el nodo inicial del tramo proveniente de la distribución según porcentajes de aprovechamiento permanentes (en caso de existir), y luego se agrega el caudal proveniente de la distribución según porcentajes de aprovechamiento eventuales (en caso de existir) del caudal aún disponible en dicho nodo.

Tablas asociadas

RI_TRAMOS: Parámetros de los tramos de ríos: nodo inicial y final, acuífero asociado, largo, ancho, espesor, permeabilidad del lecho, pendiente, y rugosidad

RI_PARAM: Parámetros de ríos: nombre

SECCIONES: Secciones de los ríos: número de las secciones legales por río

13. Zonas de Riego: Este objeto representa a un conjunto de subsectores de riego, en cada uno de los cuales existe un tipo de cultivo y método de riego determinado. De esta forma, una zona de riego es un centro de demanda consuntiva de agua, el cual puede tener varias entradas y varias salidas. La zona de riego es alimentada, superficialmente, por uno o más canales alimentadores, y subterráneamente por un único pozo de bombeo equivalente a todos los pozos de bombeo individuales que abastecen a la zona.

Tablas asociadas

ZR_AC_NNM: Necesidades netas mensuales áreas cultivadas en zonas de riego

ZR_ANC_NNM: Necesidades netas mensuales áreas no cultivadas en zonas de riego

ZR_CULT_ETP: Kc de los cultivos

ZR_CULT_PAR: Otros parámetros cultivos: distribución de cultivos por zona de riego, tipo de riego asociado, coeficiente de percolación, tipo de suelo, y porcentaje del área regada según método de riego

ZR_CULT_PEF: Precipitación efectiva en zonas de riego

ZR_CULT_SC: Superficies cultivadas por tipo de cultivos en zonas de riego

ZR_PARAM: Parámetros de las zonas de riego: estadística de precipitación asociada, coeficiente de isoyetas, y condiciones iniciales

ZR_QPR: Percolaciones de las zonas de riego a los acuíferos

ZR_RET: Retornos superficiales de las zonas de riego

ZR_SR: Otros parámetros de las zonas de riego: superficie regada, superficie máxima regable, volumen de regulación nocturna, horas de riego diario, eficiencia de aplicación, eficiencia de distribución, coeficiente global de derrames, coeficiente global de percolación, coeficiente global de reuso de los derrames, coeficiente global de reuso de los derrames, factor de reducción del déficit, y parámetros modelo MPL

CULT_TIPOS: Tipos de cultivos

MR_TIPOS: Tipos de métodos de riego y eficiencias

14) Sectores Urbanos: Este objeto representa el consumo de agua potable, la escorrentía y percolaciones producto de las precipitaciones que caen sobre un sector urbano.

Tablas asociadas

SU_AREAS: Áreas de los sectores urbanos

SU_PARAM: Parámetros de los sectores urbanos: estadística de precipitación asociada, coeficiente de isoyetas, coeficiente de pérdidas al acuífero, coeficiente de retornos, coeficiente de escorrentía superficial, y coeficiente de pérdidas por percolación subterránea

SU_Q: Caudal a captar

SU_QPR: Percolaciones

SU_RETORNOS: Retornos a nodos

Finalmente para la cuenca del Maipo, el Modelo MAGIC está representado por una topología base compuesta por 20 acuíferos, 21 aportes naturales, 117 elementos de canal, 7 centrales hidroeléctricas, 52 cuencas laterales, 19 captaciones puntuales, 23 descargas puntuales, 5 embalses, 156 nodos, 119 pozos, 152 tramos de ríos, 17 caudales ecológicos, 46 zonas de riego y 5 sectores urbanos (DGA, 2007b).

Estos objetos, están relacionados entre sí a través de sus entradas y salidas, definiendo una topología particular, los que permiten reproducir los flujos de aguas a nivel mensual, en todos los puntos de interés definidos conforme el uso actual y futuro del sistema. De esta forma, cada tipo de objeto generado en la topología del modelo es capaz de representar los distintos tipos de demandas o flujos existentes (DGA,2005).

Para este trabajo se utiliza la información verificada y calibrada para el modelo MAGIC-Maipo, el cual contiene la base de datos MC ACCESS, con todos los valores y parámetros que se requieren para modelar la cuenca del Maipo. Esta información es obtenida del Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Maipo. Etapa II. Actualización del modelo de operación del sistema y Formulación del Plan. Addendum Modelo MAGIC Maipo.

FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

La simulación de la cuenca del Maipo al interior del MAGIC se lleva a cabo desde aguas arriba hacia aguas abajo para cada uno de los nodos que definen los ríos del sistema. Realiza un ciclo a nivel mensual para el período de simulación, que en este caso corresponde al año hidrológico (Abril–Marzo), y dentro de éste efectúa otro ciclo de iteraciones para calcular todos los caudales de entrada y salida en todos los nodos del sistema. En una primera iteración se calcula en cada nodo el caudal afluente producto de los

aportes de cuencas de cabecera e intermedias (para los nodos de cabecera), de los tramos de río (para los nodos intermedios), de las descargas puntuales existentes, y los tramos de canal. En esta primera iteración no se consideran las entregas de los embalses, de los acuíferos ni de los derrames de las zonas de riego, ya que dichos objetos aún no empiezan a ser operados.

Al finalizar la primera iteración para todos los nodos del sistema, se operan los embalses y se calculan sus entregas para riego e hidroelectricidad, se operan los acuíferos y se calculan sus afloramientos y caudales efectivamente bombeados hacia el sistema superficial y se operan las zonas de riego, calculando sus derrames y percolaciones al sistema subterráneo. De esta forma, en las iteraciones siguientes, el cálculo del caudal afluente a los nodos se hace conociendo todos los caudales involucrados, incluso las entregas de los embalses, de los acuíferos y los derrames de las zonas de riego calculados al final de la iteración anterior.

El modelo sigue iterando dentro del ciclo mensual hasta asegurar que los caudales de salida de las zonas de riego, embalses y acuíferos coincidan con los correspondientes caudales afluentes a los nodos del sistema.

En cada iteración dentro del ciclo mensual, el caudal total afluente a cada nodo se reparte de acuerdo al porcentaje que tenga asignado cada uno de los objetos que reciben caudal desde dicho nodo. Esta característica puede ser utilizada, por ejemplo, para simular la asignación de caudal en un determinado nodo de acuerdo al porcentaje de caudal permanente y/o eventual ingresado a dicho nodo.

El resultado final de la modelación corresponden a balances generales, resumidos en el Cuadro 31, donde para el caso de este trabajo sólo se utilizará el balance general enfocado en los sectores de riego.

Cuadro 31. Estructura de Salida de Datos MAGIC. Balances Globales

Nº	Balance	Salidas
1	Caudales	Balance total a nivel de nodo para cada uno de los objetos asociados a este.
2	Riego	Balance General de los sectores de riego
3	Subterráneo	Balance General de los objetos acuíferos