



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

# **MODELO DE GESTIÓN PARA USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIAL SUBTERRÁNEA EN LA PRIMERA SECCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**ALFONSO RAMÓN ANABALÓN ÁLAMOS**

PROFESOR GUÍA:  
JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARCELO OLIVARES ALVEAL  
JUAN SCHUSTER VILLARROEL

SANTIAGO DE CHILE, MAYO 2010

**“MODELO DE GESTIÓN PARA USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIAL SUBTERRÁNEA EN LA PRIMERA SECCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA”**

Se creó un modelo de gestión de aguas para las dos primeras secciones de la cuenca del río Aconcagua, en la V región de Valparaíso, que incluye tanto a los componentes superficiales como subterráneos de la zona. Este es un modelo de optimización que busca la mejor distribución del recurso hídrico entre los componentes para asegurar la mayor satisfacción de la demanda de los sectores de consumo, minimizando la explotación de las napas que subyacen el lugar. Como objetivo principal de la gestión se tiene encontrar la operación óptima para un hipotético canal unificado revestido que nutre los canales de los sectores de riego de la primera sección.

Además este modelo de gestión es capaz de incorporar la incertidumbre asociada a los caudales de entrada al sistema, mediante el método de las realizaciones múltiples, generados por tres modelos hidrológicos externos a este estudio: el pronóstico de deshielo de la DGA; el modelo de RNA (Cartes, 2009); y el modelo realizado en el software WEAP (Schuster, Publicación Pendiente). Los caudales ocupados en este estudio se crearon a partir de las distribuciones de probabilidad de los errores en la predicción de los flujos de estos modelos, instaurándose escenarios de años húmedos, normales y secos. Los modelos son aplicados en la estación de Aconcagua en Chacabuquito.

Todo esto se implementó en el software GAMS y fue manejado desde MATLAB para manejar la gran cantidad de información generada. Los resultados del modelo de gestión bajo el modelo hidrológico RNA muestran un comportamiento poco confiable y es retirado del análisis. Entre los resultados del MOGIHA bajo los modelos WEAP y DGA se encontraron diferencias estadísticamente significativas que demuestran que la gestión no es indiferente al modelo hidrológico considerado.

Los resultados de la gestión se muestran más sensibles a la incertidumbre bajo el modelo WEAP y éstos tienden a ser más secos y con una dispersión similar a los del modelo DGA. La operación del modelo de gestión, con caudales generados por DGA, es menos susceptible a la incertidumbre y ya que los errores en su predicción son menos dispersos, se recomienda este modelo hidrológico para la gestión de aguas en la primera sección.

Se encontró que la forma de la función que rige la conducta del caudal desviado por el canal unificado es independiente tanto del modelo hidrológico como del escenario probado, pero sí depende del mes en que es evaluada. Así se encontró una regla de operación del canal revestido que considera la forma de su función y la distribución de probabilidad del error encontrada para los meses de los modelos DGA y WEAP.

El modelo de gestión creado, MOGIHA, puede ser ampliamente extendido para refinar el análisis tanto de la incertidumbre como de las variables de decisión del sistema estudiado.

El método de las realizaciones múltiples se mostró mayormente dominado por los caudales más bajos y, en general, no permite estudiar bien la incertidumbre reflejada por la sobreestimación en los pronósticos de caudales de los modelos hidrológicos. A pesar de esto se pudo cumplir con todos los objetivos propuestos.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Quisiera agradecer a las personas que permitieron la realización de este trabajo.

Primero al profesor James McPhee, quien, aparte de ofrecerme el tema de esta Memoria, me guió a lo largo de todo el trabajo, resolvió mis dudas y me permitió avanzar cuando me encontraba atascado.

Al profesor Juan Pablo Schuster, por la buena disposición cuando tuve dudas y por permitirme trabajar y estudiar el modelo que él creó. Al profesor Marcelo Olivares por su apoyo, sobretodo en la programación con GAMS y durante el curso de Trabajo de Título.

También quisiera agradecer a mis padres María Eugenia y Gerardo, y a mis hermanos Gerardo, Diego y Camilo, por su apoyo, ánimo y cariño a lo largo de toda mi carrera, y en especial en los meses que me tomó desarrollar este trabajo.

A mis amigos incondicionales de PCL, Pasto Seco Club Social, Percolados y a quienes me han acompañado desde primer año: Joshua, Eugenio, Javier, Jaime, Kim, Jorge y Carlos.

Y a Belén Opazo, con quien compartí casi toda mi carrera y es en gran medida responsable que esté escribiendo estas palabras. Sin su cariño y apoyo no sería quien soy hoy y quizás nunca hubiese terminado nada de esto. Gracias.

*A mis abuelos:  
Elsa, María Eugenia, Ignacio y Ramón.*

# Índice

1. Introducción.....	6
1.1. Objetivos.....	6
1.2. Descripción de la zona de estudio.....	7
2. Revisión bibliográfica.....	9
3. Marco teórico.....	11
3.1. Análisis de la incertidumbre.....	13
3.1.1. Enfoque estocástico: Método de las Realizaciones Múltiples.....	13
3.1.2. Información hidrológica base: caudales reales y pronosticados.....	15
3.1.3. Cálculo de los errores y ajuste de función de probabilidad.....	20
3.1.4. Generación de los caudales de entrada.....	22
3.2. Definición de la topología.....	30
3.2.1. Antecedentes.....	30
3.2.2. Descripción del mapa topológico.....	32
3.3. Programación del modelo.....	40
3.3.1. Formulación matemática.....	40
3.3.2. Escritura del código.....	42
3.3.4. Calibración de los valores iniciales del MOGIHA.....	44
3.4. Análisis estadístico de los resultados.....	47
4. Resultados.....	48
4.1. Años húmedos.....	50
4.1.1. Modulador de la demanda para la primera sección $a(t)$ .....	50
4.1.2. Caudal por el canal revestido $U$ .....	53
4.1.3. Modulador de la demanda para la segunda sección $b(t)$ .....	56
4.1.4. Caudales de bombeo y canales de la primera sección.....	59
4.1.5. Caudales de bombeo y canales de la segunda sección.....	60
4.2. Años normales.....	62
4.2.1. Modulador de la demanda para la primera sección $a(t)$ .....	62
4.2.2. Caudal por el canal revestido $U$ .....	64
4.2.3. Modulador de la demanda para la segunda sección $b(t)$ .....	67
4.2.4. Caudales de bombeo y canales de la primera sección.....	69
4.2.5. Caudales de bombeo y canales de la segunda sección.....	70

4.3. Años secos.....	72
4.3.1. Modulador de la demanda de la primera sección a(t).....	72
4.3.2. Caudal por el canal revestido U.....	74
4.3.3. Modulador de la demanda para la segunda sección b(t).....	77
4.3.4. Caudales de bombeo y canales de la primera sección.....	79
4.3.5. Caudales de bombeo y canales de la segunda sección.....	80
5. Discusión de los resultados.....	82
5.1. Conducta general del modelo de gestión.....	82
5.2. Resultados del MOGIHA bajo el modelo hidrológico RNA.....	85
5.3. Diferencias en la operación bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP.....	87
5.4. Operación del canal revestido.....	88
6. Conclusiones.....	90
6.1. Características del modelo de gestión.....	90
6.2. Resultados generales.....	91
6.3. Análisis de los resultados relevantes.....	92
6.4. Limitaciones y posibles extensiones.....	93
7. Referencias.....	94
Anexo A. Información hidrológica.....	97
Anexo B. Programación del modelo.....	98
Anexo C. Resultados.....	99

## **1. Introducción.**

En la primera sección de la cuenca del río Aconcagua, entre Los Andes y San Felipe, el río pierde parte de su caudal infiltrándose en la napa que subyace en el sector. Aguas abajo de San Felipe, el cauce recupera agua por los afloramientos desde la napa, permitiendo así regar con aguas superficiales las tierras de la segunda sección.

Sin embargo, durante los años de sequía, los regantes de la primera sección ven esta infiltración natural del río como una pérdida que merma su producción agrícola. Así nace la idea de crear un sistema de bocatomas unificadas mediante un canal revestido que llevaría las aguas sin pérdidas hacia los canales de distribución durante los meses de riego (agosto a marzo). Con este sistema se reducen las mermas en la primera sección, pero también se reduce la alimentación que el río provee a la napa y con ella, los afloramientos de la segunda sección.

Es por esto que surge la necesidad de generar un modelo de gestión del sistema de canales que permita su uso, minimizando los perjuicios provocados en la segunda sección.

Este escenario es el escogido para evaluar la influencia de la incertidumbre asociada a los caudales entregados por los modelos hidrológicos creados para la primera sección de la cuenca, sobre la toma de decisiones. El trabajo a desarrollar se enmarca en el proyecto FONDECYT número 11060444 Operational Framework For Data Sufficiency Evaluation In Distributed Hydrologic Modeling; en el cual, en forma resumida, se construyen modelos hidrológicos de distinta complejidad y detalle al momento de tomar los datos disponibles en la zona, para luego analizar cómo se comportan estos modelos y su incertidumbre frente a una aplicación de características reales.

Este trabajo corresponde a dicha aplicación y consiste en un modelo de gestión de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas capaz de incluir esta incertidumbre para el análisis de su influencia en las decisiones.

### **1.1. Objetivos.**

El principal objetivo de este trabajo es construir la aplicación para los modelos hidrológicos generados dentro del proyecto. Esta aplicación ha sido definida como la gestión de los canales unificados ubicados en la primera sección de la cuenca del río Aconcagua, aguas abajo de la estación fluviométrica Aconcagua en Chacabuquito.

El modelo debe ser capaz representar en forma correcta; esto es, con resultados consistentes a los datos disponibles; el funcionamiento del sistema para el escenario actual (sin los canales) con datos reales. Además debe entregar resultados acorde a los datos ingresados de los modelos hidrológicos generados para el proyecto, con sus respectivas incertidumbres como variables aleatorias.

La operación de los canales debe quedar definida por los pronósticos de caudales de los modelos hidrológicos, considerando la incertidumbre de los resultados para observar como esta influye en las decisiones asociadas a la gestión.

Finalmente se debe buscar diferencias entre las operaciones del modelo de gestión bajo los distintos modelos hidrológicos con el fin de saber si las decisiones son realmente afectadas por lo predicho por un modelo u otro y, en la medida de lo posible, determinar si uno es mejor que el otro para fines de gestión.

## 1.2. Descripción de la zona de estudio.

La zona en estudio abarca las dos primeras secciones de la cuenca del río Aconcagua, V región de Valparaíso. Estas secciones son divisiones administrativas creadas por la Dirección General de Aguas (DGA) para el manejo de los derechos de agua, administradas por una junta de vigilancia del río, como se describe en el artículo 264 del Código de Aguas.

La primera sección comprende desde las nacientes de los ríos Juncal, Blanco y Colorado en la Cordillera de los Andes hasta el puente del Rey, que corresponde a la entrada sur a la ciudad de San Felipe. Los recursos de agua disponibles en este tramo provienen del caudal propio del río Aconcagua y sus afluentes cordilleranos tales como los ríos Juncal y Blanco que lo forman, más el río Colorado y esteros menores como Riecillos, Vilcuya y Los Chacayes.

La segunda sección cubre desde el fin de la primera en el puente carretero del Rey, hasta el lugar donde pasa el río Aconcagua frente a la puntilla de Romeral, donde se ubica aproximadamente la estación fluviométrica Aconcagua en Romeral. Sus principales afluentes corresponden al río Putaendo que llega junto con el estero Quilpué o San Francisco al comienzo de la sección y estero Catemu al final de la sección, por el lado norte; y los esteros Lo Campo y Los Loros o Las Vegas por su lado sur en su parte final de la sección. Las figuras 1.1 y 1.2 muestran la ubicación de la zona de estudio.

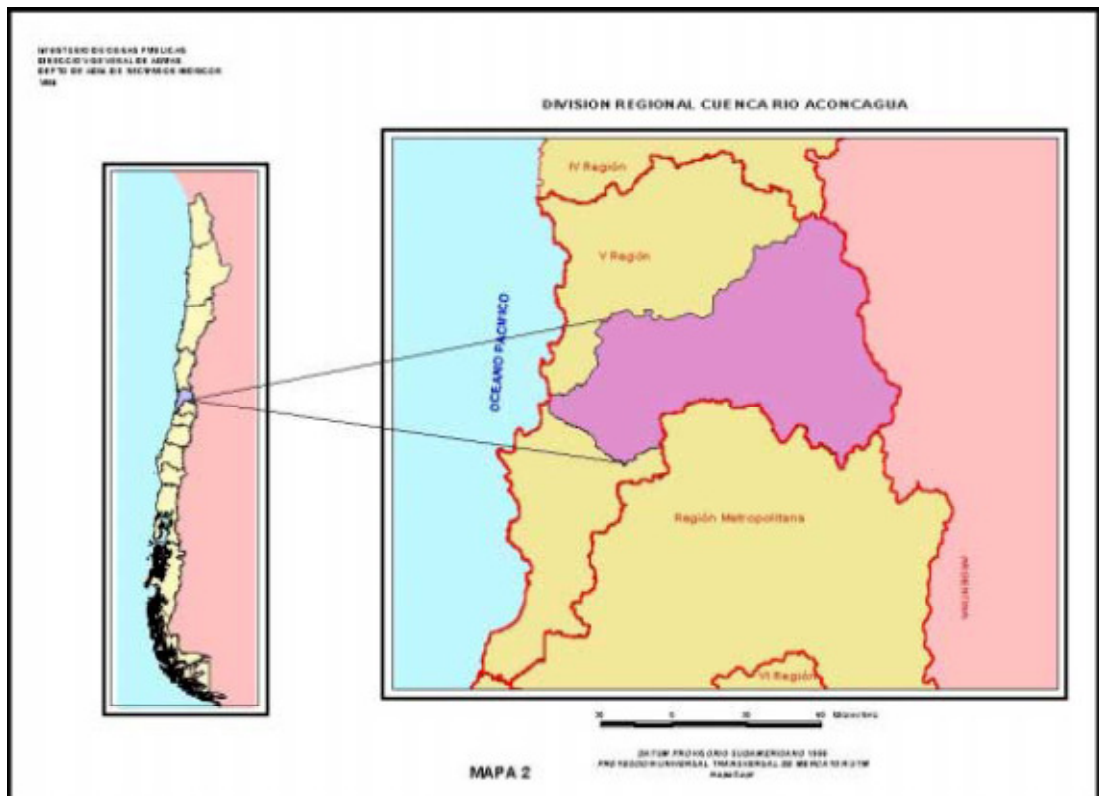
Los recursos de agua de esta segunda sección lo constituyen las siguientes fuentes: afloramientos o recuperaciones provenientes de la napa subterránea en la parte alta del río Aconcagua entre el puente del Rey y poco más aguas abajo de la junta con el río Putaendo; los sobrantes del río Putaendo y del estero Quilpué o San Francisco; los sobrantes desde la primera sección que recoge los derrames de ella, junto con el estero Pocuro que desemboca justo en el cierre de la primera sección. También contribuyen los derrames de riego provenientes de áreas regadas por canales que nacen en la primera sección y que atraviesa esta segunda sección (DGA, 2004a).

A lo largo del valle se desarrolla un Clima Mediterráneo Templado con estación seca prolongada, con una temperatura media anual de 15.2 °C en Los Andes. La estación meteorológica Vilcuya, representativa de la zona pero más en altura, presenta una temperatura media anual de 14.1 °C y una precipitación anual de 467 mm. Hacia la cordillera, sobre los 3000 [m.s.n.m.], se desarrolla un Clima Frío de Altura que permite la acumulación de nieve y campos de hielo permanente en cumbre y quebradas de la Alta Cordillera (DGA, 2004b).

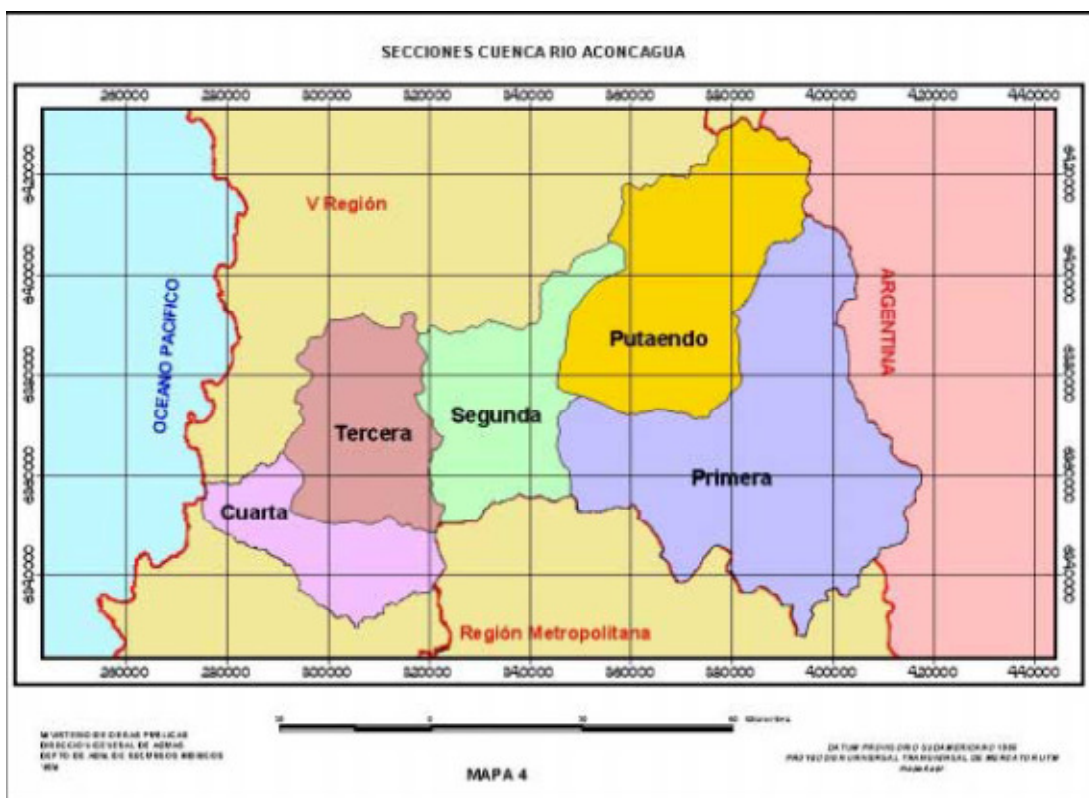
El valle se encuentra relleno de depósitos aluviales cuaternarios los cuales forman acuíferos que poseen un gran volumen de agua almacenada. En la primera sección el acuífero se compone de bolones, ripios, arenas y algo de arcilla; tiene características freáticas y espesores que varían, a lo menos, entre 50 y 100 m. El acuífero de la segunda sección presenta características similares al de la primera, pero con un valle más angosto (alrededor de 4000 m) y una potencia estimada en 50 m (DGA, 2001).

Desde un punto de vista político – administrativo, la zona de estudio abarca las comunas de Los Andes, San Estaban, Rinconada, Santa María, San Felipe, Panquehue, Llay Llay y Catemu. Las principales actividades económicas de la zona son la agricultura, minería e industria. La agricultura se desarrolla principalmente en los alrededores de las ciudades de San Felipe y Los Andes, donde los principales cultivos son frutales, cereales y chacras. La minería corresponde a la explotación de cobre fino en Los Andes y Catemu. Con respecto a la industria, se pueden encontrar rubros como la minería, alimentos y conserveras (DGA, 2004b).





**Figura 1.1.** Cuenca del río Aconcagua.  
Fuente: (DGA, 2004a)



**Figura 1.2.** División administrativa de la cuenca.  
Fuente: (DGA, 2004a)

## 2. Revisión bibliográfica.

El uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales es un tema ampliamente estudiado. Coe (1990) define al uso conjunto como el manejo de los recursos superficiales y subterráneos en una operación coordinada, con el fin de que la producción del sistema global, en un determinado período de tiempo, exceda la suma de las producciones de sus componentes por separado como el resultado de una operación no coordinada.

Asimismo, dice Coe, su objetivo es incrementar la producción, fiabilidad de suministro y la eficiencia general de un sistema hídrico. Con este fin se desvía el agua desde cauces o embalses para su transporte y almacenaje en los acuíferos, y así se ocupa cuando hay escasez superficial.

Entre las ventajas del uso conjunto se encuentran el incremento en la producción como resultado en la disminución de las pérdidas de agua dulce; distribuye mejor el recurso en el tiempo, bajando las diferencias entre los meses con mucha y muy poca agua; puede almacenar agua cerca de sus usuarios finales y evitar grandes obras de desvío debido a la dispersión de los pozos; y al ocupar las napas como embalses subterráneos, el sistema puede funcionar con embalses superficiales pequeños, bajando los costos de construcción y los impactos de las grandes presas (Coe, 1990).

Considerando lo anterior, no es extraño que se produzca un fuerte interés por el estudio de este tipo de gestión más integrada de la cuenca. Sin embargo, los modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas presentan la dificultad de lidiar con las complejas ecuaciones que rigen el flujo en medios porosos saturados y su interacción con aguas superficiales. Las soluciones a esto varían enormemente dependiendo del autor, tal como se muestra a continuación..

Matsukawa et al. (1992) presentan un sencillo modelo de uso conjunto, compuesto por un embalse superficial, un río y un acuífero en el cual el comportamiento de la napa está incluido en las restricciones del problema mediante una declaración implícita, en diferencias finitas, de las ecuaciones de flujo en medios porosos saturados. El mismo autor reconoce los altos costos computacionales de este método para la evaluación de largos períodos de tiempo.

Pulido – Velázquez et al. (2004) incluyen, en su modelo CALVIN, a los acuíferos de California de forma similar a los embalses superficiales y con sus relaciones en forma de series de tiempo, por las limitaciones del modelo de flujo y la falta de información hidrogeológica. En un estudio posterior, el mismo autor utiliza dos métodos para representar al acuífero: el método de los valores propios para la simulación distribuida de acuíferos como restricciones al problema de optimización, y la solución analítica del método de multiembalses enterrados (Pulido – Velázquez et al., 2006). El primero permite el manejo de las variables del sistema con más soltura obteniendo respuestas muy estables y seguras, mientras el segundo provee una buena manera de representar la conexión río – napa cuando no hay un modelo distribuido calibrado del acuífero.

Belaine et al. (1999) presenta un modelo de simulación/optimización de uso conjunto de aguas, donde la modelación del acuífero se hace a través de MODFLOW. Luego, para cada iteración del módulo de optimización se debe resolver el flujo subterráneo en el programa externo. Un enfoque similar ocupa Schoups et al. (2006) para la representación del Valle Yaqui, en México. Utiliza un modelo de uso conjunto de simulación-optimización que incluye un modelo físico para representar los elementos e interacciones del sistema y un modelo agronómico para maximizar los beneficios económicos del manejo del agua. Éste es uno de los ejemplos más completos y complejos de la utilización de modelos de uso conjunto que se encontraron en la revisión de la literatura.

Pese a la complejidad que alcanzan estos modelos, ninguno presenta un análisis de la incertidumbre hidrológica, sino que la hidrología se toma como un parámetro de entrada al modelo variando escenarios. Sin embargo, hay modelos de gestión que excluyen el manejo de los acuíferos pero que sí toman en consideración la incertidumbre hidrológica.

Zhang et al. (2008) propone la integración de la programación de De Novo (Zeleny, 1982) con la programación de intervalos para poder representar la incertidumbre de las variables como intervalos dentro de la optimización. Este modelo funciona separando el problema original en dos submodelos determinísticos correspondientes a los límites inferiores y superiores. Luego de obtener los óptimos en cada submodelo mediante funciones de transformación, se construye un modelo del metaóptimo y se resuelve para obtener la solución final. Este proceso es bastante engorroso de programar pero puede representar una buena alternativa.

Li et al. (2008) presentan una programación dinámica de intervalos estocásticos basada en escenarios para el manejo del recurso. Este modelo presenta la ventaja de poder representar la incertidumbre en intervalos o en funciones de densidad de probabilidad. No obstante, esta metodología también se basa en la separación en submodelos para luego ser unidos y es difícil de asimilar. Además, pese a incluir a los acuíferos, no se pretende crear un modelo de programación dinámica para éstos.

Ya que la modelación hidrogeológica ha sido siempre un campo dominado por la incertidumbre de los parámetros, en particular de la conductividad hidráulica del medio, se han realizado varios estudios para incluir esta característica en sus modelos.

Feyen y Gorelick (2004) proponen un modelo estocástico para la gestión de un acuífero, bajo la incertidumbre del campo de conductividad hidráulica de éste. El enfoque escogido es el método de las realizaciones múltiples, en el cual se realiza un modelo de simulación – optimización donde la incertidumbre es incluida como restricciones en la optimización. Esto se logra creando distintos acuíferos aleatorios mediante la función de distribución de probabilidad de los valores de la conductividad hidráulica, seleccionando un conjunto de estos al azar y optimizando la función objetivo considerando la satisfacción de las restricciones para cada una de las napas involucradas. Este método es el seleccionado para incorporar la incertidumbre de los caudales creados en los modelos hidrológicos estudiados, ya que en principio permite una programación sencilla y la idea base sobre la incorporación de la incertidumbre es bastante intuitiva. La adaptación para un modelo de gestión de uso conjunto se discute en el marco teórico.

Finalmente, McPhee y Yeh (2006) proponen una regla de cuadratura Gaussiana y la teoría Bayesiana de decisión para elegir el mejor diseño experimental en un acuífero sujeto a la incertidumbre del campo de conductividad hidráulica. Esta metodología podría ser útil para diferenciar entre los resultados de los modelos hidrológicos y elegir, si se puede, el mejor de ellos.

### 3. Marco teórico.

Como se mencionó en el capítulo 1, el objetivo de este trabajo es la creación de un modelo de gestión que sea capaz de incorporar la incertidumbre de los pronósticos de distintos modelos hidrológicos. Con esto se pretende distinguir las posibles diferencias en las decisiones cuando se toma un modelo hidrológico u otro. El trabajo realizado para el Modelo de Gestión e Incertidumbre Hidrológica del Aconcagua (MOGIHA), como se ha llamado al modelo aquí propuesto, sigue el esquema de la figura 3.1.

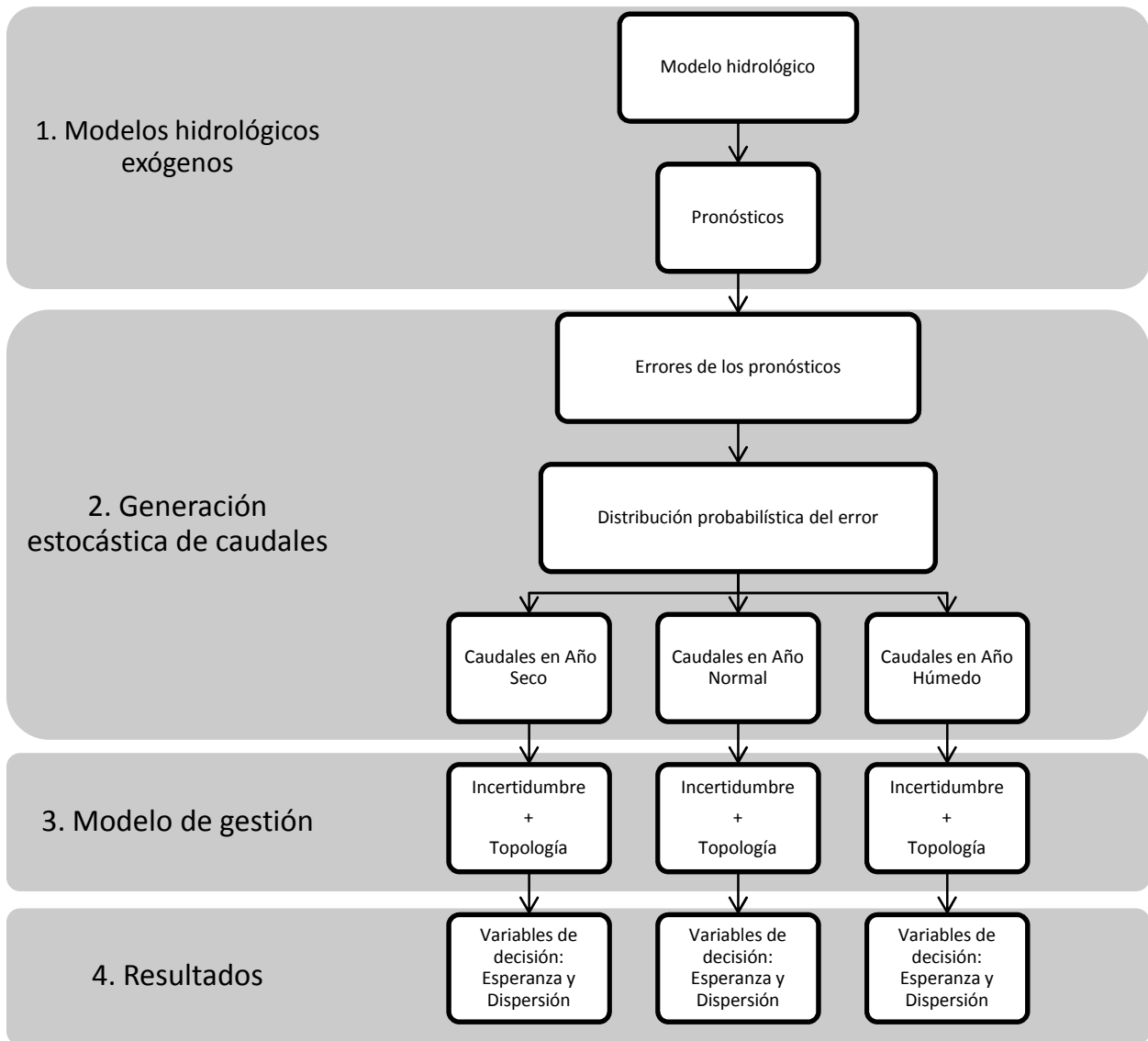


Figura 3.1. Esquema de funcionamiento del MOGIHA.

Tal como muestra la figura 3.1, se requiere de una importante faena con los datos de los modelos hidrológicos para poder trabajar con la incertidumbre a través de un modelo de gestión. En el presente capítulo se presenta de forma detallada la metodología ocupada para preparar y configurar el MOGIHA, y obtener los resultados de este trabajo. Esta metodología fue dividida con el fin de diferenciar los dos aspectos de naturaleza muy distinta que dan forma al modelo de gestión propuesto: el manejo estocástico de la incertidumbre y la representación topológica del sector en estudio.

El primero explica cómo se trata la información obtenida de los errores de los pronósticos de los modelos hidrológicos estudiados para generar los caudales de entrada al modelo y con qué fin se hizo esto. El segundo, en tanto, enseña la conformación sintética de los elementos ocupados para la programación del modelo de gestión. Es decir, la estructura del modelo que permite la repartición de los caudales de forma similar a la real. Estos aspectos se unen en la programación final del modelo y para terminar este capítulo se presenta la forma como se buscó diferencias significativas entre los resultados.

En el desarrollo mostrado a continuación, se omiten los pasos no involucrados en la forma final del modelo.

### 3.1. Análisis de la incertidumbre.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es el estudio de la incertidumbre de los modelos hidrológicos creados para la cuenca del río Aconcagua. Éstos corresponden al modelo de Pronóstico de Disponibilidad de Agua Temporada de Riego de la Dirección General de Aguas (DGA); el modelo de Pronóstico de Volúmenes de Deshielo Mediante Redes Neuronales Recurrentes e Imágenes Satelitales MODIS (Cartes, 2009); y al modelo de la primera y segunda sección de la cuenca del río Aconcagua realizado en el software Water Evaluation And Planning System (WEAP) por Schuster (Publicación pendiente).

En lo que sigue, para mayor comodidad y entendimiento, se referirá al modelo de la Dirección General de Aguas como el modelo DGA, al modelo de Redes Neuronales Artificiales como el modelo RNA y al modelo de Schuster como el modelo WEAP.

En este capítulo se presenta el enfoque usado para afrontar este tema, cómo se manejaron los datos disponibles en función de la modelación y la formulación final, lo cual corresponde a los puntos 1 y 2 de la figura 3.1

#### 3.1.1. Enfoque estocástico: Método de las Realizaciones Múltiples.

La forma escogida para lidiar con la incertidumbre dentro del MOGIHA es el llamado método de las realizaciones múltiples (Feyn & Gorelick, 2004). Esta técnica consiste en que numerosas realizaciones del parámetro incierto son consideradas simultáneamente en una sola optimización, restringiendo las soluciones. Estas realizaciones son generadas a través de la distribución probabilística del parámetro, por lo que no están restringidas en número.

La variación del número de realizaciones incluidas en una optimización permite observar el comportamiento del modelo y sus variables con respecto a la incertidumbre, ya que una mayor cantidad de realizaciones simultáneas implica una mayor muestra de la incertidumbre del modelo. Este proceso se repite numerosas veces, con distintas muestras, para obtener un conjunto de soluciones lo suficientemente grande como para hacer un análisis estadístico válido. Así, cuando sólo se toma una realización en el modelo, es una aplicación directa del método de Montecarlo (Metropolis y Ulam, 1949).

Creado para modelar acuíferos bajo condiciones de incertidumbre en el campo de conductividad hidráulica, este método originalmente ejecuta una simulación del comportamiento del sistema asociado a cada realización en todas las iteraciones hasta encontrar el óptimo.

La formulación matemática del problema original se presenta a continuación.

$$\begin{aligned} \max Z &= e^t q && (1) \\ \text{Sujeto a:} &&& \\ \text{Realización 1: } & f(q) = \tilde{d}_i(K_1) \leq d_i^* \quad \forall i && (2.a) \\ \text{Realización 2: } & f(q) = \tilde{d}_i(K_2) \leq d_i^* \quad \forall i && (2.b) \\ & \vdots && \\ \text{Realización j: } & f(q) = \tilde{d}_i(K_j) \leq d_i^* \quad \forall i && (2.c) \\ & \vdots && \\ \text{Realización } s_{sz}: & f(q) = \tilde{d}_i(K_{s_{sz}}) \leq d_i^* \quad \forall i && (2.d) \\ & q \geq 0 && (3) \end{aligned}$$

Donde  $q$  es el vector de caudales extraídos del acuífero,  $e^t$  es un vector unitario transpuesto,  $K_j$  representa la  $j$  – ésima realización del campo de conductividad hidráulica,  $\tilde{d}_i$  es la profundidad del acuífero en el punto  $i$ ,  $d_i^*$  es el descenso máximo permitido del acuífero en el punto  $i$ , y  $s_{sz}$  es el tamaño de la muestra de realizaciones elegido. Luego se varía  $s_{sz}$  y se estudia cómo cambian los valores óptimos obtenidos. El objetivo original de la formulación es maximizar el caudal extraído de la napa, sujeto a descensos máximos en zonas protegidas.

Sin embargo, para aplicarse al sistema en estudio se debieron realizar varias modificaciones. Lo primero a considerar es que no se tiene una regla de operación fija para el canal revestido, por lo que no se puede realizar una simulación separada de cada realización. Esto se debe a que no hay una forma determinada del comportamiento del sistema, ya que lo que se busca es la operación del canal revestido en función de la incertidumbre. A raíz de esto se deben optimizar todas las realizaciones en conjunto para cada iteración del sistema.

Otro punto importante es que el período de estudio corresponde a los siete meses de la temporada de riego, por lo que cada realización corresponde a la serie de caudales de toda la temporada y no a un solo valor. Más aún, por ser el sistema dependiente del tiempo, hay variables de estado internas que dependen de su situación en tiempos anteriores (como el volumen almacenado en un acuífero).

Sólo las variables que indican decisiones de gestión son dejadas como únicas en relación a las realizaciones, manteniendo su variabilidad temporal. Estas variables corresponden a la satisfacción de la demanda de riego, el caudal bombeado de las napas para irrigar y los caudales derivados del río a través de canales, revestidos o no, hacia los sectores de consumo. Todo el resto de variables dependen tanto del tiempo como de la realización bajo la cual son creadas.

Finalmente la formulación del sistema se puede expresar como a continuación.

$$\min Z = \sum_t [\sum_{j=1}^{ssz} (c^T b_t^j) - e^T a_t] \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\text{Realización 1: } g_t(I_t^1, a_t, b_t^1) \leq 0 \quad \forall t \quad (5.a)$$

$$h_t(I_t^1, a_t, b_t^1) = 0 \quad \forall t \quad (5.b)$$

⋮

$$\text{Realización } j: g_t(I_t^j, a_t, b_t^j) \leq 0 \quad \forall t \quad (5.c)$$

$$h_t(I_t^j, a_t, b_t^j) = 0 \quad \forall t \quad (5.d)$$

⋮

$$\text{Realización } s_{sz}: g_t(I_t^{ssz}, a_t, b_t^{ssz}) \leq 0 \quad \forall t \quad (5.e)$$

$$h_t(I_t^{ssz}, a_t, b_t^{ssz}) = 0 \quad \forall t \quad (5.f)$$

$$a, b \geq 0 \quad (6)$$

Donde  $a_t$  es el vector de variables de decisiones de gestión para el mes  $t$ ,  $e^T$  es un vector transpuesto de factores para las variables de decisión,  $b_t^j$  es el vector de variables de estado internas del mes  $t$  para la realización  $j$ ,  $c^T$  es un vector transpuesto de factores para las variables de estado internas,  $I_t^j$  es el vector de caudales, y  $g_t$  y  $h_t$  son vectores de funciones que dependen de la topología (balances de masa, capacidades de canales, etc.). La forma final de la función objetivo y de las restricciones se explica en el apartado de Programación del modelo, ya que para su comprensión cabal es necesario conocer la topología del modelo.

Para fines de este estudio se consideraron pruebas con 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 realizaciones simultáneas ( $s_{sz}$ ); y se realizaron 300 optimizaciones para cada  $s_{sz}$ , siguiendo lo recomendado (Feyen y Gorelick, 2004).

### **3.1.2. Información hidrológica base: caudales reales y pronosticados.**

El principal punto de entrada al modelo de gestión, y el que está sujeto al estudio de la incertidumbre de los caudales pronosticados, es la estación fluviométrica de Aconcagua en Chacabuquito. Esta estación representa la entrada del río al valle, donde el riego agrícola se convierte en el principal uso del agua en la zona. Aguas abajo de esta estación es donde se proyecta el sistema de bocatomas unificadas a analizar.

Considerando lo anterior, gran parte del estudio se centrará en esta estación y los datos hidrológicos se referirán a ésta, tanto los observados como los obtenidos a través de los modelos hidrológicos. Las otras estaciones de la zona en estudio servirán para calibrar el MOGIHA y obtener relaciones entre las cuencas que permitan un desempeño apropiado de este.

Como se vio en la sección anterior, es necesario generar un gran número de caudales en Aconcagua en Chacabuquito con el fin de hacer efectiva la programación del método de las realizaciones múltiples. Para esto se realizó un estudio estadístico de los errores de los modelos hidrológicos con respecto a los caudales observados en su estación fluviométrica principal, es decir, la diferencia entre el valor pronosticado y el observado. A continuación se presenta la información obtenida tanto de las estaciones de medición como de los modelos hidrológicos en estudio.

#### **3.1.2.1. Información hidrológica.**

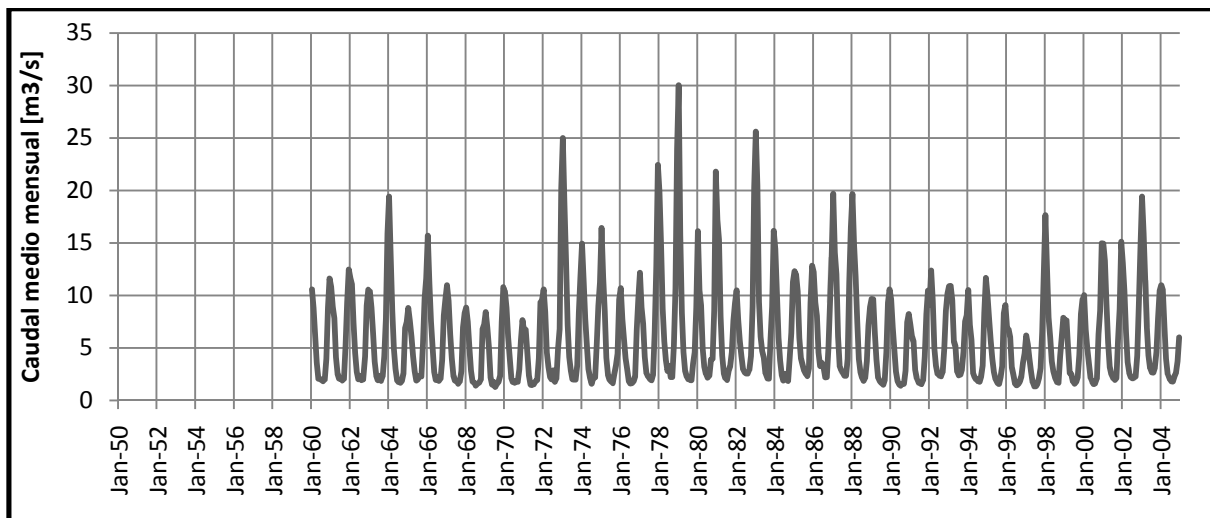
Las estaciones fluviométricas que se utilizaron en este estudio corresponden a las estaciones de Juncal en Juncal, Aconcagua en Chacabuquito, Aconcagua en San Felipe, Aconcagua en Romeral y Putaendo en Resguardo Los Patos, con las características que presenta la tabla 3.1. Los caudales medios mensuales de estas estaciones, obtenidos del EIA del Embalse Puntilla del Viento (CADE – IDEPE, 2007), se resume en las figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y se muestran en el anexo A.



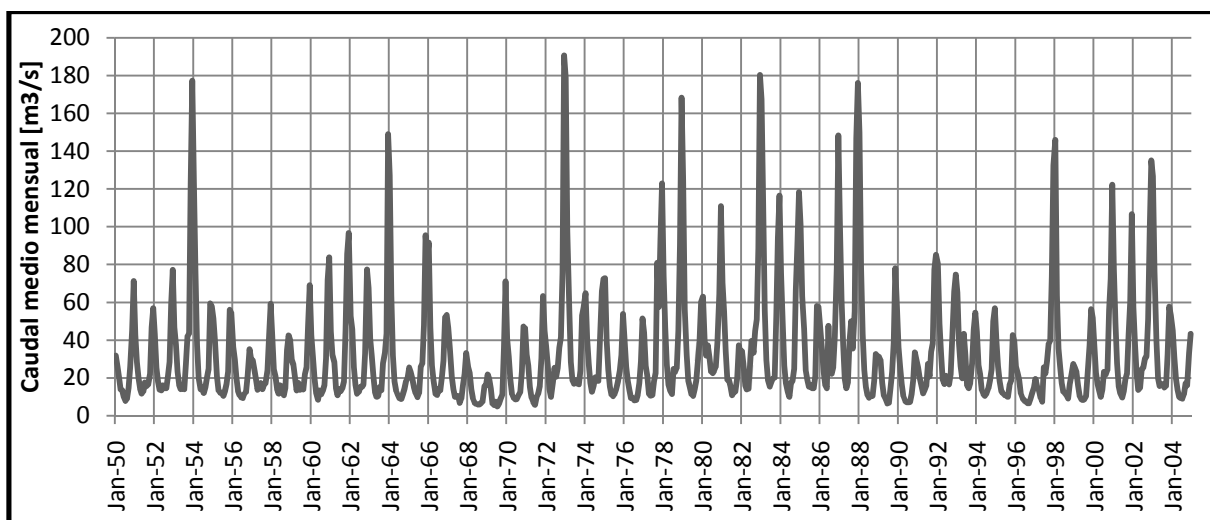
**Tabla 3.1.** Estaciones fluviométricas consideradas en el estudio.

Fuente: (DGA, 2004a)

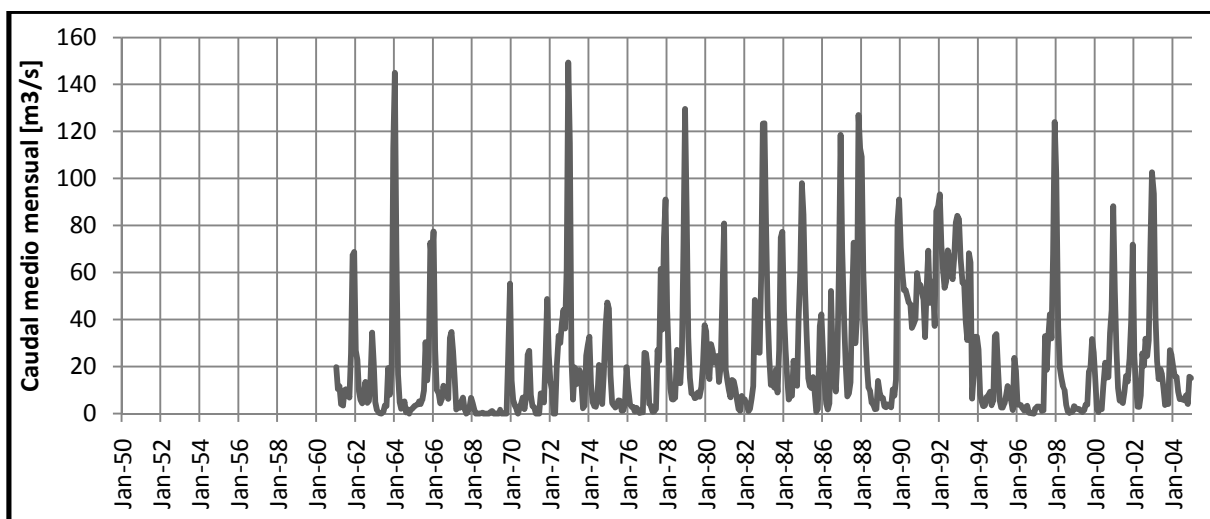
Código BNA	Nombre estación	Altura [m.s.n.m]	Longitud W	Latitud S	Área [km <sup>2</sup> ]
05401003-6	Río Juncal en Juncal	1800	32° 53' 0"	70° 9' 0"	233
05410002-7	Río Aconcagua en Chacabuquito	1030	32° 50' 0"	70° 34' 0"	2400
05414001-0	Río Putaendo en Resguardo Los Patos	1218	32° 31' 0"	70° 36' 0"	927
05410005-1	Río Aconcagua En San Felipe	630	32° 45' 0"	70° 45' 0"	3005
05423003-6	Río Aconcagua En Romeral	310	32° 50' 0"	71° 4' 0"	5476



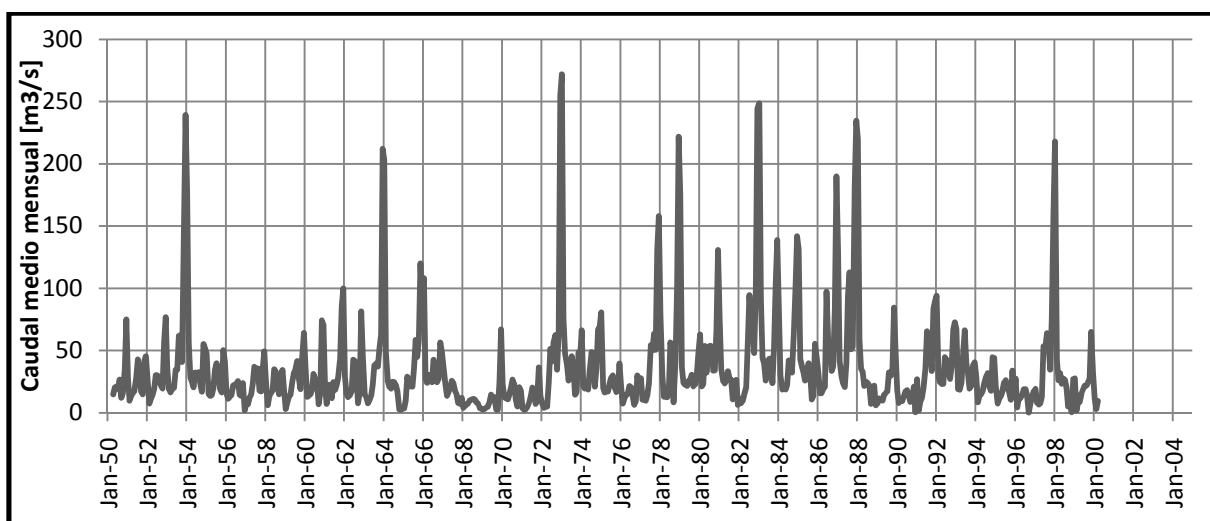
**Figura 3.2.** Caudales medios mensuales en Juncal en Juncal.



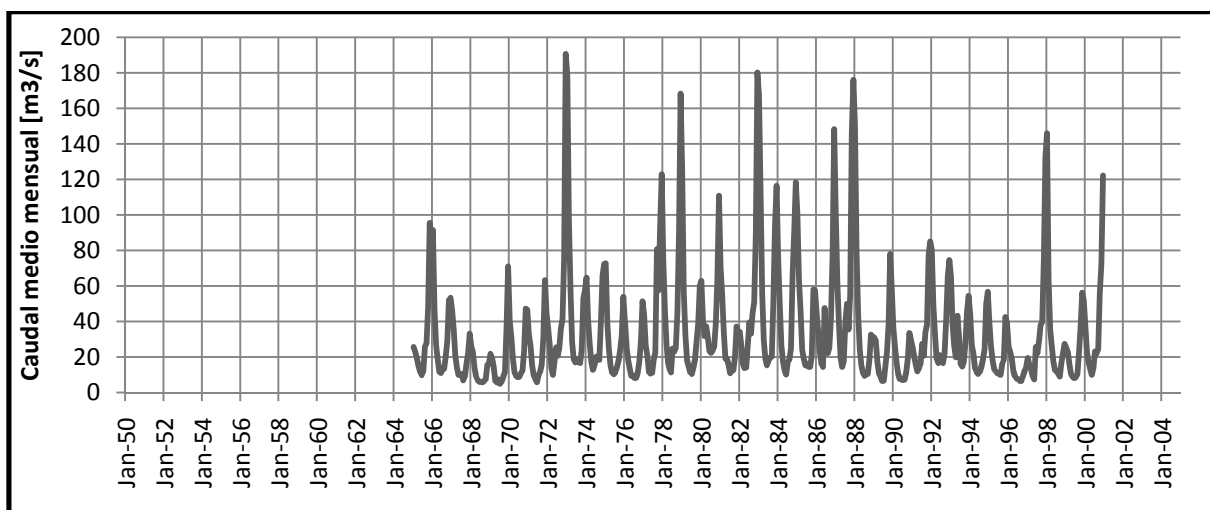
**Figura 3.3.** Caudales medios mensuales en Aconcagua en Chacabuquito.



**Figura 3.4.** Caudales medios mensuales en Aconcagua en San Felipe.



**Figura 3.5.** Caudales medios mensuales en Aconcagua en Romeral.

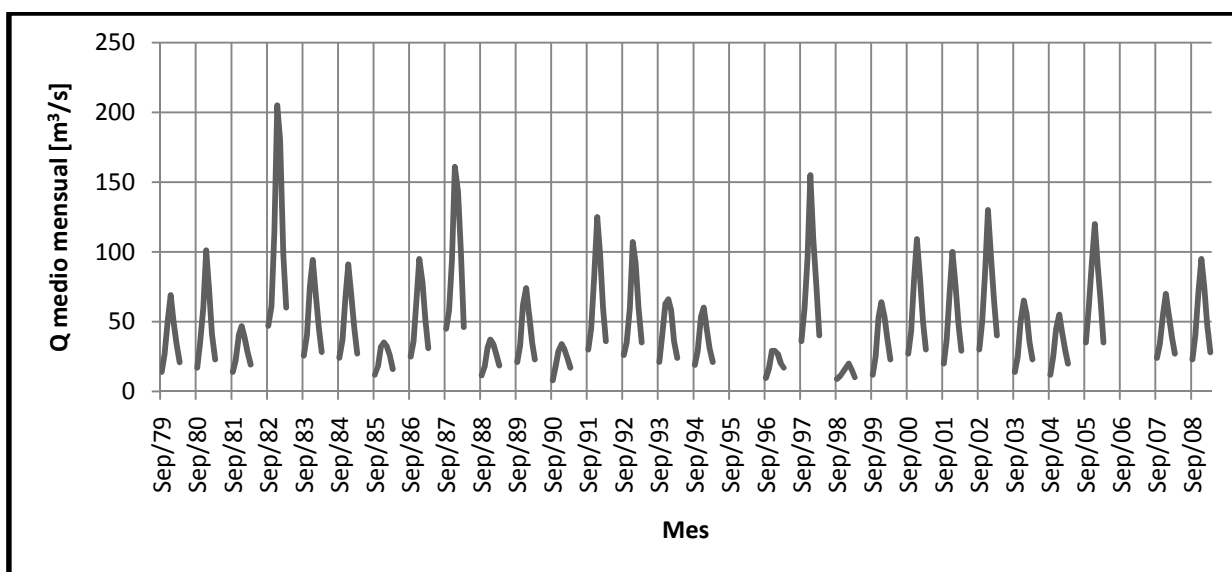


**Figura 3.6.** Caudales medios mensuales en Putaendo en Resguardo Los Patos.

Para los modelos hidrológicos de la DGA y el WEAP, la estación fluviométrica principal es Aconcagua en Chacabuquito, mientras que el modelo de RNA entrega los resultados en Juncal en Juncal, estación fluviométrica localizada aguas arriba de Chacabuquito.

### 3.1.2.2. Pronósticos de los modelos hidrológicos.

El modelo de la DGA sólo entrega los valores pronosticados para la temporada de riego, desde septiembre de 1979 hasta marzo de 2009, excluyendo los años hidrológicos de 1995/1996 y 2006/2007 tal como se observa en la figura 3.7. Aparte de sus pronósticos no se tiene más información de este modelo, por lo que la forma cómo se pronostican los caudales, cuántos modelos se han usado a lo largo de los años y en qué años cambiaron se desconoce. Como consecuencia de esto se considera que todos los datos corresponden a un único modelo "DGA" y se trabajan en grupo. Esta información fue extraída directamente de los informes de la DGA (DGA, 1979 - 2008) y consta de 28 temporadas de riego.

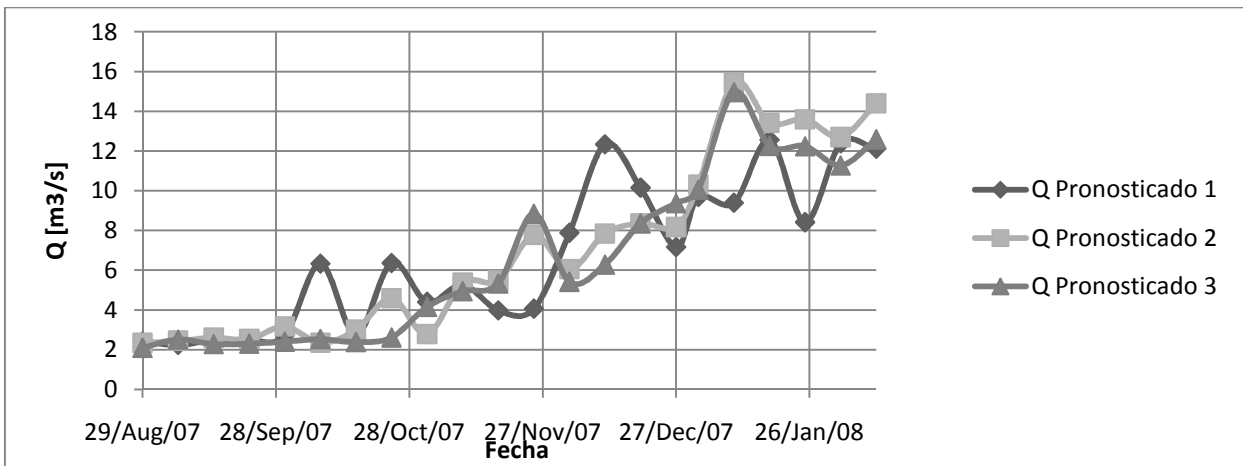


Fuente: (DGA, 1979 - 2008)

**Figura 3.7.** Pronóstico de caudales en Aconcagua en Chacabuquito modelo DGA.

En el caso del modelo de RNA, los caudales pronosticados se obtuvieron directamente de los resultados del estudio. Éstos corresponden a pronósticos periódicos para los meses de agosto de 2007 hasta febrero de 2008, por lo cual se tienen muy pocos datos. Sin embargo, existen tres pronósticos distintos para cada fecha los cuales fueron unidos como si fueran distintas muestras del mismo modelo. Además, los caudales diarios fueron considerados como muestras de caudales mensuales.

Sin estas consideraciones no se hubiese podido ajustar una curva de distribución de probabilidad a los errores, ya que las muestras serían tan pocas que no habría un test de bondad de ajuste válido. De hecho se obtuvieron sólo 3 muestras para el mes de agosto; 12 para los meses de septiembre, noviembre, diciembre y enero; 9 para octubre y 6 para febrero. La figura 3.8 muestra la información obtenida desde los tres pronósticos del modelo RNA.

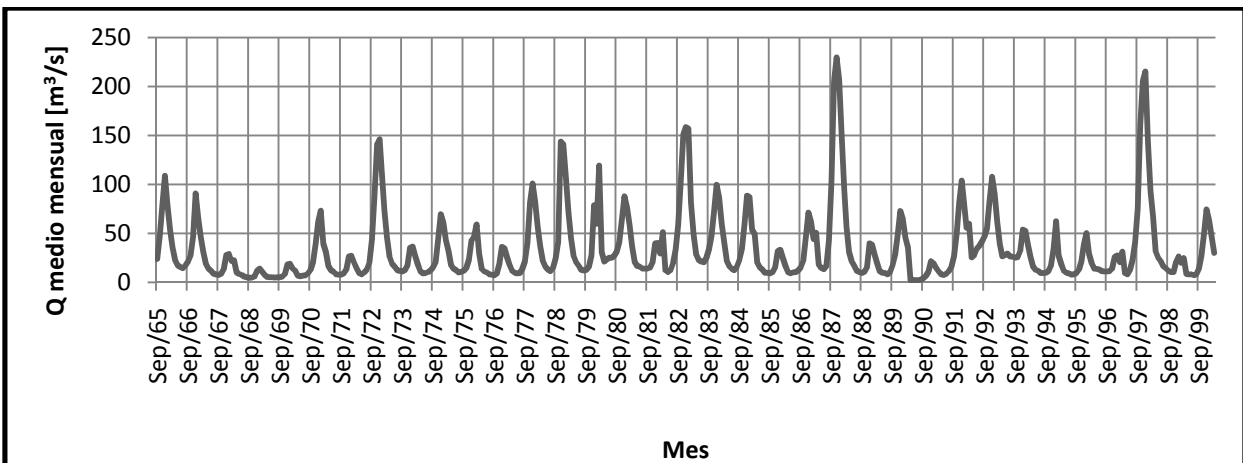


**Figura 3.8.** Pronóstico de caudales para Juncal en Juncal modelo RNA.

Las diferencias del modelo RNA con respecto a los otros estudiados, vienen de que el objetivo buscado con este modelo hidrológico es evaluar la oferta de agua diaria disponible en las zonas cordilleranas durante la temporada estival a escala semanal (Cartes, 2009). Por tanto nunca pretendió generar caudales medios mensuales en la zona del valle, como lo hacen los otros dos modelos hidrológicos en estudio.

El modelo WEAP consiste en una síntesis de las dos primeras secciones de la cuenca del río Aconcagua más la sección del río Putaendo, y por su naturaleza de modelo de simulación se puede obtener los caudales en cualquier tiempo, en cualquier elemento del sistema que compone al modelo. Para conseguir caudales de pronóstico se modificó la climatología, transformando las series de precipitación y temperatura en promedios mensuales y se consideró que no cae lluvia durante la temporada de riego.

El punto escogido para la evaluación del caudal del río Aconcagua es Bajo Central El Sauce, ya que es el punto aguas arriba de Aconcagua en Chacabuquito y el modelo no presenta entradas o salidas de agua bajo entre éste y la estación, por lo tanto es el que mejor la representa. El período de estudio corresponde desde abril de 1965 hasta septiembre de 2000, utilizando los datos de calibración (1965/1966 – 1989/1990) y validación (1990/1991 – 1999/2000), logrando 35 temporadas completas. Los caudales obtenidos se presentan en la figura 3.9. A pesar de que se obtuvo la serie completa de caudales, para efectos de este estudio sólo se consideró la temporada de riego de septiembre a marzo.



**Figura 3.9.** Pronóstico de caudales Bajo Central El Sauce modelo WEAP.

### 3.1.3. Cálculo de los errores y ajuste de función de probabilidad.

Recopilada la información de los caudales pronosticados por los modelos hidrológicos, se realizó el cálculo de los errores asociados definidos como la diferencia entre el caudal pronosticado y el observado en la estación de referencia. En la figura 3.10, 3.11 y 3.12 se observan los histogramas de los errores de cada mes para cada modelo.

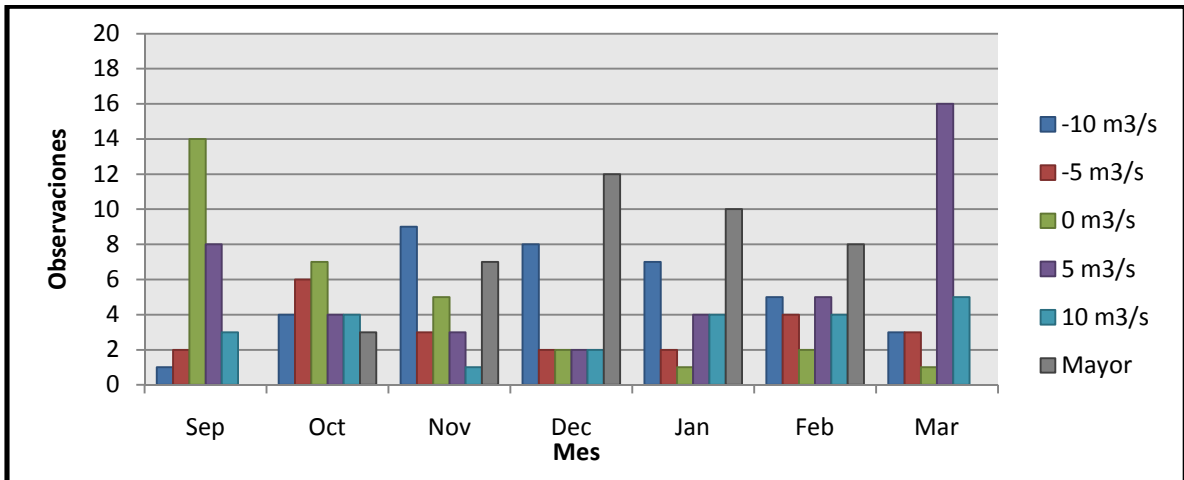


Figura 3.10. Histograma de los errores del modelo DGA.

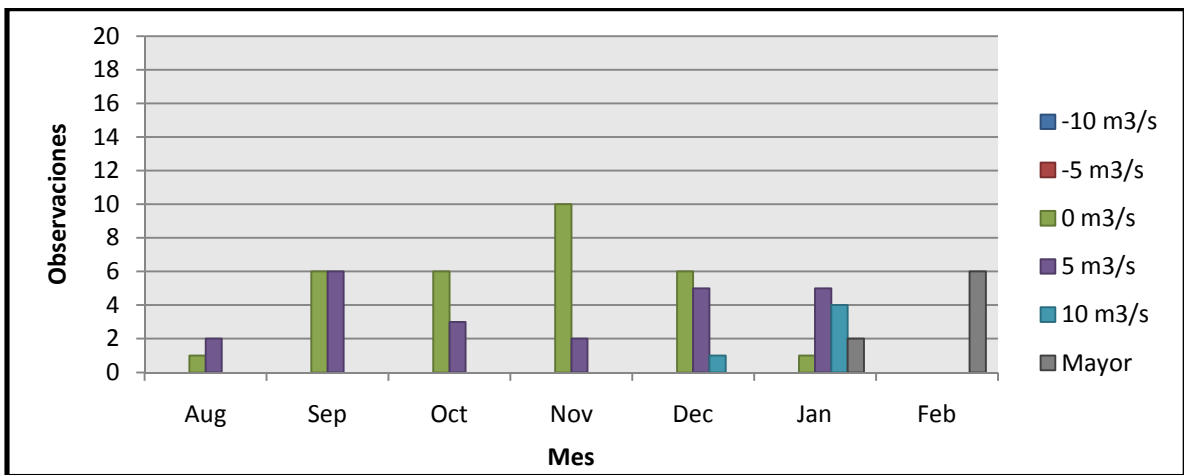
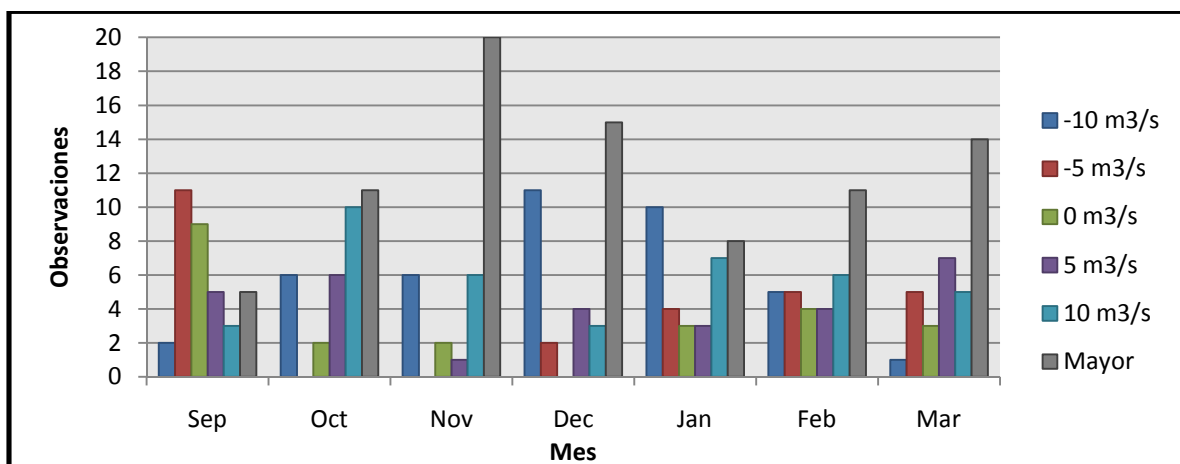


Figura 3.11. Histograma de los errores del modelo RNA.



**Figura 3.12.** Histograma de los errores del modelo WEAP.

A los errores estimados se les realizó un test de bondad de ajuste para encontrar una curva de densidad de probabilidad a cada mes. Para los modelos DGA y WEAP se ocupó el test chi – cuadrado, y para el modelo RNA se ocupó el test de Kolmogorov – Smirnov debido a los pocos datos que presenta para cada mes. Las distribuciones encontradas y sus parámetros característicos se presentan en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 para los modelos DGA, RNA y WEAP respectivamente, y las funciones de densidad de probabilidad se definen según las expresiones (7) y (8).

No se realizó un estudio sobre posibles correlaciones entre los errores de los diferentes meses, por tanto los errores de cada mes se considerarán a partir de ahora como variables independientes entre sí. Consecuencia de esto es que los caudales generados de un año, como se explica en el próximo punto, estarán formados por caudales medios mensuales que pueden ser muy distintos. Esta es una importante limitación del estudio, pero corresponde a los alcances del mismo.

**Tabla 3.2.** Distribución de probabilidad para los errores del modelo DGA.

Mes	Distribución	Mediana [m³/s]	b [m³/s]
Sep	Laplace	-1.06	3.19
Oct	Laplace	-1.43	6.85
Nov	Laplace	-3.90	12.75
Dec	Laplace	4.91	16.50
Jan	Laplace	5.01	14.06
Feb	Laplace	4.22	9.50
Mar	Laplace	2.70	4.41

**Tabla 3.3.** Distribución de probabilidad para los errores del modelo RNA.

Mes	Distribución	$\mu$ [m³/s]	$\sigma$ [m³/s]
Aug	Normal	0.18	0.17
Sep	Normal	-0.04	0.24
Oct	Normal	0.00	1.60
Nov	Normal	-0.78	1.52
Dec	Normal	0.19	3.24
Jan	Normal	5.35	4.37
Feb	Normal	11.34	0.94

**Tabla 3.4.** Distribución de probabilidad para los errores del modelo WEAP.

Mes	Distribución	Mediana [m <sup>3</sup> /s]	b [m <sup>3</sup> /s]
Sep	Laplace	-2.32	9.71
Oct	Laplace	5.30	17.16
Nov	Laplace	11.53	22.66
Dec	Laplace	5.08	21.86
Jan	Laplace	1.08	15.03
Feb	Laplace	3.94	13.20
Mar	Laplace	8.42	8.81

Función de densidad de probabilidad de la Distribución de Laplace:

$$f(x|a, b) = \frac{1}{2b} \begin{cases} \exp\left(-\frac{a-x}{b}\right) & \text{si } x < a \\ \exp\left(-\frac{x-a}{b}\right) & \text{si } x \geq a \end{cases} \quad (7)$$

Función de densidad de probabilidad de la Distribución Normal:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

Donde x es la variable aleatoria, a es la mediana, b es el parámetro de escala,  $\mu$  es la media y  $\sigma$  es la desviación estándar de la distribución (Evans, Hastings, & Peacock, 2000).

#### 3.1.4. Generación de los caudales de entrada.

Para los caudales de entrada al modelo de gestión se crearon tres escenarios correspondientes a años húmedos [definidos por los caudales con probabilidad de excedencia (Pex) del 20%], años normales (50%) y años secos (85%). Estos caudales se resumen en la tabla 3.5 y fueron obtenidos de estudios de la DGA (DGA, 2004b). A fin de obtener los flujos que ingresan al modelo, se sumó a los caudales característicos de los escenarios los errores generados aleatoriamente de las distribuciones de probabilidad encontradas. Así se obtuvo un millón de caudales medios mensuales para cada mes, para cada escenario, para cada modelo: 63 millones en total, es decir, 9 millones de realizaciones.

Se fijaron caudales mínimos distintos para todos los meses con el fin de evitar problemas numéricos al momento de realizar la optimización. Dichos caudales se encontraron normalizando los flujos con Pex del 85% en Aconcagua en Chacabucuito por el menor de éstos en la temporada de riego, septiembre. Se escogió esta Pex por ser la que menores caudales tiene, y por tanto, la más propensa a generar caudales negativos. Posteriormente, estos caudales se multiplicaron por un factor que resultó ser el mínimo que permitía una buena resolución del problema de optimización. El factor adoptado fue 0.776, los caudales mínimos se muestran en la tabla 3.6 y el programa con que se encontró se expone en el anexo con el nombre de genqmin.m. El porcentaje teórico de caudales afectados por esta corrección se muestra en la tabla 3.7. La corrección de los caudales se hizo mediante el programa Qmin.m que se presenta en el anexo B.

**Tabla 3.5.** Caudales según probabilidad de excedencia para Aconcagua en Chacabuquito y Juncal en Juncal.

Estación	Pex Juncal			Pex Chacabuquito			
	Mes	20% [m <sup>3</sup> /s]	50% [m <sup>3</sup> /s]	85% [m <sup>3</sup> /s]	20% [m <sup>3</sup> /s]	50% [m <sup>3</sup> /s]	85% [m <sup>3</sup> /s]
Ago		2.144	1.854	1.639	20.817	14.719	9.303
Sep		2.405	2.103	1.836	27.93	18.533	11.183
Oct		4.812	3.805	2.91	42.405	28.417	17.356
Nov		9.413	8.047	6.364	79.675	54.203	31.177
Dic		14.29	10.982	8.043	109.112	65.928	34.35
Ene		15.945	11.167	8.187	81.336	46.247	28.273
Feb		12.319	9.178	7.054	50.426	32.976	22.448
Mar		8.471	6.781	5.279	30.65	21.565	16.188

**Tabla 3.6.** Caudales medios mínimos mensuales.

Mes	Q min [m <sup>3</sup> /s]
Ago	0.65
Sep	0.78
Oct	1.20
Nov	2.16
Dic	2.38
Ene	1.96
Feb	1.56
Mar	1.12

**Tabla 3.7.** Porcentaje teórico de caudales afectados por el caudal mínimo impuesto según probabilidad de excedencia y modelo.

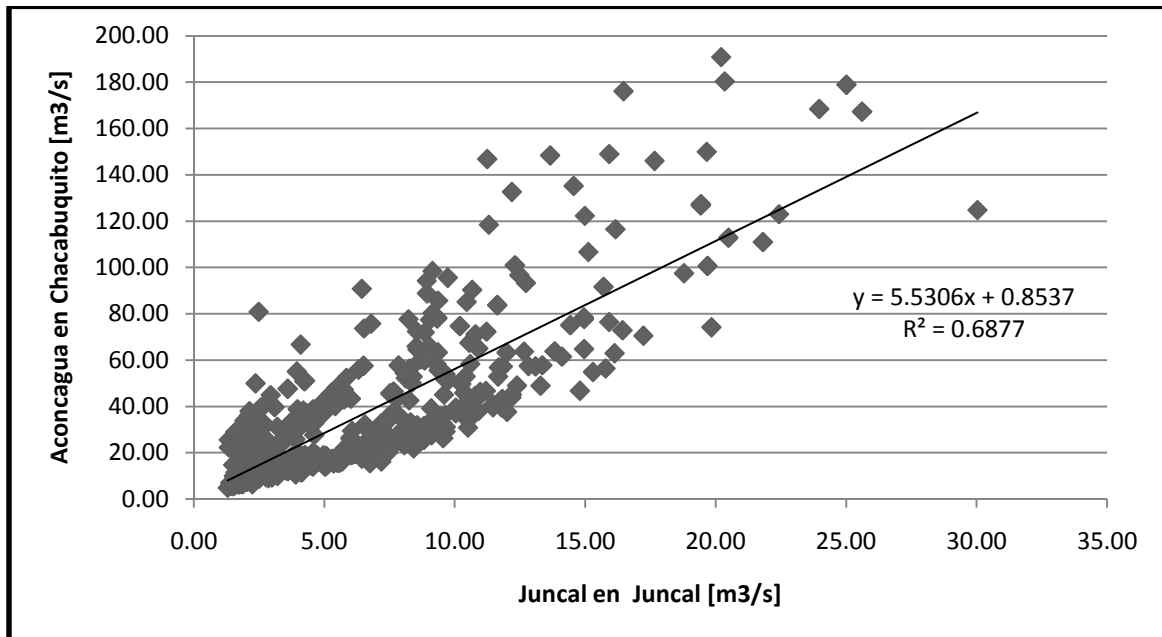
Mes	Modelo DGA			Modelo RNA			Modelo WEAP		
	Pex 20%	Pex 50%	Pex 85%	Pex 20%	Pex 50%	Pex 85%	Pex 20%	Pex 50%	Pex 85%
Ago	-	-	-	0.00%	0.00%	0.00%	-	-	-
Sep	0.13%	0.88%	4.80%	0.00%	0.00%	0.00%	8.06%	15.10%	26.37%
Oct	1.24%	4.90%	14.34%	0.15%	0.97%	3.77%	7.73%	13.37%	20.52%
Nov	2.89%	8.66%	20.62%	0.00%	0.00%	0.02%	5.09%	9.44%	15.38%
Dic	0.34%	1.61%	6.49%	0.00%	0.04%	0.70%	1.15%	3.70%	10.62%
Ene	0.02%	0.37%	3.50%	0.00%	0.01%	0.11%	0.04%	0.66%	5.40%
Feb	0.01%	0.29%	1.93%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%	1.26%	4.90%
Mar	0.00%	0.02%	0.22%	-	-	-	0.07%	0.52%	1.71%

Con esta corrección en los caudales, también se evitó que quedasen caudales negativos cuando el error generado al azar fue mayor que el valor correspondiente a la probabilidad de excedencia. Los caudales negativos, junto con ir en contra de la naturaleza de la variable, provocan errores en los balances de masa.

Contrastando con el caso de los modelos DGA y WEAP, donde la generación de caudales fue directa para Aconcagua en Chacabuquito, para el modelo RNA los caudales se generaron en la estación

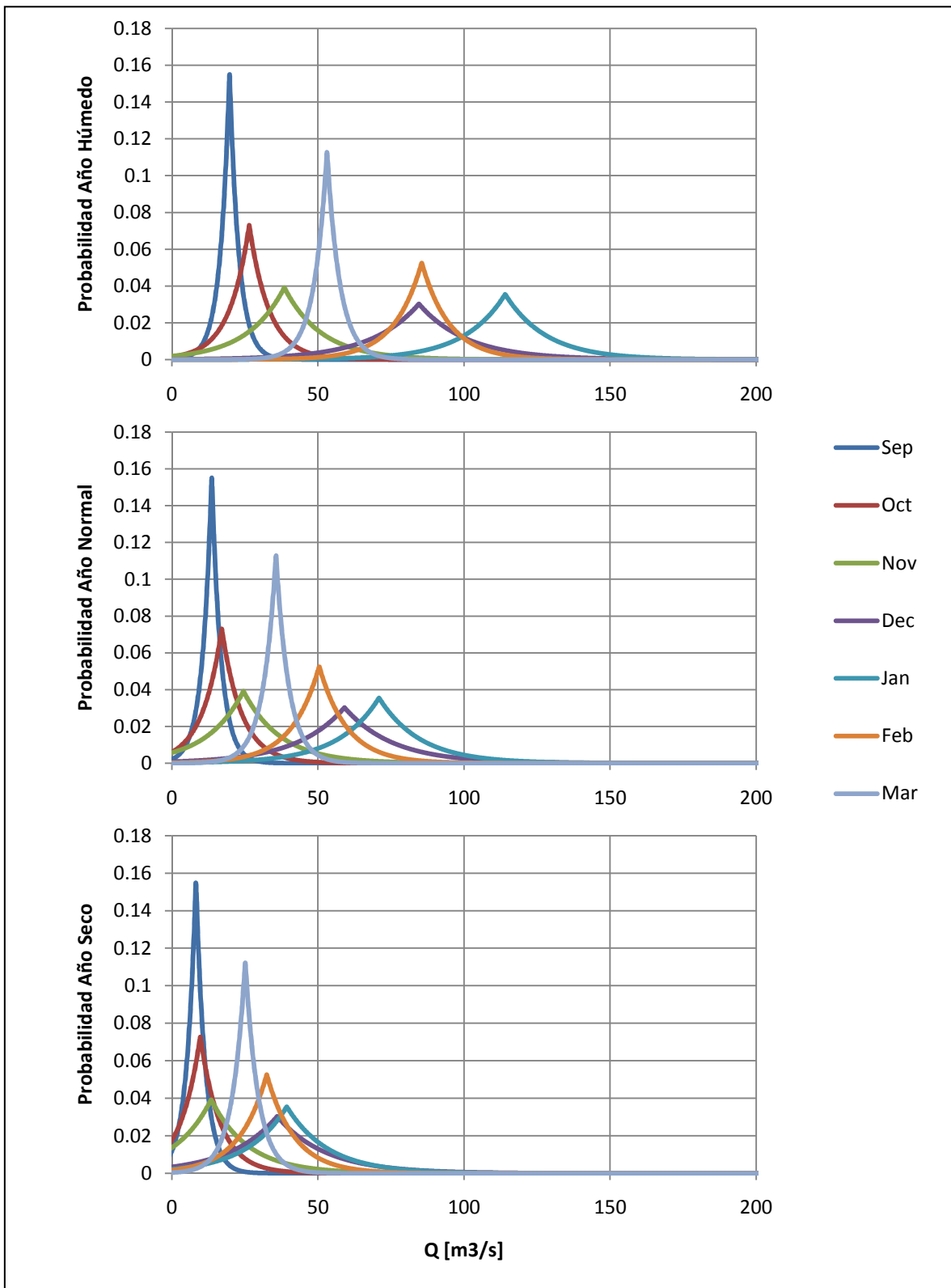


de Juncal en Juncal. Fue necesario entonces encontrar una función de transferencia entre dichas estaciones. Para esto se realizó una regresión lineal entre los caudales observados en Juncal en Juncal y Aconcagua en Chacabuquito, tal como se observa en la figura 3.13. Esta función afecta la forma como la incertidumbre entra al modelo de gestión, como se discute más adelante.

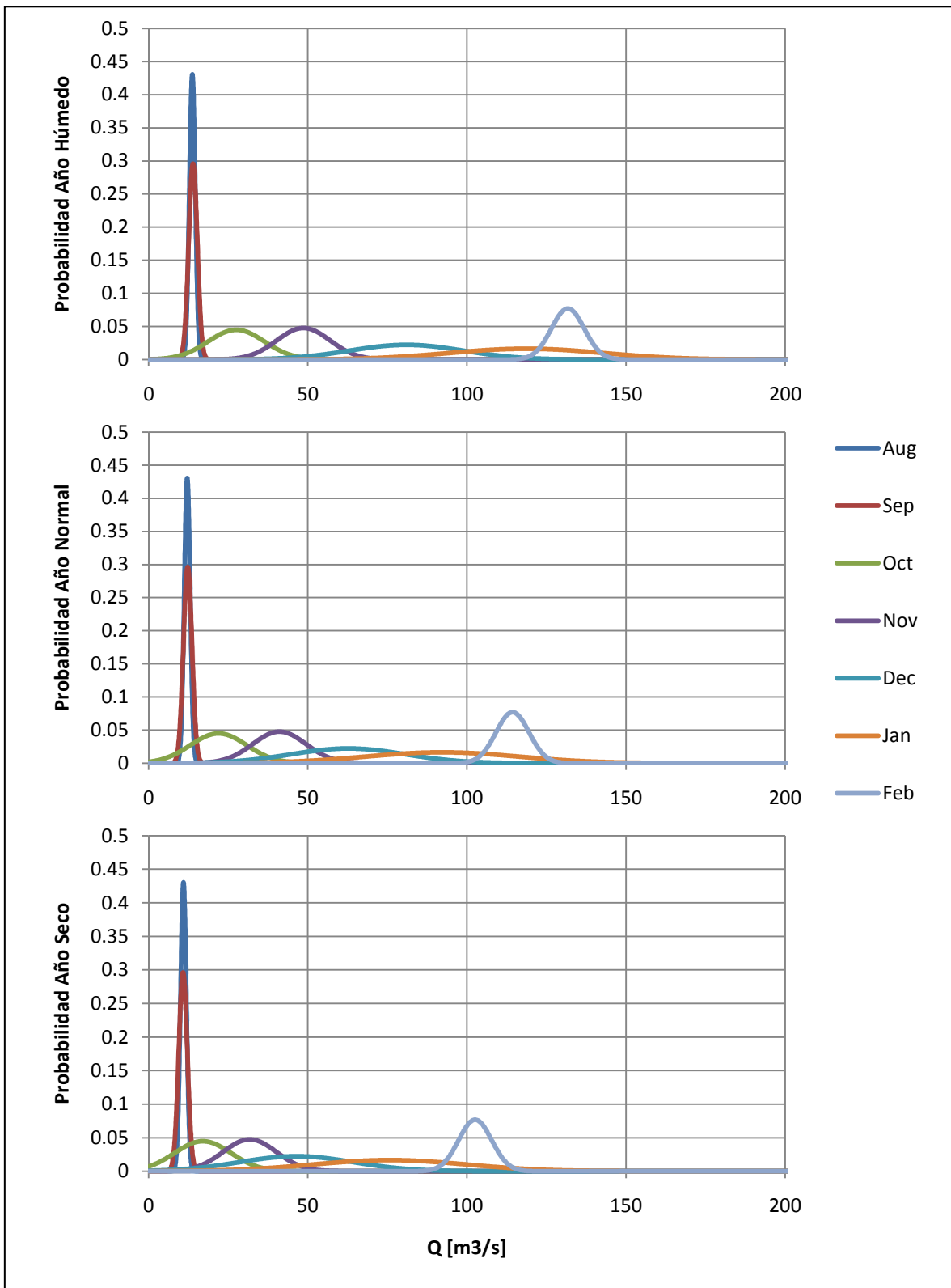


**Figura 3.13.** Función de transferencia entre Juncal en Juncal y Aconcagua en Chacabuquito.

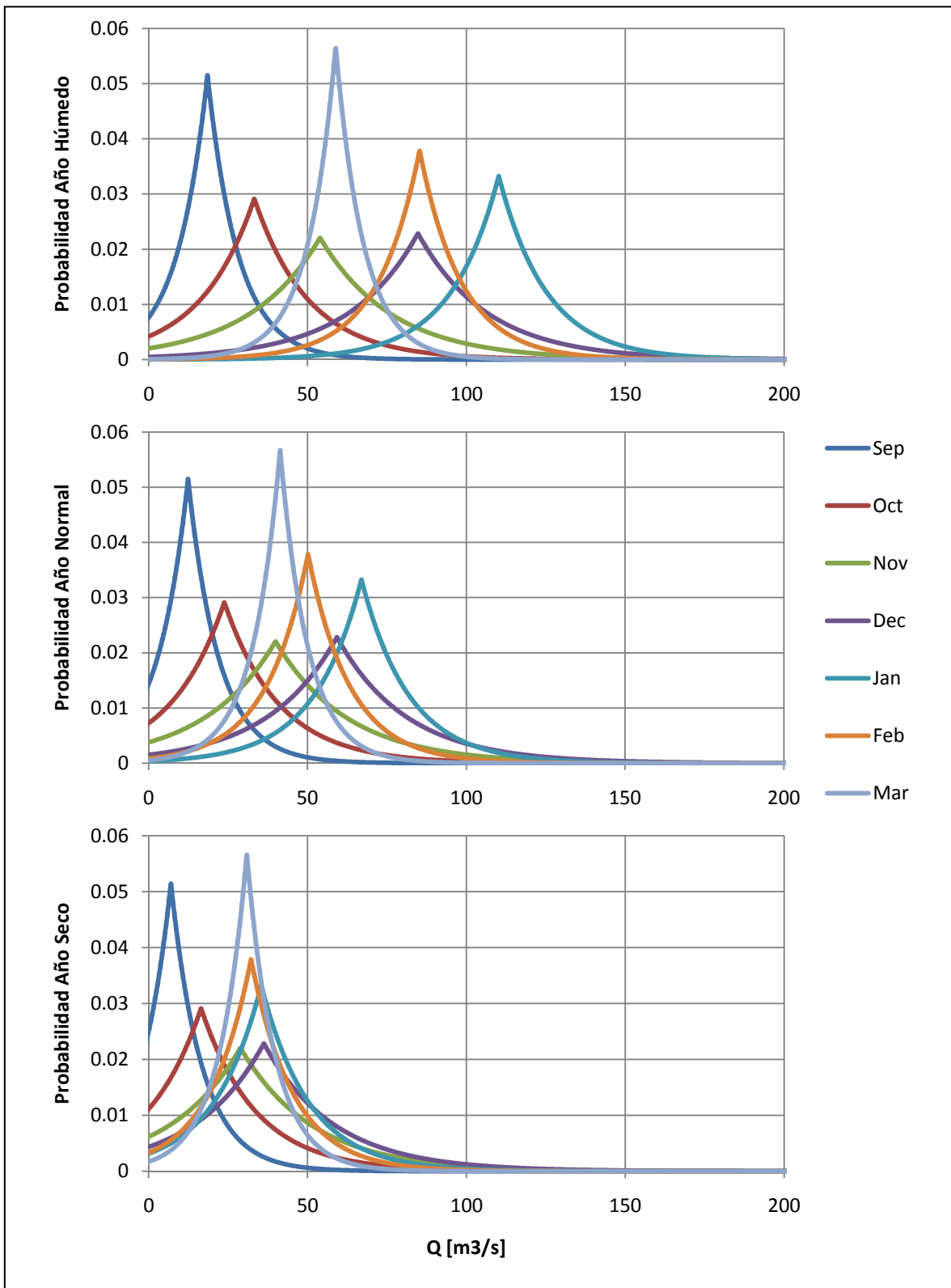
Finalmente los caudales se calcularon mediante los programas dgaerror.m, rnaerror.m y weaplerror.m para los modelos DGA, RNA y WEAP respectivamente. Estos se pueden encontrar en el anexo B. Las distribuciones de caudales generados por modelo hidrológico para Aconcagua en Chacabuquito según escenario se pueden observar en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 para los modelos DGA, RNA y WEAP respectivamente.



**Figura 3.14.** Distribuciones de probabilidad de los caudales generados para en modelo DGA según escenario en Aconcgua en Chacabuquito.



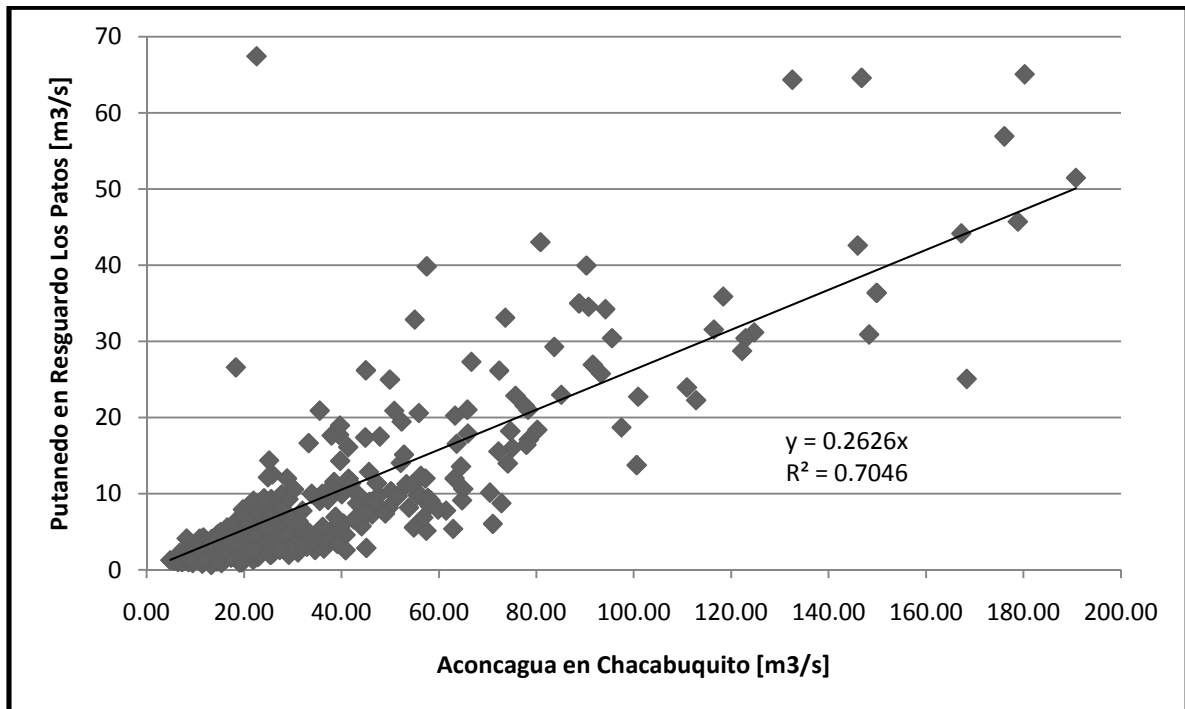
**Figura 3.15.** Distribuciones de probabilidad de los caudales generados para en modelo RNA según escenario en Aconcagua en Chacabuquito.



**Figura 3.16.** Distribuciones de probabilidad de los caudales generados para en modelo WEAP según escenario en Aconcagua en Chacabuquito.

Para obtener los caudales de la otra entrada del modelo de gestión, el río Putaendo, se encontró una función de transferencia mediante una regresión lineal de los datos observados en la estación fluviométrica de Putaendo en Resguardo Los Patos y Aconcagua en Chacabucuito. Esta regresión se muestra en la figura 3.17. Se escogió esta estación por ser la con mayor información disponible en la cuenca del Putaendo y porque aguas abajo de ésta no se observan entradas de importancia al río.

Es importante mencionar que debido a la baja cantidad de pronósticos obtenidos de los modelos hidrológicos, no fue posible realizar un estudio estadístico de los errores de los modelos según tipo de año (húmedo, normal o seco). Esto debido a que para obtener resultados estadísticamente significativos se deben contar con a lo menos 5 muestras por intervalo, lo que no se cumplía en todos los casos.



**Figura 3.17.** Función de transferencia entre Aconcagua en Chacabucuito y Putaendo en Resguardo Los Patos.

3.1.4.1. Discusión sobre la incertidumbre de la extensión del modelo RNA a Aconcagua en Chacabucuito.

Una regresión lineal simple es un modelo estocástico, por lo que tiene asociada una incertidumbre propia que hace interferencia con la de los pronósticos de los modelos hidrológicos. Esta incertidumbre nace de la estimación de los parámetros que definen la recta de la regresión. Si se define la recta de regresión lineal simple como:

$$Y = \alpha + \beta X + E \tag{9}$$

Donde Y es la variable dependiente, X la independiente, E el error de la medición de X,  $\alpha$  la constante de intersección y  $\beta$  la pendiente. Si se asume que  $E \sim N(0, \sigma)$  se puede determinar a y b tal que:

$$\bar{Y} = a + bX \tag{10}$$

Donde  $a$  y  $b$  corresponden a estimadores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , basados en una muestra de tamaño  $n$ . Así, el modelo que se presenta generalmente de regresión lineal representa el comportamiento de la esperanza de la variable aleatoria  $Y$ . Se puede comprobar que la variable aleatoria  $Y$  sigue una distribución normal de media  $\mu_Y = \alpha + \beta x$  y varianza  $\sigma_Y^2 = \sigma^2$ .

Tal como se vio en la sección anterior, los errores del modelo RNA también tienen una distribución normal por lo cual se puede inferir que la variable aleatoria de los caudales en Aconcagua en Chacabucuito sigue una distribución normal bivariada. No obstante, esta distribución depende de los valores reales de  $\alpha$  y  $\beta$  por lo que nunca se podrá definir completamente. El máximo acercamiento que se puede obtener de estos parámetros es una estimación de los intervalos de confianza donde se encuentran (Walpole, 1999), tal como se muestra en la tabla 3.8 para una confianza del 95%.

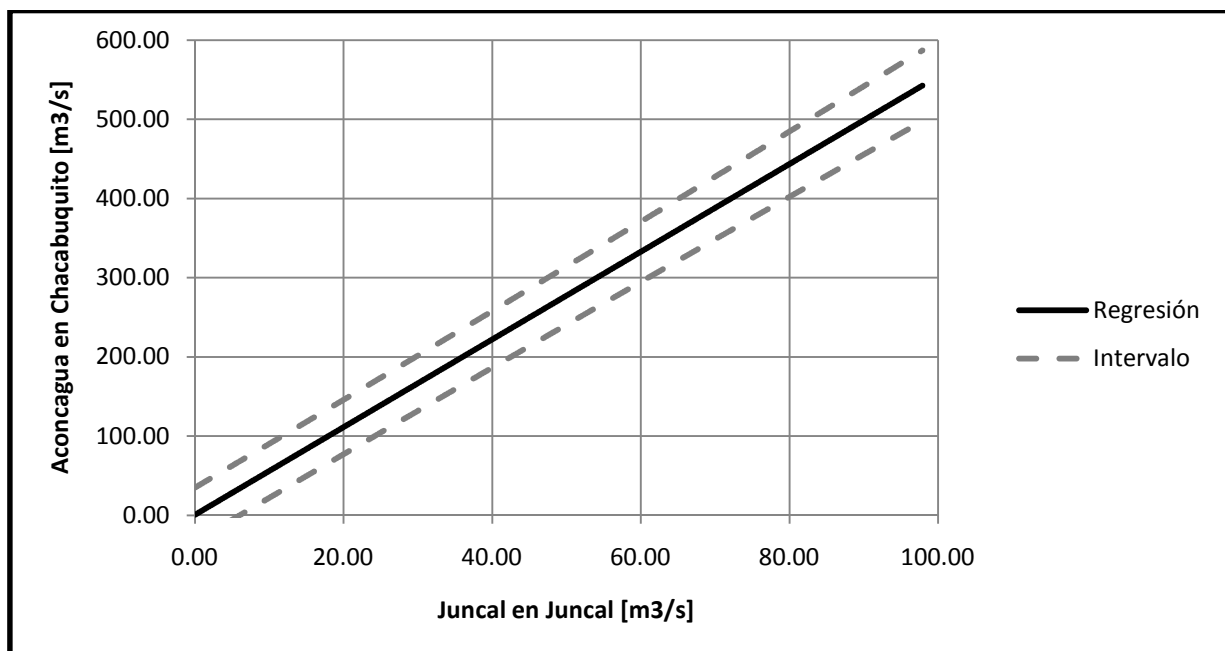
**Tabla 3.8.** Intervalos de confianza del 95% para los parámetros de la regresión lineal.

Parámetro	Mínimo	Máximo
$\alpha$	-5.96	7.71
$\beta$	5.21	5.84

Ya que no se puede definir completamente la función de distribución de probabilidad en el punto de interés, se puede definir un intervalo de confianza para los valores predichos por el modelo de regresión lineal. Este intervalo es función tanto de la variable independiente como de los datos recopilados, y se define como (Walpole, 1999):

$$a + bX \pm t_{\alpha/2}^{n-2} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X-\bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (11)$$

Donde  $t_{\alpha/2}^{n-2}$  es el valor de  $\alpha/2$  en la distribución  $t$  con  $n-2$  grados de libertad,  $s$  es el estimador de  $\sigma$  y  $S_{xx}$  es igual a  $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ . Esta función toma valores aproximados de  $\pm 34$  [ $m^3/s$ ] con un 95% de confianza para el rango estudiado y se muestra graficada junto a la regresión en la figura 3.18.



**Figura 3.18.** Intervalo de confianza del 95% para la predicción de la regresión lineal del modelo RNA.

## **3.2. Definición de la topología.**

Para poder definir un sistema es necesario identificar su límite, los elementos que lo componen en su interior y las relaciones que permiten que éstos interactúen entre sí. En el caso de un sistema hídrico como el estudiado, la frontera natural es clara y corresponde a la divisoria de las aguas. Pero cuando se buscan los elementos que presentan actividad, se vuelve más complejo principalmente por su número y las relaciones poco claras que en ocasiones presentan.

Es así como la elección de un nivel de agregación adecuado se vuelve fundamental. En general este nivel depende de lo que se busque con el modelo y de la escala del mismo, por lo que es difícil definirlo a priori. Como se mostró en el capítulo anterior, la programación estocástica asociada a la incorporación de la incertidumbre en el modelo de por sí requiere de una gran cantidad de variables, que aumentan conforme el número de realizaciones consideradas. Por esto se evitó atomizar las unidades internas en elementos muy pequeños, además de no considerarse necesario para un buen planteamiento del problema propuesto.

En lo que sigue se explica cómo se llegó a la formulación final del mapa topológico de la zona en estudio para la implementación del modelo, completando conceptualmente la parte 3 de la figura 3.1

### **3.2.1. Antecedentes.**

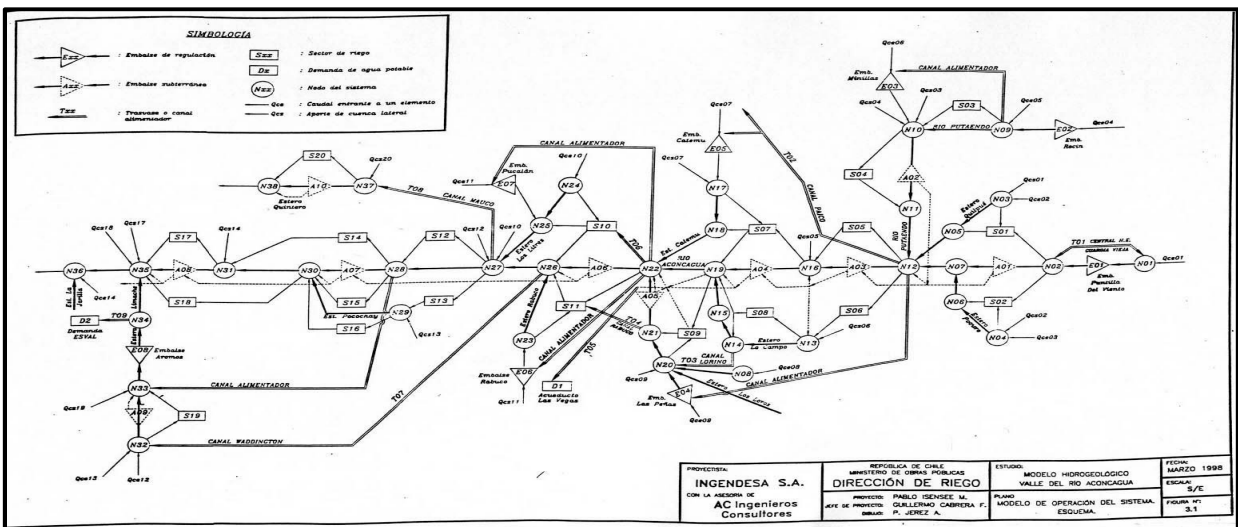
El proceso comenzó con una recopilación de información de la zona en estudio, en particular de la utilización de los recursos hídricos. Basta con revisar fotografías aéreas o satelitales para notar la intensa actividad agrícola del sector, llegando a ser un 70% del uso de agua en la primera sección y un 73% en la segunda (DGA, 2002).

Siendo así, no es de sorprender que modelos anteriores creados para la misma zona no consideren, en los valles, otros usos de agua. Estos modelos corresponden al Modelo de Operación del Sistema (MOS) ordenado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) en 1998, que representa a toda la cuenca del Aconcagua, y al modelo WEAP de Schuster que representa las dos primeras secciones del río. Estos modelos sirvieron de apoyo en la creación del propuesto aquí.

El MOS es un modelo de simulación de flujos superficiales y subterráneos que representa la totalidad de la cuenca y que ha sido actualizado en numerosas ocasiones, en general, agregándole mayor cantidad de detalles. En su forma básica presenta 20 sectores de riego, 14 cuencas de entrada, 10 acuíferos, 8 embalses y 38 nodos tal como se puede apreciar en la figura 3.16. La parte hidrogeológica es manejada externamente mediante el software VISUAL MODFLOW, por lo que el MOS no resuelve directamente los acuíferos.

En cuanto a las relaciones entre los elementos se consideran flujos superficiales por tramos de río y canales, además de derrames y reúsos de riego; percolaciones de riego, canales y del río; bombeos y recargas hacia la napa; recuperaciones que presenta el río y flujos subterráneos entre los acuíferos.

El modelo generado en WEAP se enfoca sólo en las dos primeras secciones de la cuenca y en el sector de Putaendo, por lo que trata estas zonas con mayor detalle. Este modelo muestra la primera sección con 2 sectores de riego, un acuífero y 6 nodos; pero con relaciones bidireccionales entre los sectores de riego y los acuíferos. La segunda sección presenta 6 sectores de riego, 4 acuíferos y 22 nodos.



Fuente: (DGA, 2002)

Figura 3.16. Topología del MOS.

El software WEAP, es una herramienta bastante poderosa ya que puede calcular internamente relaciones complejas como infiltraciones, evapotranspiraciones y flujos subterráneos. Además se puede enlazar con MODFLOW para incrementar la capacidad de simulación en sistemas de uso conjunto. El modelo creado para la zona presenta relaciones superficiales y subterráneas entre los elementos con una trama bastante compleja; y, a raíz de que los cálculos se realizan internamente, no se obtuvo información acerca del comportamiento de éstos.

Estudiando la estructura y composición de ambos modelos, más la información recopilada previamente de la zona en estudio, se definió la topología del MOGIHA que se muestra en la figura 3.17. En este mapa se distinguen 4 tipos de elementos: Acuíferos (A) representados por triángulos con bordes segmentados, sectores de consumo o riego (R) representado por rectángulos, nodos de distribución (N) representados por círculos, y entradas externas al sistema (I y P) representadas por rombos. Las flechas indican flujos o relaciones entre los elementos, siendo las segmentadas las que se producen bajo tierra. Los bombeos y recuperaciones del río son considerados, por su modo de uso, como superficiales.

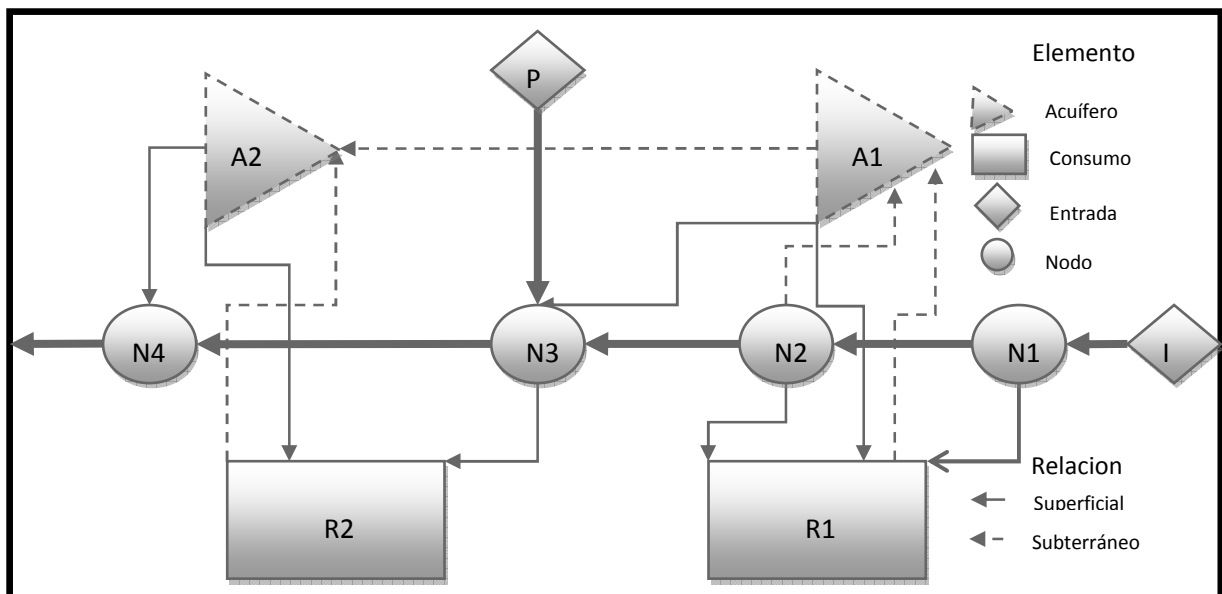


Figura 3.17. Topología adoptada para el MOGIHA.



La numeración de los elementos tiene relación con el sentido del flujo del agua, siendo los primeros los que están aguas arriba. Los nodos N1 y N4 corresponden a las estaciones de Aconcagua en Chacabucuito y Aconcagua en Romeral respectivamente, mientras que la estación Aconcagua en San Felipe no fue incluida en la modelación, pero se ocupó su información para calibrar el modelo tal como se discute más adelante. Esta estación debería localizarse entre los nodos N2 y N3.

Los flujos o relaciones, por simplicidad en la notación, son nombrados con el nombre del nodo donde nacen yuxtapuesto con el nombre del nodo donde llegan, es decir, al flujo entre N2 y N3 se le llama sencillamente N2N3. Esto se cumple en todos los casos excepto en los flujos de entrada al sistema, los cuales fueron llamados I (el que entra en Chacabucuito) y P (el del río Putaendo), las recuperaciones de los acuíferos llamados DA1 y DA2; y el flujo N1R1 que fue llamado U por ser éste el caudal que circula por canal revestido, objeto de este estudio.

A continuación se explica en qué consisten estos elementos y cómo se dio forma al diagrama mostrado en la figura 3.17.

### **3.2.2. Descripción del mapa topológico.**

El modelo creado es bastante más sencillo que los citados previamente. Esto tiene relación con el objetivo de este trabajo y, como se explicó con anterioridad, con la complejidad del enfoque estocástico adoptado. En esta sección se presentan las decisiones que conformaron el mapa topológico utilizado. Cabe destacar que no se consideran variables meteorológicas en el estudio, como precipitación o temperatura, ya que habría que generarlos junto con los caudales puesto que las realizaciones no son años reales, si no una compilación de caudales generados aleatoriamente.

#### **3.2.2.1. Frontera.**

Este trabajo se localiza en las dos primeras secciones de la cuenca del río Aconcagua, por tanto esta es la frontera natural escogida. Sin embargo, esto fue levemente modificado y se tomó como frontera la definida por la cuenca de la estación fluviométrica de Aconcagua en Romeral. Así se estudiaron todos los elementos encerrados por esta divisoria de las aguas.

No obstante, la parte alta de la cuenca se omitió del análisis ya que esta se considera estudiada por los modelos hidrológicos utilizados y no se pretendió realizar uno nuevo en este trabajo.

#### **3.2.2.2. Esteros y cuencas laterales menores.**

Los esteros Pocuro, Quilpué, Los Loros, Lo Campo y San Francisco presentan un caudal tan bajo durante el período de riego que fueron sacados del análisis. El estero Catemu presenta mayores volúmenes, pero es alimentado por un canal que nace del mismo río Aconcagua por lo que también se retiró del análisis. Esto se explica mayormente por la naturaleza pluvial de los esteros, por lo que además se evita la creación de pronósticos para estas cuencas lo cual generaría más interferencia en el estudio de la incertidumbre en Chacabucuito.

### 3.2.2.3. Sector de Putaendo.

El sector de Putaendo fue simplificado como una entrega superficial para evitar complicar más el modelo con elementos e interacciones que no afectan directamente el efecto que se pretende modelar. Esta razón llevó a no considerar en el caudal calculado para este sector, explicado en la sección 3.1.4, el consumo de los sectores de riego. Al no encontrarse información específica sobre el acuífero que subyace en el lugar, no se podía caracterizar sin realizar una simulación, por lo que no se incluyó en el análisis. Se estima que el aporte que éste hace al sistema principal puede ser considerable.

### 3.2.2.4. Sectores de consumo.

Como sectores de consumo sólo se consideraron las zonas de riego ya que en el período de estudio demandan una cantidad de agua tal que hace que los otros usos (agua potable, industrial) sean despreciables.

Al no considerarse el aporte de los esteros a la entrega de agua para consumo, pierde sentido dividir el sector de riego de la primera sección (R1) en dos. Además, las características de los sectores considerados en los modelos precedentes son muy similares. Esta unión también favorece al modelo ya que se puede considerar que existe un solo canal revestido que unifica las bocatomas. La demanda de esta zona es la suma de las demandas de los sectores de riego identificados en los modelos anteriores, en particular el del modelo WEAP.

Para la segunda sección (R2) el caso es similar al de la primera por la ausencia de los esteros. Junto con esto, el modelo busca identificar el efecto que puede tener desviar las aguas del río en toda la segunda sección, por lo tanto no hay razones para mantener varios sectores de riego. Las demandas mensuales para los dos sectores de riego se resumen en la tabla 3.9.

La demanda de los sectores de riego es modulada por variables llamadas a y b para R1 y R2 respectivamente. Estas variables multiplican directamente a la demanda y tienen variación mensual. En estos sectores no se considera evapotranspiración ni otros factores que involucren meteorología. La demanda se considera bruta, es decir, no incluye el efecto de la eficiencia de riego. Sin embargo, esta eficiencia toma importancia cuando se considera el agua efectivamente gastada en el crecimiento de la planta como una salida del sistema, completando el balance de masa que se analiza en la sección del acuífero.

**Tabla 3.9.** Demanda de riego según sector.

<b>Mes</b>	<b>Demanda R1 [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Demanda R2 [m<sup>3</sup>/s]</b>
Ago	0.20	0.00
Sep	3.33	0.95
Oct	8.63	2.35
Nov	15.06	3.94
Dic	20.03	4.98
Ene	19.60	4.76
Feb	18.15	4.39
Mar	11.88	2.46

La formulación matemática en base a balance de masa de los sectores de riego R1 y R2 quedaría, entonces, como muestran las expresiones (12) y (13) respectivamente.

$$D_1(t) \times a(t) = Q_{c1}(t) + Q_{b1}(t) \quad (12)$$

$$D_2(t) \times b(t) = Q_{c2}(t) + Q_{b2}(t) \quad (13)$$

Donde  $D_i(t)$  es la demanda para el sector  $i$  para el mes  $t$  [ $m^3/s$ ],  $a(t)$  y  $b(t)$  son los moduladores de la demanda para R1 y R2 y son reales pertenecientes a  $[0, 1]$ ,  $Q_{ci}(t)$  es el caudal entregado por los canales para el sector  $i$  [ $m^3/s$ ], y  $Q_{bi}(t)$  es el caudal de bombeo para el sector  $i$  [ $m^3/s$ ].

### 3.2.2.5. Acuíferos.

Se mantuvo la idea precedente de considerar un solo acuífero en la primera sección de la cuenca, ya que en verdad funciona como una sola unidad (DGA, 2001) y para las condiciones como se presenta en modelo no es necesario una mayor división.

En la segunda sección se prefirió unir los acuíferos en uno para representar un embalse subterráneo que nutre al único sector de riego considerado. Aunque en la realidad no funcione como una unidad (DGA, 2001), para efectos del modelo funciona bien y simplifica las relaciones del sistema.

En cuanto a su modelación, los acuíferos se consideraron como embalses que responden a simples balances de masa y a reglas de operación. Esta gran simplificación se hizo pensando en disminuir en los tiempos de cálculo y simplificar los programas de optimización. La programación de las ecuaciones que rigen el flujo en medios porosos saturados es bastante compleja; y enlazar el programa de optimización con un software externo como MODFLOW implicaría la simulación completa del acuífero en cada iteración del método de optimización, aumentando drásticamente los tiempos de cálculo. Esto es de suma importancia cuando se consideran numerosas realizaciones simultáneas, ya que se tiene que recrear un acuífero distinto por cada realización.

Los volúmenes de las napas se obtuvieron del modelo WEAP, y para el caso de A2 corresponde a la suma de sus partes como se resume en la tabla 3.10. Como regla de operación para A1 se buscó una función potencial en la cual, cuando el acuífero estuviese en su máxima capacidad, el caudal saliente de éste fuese igual a 15 [ $m^3/s$ ], el mayor que registran los estudios (DGA, 2001). Esta función corresponde a la expresión (14); mientras que para A2 no existe regla de operación ya que, según los modelos citados, no libera caudal hacia las napas aguas abajo si no por rebalse.

**Tabla 3.10.** Volúmenes de los acuíferos.

Acuífero	Acuífero Componente	Volumen [ $10^6$ m3]	Volumen Total [ $10^6$ m3]
A1	A1	5950	5950
A2	A2 <sub>1</sub>	364	1597
	A2 <sub>2</sub>	748	
	A2 <sub>3</sub>	147	
	A2 <sub>4</sub>	339	

Regla de operación de A1:

$$Q_{SA1}(t) = [V_{A1}(t - 1)]^{0.35} \quad (14)$$

Donde  $Q_{SA1}(t)$  es el caudal de salida de A1 [ $m^3/s$ ] en el mes  $t$  y  $V_{A1}(t-1)$  es el volumen almacenado en el acuífero en el mes  $t-1$  expresado como el caudal constante que llenaría dicho volumen en 30 días [ $m^3/s$ ]. Este cambio de unidad, que se aplicó a ambas napas, se hizo con el fin de reescalar el problema de optimización y así evitar complicaciones numéricas. Además, simplificó la escritura matemática del acuífero ya que no fue necesario transformar las variables internas de caudales a volúmenes.

Las salidas, aparte de la ya mencionada operación, corresponden al bombeo utilizado para el riego en los sectores de consumo y a los rebales que se suman a los nodos de distribución N3 y N4 para A1 y A2 respectivamente. Las entradas comprenden las infiltraciones desde el río, los canales y los sectores de consumo como consecuencia de la ineficiencia en el riego; todas calculadas en base a los datos del MOS.

La infiltración desde el río y los canales se discute más adelante en la sección de flujos superficiales. En cuanto a la eficiencia de riego, esta se calculó como el promedio ponderado de las eficiencias prediales por las áreas que componen a R1 y R2. Esta información se obtuvo del archivo INFSEC03.dat y se resume en la tabla 3.11 (DGA, 2002).

**Tabla 3.11.** Cálculo de las eficiencias de riego.

Sector de Consumo	Sector Riego MOS	Área Cultivada [Há]	Eficiencia Predial Ponderada	Eficiencia Total Ponderada
S1	1	11431.3	0.45	0.45
	2	11124.0	0.44	
S2	5	596.4	0.43	0.41
	6	2923.3	0.46	
	7	5600.6	0.38	
	8	1754.9	0.41	
	9	6613.9	0.42	

Finalmente, el modelo del acuífero puede ser expresado matemáticamente mediante la fórmula (15).

$$V_i(t) = V_i(t - 1) + m_i \times (1 - \eta_i^r) \times D_i(t) + Q_i^{ir}(t) + Q_i^{ic}(t) - Q_i^b(t) \quad (15)$$

Donde  $V_i(t)$  es el volumen almacenado en el acuífero  $i$  en el mes  $t$  como caudal pasante [ $m^3/s$ ],  $m_i$  es el modulador de la demanda para el sector de riego  $i$  (a o b),  $\eta_i^r$  es la eficiencia de riego total ponderada para el sector de consumo  $i$ ,  $D_i(t)$  es la demanda de riego del sector  $i$  [ $m^3/s$ ],  $Q_i^{ir}(t)$  es el caudal infiltrado desde el río al acuífero  $i$  [ $m^3/s$ ],  $Q_i^{ic}(t)$  es el caudal infiltrado desde los canales de riego al acuífero  $i$  [ $m^3/s$ ] y  $Q_i^b(t)$  es el caudal bombeado del acuífero  $i$  al sector de consumo [ $m^3/s$ ]. Se considera que los acuíferos y los sectores de riego están asociados y que no hay pérdidas en el bombeo. Además, el agua que no entra desde el riego al acuífero corresponde a la utilizada efectivamente para la nutrición del cultivo.

### 3.2.2.6. Nodos de distribución.

El modelo presenta cuatro nodos de distribución de agua, necesarios para identificar las relaciones establecidas en la topología. El primer y segundo nodo (N1 y N2) son los que entregan los caudales superficiales de riego a R1, distinguiéndose entre ellos en que desde N1 sale el hipotético canal revestido, y de N2 sale un canal sin revestir. Esta separación está pensada para modelar el efecto de la infiltración desde el río, ya que el caudal disponible para el riego en N2 es el proveniente de N1 menos lo que se infiltra. La forma como se calcula la infiltración es discutida en la sección de flujos superficiales.

Desde un punto de vista territorial, N1 corresponde a justo agua abajo de Aconcagua en Chacabuquito, mientras que N2 es la unión de las bocatomas tradicionales entre Chacabuquito y la confluencia con Putaendo. Esto porque el flujo N2R1 representa a los múltiples canales no revestidos que se distribuyen a lo largo del cauce, en la situación real, para nutrir a los canales menores de la primera sección.

El nodo N3 corresponde a la unión del río Aconcagua con el río Putaendo, aguas abajo de San Felipe. Este nodo da inicio a la segunda sección de la cuenca y entrega el riego superficial a R2. Además recibe los aportes del Putaendo, los rebalses de A1 y las recuperaciones desde la napa que el río Aconcagua presenta en el sector (DGA, 2001).

El nodo N4 corresponde a la estación fluviométrica de Aconcagua en Romeral, recibiendo los rebalses de A2.

En cuanto a su formulación matemática, todos los nodos se concibieron como balances de masa y se pasan a describir a continuación en las expresiones (16), (17), (18) y (19) para N1, N2, N3 y N4 respectivamente.

$$Q_{N1N2}(t) = I(t) - U(t) \quad (16)$$

$$Q_{N2N3}(t) = Q_{N1N2}(t) - Q_{N2R1}(t) - Q_{N2A1}(t) \quad (17)$$

$$Q_{N3N4}(t) = Q_{N2N3}(t) + Q_{A1N3}(t) + P(t) + D_{A1}(t) - Q_{N3R2}(t) \quad (18)$$

$$Q_{N4}(t) = Q_{N3N4}(t) + D_{A2}(t) \quad (19)$$

Donde  $Q_{EiEj}(t)$  es el caudal entre el elemento Ei y el elemento Ej en el mes y  $[m^3/s]$ ,  $I(t)$  y  $P(t)$  son los caudales de Aconcagua en Chacabuquito y del río Putaendo  $[m^3/s]$ ,  $U(t)$  es el caudal que circula por el canal revestido  $[m^3/s]$ , y  $D_{Ai}$  es el caudal de desborde del acuífero Ai  $[m^3/s]$ .

### 3.2.2.7. Entradas externas al sistema.

Las entradas I y P son los caudales generados mediante el proceso descrito en la sección 3.1.4 para Aconcagua en Chacabuquito y Putaendo en Resguardo Los Patos. De aquí salen los caudales que llevan los mismos nombres a N1 y N3. Para mayor información referirse a dicha sección.

### 3.2.2.8. Flujos superficiales.

Los flujos superficiales representan los caudales de río, canales, bombes y recuperaciones a lo largo del modelo de gestión. En su gran mayoría quedan definidos por las ecuaciones previamente expuestas, por lo que sólo queda agregar los límites impuestos y los casos excepcionales.

Primero que todo, se supuso que el río no tiene límite en su capacidad de transportar agua, por lo que los flujos I, P, N1N2, N2N3, N3N4 Y N4 carecen de un margen superior. Por otro lado, no se realizó una simulación del comportamiento hidráulico del cauce por lo que no se consideró un caudal mínimo que asegurase el flujo continuo, es decir, el río siempre fluye.

Distinto es en el caso de los canales y bombes, donde sí se impuso un límite superior el cual corresponde a la capacidad de los canales y de las bombas situadas en los acuíferos. Estas capacidades se calcularon como la suma de lo encontrado en cada sector de riego previo a la unificación de los sectores de consumo. Los datos de los canales se obtuvieron del MOS (DGA, 2001), mientras que los de bombeo del modelo WEAP. Del MOS también se obtuvieron las eficiencias de transporte de los canales en los sectores de riego, las cuales fueron ponderadas según la capacidad del canal para obtener la eficiencia total en el sector de consumo unificado, de forma similar a como se realizó el cálculo de la eficiencia de riego. La tabla 3.12 muestra la información de canales, destacando el sector MOS 8 donde no hay datos. Esto se produce porque el análisis sólo incluye el riego proveniente desde el río, y este sector sólo se riega con agua de los esteros. Por otro lado, la tabla 3.13 muestra las capacidades de bombeo utilizadas, destacando el sector de riego MOS

**Tabla 3.12.** Capacidad y eficiencia de canales.

Sector de Consumo	Sector Riego MOS	Capacidad Canales [m <sup>3</sup> /s]	Eficiencia Canal	Capacidad Total [m <sup>3</sup> /s]	Eficiencia Total
R1	1	20.31	0.94	40.23	0.94
	2	19.92	0.95		
R2	5	0.90	0.80	27.12	0.88
	6	6.40	0.93		
	7	9.58	0.83		
	8	-	-		
	9	10.24	0.90		

**Tabla 3.13.** Capacidad de bombas.

Acuífero	Acuífero WEAP	Capacidad Bombas [m <sup>3</sup> /s]	Capacidad Total [m <sup>3</sup> /s]
A1	A01	1.50	1.70
	A01	0.20	
A2	A03	1.00	3.30
	A11	0.50	
	A05	0.80	
	A04	0.50	
	A04	0.50	

Como se observa en la figura 3.17, hay dos canales matrices que nutren a R1: el canal revestido U y el canal tradicional N2R1. La función de estas conducciones es entregar agua a los canales menores de

la primera sección, y no regar directamente R1 por lo que la suma de los caudales de U y N2R1 debe ser menor que la capacidad calculada para R1. En el caso de la eficiencia, ambos, U y N2R1, tienen la misma ya U entrega su caudal a los mismo canales preexistentes que N2R1.

El caso de R2 es más sencillo ya que hay un solo canal que lo nutre, N3R2, por lo que la capacidad y eficiencia calculadas se aplican directamente sobre éste. La capacidad de los bombeos también se aplica a una sola fuente en ambos casos, A1R1 y A2R2, por lo que no requiere mayor explicación.

La recuperación del río desde la napa que se produce a través de A1N3 fue modelada a partir de la operación de A1 explicada en la sección 3.2.2.5, donde la napa libera caudal en función del volumen almacenado. Este caudal se divide entre el que fluye hacia A2 y el que se recupera hacia N3 mediante las expresiones (20) y (21)

$$Q_{A1A2}(t) = \begin{cases} Q_{SA1}(t) & Q_{SA1}(t) \leq 1.56 \\ 1.56 & Q_{SA1}(t) > 1.56 \end{cases} \quad (20)$$

$$Q_{A1N3}(t) = \begin{cases} 0 & Q_{SA1}(t) \leq 1.56 \\ Q_{SA1}(t) - 1.56 & Q_{SA1}(t) > 1.56 \end{cases} \quad (21)$$

Donde  $Q_{A1Ei}(t)$  es el caudal que va desde A1 al elemento  $E_i$  en el mes  $t$  [ $m^3/s$ ] y  $Q_{SA1}(t)$  es el caudal de salida de A1 calculado mediante la expresión (14) [ $m^3/s$ ]. El valor 1.56 [ $m^3/s$ ] es el máximo caudal pasante de forma subterránea entre A1 y A2, calculado mediante la ley de Darcy en flujo permanente, expresada como (22) (Espinoza, 2008).

$$Q = A \times K \times n_{ef} \times \frac{dh}{dx} \quad (22)$$

Donde  $Q$  [ $L^3/T$ ] es el caudal instantáneo que fluye por el área transversal  $A$  [ $L^2$ ],  $K$  es la conductividad hidráulica del medio [ $L/T$ ],  $n_{ef}$  es la porosidad efectiva del medio y  $\frac{dh}{dx}$  es la pendiente hidráulica de la napa. En este caso el área  $A$  fue calculada considerando una sección rectangular de la napa justo aguas abajo de la confluencia del río Aconcagua con el Putaendo, lugar donde se comienza a producir la recuperación. El ancho fue calculado como 3000 [m] mediante la representación cartográfica del Sistema de Información Integral de Riego (E-SIIR) de la Comisión Nacional de Riego (CNR), y la potencia fue promediada en 50 [m] (DGA, 2001). El valor de  $K$  se fijó en 600 [m/d] (DGA, 2001), mientras que no se encontraron valores para  $n_{ef}$  por lo que se ocupó el valor del coeficiente de almacenamiento específico  $S_y$  igual a 0.15 (DGA, 2001). El valor de la pendiente hidráulica se consideró constante y fue estimado en 0.01 mediante las observaciones del nivel estático presentadas en el informe de la DGA (DGA, 2001) y corroborado con los valores ocupados en el MOS (DGA, 2002).

Por último es necesario considerar que bajo el estado actual de los derechos de agua en la cuenca, no hay caudal ecológico, o sea, se han otorgado todos los derechos explotables del río (DGA, 2004a). Esto implica que el límite inferior para los caudales circulantes por el río es igual a cero.

### 3.2.2.9. Flujos subterráneos.

Ya que el flujo entre los acuíferos fue explicado en la sección anterior, sólo falta explicar cómo se calculó la infiltración desde el río al acuífero de la primera sección para concluir el desarrollo de la topología. Para este cálculo se ocupó la misma expresión potencial que utilizada en el MOS y enseñada en la fórmula (23) (DGA, 2002).

$$Q_{N2A1}(t) = 0.349 \times [Q_{N1N2}(t)]^{0.6} \quad (23)$$

Donde  $Q_{EiEj}(t)$  es el caudal entre el elemento  $Ei$  y el  $Ej$  [ $m^3/s$ ].

Así se finaliza la caracterización de los elementos y relaciones del modelo de gestión. Configurando todo lo descrito en esta sección, a continuación se muestra la programación final del modelo.



### 3.3. Programación del modelo.

La programación del modelo consta de tres partes: la formulación matemática, la escritura del código en el software que realizará la optimización y la calibración de éste. A continuación se explican en detalles cada una de estas partes, que comprenden la materialización del MOGIHA, correspondiente a la parte 3 de la figura 3.1

#### 3.3.1. Formulación matemática.

El MOGIHA fue concebido como una optimización, por tanto se compone de una función objetivo sujeta a restricciones. Estas restricciones se refieren a las impuestas por el funcionamiento del sistema, descrito en la topología, y por la naturaleza propia de las variables en juego.

Sin embargo, esta optimización está sujeta al Método de las Realizaciones descrito en la sección 3.1.1, por lo que además del tiempo  $t$ , el número de realizaciones  $j$  es incluido en la programación. Esto le agrega una nueva dimensión al problema, obligando a cumplir con las restricciones en todo tiempo, en cada realización.

Las variables de decisión del MOGIHA dependen sólo del tiempo, ya que deben cumplir con las restricciones para todas las realizaciones consideradas simultáneamente. Si esto no fuese así, se tendría una decisión por cada realización, convirtiéndose en una aplicación del Método de Monte Carlo. Constituyen variables de decisión los moduladores de demanda de cada sector de consumo  $a$  y  $b$ , los caudales desviados por los canales tradicionales  $N2R1$  y  $N3R2$ , los bombeos desde las napas hacia los sectores de consumo  $A1R1$  y  $A2R2$ , y el caudal desviado por el canal unificado  $U$ . Pese a que no todas estas variables son necesariamente de decisión (por el balance de masa en los sectores de consumo), se ha decidido agruparlas por su naturaleza y dejarlas explícitas con el fin de poder estudiarlas más adelante.

Las variables de estado o internas del modelo de gestión, cambian con cada realización y corresponden a los caudales que pasan por el río entre cada nodo  $N1N2$ ,  $N2N3$ ,  $N3N4$  y  $N4$ ; a los flujos subterráneos  $N1A1$ ,  $A1N3$ ,  $A1A2$ ; a los volúmenes de agua almacenados en los acuíferos  $V1$  y  $V2$ ; y a los desbordes de estos últimos  $DA1$  y  $DA2$ . Todas las variables; excepto  $a$ ,  $b$  e  $y$ ; tienen unidades de  $[m^3/s]$ .

La función objetivo del modelo se creó con la intención de simular el comportamiento racional que el operador de sistema tomaría, es decir, se busca maximizar la satisfacción de la demanda ( $a$  y  $b$ ), al mismo tiempo que se minimizan los gastos operacionales asociados al bombeo ( $A1R1$  y  $A2R2$ ). Además, para evitar comportamientos inadecuados de los acuíferos sin complicar más el modelo, se incluyó una minimización de los desbordes ( $DA1$  y  $DA2$ ). Así la función objetivo de la optimización del MOGIHA queda definida por la expresión (24).

$$\max C = 100 \times \sum_{t=1}^7 (a(t) + b(t)) - \sum_{j=1}^{ssz} \left[ \sum_{t=1}^7 (0.25 \times A1R1(t) + A2R2(t) + DA1(t,j) + DA2(t,j)) \right] \quad (24)$$

Pese a que los bombeos  $A1R1$  y  $A2R2$  sólo dependen del tiempo, son sumados en cada realización para que la suma alcance un valor comparable con la suma total de los desbordes  $DA1$  y  $DA2$ . Así se busca evitar que el bombeo se vuelva numéricamente irrelevante dentro de la optimización. El factor 0.25 que acompaña al bombeo del primer sector  $A1R1$  se debe a que la demanda de éste es

cuatro veces mayor que la del segundo, por lo tanto se favorece el bombeo en la primera sección. El hecho de que los moduladores de demanda, a y b, están multiplicados por un factor de 100 es el resultado de la búsqueda entre numerosas combinaciones de la función objetivo hasta encontrar una que tuviese una buena respuesta numérica. No obstante esta búsqueda sólo se limitó a funciones lineales, lo cual puede representar una limitación de este modelo.

En cuanto a las restricciones, no son más que la agrupación de las ecuaciones de la parte 3.2 y que, tal como se muestra a continuación, tienen la parte del Método de las Realizaciones. Además se incluye una variable binaria para poder modelar la recuperación del río. Las ecuaciones que componen las restricciones son:

- N1:  $N1N2(t, j) = I(t, j) - U(t, j)$  (25)

- N2:  $N2N3(t, j) = N1N2(t, j) - N2R1(t, j) - N2A1(t, j)$  (26)

- R1:  $a(t) \times D1(t) = A1R1(t) + ec1 \times U(t) + ec1 \times N2R1(t)$  (27)

- A1:  $V1(t, j) = V1(t - 1, j) + (1 - er1) \times a(t) \times D1(t) + (1 - ec1) \times (U(t) + N2R1t - A1R1t - SA1t, j - DA1(t, j))$  (28)

- SA1:  $SA1(t, j) = A1A2(t, j) + A1N3(t, j)$  (29)

- N3:  $N3N4(t, j) = P(t, j) + N2N3(t, j) + A1N3(t, j) + DA1(t, j) - N3R2(t)$  (30)

- R2:  $b(t) \times D2(t) = A2R2(t) + ec2 \times N3R2(t)$  (31)

- A2:  $V2(t, j) = V2(t - 1, j) + (1 - er2) \times b(t) \times D2(t) + (1 - ec2) \times N3R2(t) + A1A2(t, j) - A2R2(t) - DA2(t, j)$  (32)

- N4:  $N4(t, j) = N3N4(t, j) + DA2(t, j)$  (33)

- CC1:  $U(t) + N2R1(t) \leq 40.23$  (34)

- FINF1:  $N2A1(t, j) = 0.349 \times (N1N2(t, j))^{0.6}$  (35)

- MINY:  $y(t, j) \geq \frac{SA1(t, j) - 1.56}{9e6}$  (36)

- MAXY:  $y(t, j) < 1 - \frac{1.56 - SA1(t, j)}{9e6}$  (37)

- FSALA1:  $SA1(t, j) = V1(t - 1, j)^{0.35}$  (38)

- FAFLO:  $A1A2(t, j) = SA1(t, j) \times [1 - y(t, j)] + y(t, j) \times 1.56$  (39)

- Capacidades de bombeo, transporte y volúmenes de acuíferos  
 $A1R1(t) \leq 1.7$  (40)

- $A1R2(t) \leq 3.3$  (41)

- $N3R2(t) \leq 27.12$  (42)

- $V1(t, j) \leq 2295.2$  (43)

- $V2(t, j) \leq 616.09$  (44)

- Naturaleza de las variables  
 $0 \leq a(t), b(t) \leq 1$  (45)

- $y(t, j) \in \{0, 1\}$  (46)

- Límites inferiores  
 $V1(t, j) \geq 1$  (47)

- Todas las otras variables  $\geq 0$  (48)

Válido para todo  $t \in \mathbb{N} = \{1, \dots, 7\}$ ,  $j \in \mathbb{N} = \{1, \dots, S_{sz}\}$ .

Las ecuaciones (25) hasta la (33), exceptuando la (29), corresponden a los elementos definidos en la sección 3.2.2, destacando que  $eci$  corresponde a la eficiencia de los canales en la sección  $i$ ,  $eri$  a la eficiencia de riego en la sección  $i$ ,  $D1$  y  $D2$  a la demanda de riego de  $R1$  y  $R2$  respectivamente, y  $SA1$  a la salida bruta del acuífero  $A1$ .

Las ecuaciones (34) a (39) corresponden a la capacidad de canales de la primera sección, a la fórmula de la infiltración desde el río de en la primera sección, al comportamiento esperado de la variable binaria  $y$ , a la función de salida de A1 y a la función de afloramiento o recuperación desde el acuífero A1 respectivamente. La variable binaria  $y$  funciona como la válvula que permite o no la recuperación descrita en las expresiones (20) y (21), tomando el valor 1 si SA1 es mayor que 1.56 [m<sup>3</sup>/s] y 0 en caso contrario. Así, la ecuación (39) define que A1A2 será igual a SA1 mientras que SA1 no supere 1.56 [m<sup>3</sup>/s], o A1A2 será igual a 1.56 [m<sup>3</sup>/s] en caso contrario. La ecuación (47) se impuso para evitar problemas numéricos en la resolución del problema de optimización, y las demás ya fueron discutidas previamente.

### **3.3.2. Escritura del código.**

El software escogido para la programación del MOGIHA es General Algebraic Modeling System (GAMS). Este software funciona con un poderoso lenguaje orientado a la optimización, el cual es capaz de resolver problemas con una gran cantidad de variables en un tiempo razonable y no requiere grandes recursos computacionales. El lenguaje de GAMS permite escribir la función objetivo y las restricciones de forma casi idéntica a la expresada en la parte anterior, pero el manejo posterior de los datos es más engorroso.

Por esto se decidió dirigir GAMS desde el software MATLAB mediante la aplicación GAMS/MATLAB (Ferris, 2008); con la cual, mediante sencillos comandos, se puede cambiar parámetros, ejecutar y obtener los resultados de vuelta de los programas en GAMS desde MATLAB. Por esto se dividió esta sección en dos: la programación en GAMS y la programación en MATLAB. La programación del MOGIHA funciona según el diagrama de la figura 3.18; donde todo, excepto por la explícita optimización en GAMS, corresponde a la programación en MATLAB.

#### **3.3.2.1. Programación en GAMS.**

Lo que se busca con esta programación son los valores de las variables de decisión del sistema descrito en los apartados 3.1 y 3.2. Por esto, el código escrito es la traducción literal de las ecuaciones (24) a (48) a su lenguaje, más la inclusión de caudales iniciales para I y P, las demandas en R1 y R2 y los valores iniciales para todas las variables con el fin de facilitar o hacer posible el encuentro de un óptimo local.

La solución fue buscada mediante el algoritmo CONOPT, relajando la condición de la variable binaria. Sin embargo, no se observaron casos donde ésta tomase valores distintos de 1, por lo que de todas formas se cumplió la condición. Para posibilitar el encuentro de soluciones también fue necesario aumentar el valor del máximo elemento del Jacobiano (RTMAXJ) en el archivo de opciones conopt.op.

Se crearon ocho archivos distintos de optimización en GAMS, uno para cada valor de  $s_{sz}$  tomado (1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200). El primero difiere en los demás en que no hay dependencia de  $j$  en las variables de estado internas, mientras todos los demás son iguales variando únicamente la cantidad de caudales iniciales y su respectiva definición. Esto se hizo para simplificar la programación en MATLAB.

Todos los archivos citados se pueden encontrar en el anexo B. Cabe destacar que en estos programas, los nombres de las variables fueron cambiados para facilitar notación y por venir de una programación previa donde se ocupaban dichos nombres. Esa nomenclatura fue cambiada por la presente para facilitar la comprensión del sistema.

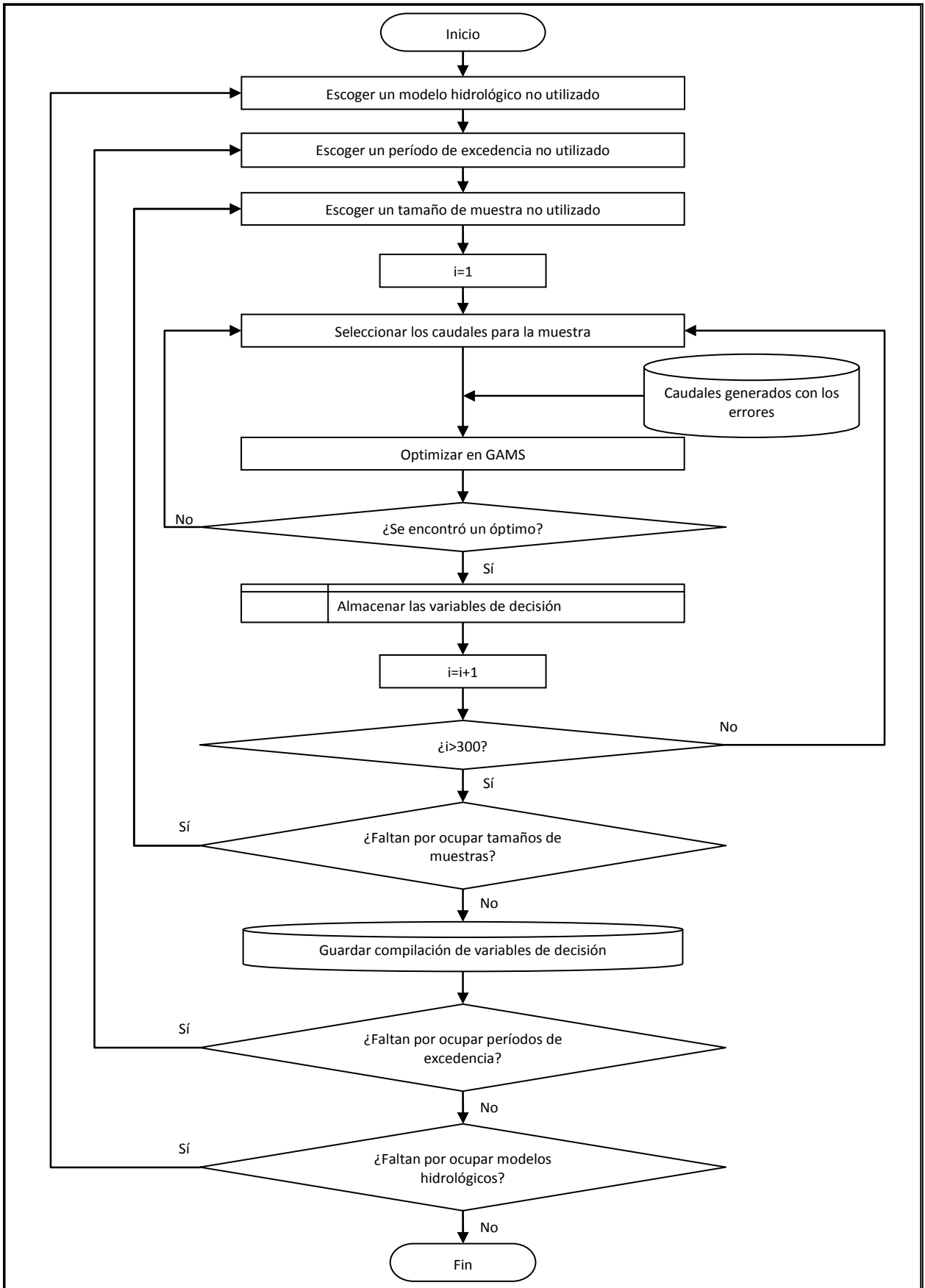


Figura 3.18. Diagrama de flujo de la programación del MOGIHA.

### 3.3.2.2. Programación en MATLAB.

El objetivo de los programas escritos en MATLAB, es manejar la optimización en GAMS tal como se muestra en la figura 3.18. Esto corresponde al almacenaje, elección y cambio de los caudales de entrada según modelo hidrológico y período de excedencia; a la elección y ejecución del programa en GAMS según tamaño de muestra, al almacenaje de las variables de decisión, y a la repetición sistemática de todo el proceso.

Para poder correr numerosas veces las optimizaciones que exige el Método de las Realizaciones Múltiples, se crearon tres programas en MATLAB. El primero de ellos, llamado Qalep, toma el valor de  $s_{sz}$ , el modelo hidrológico y la probabilidad de excedencia deseada y entrega los caudales necesarios para la optimización con el número de realizaciones escogido y el vector con los índices de los caudales elegidos.

El segundo programa, llamado szmethod, pide lo mismo que Qalep más el número de veces que se desea hacer las optimizaciones (300 para este estudio); y, con los caudales obtenidos de Qalep, ejecuta las optimizaciones en GAMS. Entrega el valor de todas las decisiones del sistema, es decir, modulación de las demandas, caudales por los canales y bombeos. Además, szmethod chequea que cada resultado de GAMS corresponda a un óptimo global o local (más probable en problemas no lineales como éste), y realiza una nueva optimización si no lo es.

El último programa, llamado incer, ejecuta a szmethod para todos los valores de  $s_{sz}$  y guarda en archivos sus resultados para una posterior consulta.

Para el manejo de los resultados se creó un programa que los ordena para su fácil traspaso a una planilla de cálculo, llamado histomes. Todos estos programas se pueden encontrar en el anexo B.

### **3.3.4. Calibración de los valores iniciales del MOGIHA.**

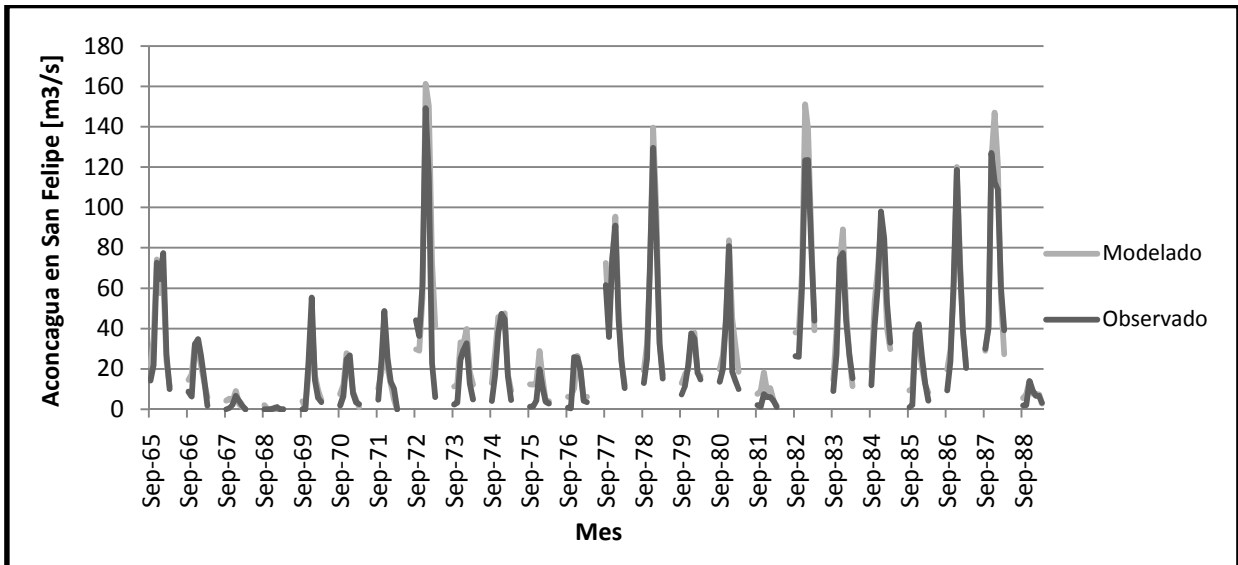
Para observar cómo se comporta el modelo en relación a lo observado, se programó un código en GAMS donde no se considera al canal revestido, es decir, la situación actual. Este programa se llama opcal.gms, se maneja con el programa Calibracion.m y ambos se encuentran en el anexo B. Las estaciones que se utilizaron para evaluar el comportamiento del modelo fueron Aconcagua en San Felipe, midiendo el flujo N2N3; y Aconcagua en Romeral, midiendo a N4. Para observar el comportamiento completo, los caudales de Putaendo en Resguardo Los Patos fueron generados a partir de los de Aconcagua en Chacabuquito de la misma forma como se muestra en la sección 3.1.4.

El período de calibración es desde septiembre de 1965 hasta marzo de 1989, considerando sólo los meses de la temporada de riego, es decir, de septiembre a marzo. Como el MOGIHA corre sólo una temporada por vez, todas las temporadas de riego se tomaron independientes entre sí. Además se definieron valores únicos de las variables internas para todas las temporadas, en coherencia con el hecho de que el MOGIHA debe afrontar situaciones aleatorias que pueden ser muy disímiles.

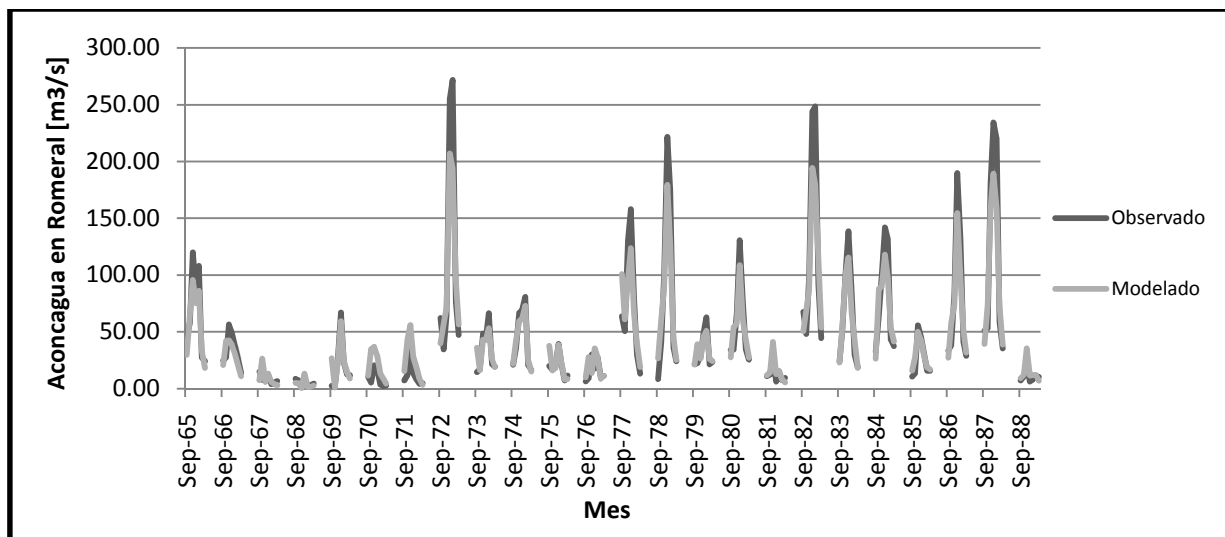
En este proceso se observó desde el principio que la primera sección estaba bastante bien representada, obteniéndose un valor de  $R^2$  igual a 0.93; por lo tanto no se realizaron modificaciones que afectasen el caudal de N2N3. Sin embargo, la evaluación en Romeral daba bastante distinta: en general estaba muy sobreestimada, en especial el mes de septiembre. Estudiando los resultados se llegó a la conclusión que esta sobreestimación venía de los derrames del acuífero A1, que por ese entonces se

suponía lleno a comienzos de la temporada. Mediante un proceso de acercamiento por promedios, se llegó a que el volumen inicial de A1 debía ser el justo que permitiese el paso máximo de flujo hacia A2, pero que no generara recuperación, es decir, 3.58 [m<sup>3</sup>/s] como caudal constante por un mes.

Tomando este valor como el volumen inicial de A1 se obtuvo un valor de R<sup>2</sup> igual a 0.94 para Aconcagua en Romeral. Los valores finales obtenidos tanto para San Felipe como para Romeral se muestran en las figuras 3.19 y 3.20.



**Figura 3.19.** Calibración de Aconcagua en San Felipe.



**Figura 3.20.** Calibración final en Aconcagua en Romeral.

Posterior a la calibración, se realizó una validación con los caudales que quedaron fuera del último proceso, es decir, desde septiembre de 1989 hasta marzo de 2004. En este caso se obtuvo un valor de R<sup>2</sup> igual a 0.56 para San Felipe y de 0.93 para Romeral, con una clara subestimación para los años 1989 hasta 1992 en San Felipe. Sin embargo, como el caso de estudio es el modificado no se

hicieron cambios en el modelo de gestión a raíz de estos resultados. Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran los resultados de la validación.

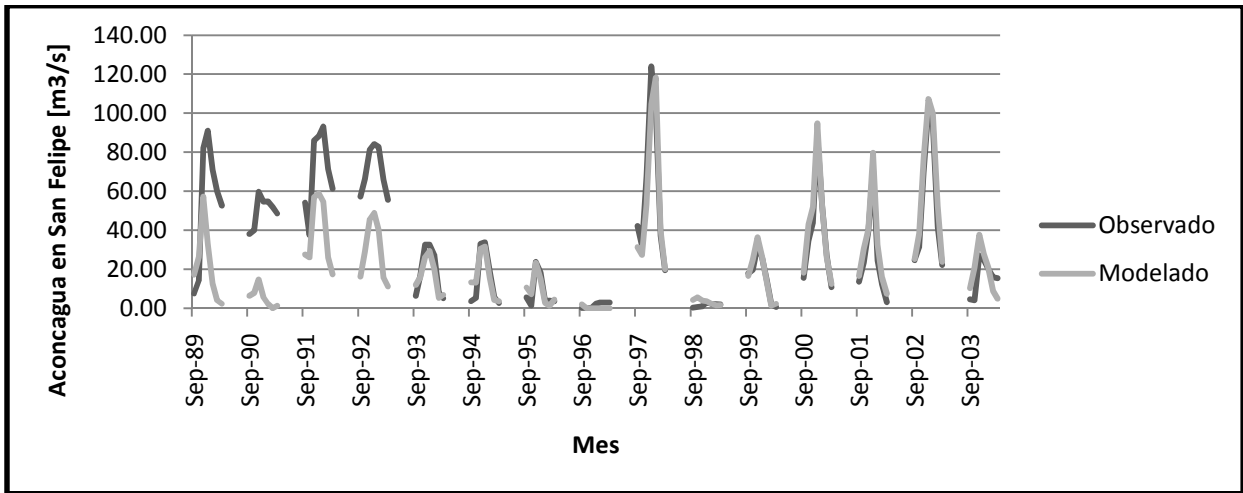


Figura 3.21. Validación en Aconcagua en San Felipe.

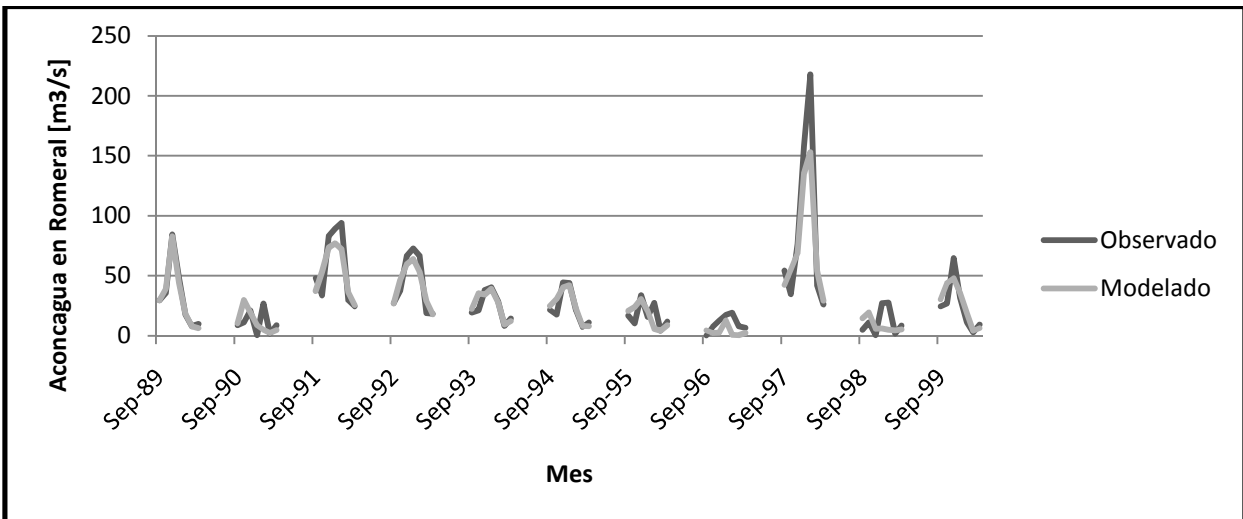


Figura 3.22. Validación en Aconcagua en Romeral.

### 3.4. Análisis estadístico de los resultados.

Como se mostró en las secciones anteriores de este capítulo, la programación del método de las realizaciones múltiples arrojó un gran número de resultados. Éstos, que se presentan en el capítulo 4, son estudiados mediante su esperanza matemática y su desviación estándar. Sin embargo, a la hora de distinguir el comportamiento entre los resultados del MOGIHA bajo los distintos modelos hidrológicos, no basta con la simple observación de los gráficos. Para decir que hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos mediante los caudales generados por uno u otro modelo hidrológico hay que realizar tests de hipótesis.

Se utilizaron dos tests de hipótesis distintos: el primero para evaluar si las medias y las varianzas de los resultados son iguales, y el segundo sólo evalúa la igualdad entre medias (Walpole, 1999). El primer test toma la siguiente forma:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (49)$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0 \quad (50)$$

Donde  $H_0$  no se rechaza si:

$$-t_{\frac{\alpha}{2}, 2n-2} < t < t_{\frac{\alpha}{2}, 2n-2} \quad (51)$$

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{s_p \sqrt{2/n}} \quad (52)$$

$$s_p^2 = \frac{(s_1^2 + s_2^2)(n-1)}{2n-2} \quad (53)$$

Donde  $n$  corresponde al número de muestras que se tiene,  $s_i^2$  es la varianza muestral del conjunto  $i$ ,  $\bar{X}_i$  es la media muestral del conjunto  $i$ , y  $t_{\frac{\alpha}{2}, 2n-2}$  es el valor de la distribución  $t$  de Student de  $2n-2$  grados de libertad para una probabilidad de  $\alpha/2$ . En este caso se utilizaron, para ambas pruebas, intervalos de confianza del 95% por lo que  $\alpha$  toma el valor de 0.05. El segundo test toma la siguiente forma:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (54)$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0 \quad (54)$$

Donde  $H_0$  no se rechaza si:

$$-t_{\frac{\alpha}{2}, v} < t' < t_{\frac{\alpha}{2}, v} \quad (55)$$

$$t' = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{(s_1^2 + s_2^2)/n}} \quad (56)$$

$$v = \frac{[(s_1^2 + s_2^2)/n]^2}{[(s_1^2/n)^2 + (s_2^2/n)^2]/(n-1)} \quad (57)$$

Estos tests se utilizan en el capítulo de Discusión de resultados.



## 4. Resultados.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante la metodología expuesta en el capítulo 3. Debido al gran número de variables en estudio, se optó por analizar en detalle sólo las decisiones, particularmente los moduladores de demanda de los sectores de consumo a y b, y el caudal desviado por el canal revestido U, cuya operación busca el MOGIHA. El resto se presenta como promedios anuales.

El análisis consiste en comparar el comportamiento de las variables de decisión del MOGIHA según los caudales generados a partir de cada modelo hidrológico en los escenarios propuestos, es decir, años húmedos, normales y secos. Dichos escenarios, explicados en la sección 3.1.4, fueron definidos a partir de las curvas de variación estacional de caudales mensuales en la estación fluviométrica de referencia del modelo hidrológico. Así, los caudales del escenario de año húmedo se crearon sumando el error aleatorio de los pronósticos y el caudal que tiene una probabilidad de excedencia de 20%. Para los caudales de año normal se utilizó una probabilidad de excedencia de 50% y en año seco, 85%. La figura 4.1 muestra ejemplos de series de caudales típicas de los distintos escenarios y modelos hidrológicos.

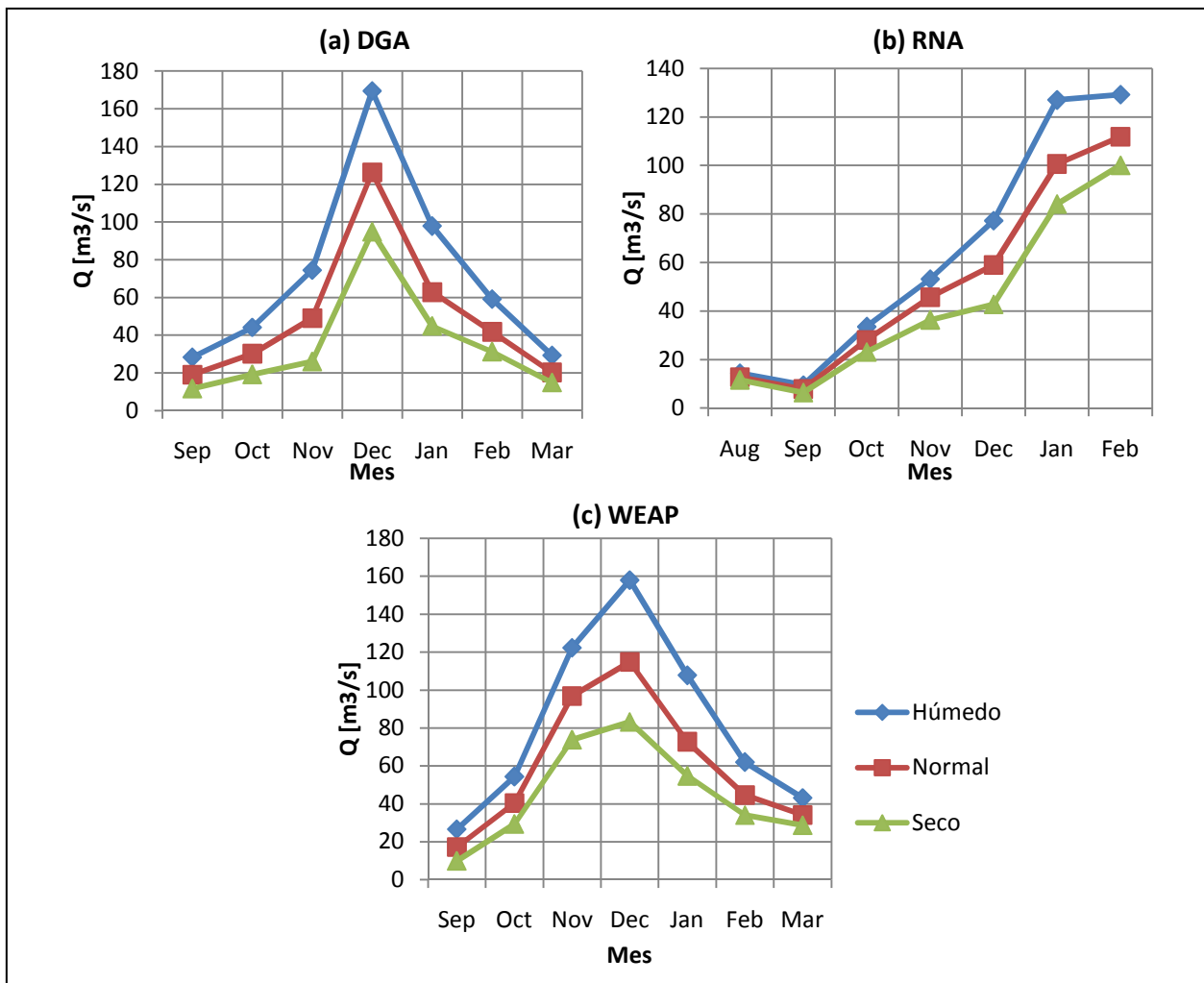


Figura 4.1. Ejemplos de series de entrada al MOGIHA.

Es importante recordar que también se pretende estudiar cómo afecta la incertidumbre de los modelos hidrológicos a las variables del MOGIHA. Por esto los resultados aquí mostrados presentan su variación con respecto al número de realizaciones simultáneas con las que fueron creados.

Los resultados presentados corresponden a la compilación de los obtenidos, que pueden ser encontrados en el anexo C. Por razones de espacio se ha decidido no mostrar las 1,058,400 decisiones conseguidas entre todos los meses, modelos y años estudiados; por lo que el análisis se realizará sobre los valores medios y desviaciones estándar para las variables de decisión de moduladores de la demanda en la primera y segunda sección  $a(t)$  y  $b(t)$  respectivamente, y el caudal desviado por el canal revestido U. Las otras variables de decisión del MOGIHA se estudiarán como caudales medios anuales.

Es necesario recordar que se hicieron 300 optimizaciones para cada valor de  $s_{sz}$  (1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200), para cada modelo hidrológico (DGA, RNA y WEAP), para cada escenario. Estos son los resultados que se resumen en el presente capítulo.

Se ha incluido deliberadamente a los meses de agosto y marzo en todos los gráficos, pese a que no todos los modelos los utilizan, para facilitar la lectura y comparación de los resultados. Aún así, es importante destacar que el efecto de los valores iniciales se produce en el mes de septiembre en los modelos hidrológicos DGA y WEAP y en agosto para RNA; y que R2 no demanda agua en agosto, tal como se puede observar en la tabla 3.9.

#### **4.1. Años húmedos.**

Tal como se definió en la sección 3.1.4, el año húmedo es el que se define por la probabilidad de excedencia del 20% en la estación fluviométrica característica del modelo hidrológico. Por tanto se esperan años con gran disponibilidad superficial de agua, valores elevados de los moduladores y poco bombeo. En estos años la gestión no suele ser un problema ya que los volúmenes de agua bastan para satisfacer todas las demandas.

A continuación se detallan los valores encontrados para cada decisión del sistema, sujeto a la incertidumbre de los modelos hidrológicos.

##### **4.1.1. Modulador de la demanda para la primera sección $a(t)$ .**

Tal como se esperaba, para valores bajos del número de realizaciones ( $S_{sz}$ ) el modulador de la demanda del sector R1,  $a(t)$ , mantiene valores medios cercanos a 1. Esto implica que la demanda se cumple casi completamente, en los tres modelos tal como se observa en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4.

No obstante, a medida que se aumenta la muestra de la incertidumbre los valores comienzan a disminuir. Esto es de esperarse, ya que según el método de las realizaciones múltiples la incertidumbre entra en la optimización como restricciones. Esto implica que mientras mayor sea el número de realizaciones, mayor será la muestra de la incertidumbre y el modelo tendrá una mayor cantidad de restricciones. Además, al aumentar el tamaño de la muestra es más probable incluir caudales bajos que dominarán la respuesta en cuanto a la satisfacción de la demanda.

Al usar los caudales generados con el modelo DGA, el modulador de la demanda para R1 presenta un comportamiento casi lineal con respecto a la incertidumbre para todos los meses, exceptuando a diciembre y febrero. Este último se muestra como el más sensible a la incertidumbre, mientras que septiembre pareciera ser indiferente a ésta, disminuyendo muy levemente su valor medio. Es interesante notar, bajo este modelo hidrológico, la agrupación de los valores medios mensuales de esta variable, indicando un tratamiento similar para todos los meses, tal como se ve en la figura 4.2.

El MOGIHA, bajo los caudales del modelo RNA, presenta un comportamiento muy distinto que con los otros modelos hidrológicos, como se puede ver en la figura 4.3. Se presenta prácticamente indiferente a la incertidumbre hasta que el número de realizaciones llega a 200, donde los valores medios mensuales de  $a(t)$  caen súbitamente en los meses de noviembre, diciembre y enero. Octubre, por otro lado, se muestra casi salido de otro modelo hidrológico, con una sensibilidad desde el principio mayor a la incertidumbre que los otros meses y una baja suave en sus valores.

El comportamiento de este modelo para el escenario de año húmedo puede explicarse por dificultades numéricas que se observaron en el modelo de gestión cuando hay caudales altos y muy parecidos entre ellos, en particular cuando  $S_{sz}$  alcanza los 200. Las bajas desviaciones estándar que caracterizan a las distribuciones normales de este modelo pueden haber contribuido a esto. A pesar de ser descubierto, este problema no pudo ser solucionado efectivamente sin modificar de manera completa el modelo. Además, como se observa en el gráfico (b) de la figura 4.1, el mes de febrero está completamente sobreestimado debido al sesgo que produjo la alta media de la distribución de los errores de los pronósticos de este modelo hidrológico. Esto afecta la forma como se comporta este mes, siempre con agua suficiente como para satisfacer la demanda.

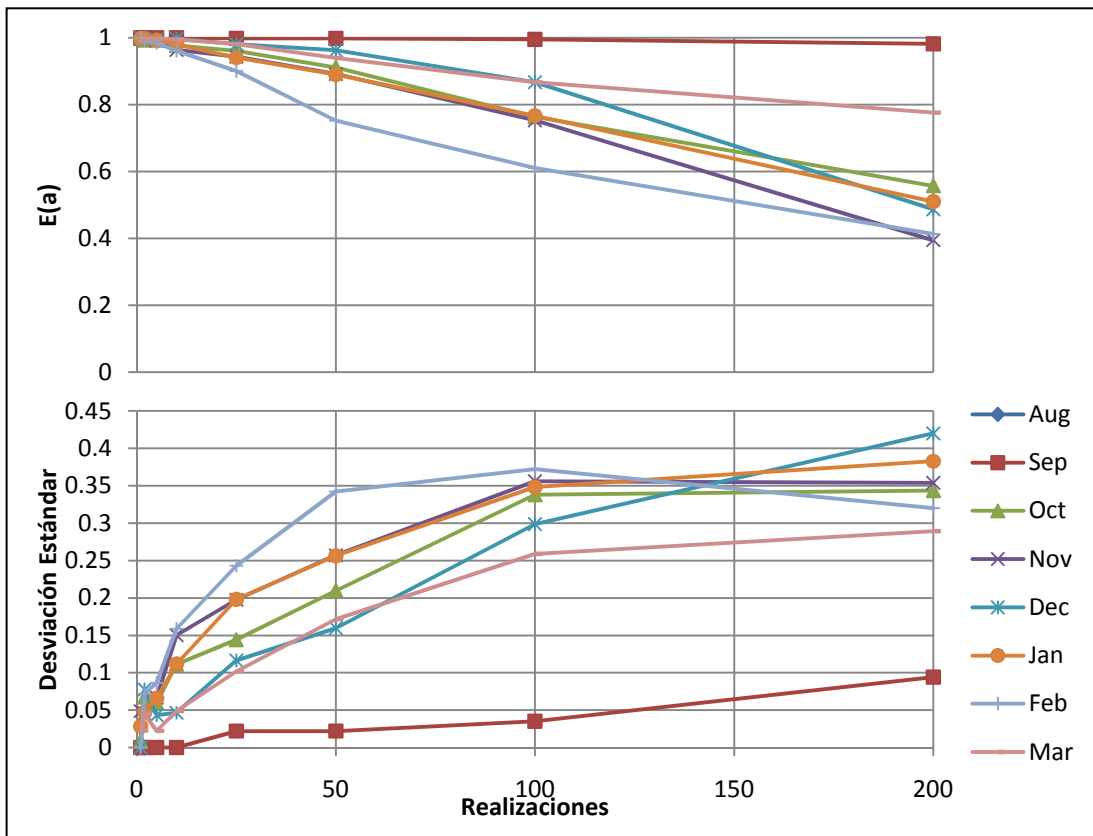


Figura 4.2. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo DGA en año húmedo.

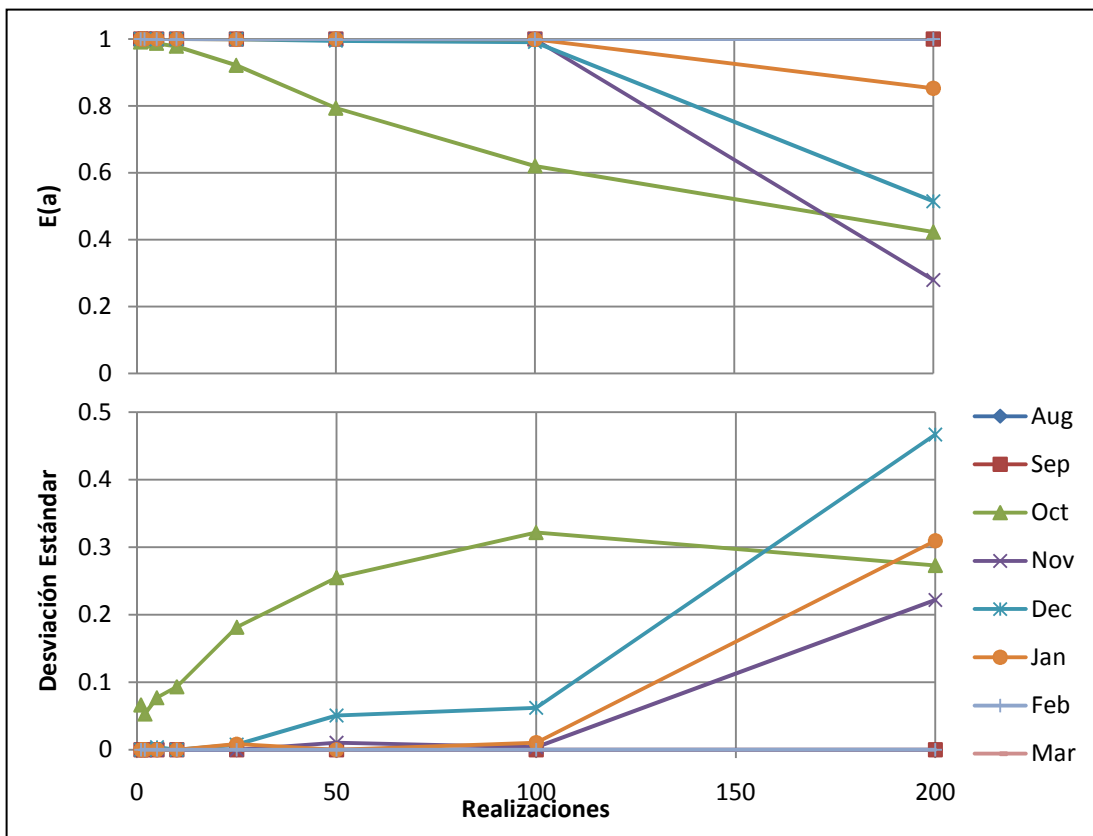


Figura 4.3. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo RNA en año húmedo.

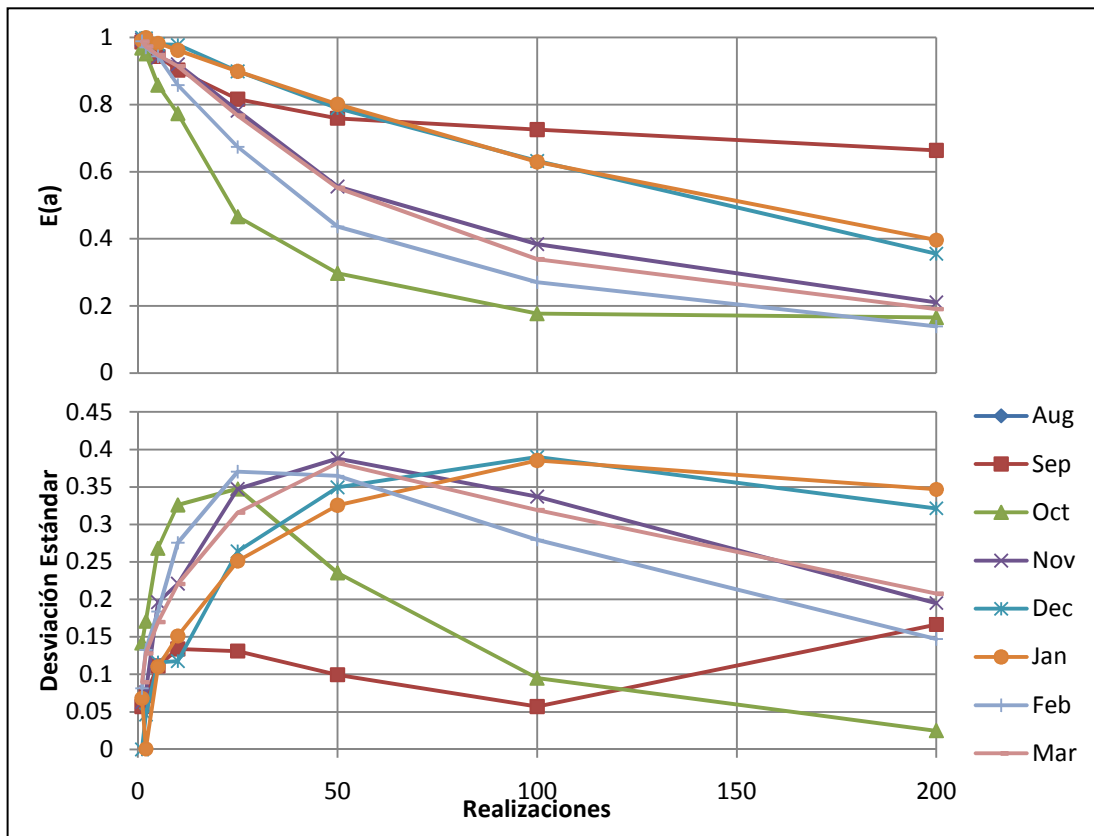


Figura 4.4. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo WEAP en año húmedo.

Como se observa en la figura 4.4, las series de  $a(t)$  bajo el modelo WEAP muestran una baja más pronunciada al principio y más lisa hacia el final. Esto se debe a que con pocas realizaciones sólo una pequeña muestra de la variabilidad de los caudales de entrada es considerada, por lo tanto los diferentes conjuntos del mismo tamaño tienen más posibilidad de muestrear diferentes rangos de los inciertos caudales (Feyen & Gorelick, 2004). En este modelo también se observa una mayor distancia entre los valores mensuales, lo que se puede atribuir al amplio parámetro de escala que define a las distribuciones de probabilidad de los errores de los pronósticos de este modelo hidrológico.

Es interesante estudiar el comportamiento de las desviaciones estándar de esta variable bajo los caudales generados a partir de los distintos modelos hidrológicos. Las formas que toman estas curvas están íntimamente relacionadas con la naturaleza estocástica del modelo de gestión y con el método de las realizaciones múltiples.

La función objetivo del MOGIHA maximiza  $a(t)$  sujeto a la hidrología entrante al sistema, por tanto es de esperar que esta variable esté dominada por el peor caso, es decir, el mes más seco. Por otra parte, una realización está compuesta por 7 meses independientes entre sí que pueden ser más o menos secos que el caudal correspondiente a la probabilidad de excedencia mostrado en la sección 3.1.4

Cuando se calcula  $a(t)$  con  $S_{sz}$  igual a 1, sus valores dependerán directamente de los caudales que vienen en la realización escogida. Si se revisan los valores de las medias para este caso, son muy cercanas si no iguales a 1, lo que quiere decir que hay suficiente agua como para satisfacer la demanda del sector R1 completamente. Considerando lo anterior, es lógico que la dispersión de los resultados sea muy baja ya que habrán pocos meses lo suficientemente secos como para disminuir la satisfacción de la demanda.

No obstante, a medida que se aumenta la muestra de la incertidumbre en la optimización, existen más posibilidades de incluir caudales secos que disminuyan el valor de  $a(t)$ , lo cual baja el valor promedio y aumenta la dispersión, ya que estos valores no tienen por qué ser los mismos. Esto se observa claramente en las figuras 4.2 y 4.3 bajo los modelos DGA y RNA.

Al seguir aumentando el tamaño de la muestra, es cada vez más probable encontrar valores cercanos a los mínimos que dominen los valores de  $a(t)$ . Estos valores, al ser todos bajos, comienzan a parecerse mucho entre ellos por lo que se comienzan a estabilizar los promedios y a disminuir la dispersión de los resultados, como se grafica en la figura 4.4 bajo el modelo WEAP.

La velocidad con que sucedan los procesos previamente descritos de crecimiento y disminución de la dispersión de datos, dependerá de cuán difícil sea encontrar las realizaciones que contengan meses con caudales lo suficientemente bajos como para modificar de forma significativa el valor de  $a(t)$ . Por ejemplo el caso del mes de septiembre, en el cual bajo los modelos DGA y WEAP presenta un comportamiento muy distinto a los otros meses, se debe a que su demanda es tan baja que son realmente pocos los caudales tan bajos que pueden hacer disminuir la satisfacción de la demanda. Por esto se eleva hacia el final, donde hay mayor posibilidad de encontrarlos.

El comportamiento de  $a(t)$  bajo el modelo RNA es, sin embargo, distinto a ese caso. Es muy poco probable que los caudales bajos, que implican la disminución del promedio cuando se toman 200 realizaciones, no aparezcan previamente. Lo cierto es que para explicar un promedio tan bajo como el que muestra el mes de noviembre en la figura 4.3, deben existir muchos caudales muy bajos para ese mes. Si es así, es de esperar que los resultados con menores muestras, pudiendo ser altos, muestren una dispersión mayor que la obtenida. Se presume entonces algún problema de tipo numérico que explique este comportamiento.

#### **4.1.2. Caudal por el canal revestido U.**

El caudal pasante por el canal revestido U es la principal decisión del modelo de gestión. Este caudal se toma del río antes de entrar en la zona donde se produce la infiltración hacia la napa, por lo que tiene a disposición toda el agua de entrada en Aconcagua en Chacabuquito. El MOGIHA puede elegir entre pasar el agua del riego superficial por este canal o por N2R1, el cual no dispone del agua ya infiltrada.

Ya que el modelo de gestión está construido para que riegue lo más posible con agua superficial, es de esperar que mientras haya abundancia de este elemento preferirá desviar el caudal por el canal tradicional N2R1 para aumentar la recuperación del río en la segunda sección A1N3. Por esto el caudal circulante por U debería ser bajo para un año húmedo y aumentar conforme la muestra de incertidumbre incorpora más meses secos. Por supuesto, el límite superior de esta variable es el caudal I que entra por Aconcagua en Chacabuquito, por lo que puede presentar disminuciones y hasta estabilizaciones con respecto al eje de la incertidumbre cuando las entradas bajen y se estabilicen en los mínimos.

Por último, hay que considerar que esta decisión está íntimamente ligada con N2R1 y con el bombeo en la primera sección A1R1 por lo que su comportamiento presenta variaciones acorde con el de éstas. Las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 muestran el desarrollo de esta decisión con respecto a la cantidad de realizaciones bajo los modelos DGA, RNA y WEAP.

El comportamiento de U bajo DGA y WEAP cae dentro de lo esperado y descrito previamente. Al ocupar los caudales generados desde el modelo DGA, esta variable presenta curvas crecientes que se inician con valores muy bajos y que no encuentran máximos en su recorrido, como se observa en la figura 4.5. Esto es propio de años húmedos donde no se alcanzan los mínimos mostrados en la tabla 3.6.

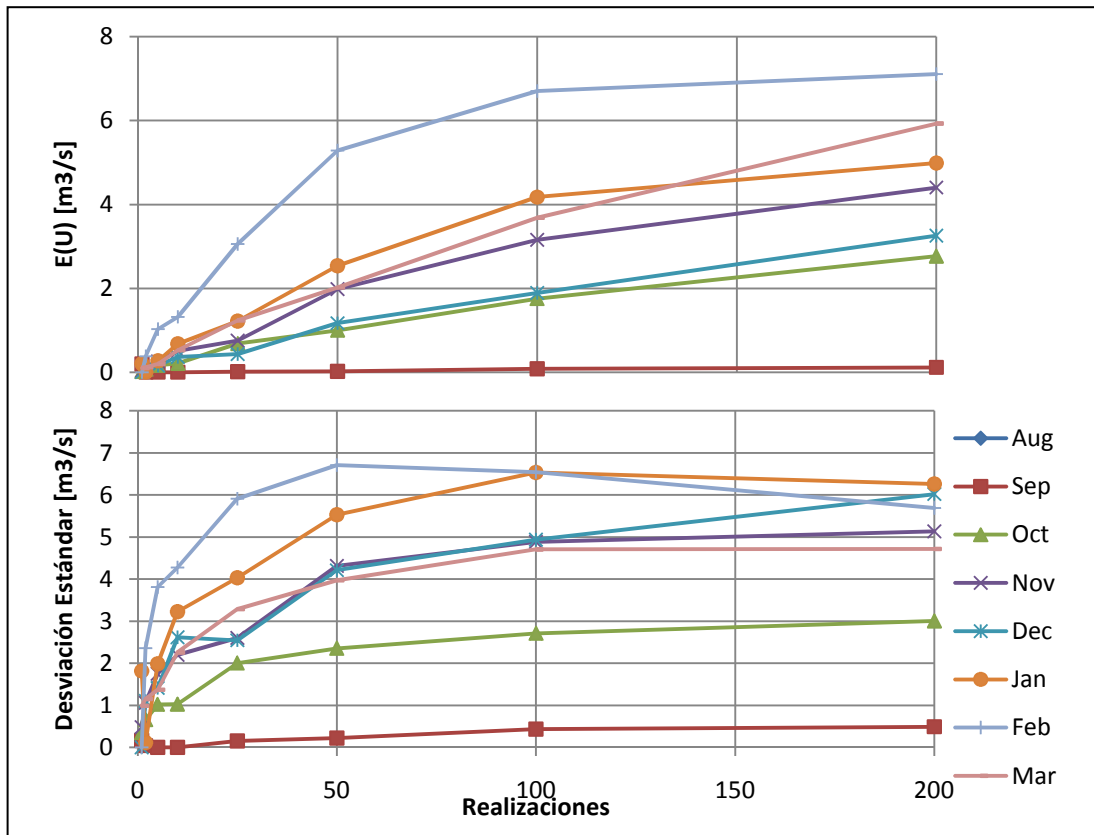


Figura 4.5. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo DGA en año húmedo.

Como se ve en la figura 4.6, bajo el modelo RNA, U muestra signos de años extremadamente húmedos, excepto en el mes de octubre, con una utilización casi nula del canal revestido. Tal como se mencionó anteriormente, el comportamiento de este modelo en el escenario húmedo es de dudosa calidad.

Por su parte, los resultados de los valores medios de U bajo el modelo WEAP, enseñados en la figura 4.7, muestran signos de alcance de mínimos como la estabilización de los valores en septiembre y octubre. En la tabla 3.7 se observa la alta posibilidad de encontrar valores mínimos para estos meses aun en años húmedos, por lo tanto es comprensible esta estabilización. También se observa bajo este modelo la presencia de máximos que indican que se encontraron valores cercanos a los mínimos entre los caudales de entrada en las realizaciones.

Las desviaciones estándar que presenta esta decisión en los distintos modelos hidrológicos cuentan la misma historia. Cuando se toman pocas muestras de la incertidumbre, al ser un escenario de año húmedo, la decisión en general va a ser llevar poca agua por U para aprovechar la infiltración. Estos valores, al ser bajos, se parecen y como resultado se tiene una dispersión baja.

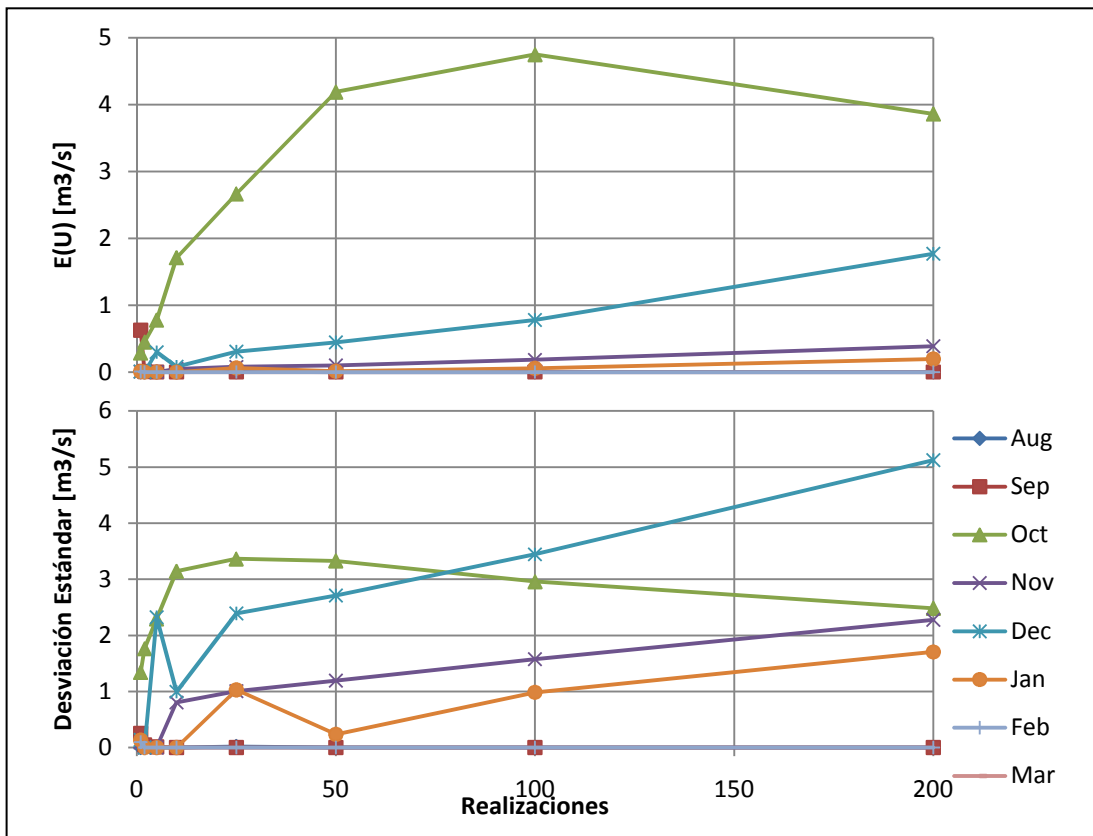


Figura 4.6. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo RNA en año húmedo.

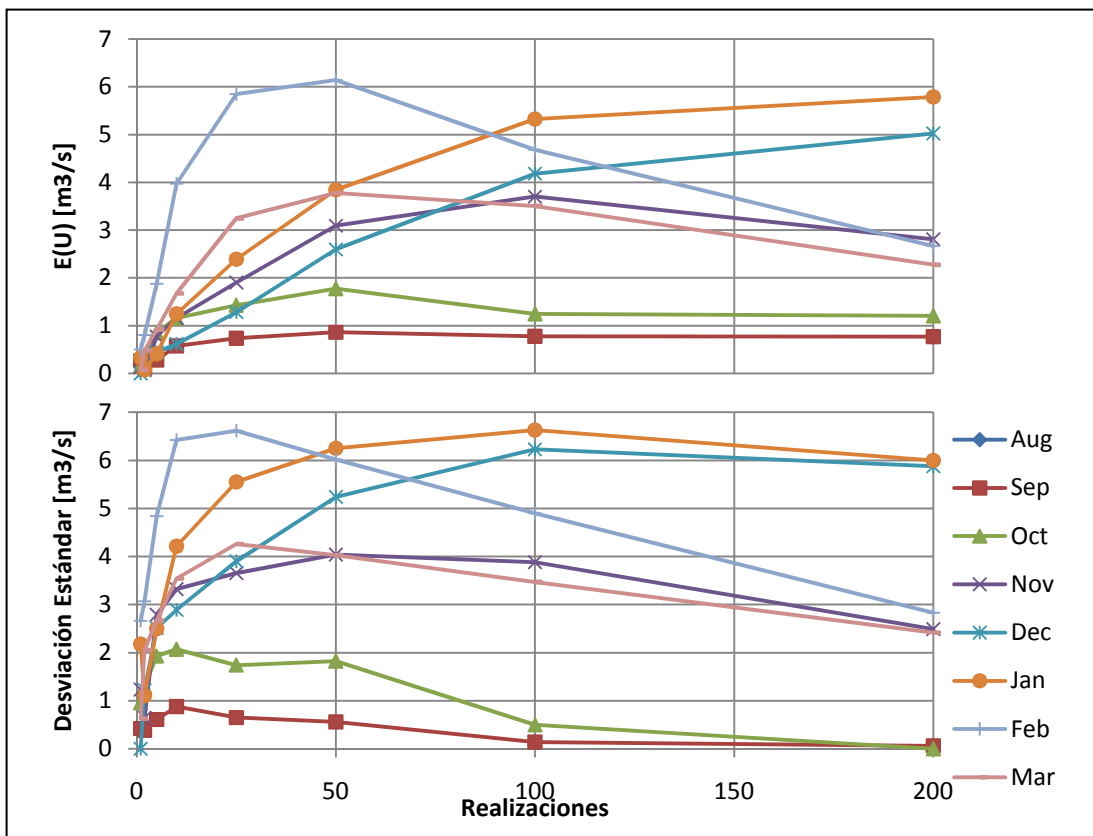


Figura 4.7. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo WEAP en año húmedo.



A medida que se incluyen más muestras y aumenta la cantidad de meses secos incluidos en la optimización, se van obteniendo mayores caudales por U que no necesariamente se parecen, por lo que aumenta la desviación estándar. Finalmente, cuando se incluye una gran muestra de la incertidumbre, se comienzan a encontrar cada vez más a los caudales cerca del mínimo, por lo que las decisiones empiezan a parecerse entre ellas también.

Sin embargo, como también existe la opción de desviar los caudales por N2R1, puede haber un momento en que las desviaciones estándar tienen una aparente estabilización. Esto puede suceder cuando se encuentran una mayor cantidad de meses secos que aumentan la media de U y bajan la de N2R1 en una proporción tal que no varíen las dispersiones. Esto se observa bajo el modelo DGA con muchas realizaciones, en la figura 4.5.

Bajo el modelo WEAP, la desviación estándar de U presenta el comportamiento esperado y descrito anteriormente de crecimiento, baja y estabilización por mínimos; mientras que bajo el modelo RNA muestra curvas cuasi crecientes de dispersión, como si todos los caudales de los meses noviembre, diciembre y enero no se pareciesen nada entre ellos.

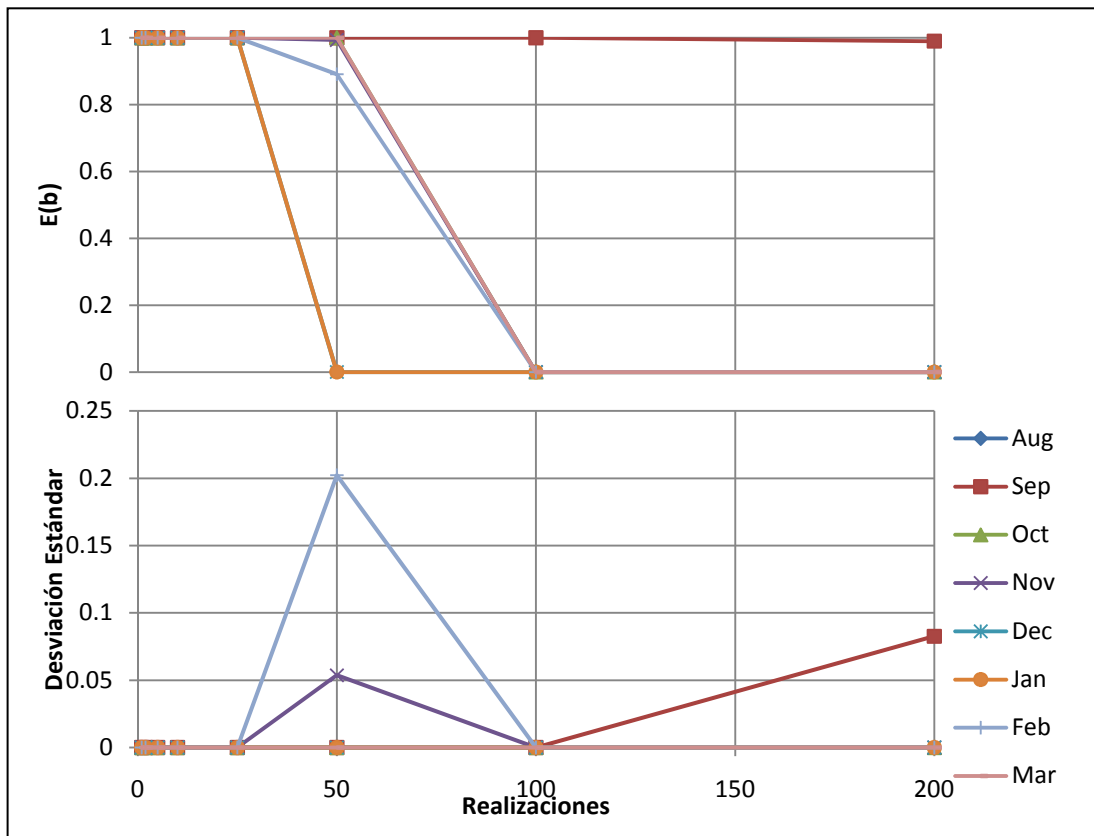
#### **4.1.3. Modulador de la demanda para la segunda sección $b(t)$ .**

El modulador de la demanda del segundo sector de riego,  $b(t)$ , depende de las decisiones tomadas en la primera sección y de los ingresos desde el río Putaendo, P. Es por esto que el comportamiento de esta variable puede resultar más impredecible que las previamente estudiadas.

Cabe recordar que la función de transferencia entre Aconcagua en Chacabuquito y Putaendo en Resguardo Los Patos es lineal, por lo que meses secos de I implican años secos de P. Sin embargo, al ser esta función calculada mediante una regresión lineal de los caudales observados en dichas estaciones, no es más que una estimación estadística de los reales caudales del río Putaendo. Esto es, nuevamente, fuente de incertidumbre en el modelo.

Como se observa en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10, el comportamiento es bastante binario aún en año húmedo, observándose una caída casi total a cero al pasar de  $S_{sz}$  igual a 100. Esto es un claro indicador que la segunda sección es mucho más sensible a la incertidumbre que la primera, ya que no hay diferencias numéricas en la escritura del modelo de gestión que favorezcan la satisfacción de la demanda en R1 por sobre la de R2. La única diferencia real es que, como se vio en la sección 3.3.1, se castiga menos el bombeo en la primera sección que en la segunda; sin embargo, en pruebas preliminares sin este factor, la forma que adopta la curva de esta variable fue la misma.

Bajo el modelo hidrológico de la DGA, la demanda del segundo sector se cumple completamente para muestras pequeñas de la incertidumbre, como se ve en la figura 4.8. Luego, en los meses de diciembre y enero, el modulador cae a cero cuando  $S_{sz}$  es igual a 50, lo que implica que no se riega nada en R2; mientras que febrero presenta una pequeña disminución. Cuando se llega a 100 realizaciones por optimización, sólo el mes de septiembre continúa con el riego, para disminuir levemente al llegar a las 200. Esto se explica por la baja demanda que tiene este mes. El mes de noviembre presenta una pequeña baja a las 50 realizaciones, justo antes de caer a cero.



**Figura 4.8.** Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo DGA en año húmedo.

Con los caudales del modelo RNA,  $b(t)$  se comporta de forma similar que bajo el modelo hidrológico de la DGA, pero sin mostrar disminuciones menores tal como se aprecia en la figura 4.9. Se recalca que el mes de agosto, considerado en este modelo hidrológico, no presenta demanda en el segundo sector.

Las curvas de  $b(t)$ , formadas a partir de los caudales generados a través del modelo WEAP, también presentan caídas al llegar a las 50 realizaciones como bajo el modelo de la DGA, pero muestran una baja mayor en los meses de noviembre y febrero. El mes de septiembre es más afectado por las realizaciones con menores caudales que se encuentran cuando se llega a las 200 realizaciones. Al utilizar este modelo hidrológico también se presenta una pequeña baja en el mes de diciembre, previa a la caída definitiva a cero; y en noviembre cuando  $S_{sz}$  es igual a 5, probablemente debido a que se encontró una realización con un mes muy seco. Esto se puede ver en la figura 4.10.

Las desviaciones estándar muestran lo drástico que es el MOGIHA al tomar las decisiones de  $b(t)$ . Se observa que hay dispersión en los resultados sólo cuando las medias no corresponden a 1 ó 0, es decir, extrañamente considera decisiones que no sean la satisfacción total o nula de la demanda. El caso más drástico es bajo el modelo RNA que presenta dispersión cero en todas las decisiones, mostrando un comportamiento completamente binario en lo que a  $b(t)$  respecta.

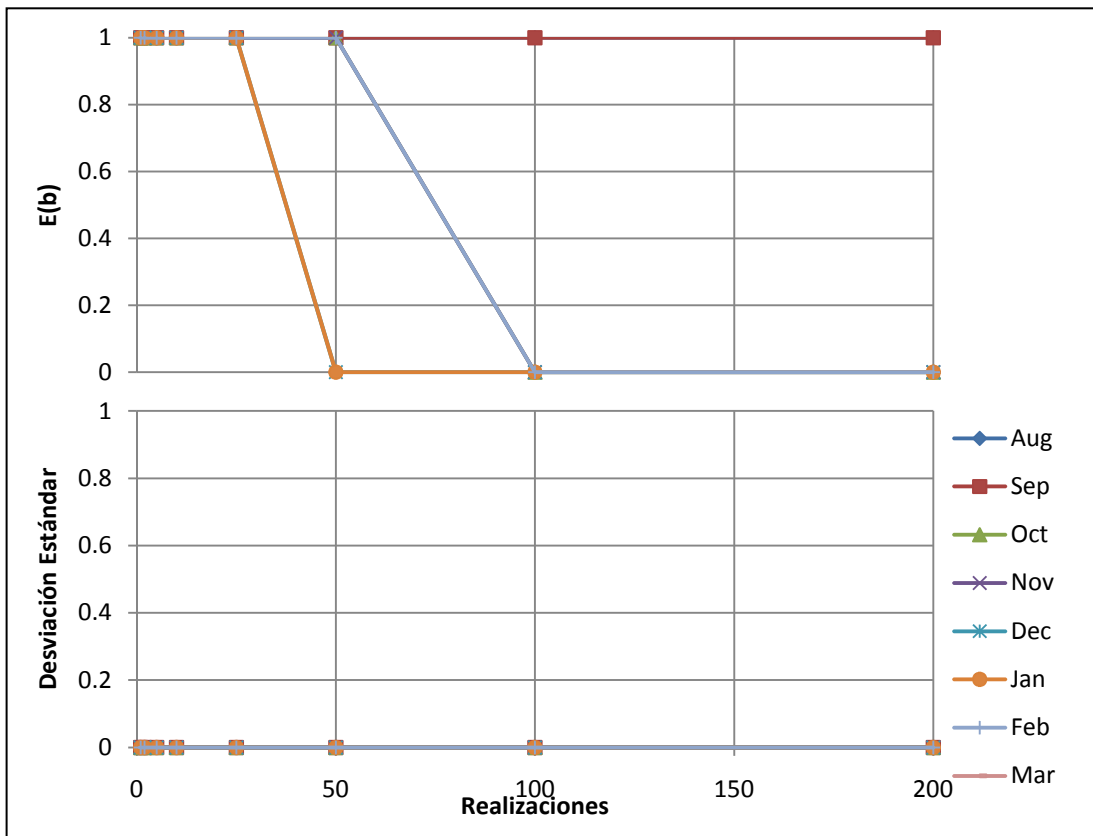


Figura 4.9. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo RNA en año húmedo.

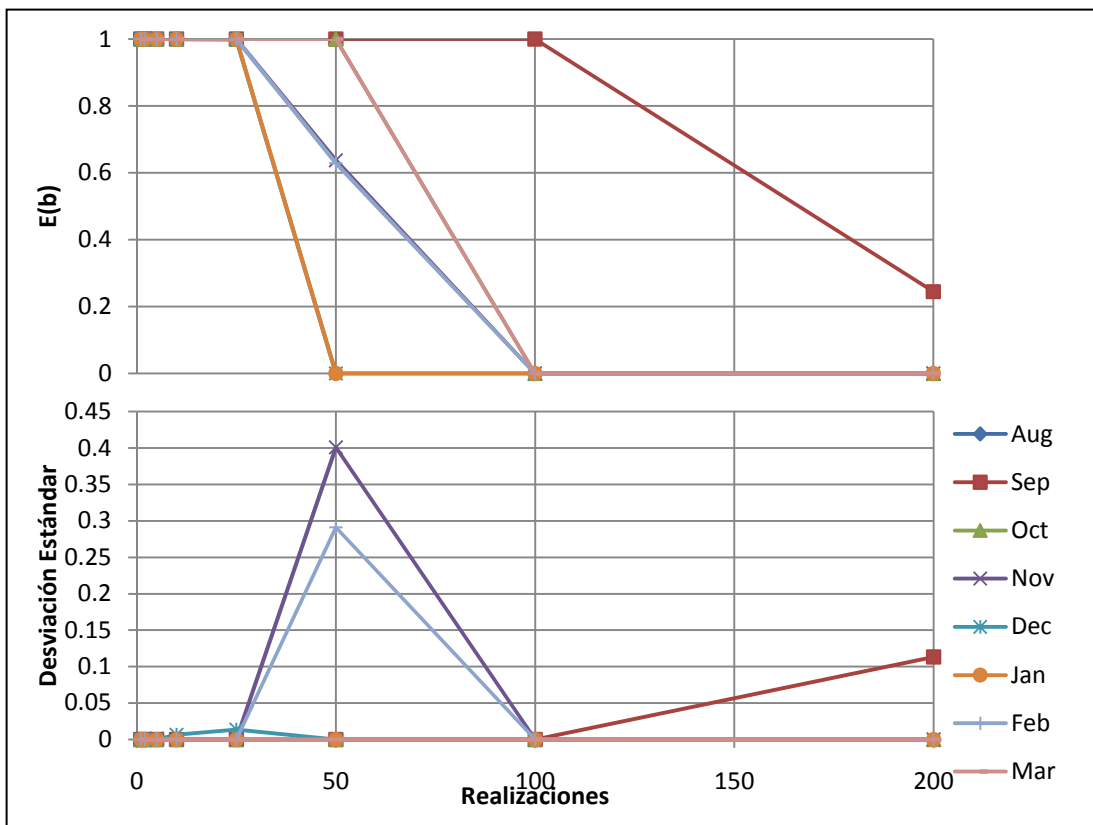


Figura 4.10. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo WEAP en año húmedo.

#### 4.1.4. Caudales de bombeo y canales de la primera sección.

En esta sección se revisará los resultados de las decisiones de la primera sección, correspondiente a los caudales superficiales de N2R1 y U, y el caudal de bombeo A1R1. Éstos se verán de forma resumida como caudales medios anuales con el fin de diferenciar el comportamiento del modelo de gestión frente los ingresos de los tres modelos hidrológicos estudiados. Se omitirá de este análisis las desviaciones estándar ya que pierde sentido el estudio de este estadístico cuando los resultados se consolidan en caudales medios anuales, si fueron calculados como mensuales.

Así en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se observan los valores de los caudales medios anuales, para los tres modelos hidrológicos, con respecto al tamaño de la muestra de incertidumbre para U, N2R1 y A1R1. Se incluye de nuevo a U con fines para poder compararlo con las demás decisiones de la primera sección. El comportamiento de esta variable ya fue estudiada en 4.1.2 y la figura 4.11 sólo deja en clara evidencia lo ya discutido allí; es decir, el uso intensivo bajo el modelo DGA, el máximo que presenta con el modelo WEAP y el bajo uso cuando se usan los caudales obtenidos a partir del modelo RNA.

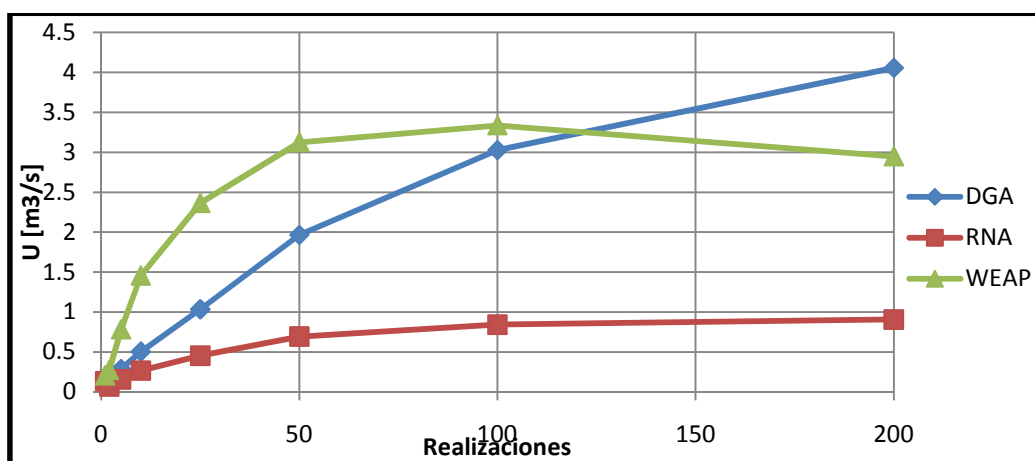


Figura 4.11. Caudal medio anual por modelo hidrológico para U para año húmedo.

Como se esperaba, los caudales que circulan por N2R1 disminuyen cuando aumenta el número de realizaciones, como se puede observar en la figura 4.12. Esto, tal como se discutió en 4.1.2, se debe a que mientras más realizaciones se incluyen en la optimización, es más probable encontrar meses secos que dominen los resultados. La respuesta del modelo de gestión a esto es desviar los caudales por U para poder aprovechar la totalidad del caudal entrante. Es interesante como se diferencian los modelos, mostrándose WEAP como el más susceptible a la incertidumbre con una curva cóncava, DGA presenta un comportamiento casi lineal de los caudales con respecto al número de realizaciones y RNA, como era de esperarse, presenta un comportamiento de años muy húmedos hasta con una curva convexa.

La diferencia que se observa en N2R1 entre los caudales generados por RNA y el resto se debe a que la demanda total anual de este modelo es menor que la de los otros, debido a que considera el mes de agosto excluyendo a marzo, mes con demanda bastante mayor, como se observa en la tabla 3.9.

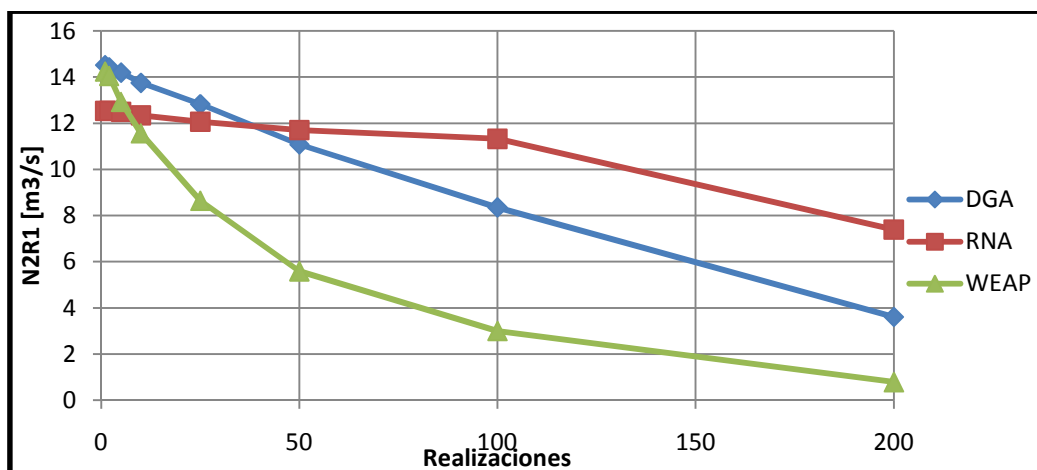


Figura 4.12. Caudal medio anual por modelo hidrológico para N2R1 en año húmedo.

Los bombeos de A1R1, tal como se presumía para un año húmedo y se observa en la figura 4.13, son bastante bajos para todos los modelos hidrológicos. No obstante, se puede observar una clara diferencia en la intensidad del uso, siendo bajo el modelo WEAP cuando más se explota la napa. Esto se podría predecir a partir de los resultados previos que lo muestran proporcionalmente más seco que los otros modelos hidrológicos.

Por otro lado es interesante que el MOGIHA bajo el modelo RNA bombee más agua que bajo el DGA. Posiblemente esto tenga relación con que el modelo de gestión bajo RNA decidió satisfacer más demanda que bajo DGA, y por lo tanto explotó más este recurso.

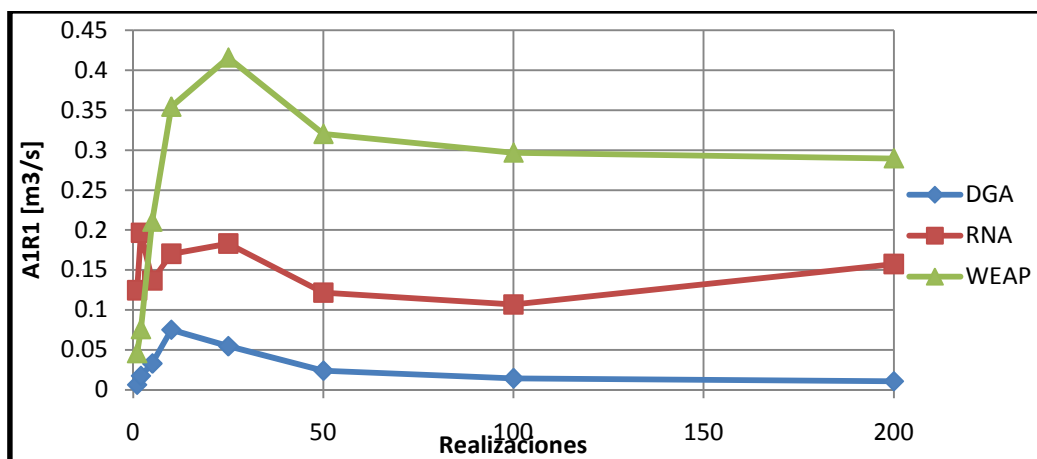


Figura 4.13. Caudal medio anual por modelo hidrológico para A1R1 en año húmedo.

#### 4.1.5. Caudales de bombeo y canales de la segunda sección.

En la segunda sección hay sólo dos caudales disponibles para regar R2: el desviado desde el río a través del nodo N3 y el bombeado desde A2. En un año húmedo se espera que el flujo superficial sea suficiente como para satisfacer la demanda, por lo que la extracción de la napa debería ser poca. Las figuras 4.14 y 4.15 muestran el desarrollo de los caudales medios anuales para N3R2 y A2R2 respectivamente.

En cuanto a los canales se refiere, El MOGIHA bajo los tres modelos hidrológicos se comporta de manera muy similar. Coherente con la forma que toma  $b(t)$ , se observan bajas en la figura 4.14 en  $S_{sz}$  igual a 50 y 100, manteniendo un mínimo para nutrir al mes de septiembre. Bajo la presunción, por su comportamiento y lo que se puede observar en la figura 4.1, que el modelo RNA tiene siempre caudales generados muy altos se puede inferir que deja salir mucho caudal superficial del sistema, sin aprovecharlo para el riego.

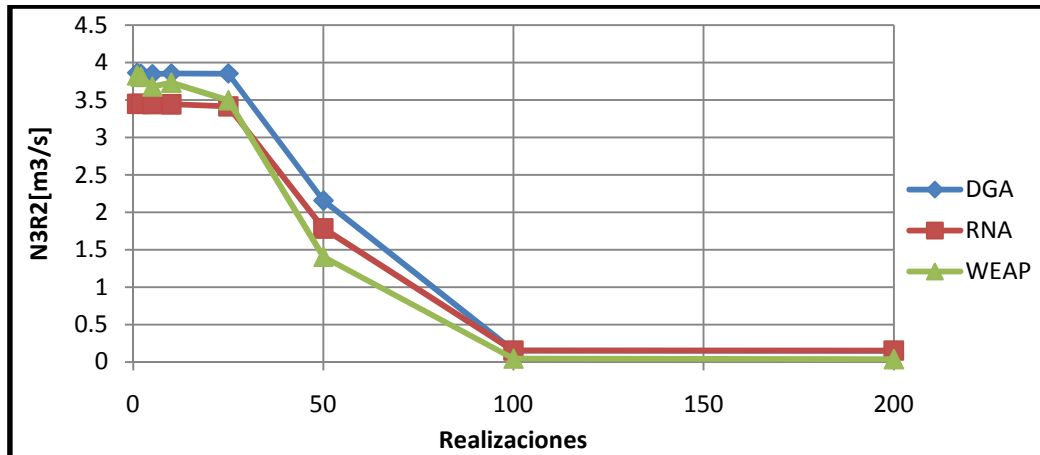


Figura 4.14. Caudal medio anual por modelo hidrológico para N3R2 en año húmedo.

El bombeo es efectivamente bajo, pero se destaca que bajo el modelo WEAP nuevamente se vuelve a explotar más la napa que con los otros dos, llegando a un máximo de 300 [l/s]. Posiblemente sea este caudal el que afecta la dispersión de los meses de noviembre y febrero en  $b(t)$ . En cuanto al uso de los otros modelos hidrológicos, los bombeos son insignificantes en comparación con los caudales de N3R2, como se observa en la figura 4.15.

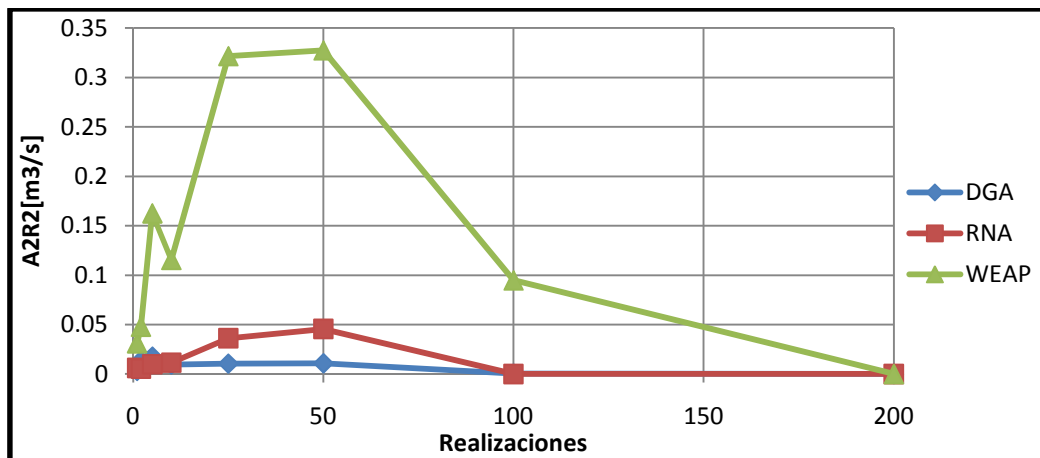


Figura 4.15. Caudal medio anual por modelo hidrológico para A2R2 en año húmedo.

## 4.2. Años normales.

Los años normales fueron definidos como los con una probabilidad de excedencia del 50% de la estación de referencia de los modelos hidrológicos estudiados, tal como se resume en la tabla 3.5. En estos años el problema de la gestión se soluciona en la realidad mediante los derechos de agua entregados por la DGA y la autorregulación que impone el mercado.

Para el caso en estudio, se espera una mayor restricción en la satisfacción de la demanda de riego y mayores bombeos a medida que aumentan las posibilidades de encontrar mínimos entre las realizaciones. A continuación se muestran los resultados obtenidos para este escenario.

Para el análisis de este escenario se supone conocida la discusión sobre la razón de las formas que toman las curvas que se desarrolló en el capítulo 4.1.

### 4.2.1. Modulador de la demanda para la primera sección $a(t)$ .

Se observa en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 una rápida disminución de los valores medios de  $a(t)$  bajo los modelos DGA y WEAP, mientras que con los caudales de RNA muestra una baja más suave que en el caso de los años húmedos.

De los resultados obtenidos a partir de los caudales generados del modelo hidrológico de la DGA, mostrados en la figura 4.16, se destaca el comportamiento del mes de septiembre, que debido a su baja demanda en R1 en comparación con los demás meses y al bajo parámetro de escala  $b$  de su distribución de probabilidad de error, tiene una pendiente casi constante. El resto de los meses presentan una sensibilidad frente a la incertidumbre mucho mayor que en el escenario de año húmedo. Se observa también que las series mensuales están mucho más juntas que en el caso anterior, lo que implica una operación menos dispar del sistema. Esto se puede deber a que los caudales de entrada, al ser menores, son más similares entre ellos; o bien que a causa de las menores entradas, el manejo del acuífero fue más crítico lo que acercó el funcionamiento entre los meses.

Bajo el modelo RNA,  $a(t)$  presenta, nuevamente, un comportamiento distinto a los otros modelos hidrológicos que se supone a causa de caudales mayores de entrada, excepto por el mes de octubre, como se observa en la figura 4.17. Sin embargo, estos resultados presentan una mayor concordancia con lo esperado que los resultados del escenario húmedo. De todas formas, se sigue caracterizando por una baja susceptibilidad a la incertidumbre, altos valores medios del modulador y una separación importante entre las series.

Usando las entradas obtenidas bajo el modelo WEAP, se consigue un comportamiento similar al del caso del año húmedo; sin embargo, se destaca la estabilización de los valores medios cuando se considera una gran cantidad de realizaciones. Esto, como se comentó previamente, se produce cuando aparecen frecuentemente los mínimos mensuales entre las realizaciones tomadas en la optimización. Esto queda aún más claro cuando se observa el gráficos de la desviación estándar en la figura 4.18.

Es claro que los valores cercanos a cero en la dispersión cuando  $S_{sz}$  llega a 200 bajo el modelo WEAP, indican que en casi todas las optimizaciones realizadas aparecieron los caudales mínimos mensuales que se indican en la tabla 3.6. Observando la tabla 3.7 es claro que esto es muy probable en el caso de los años normales.

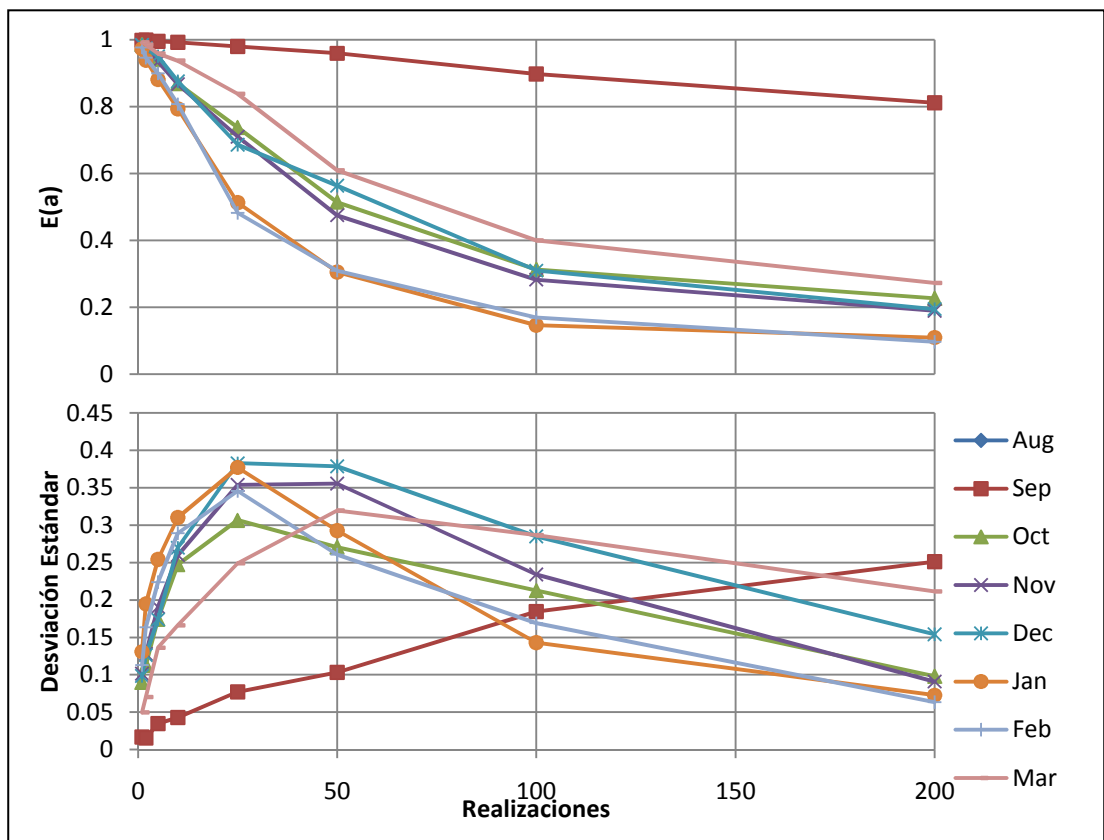


Figura 4.16. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo DGA en año normal.

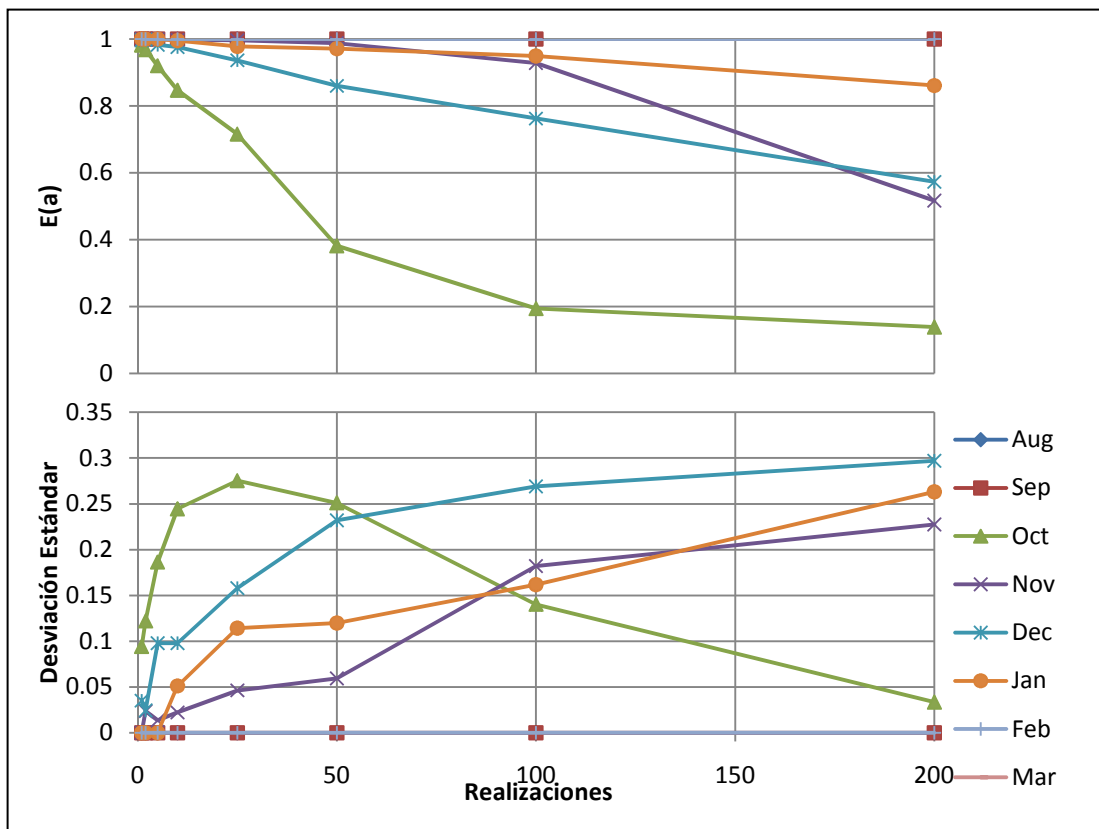


Figura 4.17. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo RNA en año normal.



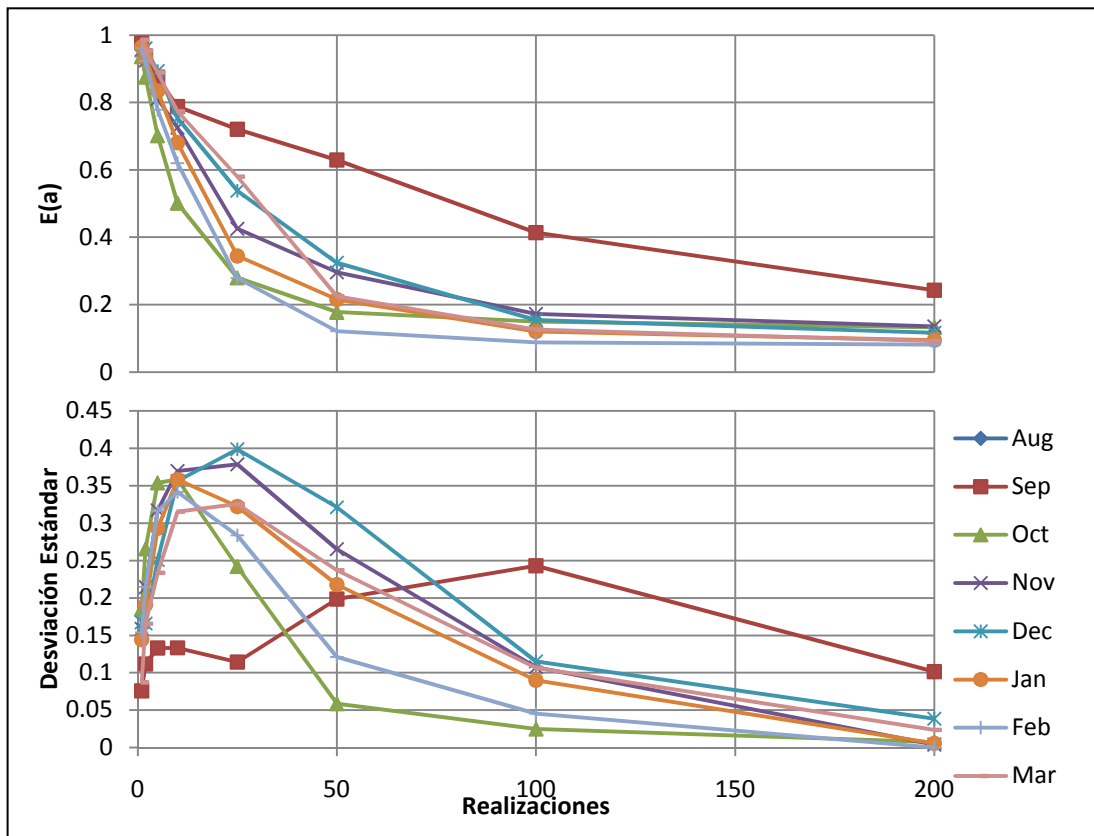


Figura 4.18. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo WEAP en año normal.

Con el modelo DGA,  $a(t)$  presenta, con la excepción del mes de septiembre, el comportamiento creciente decreciente descrito en la sección 4.1.1. Mientras septiembre presenta una curva de dispersión creciente debido a que la baja demanda facilita su satisfacción aún con caudales pequeños de entrada al sistema.

La desviación estándar de los resultados de  $a(t)$  bajo el modelo RNA presenta curvas crecientes posiblemente debido a los altos caudales que este modelo hidrológico presenta en este escenario. Nuevamente el mes de octubre presenta un comportamiento distinto a los otros meses con una curva que presenta un máximo. Los meses de agosto, septiembre y febrero presentan cero desviación estándar ya que en todas las optimizaciones realizadas los valores obtenidos fueron de 1 como se observa en la figura 4.17.

#### 4.2.2. Caudal por el canal revestido U.

Para años normales, los caudales circulantes por U comenzaron con valores medios bastante superiores a los de los años húmedos, para aprovechar mejor el agua disponible en Aconcagua en Chacabucito. Con respecto a esta decisión, el MOGIHA bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP presenta un comportamiento similar mostrando máximos mensuales y, en el modelo WEAP, tendencias a la estabilización cercanas a los caudales mínimos mensuales.

Bajo el modelo hidrológico RNA, U presenta resultados muy disímiles entre los meses evaluados, con diciembre completamente alejado del resto con grandes valores, mientras en meses como septiembre prácticamente no se ocupa el canal revestido. Esto se puede observar en las figuras 4.19, 4.20 y 4.21 para los modelos hidrológicos DGA, RNA y WEAP respectivamente.

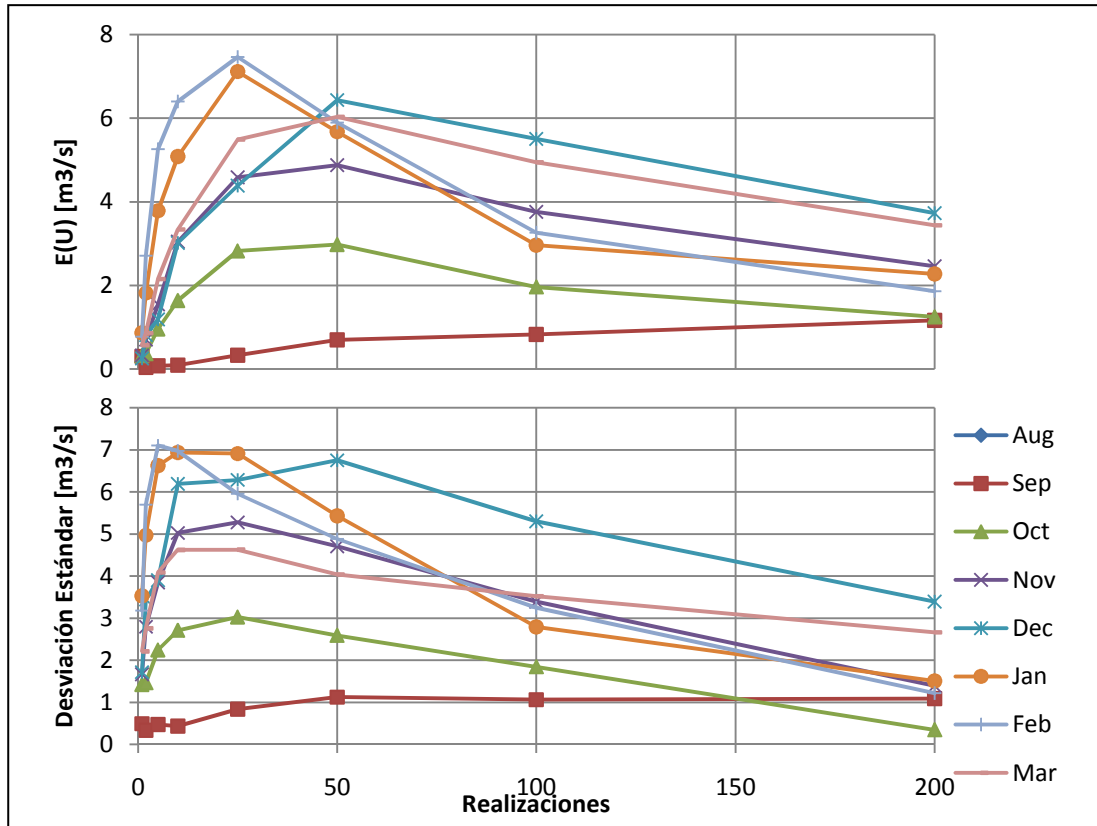


Figura 4.19. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo DGA en año normal.

Las desviaciones estándar cuentan una historia similar, mostrando curvas con máximos cuando se utilizan los modelos hidrológicos DGA y WEAP con valores del orden de las medias, en las figuras 4.19 y 4.21 respectivamente. Bajo el modelo DGA, la dispersión muestra tendencias a la baja en indicando que cada vez que se aumenta el número de realizaciones, más mínimos se encuentran a partir de  $S_{sz}$  igual a 50. Mientras, los resultados con los caudales obtenidos del modelo hidrológico WEAP muestran valores muy cercanos a cero, coincidiendo con la estabilización de los valores de las medias. En septiembre, por ejemplo, se observa una desviación completa del río hacia U cuando se alcanzan los mínimos con una dispersión de cero.

En los resultados bajo el modelo RNA, la dispersión muestra un comportamiento dispar entre los meses en la figura 4.20. Mientras octubre y diciembre muestran curvas con máximos que tienden a disminuir a lo largo del eje de la incertidumbre, enero y noviembre aparecen crecientes. Finalmente agosto, septiembre y febrero muestran valores de cero excepto en ciertos peaks, aunque sus valores son igualmente muy pequeños. Esto indica que la distribución de los valores bajos en los caudales de entradas es muy distinta en los diferentes meses que componen la realización.

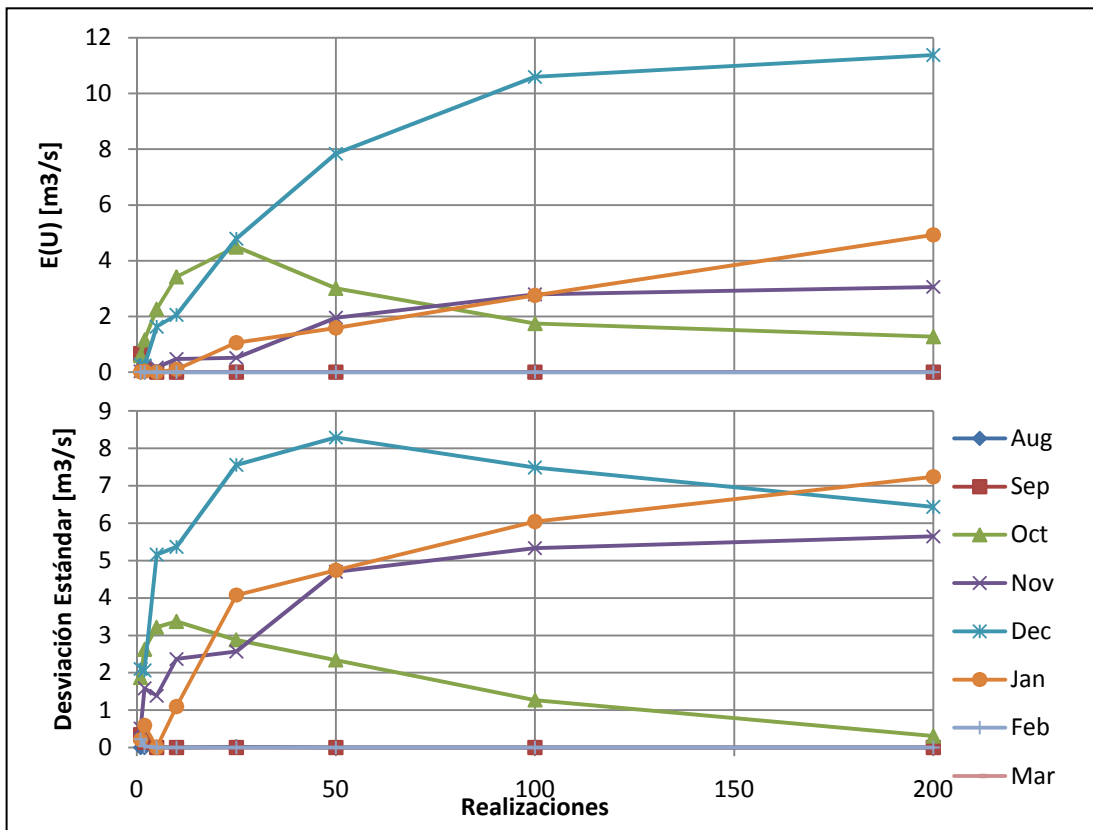


Figura 4.20. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo RNA en año normal.

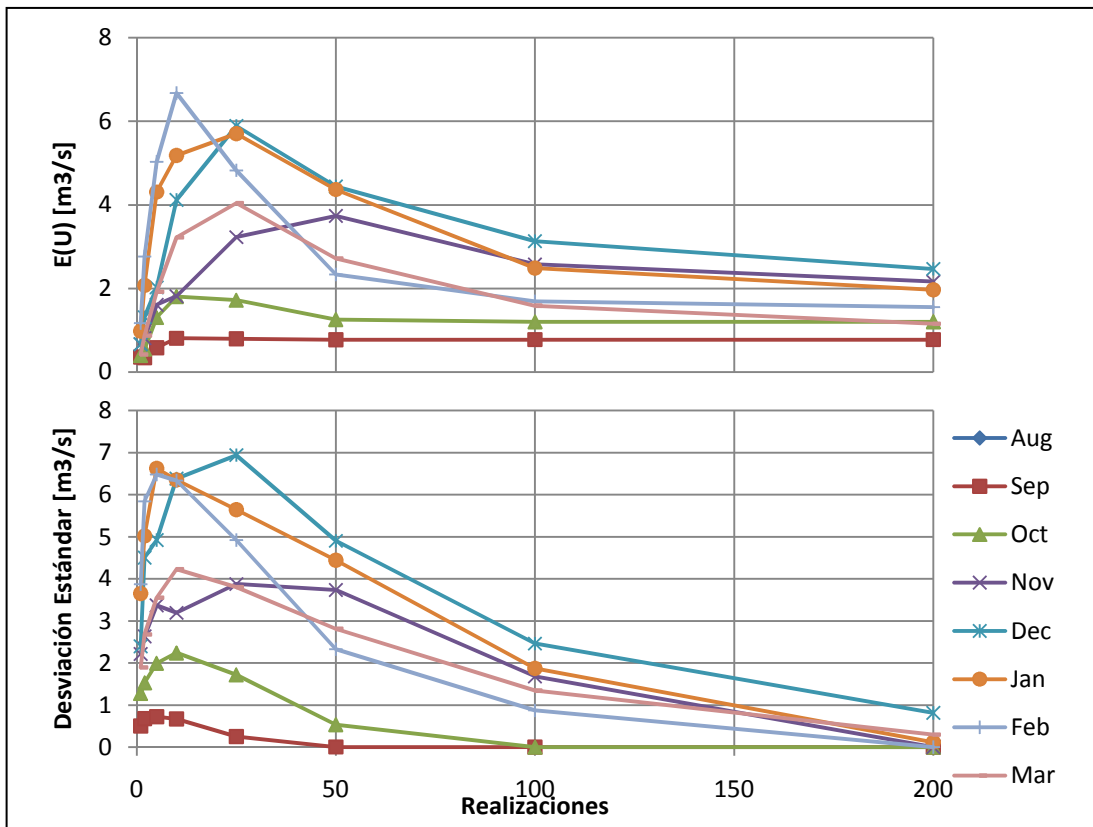
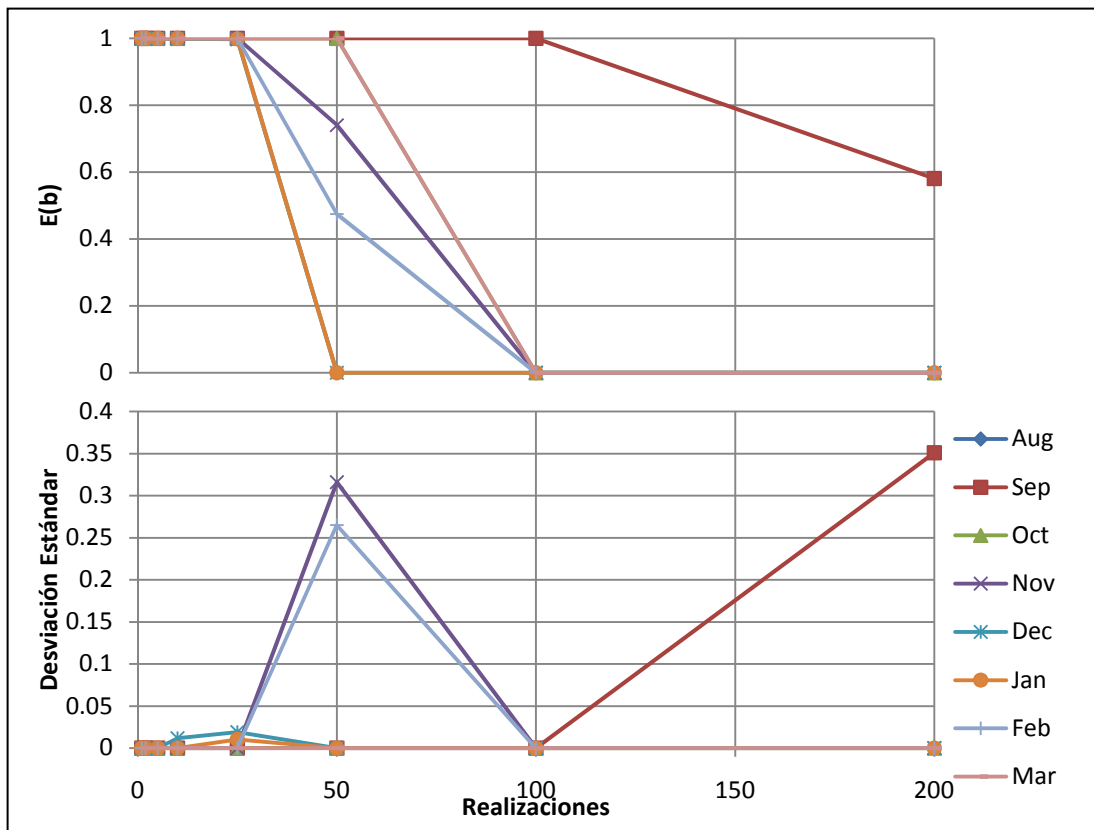


Figura 4.21. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo WEAP en año normal.

#### 4.2.3. Modulador de la demanda para la segunda sección $b(t)$ .

Los resultados para año normal de  $b(t)$  son muy similares a los de año húmedo y responden casi a la misma estructura binaria, donde los valores se precipitan a cero cuando  $S_{sz}$  es igual a 50 ó 100 como se observa en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24.

Sin embargo, en los resultados bajo el modelo hidrológico DGA se observan pequeñas bajas previas como las observadas con el modelo hidrológico WEAP anteriormente, además de acentuarse las bajas de los meses de noviembre y febrero cuando se cuentan 50 realizaciones. Por último se observa una caída importante en la satisfacción de la demanda en el mes de septiembre. Todo lo anterior se encuentra dentro de lo esperable en un escenario donde los caudales bases son más bajos y se puede observar en la figura 4.22.



**Figura 4.22.** Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo DGA en año normal.

Cuando se utilizan los caudales obtenidos desde el modelo hidrológico RNA,  $b(t)$  presenta un comportamiento prácticamente idéntico al del año húmedo, mostrando una imperceptible baja en el valor medio del mes de noviembre cuando  $S_{sz}$  es igual a 50. Esta diferencia es tan baja que sólo se nota al observarse los valores que toma la desviación estándar de dicho mes, que indican cierta variabilidad muy pequeña en los resultados, como se observa en la figura 4.23.

Los resultados bajo el modelo WEAP muestran, en la figura 4.24, una amplificación en las características que presentó en el escenario húmedo, es decir, una mayor baja previa a las 50 realizaciones, caídas más acentuadas de los meses de noviembre y febrero en  $S_{sz}$  igual a 50, y una menor valor medio de  $b(t)$  en septiembre.

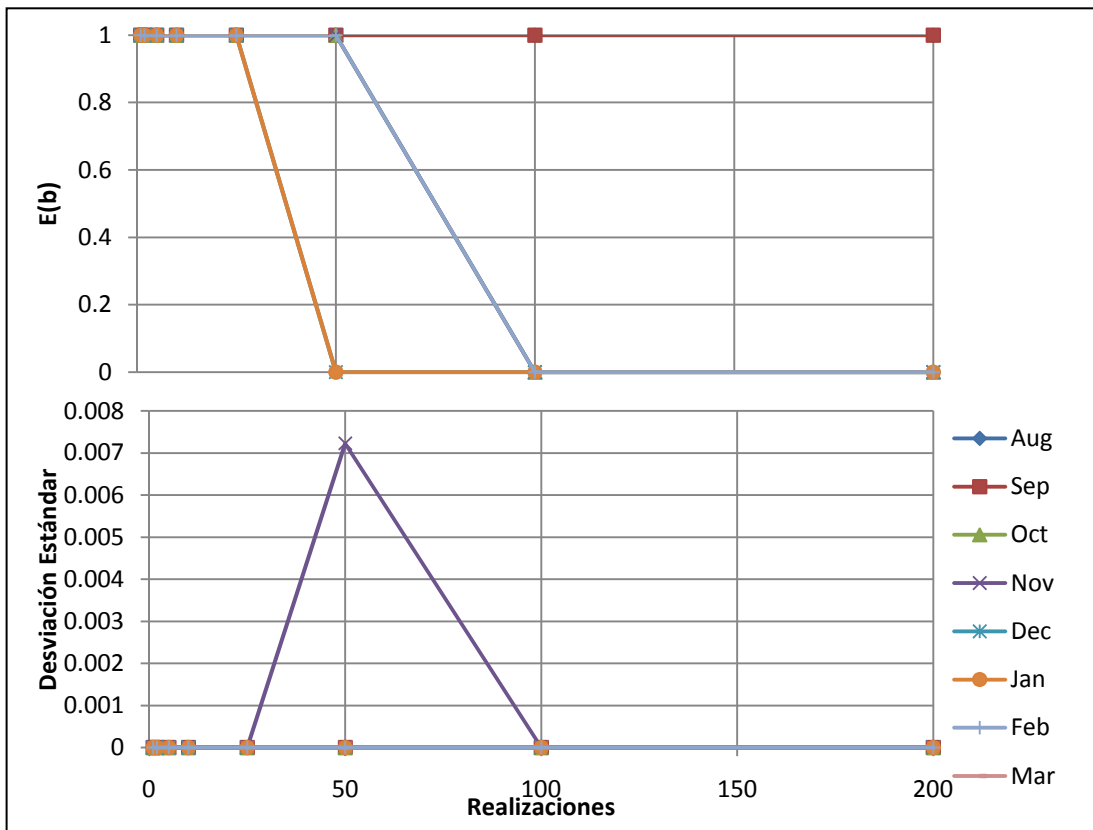


Figura 4.23. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo RNA en año normal.

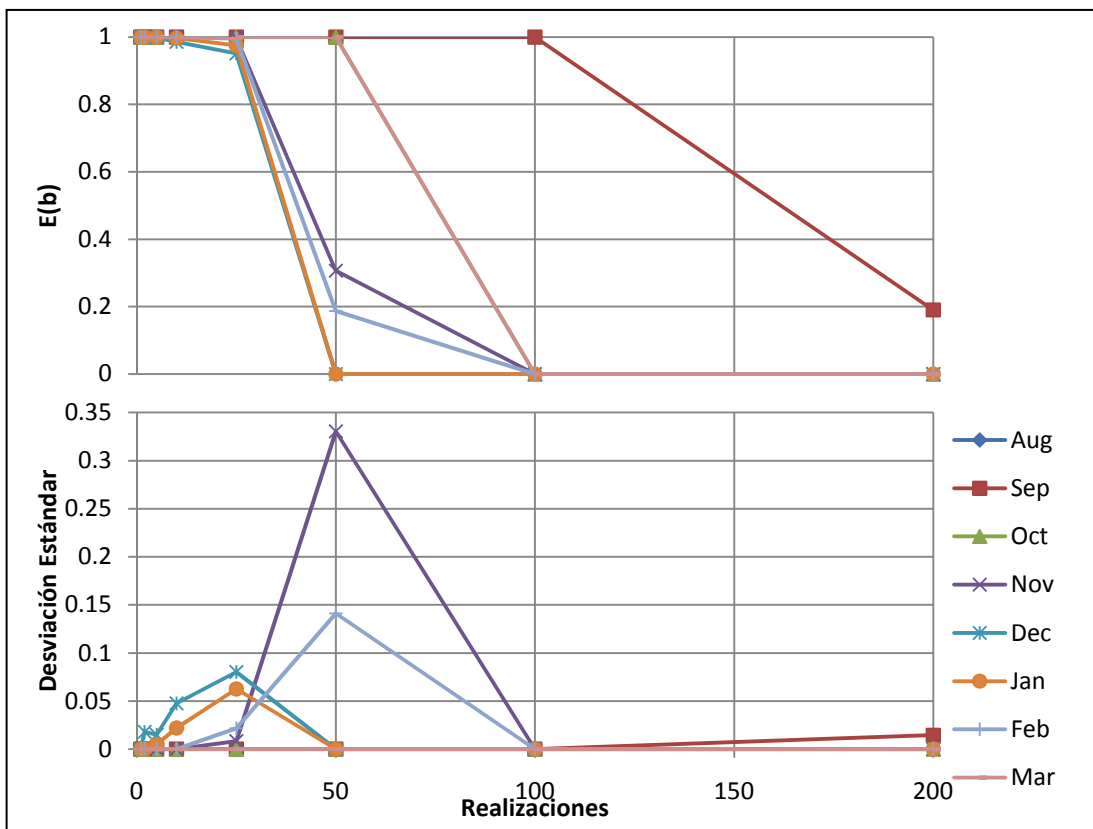


Figura 4.24. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo WEAP en año normal.

Las desviaciones estándar muestran un aumento importante de la dispersión en los resultados bajo el modelo DGA, sobretodo en el mes de septiembre. Con el modelo WEAP, esta variable muestra dispersiones mayores en los tamaños de muestra menores, pero una baja de los peaks de septiembre, noviembre y febrero. Esto debido a que al ser valores menores, seguramente se parecen más que las obtenidas en años húmedos.

#### 4.2.4. Caudales de bombeo y canales de la primera sección.

Los caudales medios anuales de las decisiones de la primera sección muestran, tal como se vio anteriormente, mayores valores de  $U$  en relación al escenario húmedo, con curvas que presentan máximos excepto al utilizar los caudales generados desde los pronósticos del modelo hidrológico RNA, como se observa en la figura 4.25. Es interesante observar cómo, en caudales medios anuales, el comportamiento de esta variable es tan parecido cuando se usan los caudales obtenidos desde los modelos hidrológicos DGA y WEAP hasta que  $S_{sz}$  es igual a 10; para luego separarse principalmente debido a los menores caudales de entrada que entrega el modelo hidrológico WEAP.

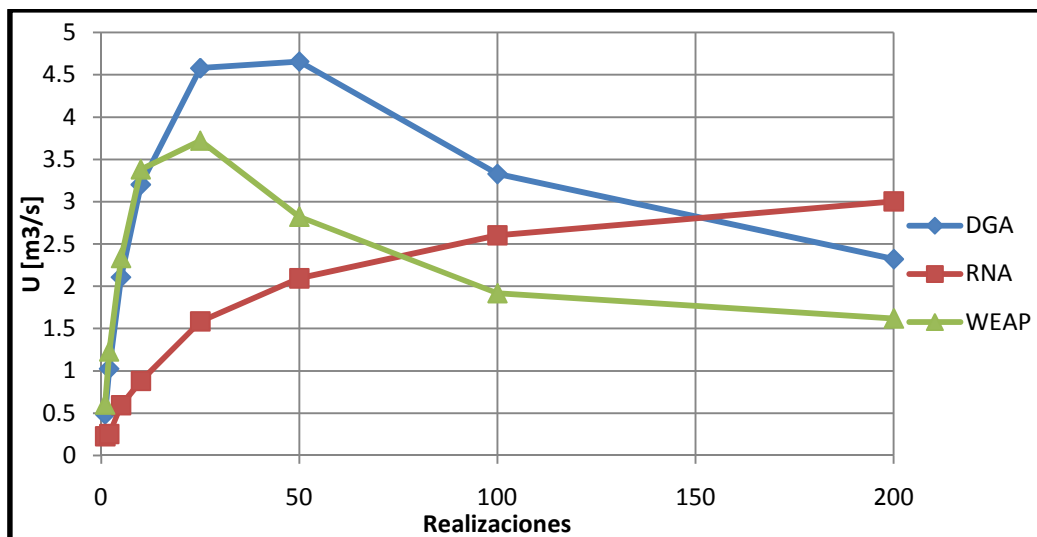


Figura 4.25. Caudal medio anual por modelo hidrológico para  $U$  en año normal.

N2R1 presenta, por otra parte, una baja mucho más pronunciada que la observada anteriormente, con las tres curvas cóncavas mostradas en la figura 4.26. La baja es tan intensa que los caudales medios anuales de N2R1 intersectan a los de  $U$  cerca de  $S_{sz}$  igual a 25 bajo los modelos DGA y WEAP. Esto indica que a partir de ese momento se empieza a priorizar claramente el riego en la primera sección sin tener mucha consideración con lo que ocurre hacia aguas abajo. Tanto así que a partir de las 100 realizaciones los valores de N2R1 son muy cercanos a cero para ambos modelos, llegando a este valor con el modelo WEAP en las 200 realizaciones. Los caudales generados a partir del modelo RNA siguen teniendo agua suficiente como para no intersectar dichas curvas.

El MOGIHA, bajo los tres modelos hidrológicos, aumenta su bombeo con respecto a los años húmedos cuando se consideran pocas realizaciones, como se ve claramente en la figura 4.27. Los resultados obtenidos al utilizar los caudales creados con los modelos hidrológicos DGA y RNA, que se caracterizaban por el escaso bombeo en el escenario de Pex 20%, lo aumentan y mantienen más alto ahora sin llegar nunca a su límite superior. Esto sucede cuando se considera una muestra de gran tamaño, seguramente para apalea los efectos de los menores caudales entrantes que se manejan por  $U$ , aunque bajo RNA, el MOGIHA lo hace muy levemente. El modelo de gestión bajo WEAP pareciera

preferir una menor satisfacción de la demanda que regar con agua subterránea. Esto pareciera ser un efecto de la construcción matemática de la función objetivo, en que se prefiere no regar que explotar la napa.

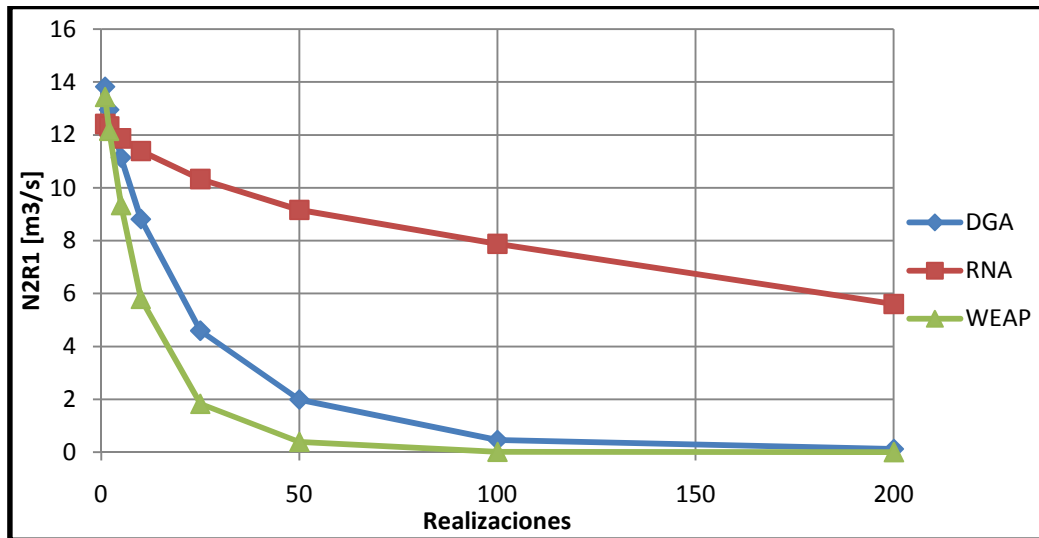


Figura 4.26. Caudal medio anual por modelo hidrológico para N2R1 en año normal.

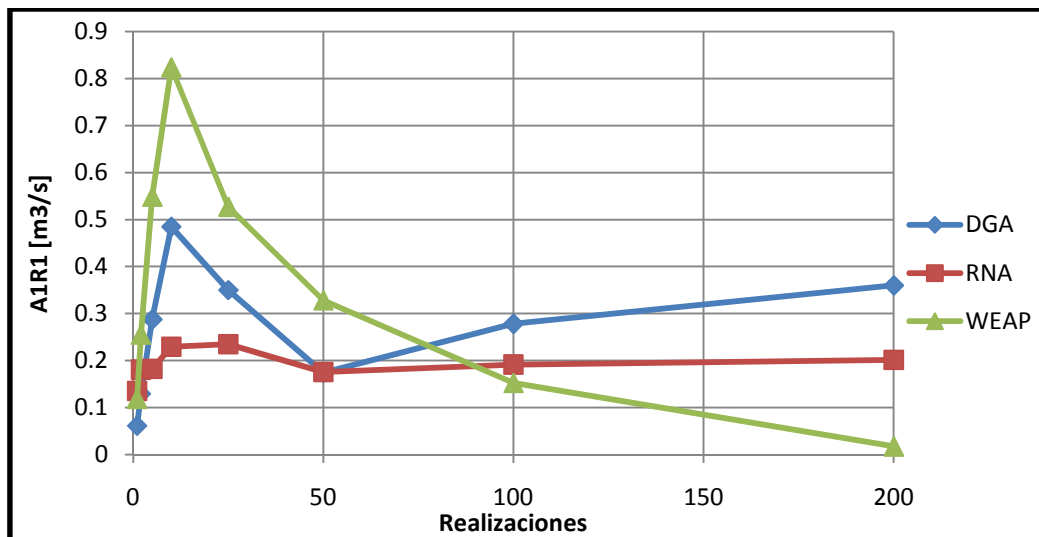


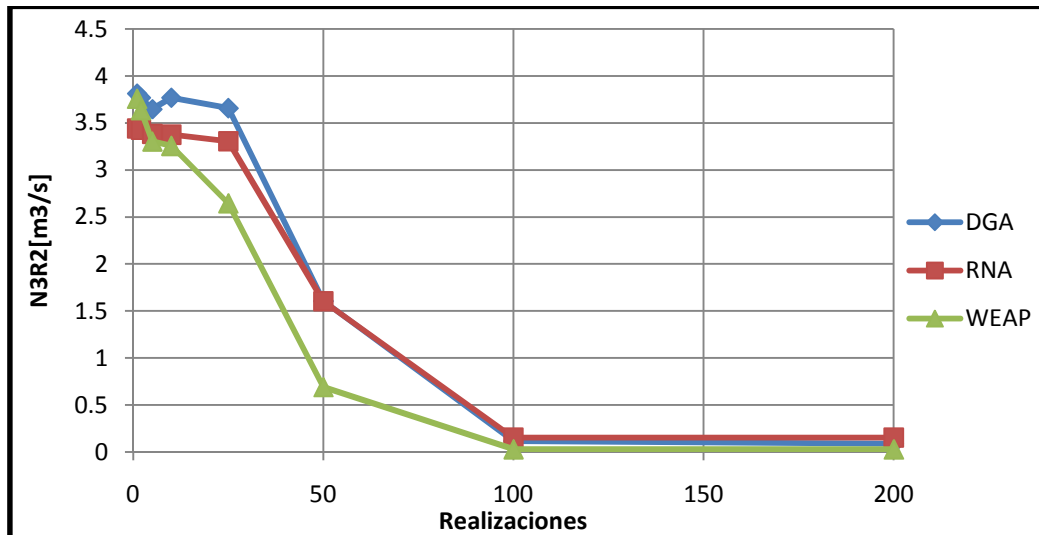
Figura 4.27. Caudal medio anual por modelo hidrológico para A1R1 en año normal.

#### 4.2.5. Caudales de bombeo y canales de la segunda sección.

Los caudales medios anuales circulantes por el canal N3R2 siguen el mismo patrón que  $b(t)$  para este escenario, es decir, altos con pequeñas muestras de incertidumbre, luego una baja en las muestras medias, y muy bajos con grandes muestras. Es importante destacar que éste es el comportamiento del caudal medio anual, por tanto el pequeño caudal que circula cuando  $S_{sz}$  es igual a 200 corresponde al utilizado para satisfacer la demanda de septiembre, único mes que se riega para tal muestra.

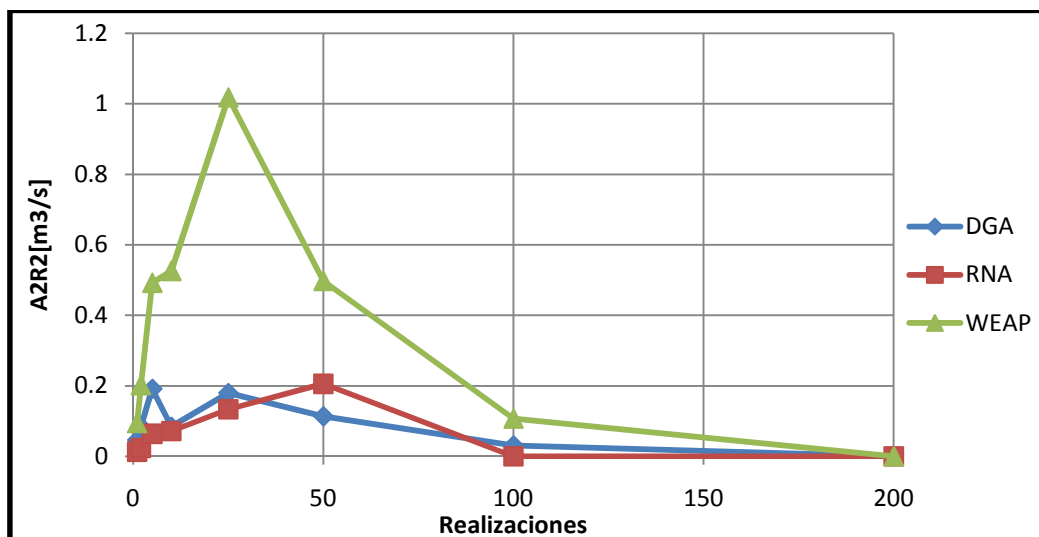
Tal como se ve en la figura 4.28 el comportamiento de N3R2 es muy similar cuando se usan los modelos hidrológicos DGA y RNA, pese a sus diferentes decisiones con respecto a  $b(t)$ . Hay que agregar que este comportamiento tan parecido es extraño considerando que los modelos no abarcan el mismo

rango de tiempo. Los resultados del MOGIHA bajo el modelo WEAP mientras tanto se muestran, como ha sido la tónica de este escenario, más secos que los otros, con caudales circulantes menores y de decaimiento más rápido. Esto reafirma la tendencia de que este modelo hidrológico es más sensible a su propia incertidumbre que los demás.



**Figura 4.28.** Caudal medio anual por modelo hidrológico para N3R2 en año seco.

Considerando lo anterior, no es raro que sea bajo el modelo hidrológico WEAP que el MOGIHA presente el mayor bombeo A2R2 en esta sección, con un peak que pasa 1 [m³/s], como se observa en la figura 4.29. Con los otros dos modelos hidrológico, el MOGIHA aumenta bastante su bombeo en comparación con el escenario húmedo. Mientras que bajo RNA, presenta una curva con un máximo único y claro, con el modelo de la DGA muestra un comportamiento más errático con respecto a la incertidumbre y peaks menores. Con ninguno de los modelos hidrológicos, el MOGIHA bombea agua al verse expuesto a la mayor muestra de incertidumbre. Esto puede deberse a lo explicado con anterioridad sobre que el modelo de gestión prefiere no regar a hacerlo con agua subterránea y al hecho de que cuando se toma  $S_{sz}$  igual a 200 sólo el mes de septiembre se riega, y ya que su demanda es muy baja se puede satisfacer con agua superficial.



**Figura 4.29.** Caudal medio anual por modelo hidrológico para A2R2 en año normal.



### 4.3. Años secos.

Tal como se definió en la sección 3.1.4, el escenario de años secos corresponde al que toma por caudal base a los caracterizados por una probabilidad de excedencia del 85% en la estación fluviométrica de referencia de los distintos modelos hidrológicos.

Es en estos años cuando la gestión toma importancia superlativa ya que hay que aprovechar el escaso recurso disponible de la mejor forma. También es en donde la incertidumbre de los modelos hidrológicos puede generar los mayores efectos, ya que una mala predicción puede llevar a tomar decisiones equivocadas que malogren las producciones agrícolas o los suministros potables.

En este escenario se espera encontrar los caudales mínimos mensuales con bastante frecuencia entre las realizaciones de las optimizaciones, por lo que deberían haber moduladores de demanda bajos y con rápidos descensos, poco caudal circulando por los canales tradicionales y bombeos más intensos que en los escenarios anteriores.

Para el análisis de este escenario se supone conocida la discusión sobre la razón de las formas que toman las curvas que se desarrolló en el capítulo 4.1.

#### 4.3.1. Modulador de la demanda de la primera sección $a(t)$ .

Como se esperaba,  $a(t)$  muestra una caída mucho más rápida que en los escenarios predecesores observable en las figuras 4.30, 4.31 y 4.32. Todos los modelos se muestran mucho más susceptibles a la incertidumbre, mostrando grandes variaciones de las medias con pequeños aumentos del tamaño de la muestra.

El modulador de la demanda, bajo el modelo hidrológico DGA, presenta una agudización de las características que mostró en el escenario de año normal, con una baja más acentuada en las primeras muestras y un mes de septiembre con menor riego. Se observa también, en la figura 4.30, que rápidamente tiende a la estabilización en valores medios bajos, lo cual es indicador de lo numeroso que son los caudales mensuales mínimos en la entrada del sistema. Es interesante ver cómo marzo tiene una disminución más suave que los otros meses en un principio, posicionándose entre septiembre y el resto.

El MOGIHA, con los caudales derivados de los pronósticos del modelo hidrológico RNA, sigue mostrando que puede satisfacer completamente la demanda para los meses agosto, septiembre y febrero de forma absolutamente independiente de la incertidumbre. Esto es particularmente extraño para la demanda de febrero, que no es baja, y es completamente satisfecha mediante N2R1. Esto se debe al importante sesgo que tiene la distribución de los errores de los pronósticos de este modelo hidrológico. Por otro lado, el mes de octubre pareciese incorporado al resto del modelo con el acercamiento de diciembre, y se observa una conducta cóncava de los meses de noviembre y enero con valores medios más bajos que en los escenarios más húmedos. Esto se puede observar en la figura 4.31.

Los valores medios de  $a(t)$  bajo el modelo hidrológico WEAP, presentan desde un principio valores menores que los otros modelos. Estos valores, mostrados en la figura 4.32, tienden rápidamente a estabilizarse cerca de los valores mínimos, lo que se confirma cuando se observan las series de desviaciones estándar según los modelos hidrológicos DGA, RNA y WEAP. Bajo este último modelo se observa como después del máximo, alrededor de  $S_{sz}$  igual a 5, las desviaciones se van rápidamente a cero indicando la convergencia de los valores hacia el mínimo.

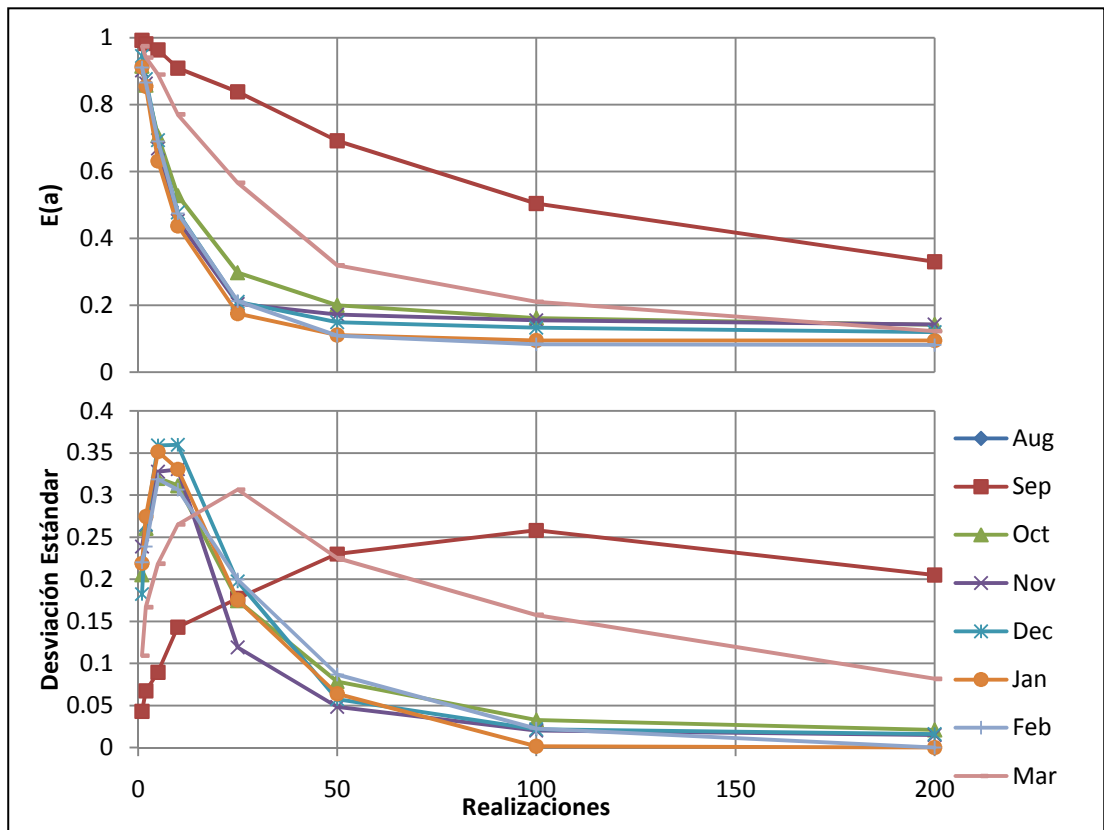


Figura 4.30. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo DGA en año seco.

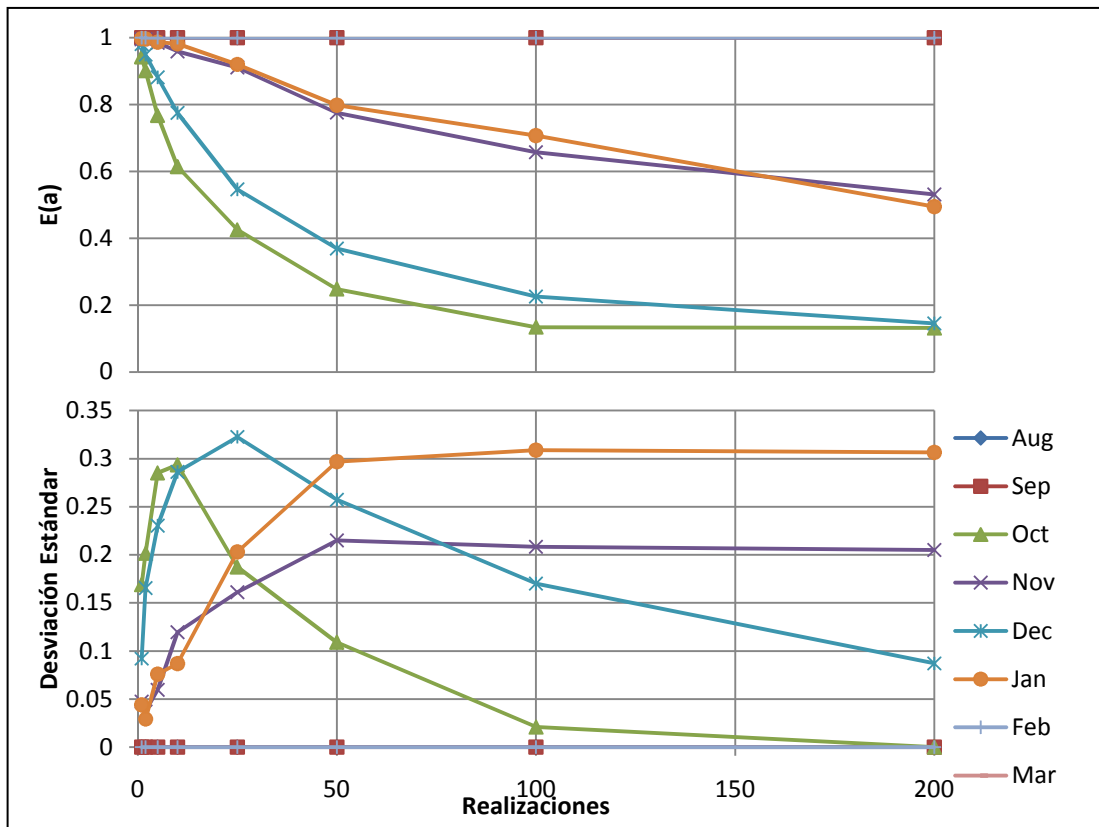
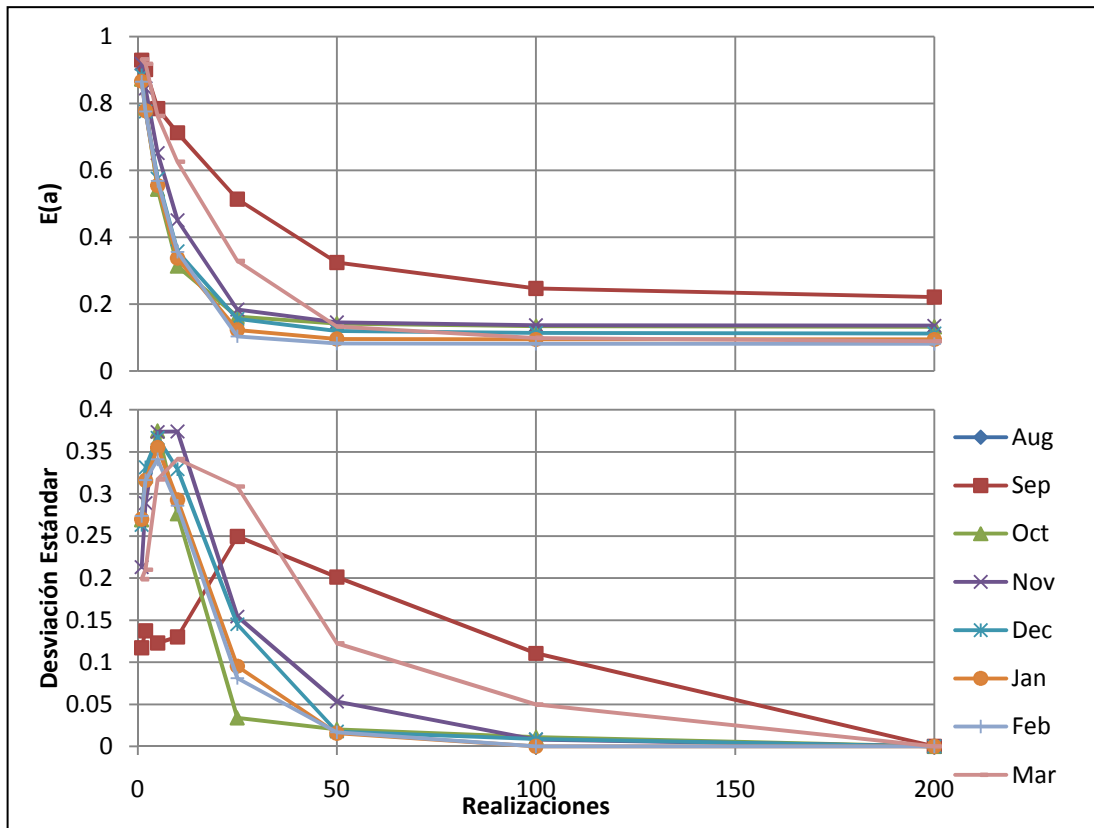


Figura 4.31. Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo RNA en año seco.



**Figura 4.32.** Esperanza y desviación estándar de  $a(t)$  bajo el modelo WEAP en año seco.

La dispersión de los resultados bajo el modelo hidrológico DGA cuenta una historia similar a la de la obtenida con el modelo WEAP pero sin una convergencia tan rápida, debido a que la posibilidad de encontrar mínimos mensuales entre los caudales de entrada es más baja como se enseña en la tabla 3.7. Por esta misma razón se puede explicar el comportamiento intermedio del mes de marzo, ya que tiene posibilidades mucho menores de generar mínimos mensuales que la de otros meses.

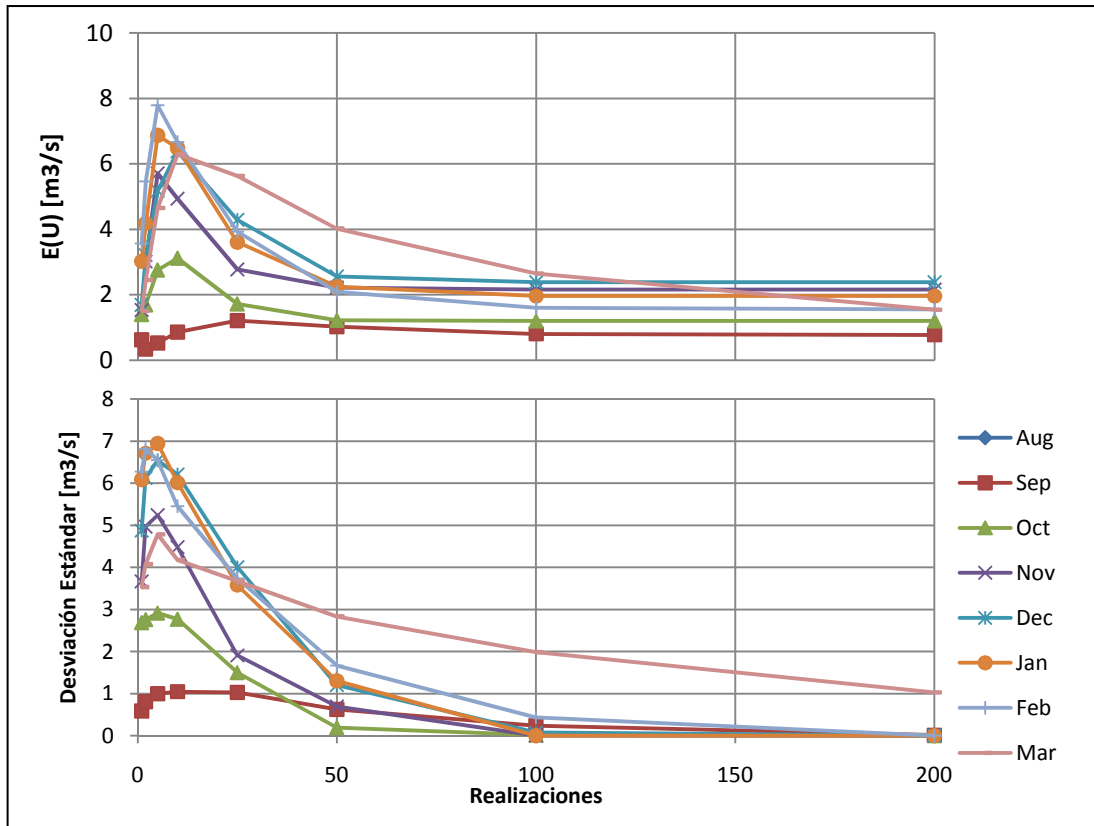
Cuando se usa el modelo hidrológico RNA en el MOGIHA, las desviaciones estándar que presenta  $a(t)$  confirman el extraño comportamiento de esta variable en el mes de febrero, ya que su dispersión es cero, por lo que no hay variabilidad alguna en los resultados. La conducta en los meses de agosto y septiembre se podría explicar si este modelo generase caudales muy altos para dichos meses aún en escenarios de años secos. Los otros meses presentan la forma de curva de máximo que ya se ha discutido con antelación.

#### 4.3.2. Caudal por el canal revestido U.

Como era de esperarse en un año seco, frente a la necesidad el modelo de gestión trata de llevarse la mayor cantidad de agua por el canal revestido para evitar la infiltración hacia la napa. Esto se observa claramente al utilizar los caudales derivados de los pronósticos de los modelos hidrológicos DGA y WEAP donde las medias se estabilizan rápidamente después de los máximos, ubicados en la zona de muestras pequeñas.

De las figuras 4.33 y 4.35, con los resultados de U bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP respectivamente, se desprende que las realizaciones vienen cargadas de caudales mínimos mensuales

por lo que el modelo no tiene más opción que desviar toda esa agua por el canal revestido para poder aprovecharla a plenitud. Esto se confirma al ver los gráficos de las desviaciones estándar que presentan los resultados. En éstos se observa que las dispersiones, luego de alcanzar sus máximos en la zona de muestras pequeñas, toman valores cercanos a cero rápidamente indicando mínima o nula dispersión de los resultados, es decir, la única decisión posible es desviar todo el caudal por U.



**Figura 4.33.** Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo DGA en año seco.

Los resultados bajo el modelo RNA presentan, nuevamente, un comportamiento más errático que con los otros modelos hidrológicos, con sólo el mes de octubre estabilizado y los otros meses con curvas con máximos pero sin alcanzar los mínimos. Se observa que casi no circula caudal por aquí en el mes de febrero y muy poco en los meses de agosto y septiembre, donde se riega por el canal tradicional. Las curvas que forman las desviaciones estándar de las series bajo este modelo presentan formas con máximos lo cual indica que se podrían empezar a encontrar caudales similares en la entrada del modelo.

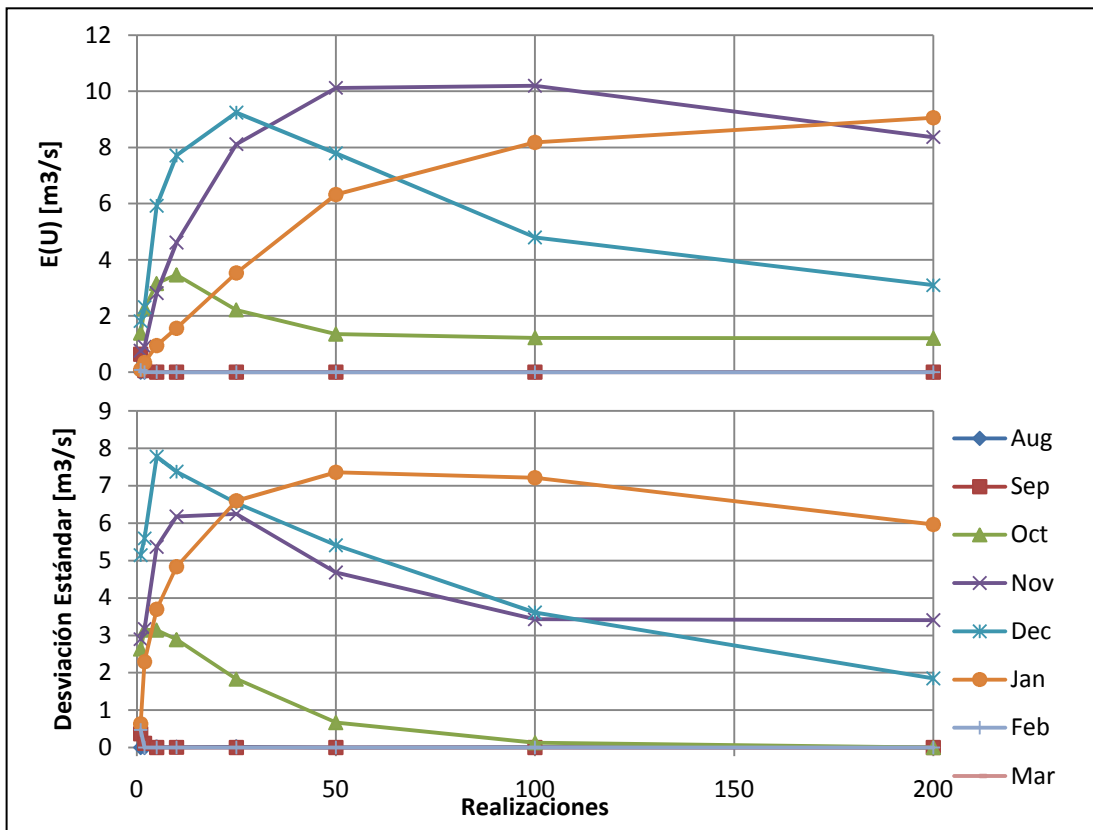


Figura 4.34. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo RNA en año seco.

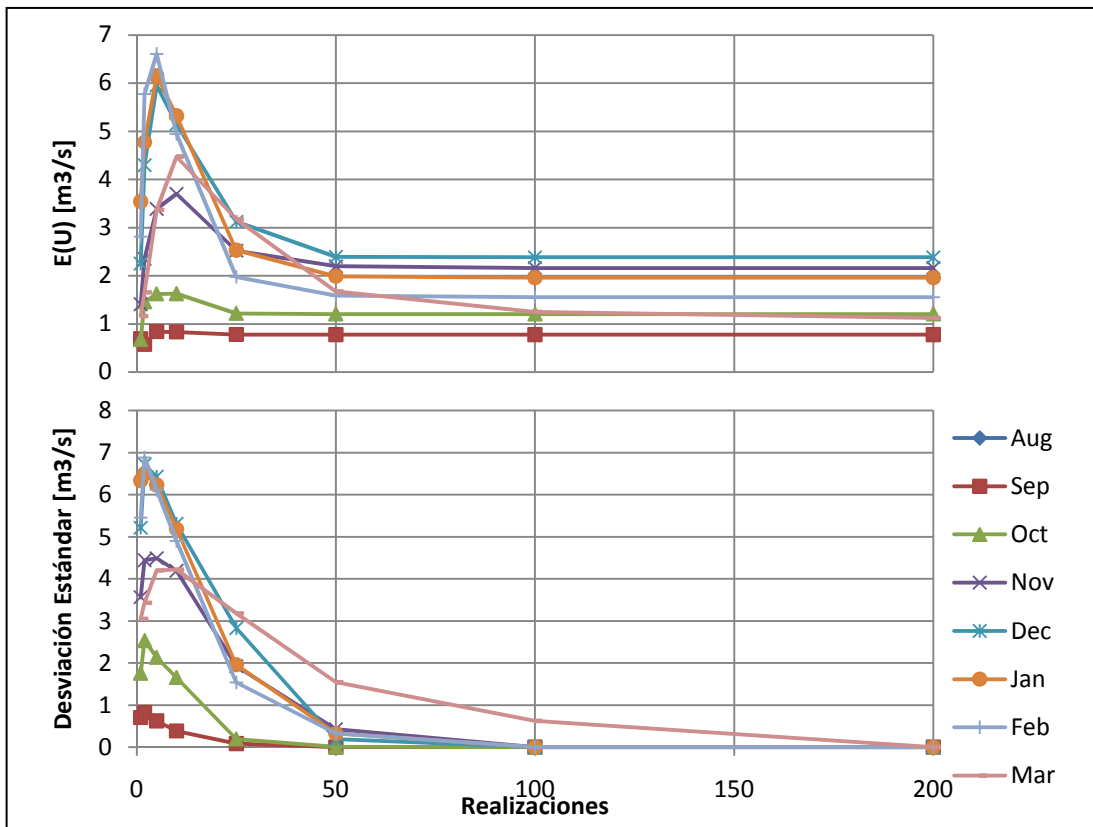


Figura 4.35. Esperanza y desviación estándar de U bajo el modelo WEAP en año seco.

### 4.3.3. Modulador de la demanda para la segunda sección $b(t)$ .

Los valores medios obtenidos para  $b(t)$ , pese a ser menores que los encontrados previamente, mantienen la misma forma que en los escenarios más húmedos, es decir, con fuertes caídas que en ciertos casos son de 1 a 0, lo que se observa en las figuras 4.36, 4.37 y 4.38.

Por ejemplo, los meses de octubre y marzo bajo el modelo DGA mantienen este comportamiento que no varió entre los distintos tipos de años considerados, como se observa en la figura 4.36. Sin embargo, las bajas más suaves que este modelo presentaba cuando la probabilidad de excedencia correspondía al 50% aumentaron su intensidad y se ampliaron en su dominio hacia muestras de menores tamaños.

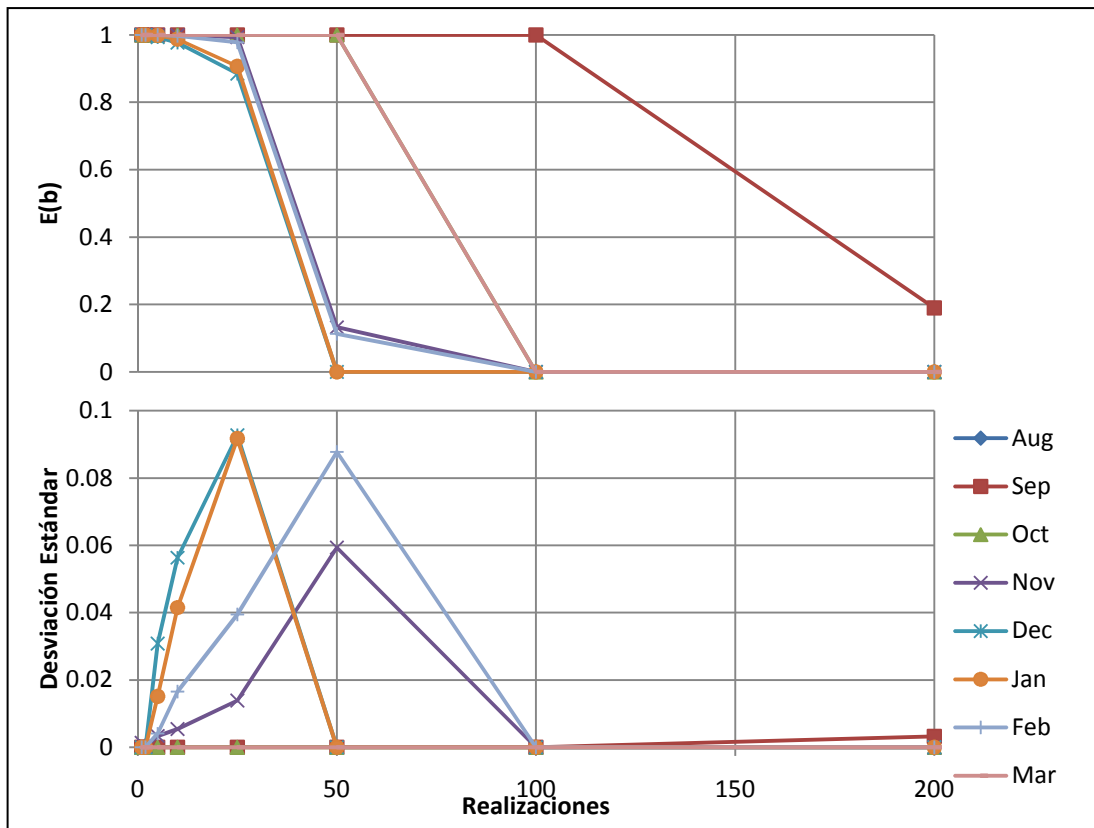


Figura 4.36. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo DGA en año seco.

Los resultados del MOGIHA, usando los caudales obtenidos de los pronósticos modelo hidrológico RNA, muestran por primera vez una disminución visible en los valores medios de esta variable antes de precipitarse a cero. Este es el caso del mes de noviembre, el cual ya había dado muestra de variabilidad en años normales. Se observa también, en la figura 4.37, que aumenta la dispersión de este mes, aunque el resto de los meses no presenta una variación alguna con respecto a los escenarios anteriores.

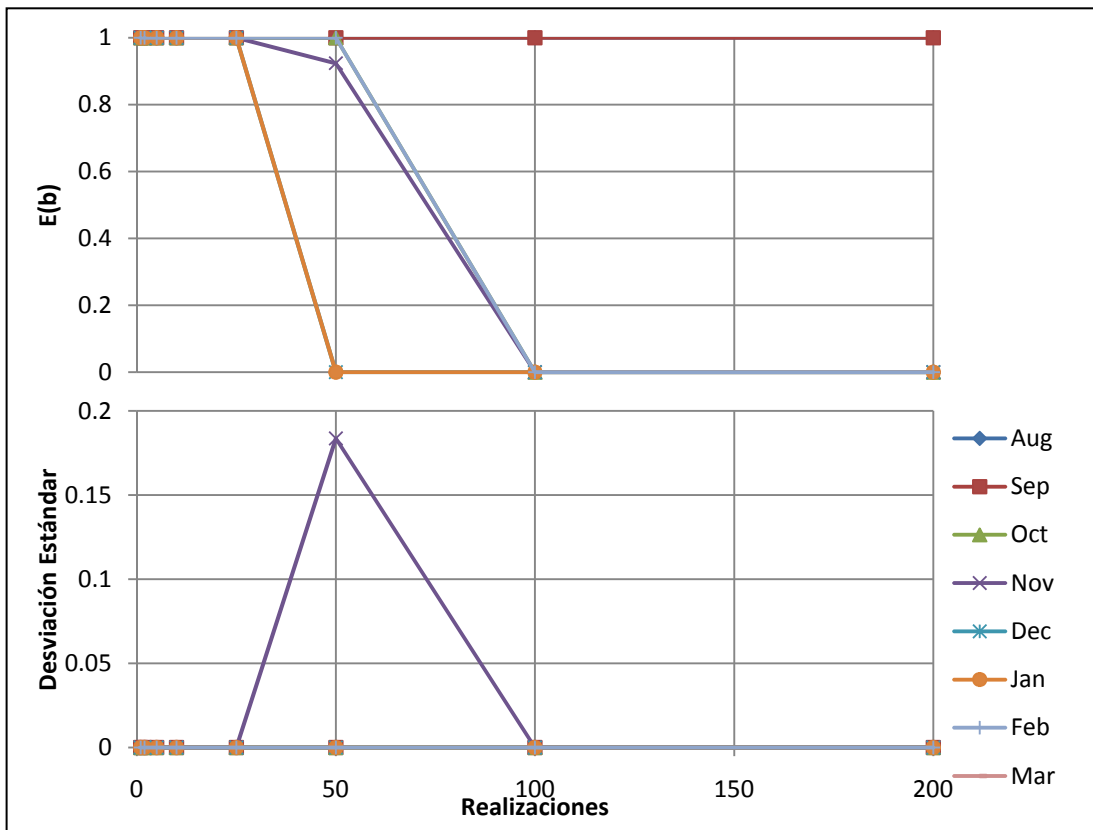


Figura 4.37. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo RNA en año seco.

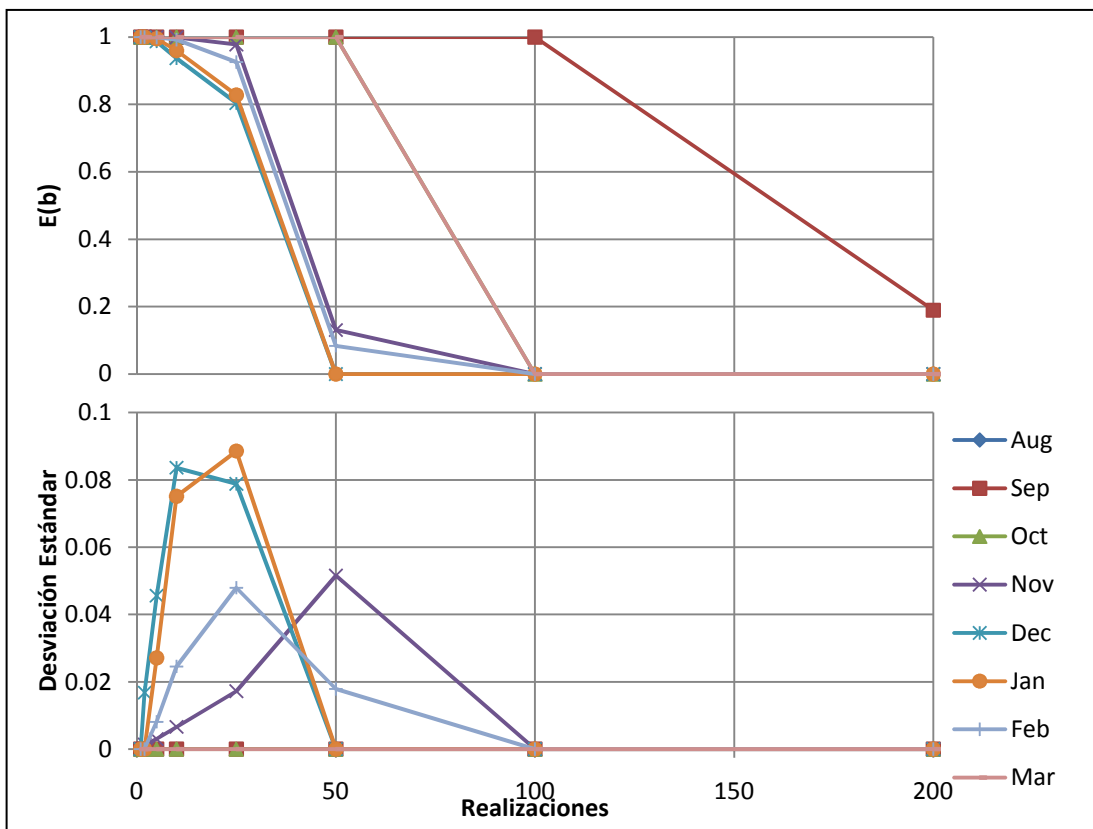


Figura 4.38. Esperanza y desviación estándar de  $b(t)$  bajo el modelo WEAP en año seco.

Con el modelo hidrológico WEAP generando entradas, el MOGIHA presenta, en esta variable, un comportamiento muy similar al obtenido en años normales aunque más agudizado, vale decir, donde había bajas ahora las hay más fuertes. Es interesante aquí observar, en la figura 4.38, que la dispersión de los resultados en los meses de noviembre y febrero baja muchísimo en comparación con los escenarios anteriores. Esto pareciera mostrar la existencia de un límite inferior en los resultados cuando se consideran 50 realizaciones en la optimización.

Este posible límite se repite en el mes de septiembre, donde la diferencia de las medias con el escenario de Pex 50% no es tan importante, pero si la de la desviación estándar para el caso de  $s_{sz}$  igual a 200. La misma conducta del mes de septiembre aparece en la dispersión de los resultados del modelo DGA, aunque la diferencia de las medias sí es importante. Se presume entonces la existencia de un límite inferior de esta variable en el mes de septiembre.

#### 4.3.4. Caudales de bombeo y canales de la primera sección.

Como se vio en la sección 4.3.2, los caudales que circulan por U presentan cierto aumento con respecto a los resultados de los años normales. Esto se confirma para todos los modelos hidrológicos ocupados en el MOGIHA en la figura 4.39 que muestra los caudales medios anuales de esta variable. También se observa la aparición de un máximo en los resultados bajo modelo hidrológico RNA y el corrimiento de los peaks de los resultados con los modelos hidrológicos DGA y WEAP hacia las muestras más pequeñas. Por último, y como ya se discutió, se observa la estabilización de los caudales en torno a los mínimos cuando se usan los modelos hidrológicos DGA y WEAP en el MOGIHA.

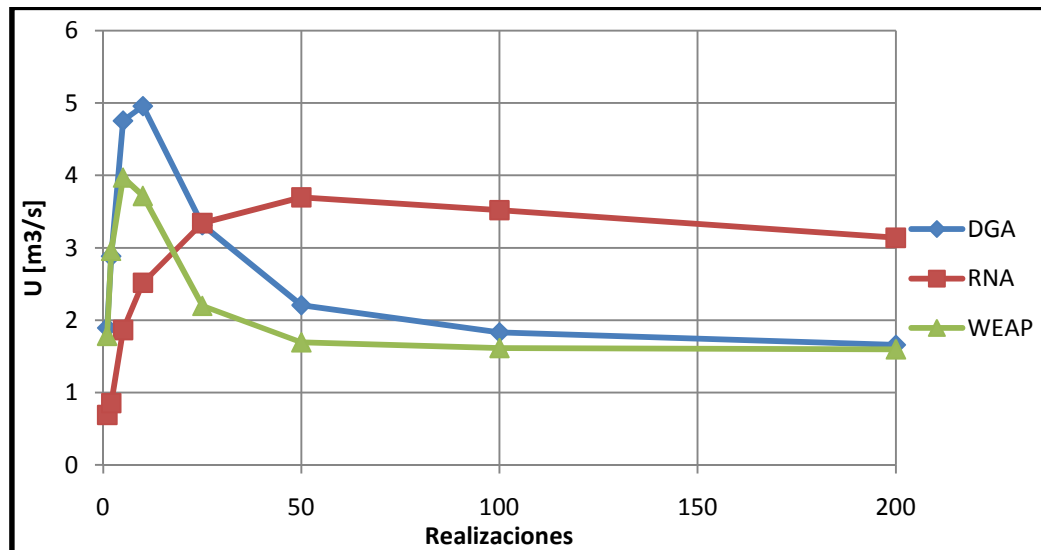


Figura 4.39. Caudal medio anual por modelo hidrológico para U en año seco.

Los caudales medios anuales que circulan por el canal tradicional N2R1 aparecen en este escenario con bajas más pronunciadas que en los años secos, registrándose valores inferiores a 1 [m³/s] en  $S_{sz}$  igual a 25 bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP como se ve en la figura 4.40. Aunque con un caudal mucho mayor que los otros modelos principalmente debido a la situación de febrero, el MOGIHA usando el modelo RNA tiene una baja lo suficientemente importante como para que se logre intersectar con los caudales medios anuales de U al considerarse 200 realizaciones. Al utilizar los modelos DGA y WEAP, U presenta estas intersecciones en valores cercanos a 5 realizaciones, lo que muestra el aceleramiento de la disminución de estos caudales.



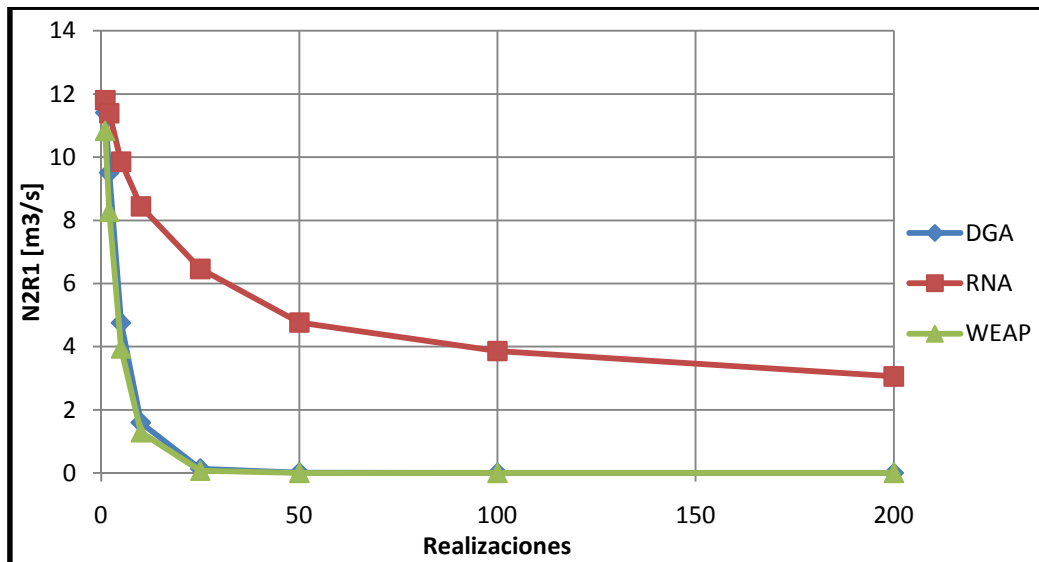


Figura 4.40. Caudal medio anual por modelo hidrológico para N2R1 en año seco.

Por otro lado, los bombeos A1R1 mostrados en la figura 4.41 presentan un importante aumento en sus peaks seguidos por una fuerte baja, en particular al usar los modelos hidrológicos DGA y WEAP. Esto puede corresponder a la preferencia del modelo a no irrigar con agua subterránea discutida con anterioridad. El caudal medio anual del bombeo bajo el modelo RNA muestra una cierta estabilización, incluso un aumento en su valor a medida que la muestra de la incertidumbre crece. Esto se debe a la predilección del modelo de gestión de satisfacer la demanda de los meses de agosto y septiembre mediante bombeo de la napa cuando se somete a los caudales entregados por el modelo hidrológico en cuestión.

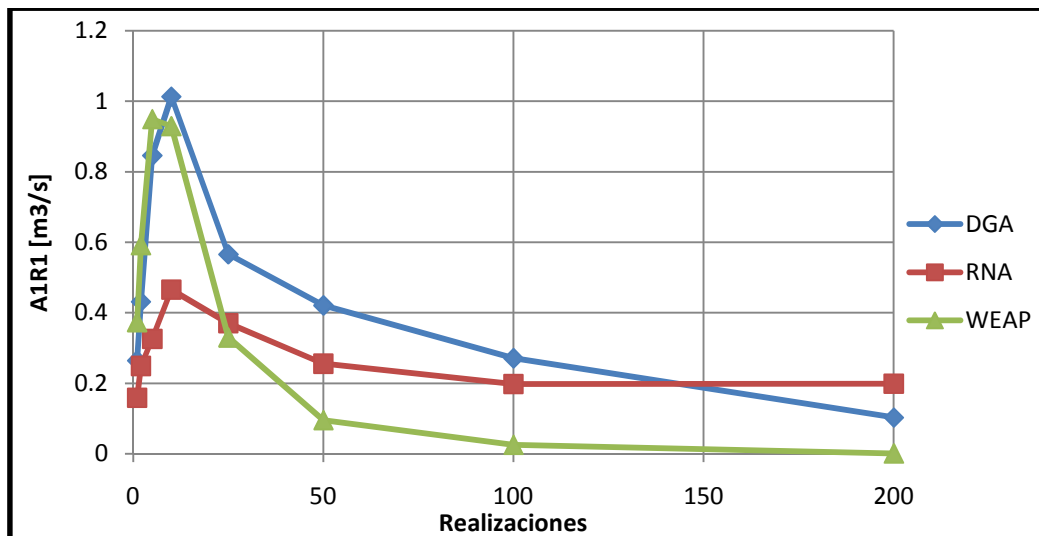


Figura 4.41. Caudal medio anual por modelo hidrológico para A1R1 en año seco.

#### 4.3.5. Caudales de bombeo y canales de la segunda sección.

A través de los caudales medios anuales del canal N3R2, que se enseñan en la figura 4.42, se observa que los resultados bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP son bastante más sensibles a la incertidumbre que lo observado en los escenarios anteriores. Esto es lógico cuando se compara esta

curva con la forma que toma  $b(t)$  en años secos, donde se observan bajas de la satisfacción de la demanda más agudas que antes. Comparando estos gráficos también se comprende que el comportamiento del caudal medio anual de N3R2 bajo el modelo RNA sea muy similar al de escenarios anteriores, ya que sólo noviembre muestra variaciones en la satisfacción de la demanda en esta sección.

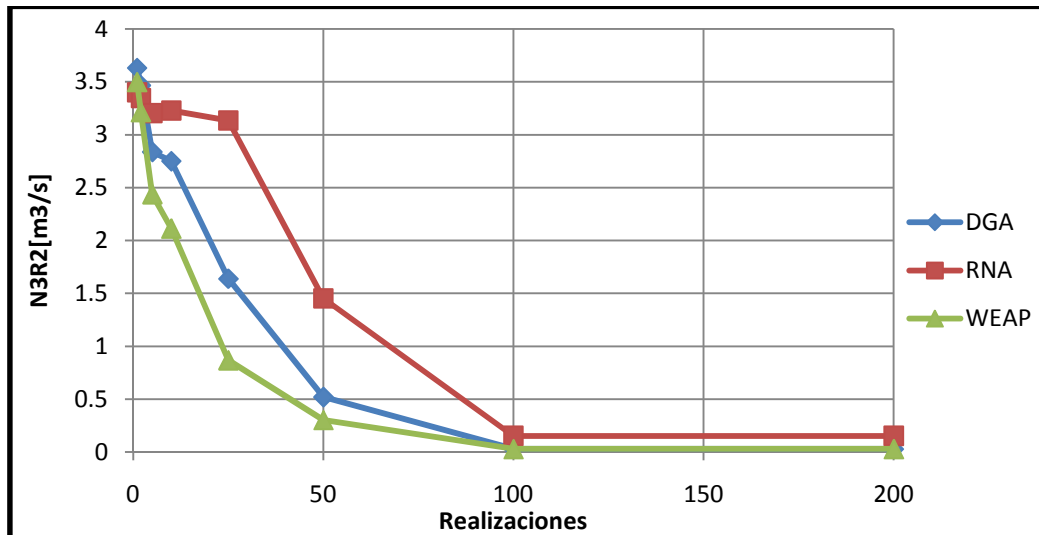


Figura 4.42. Caudal medio anual por modelo hidrológico para N3R2 en año seco.

El bombeo A2R2 muestra un uso mucho más intensivo cuando al MOGIHA entran los caudales generados a partir de los modelos DGA y WEAP, tal como se esperaba para este escenario. Tanto así que en los peaks, situados en ambos casos en  $S_{sz}$  igual a 25, el MOGIHA aumenta el bombeo en un 898% bajo el modelo DGA y en un 128% al usar WEAP con respecto a un año normal. El bombeo bajo el modelo RNA muestra un mayor peak pero no con una diferencia tan significativa como los otros modelos. El MOGIHA no utiliza el bombeo cuando se consideran 200 realizaciones por optimización, tal como se observa en la figura 4.43, independiente del modelo hidrológico ocupado en la entrada.

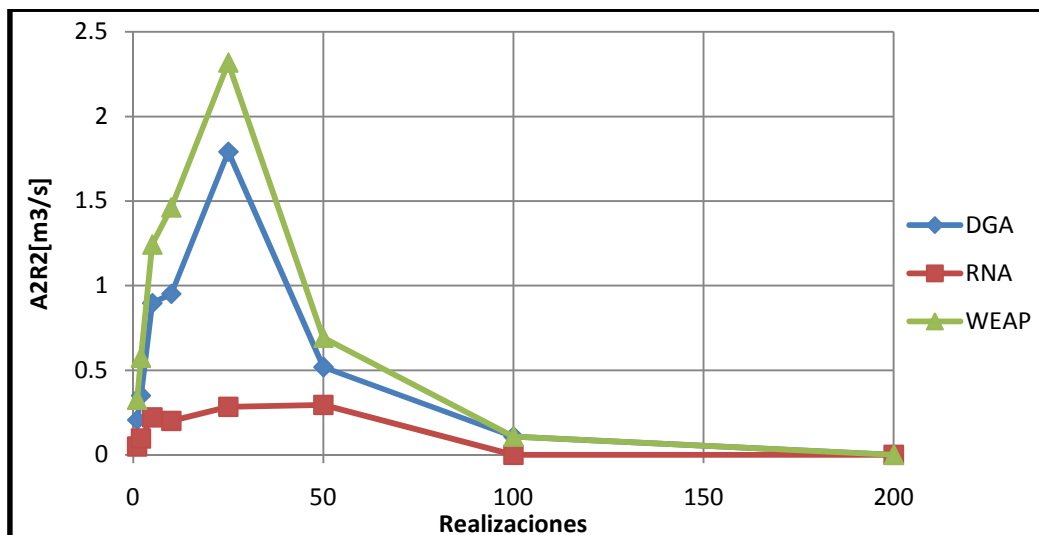


Figura 4.43. Caudal medio anual por modelo hidrológico para A2R2 en año seco.

## 5. Discusión de los resultados.

Durante el capítulo de resultados se observaron varios comportamientos que merecen ser revisados más en profundidad por su trascendencia o bien por su peculiaridad. Es importante, por ejemplo, comentar la distintiva conducta del modelo de gestión bajo los caudales generados por el modelo hidrológico RNA; o bien si se encontraron diferencias significativas en la operación cuando se generaron los caudales con el modelo DGA o con el modelo WEAP.

En el presente capítulo se pretende dar un análisis más acabado sobre las materias más importantes que conciernen a este estudio, para poder concluir de él con más herramientas que sólo los resultados en bruto. A continuación se presentan los tópicos que se consideran de mayor importancia.

### 5.1. Conducta general del modelo de gestión.

A lo largo del capítulo 4 se observó que los resultados del MOGIHA presentan ciertos patrones que son dignos de mencionar. El primero de ellos tiene relación con la aversión por el bombeo, pese a que disminuir la extracción de la napa signifique una menor satisfacción de la demanda.

Este comportamiento tiene origen en la forma de la función objetivo descrita en 3.3.1, que busca minimizar los bombeos y aumentar, al mismo tiempo, la satisfacción de la demanda. Esto provoca que la explotación del acuífero sea considerado como el último recurso a utilizar para el riego, por lo que sólo se usa en meses muy secos. Esta condición implica que hay una gran cantidad de meses en los cuales no se utiliza el bombeo y una menor donde sí se ocupa de forma intensiva. Al estudiarse el bombeo como valores medios, se produce un enmascaramiento de la verdadera conducta de esta variable que hace parecer que se ocupa menos de lo que realmente se usa.

No obstante, lo descrito en el párrafo anterior no explica que al considerarse grandes cantidades de realizaciones (por lo tanto, una mayor probabilidad de ingresar meses secos al MOGIHA), el bombeo no aumente e incluso disminuya. Buscando una solución a esto fue que se multiplicó a la suma de los moduladores de la demanda por un factor igual a 100. Mientras se probaba el modelo se utilizaron distintos de estos factores, los cuales se ensayaron con menos iteraciones que las utilizadas para obtener los resultados finales (100 en vez de 300). Sin embargo, la tendencia era clara: a pesar de aumentar varias veces el tamaño del factor (se subía en potencias de 10) los resultados seguían mostrando fuertes bajas de los moduladores de demanda en ambas secciones,  $a(t)$  y  $b(t)$ , y valores bajos de bombeo al considerar grandes cantidades de realizaciones.

Durante el desarrollo del MOGIHA no se consideraron formas no lineales de la función objetivo, que pudiesen haber ayudado a resolver esta situación, logrando una mayor penalización por la sub satisfacción de la demanda. Una función objetivo de este tipo podría representar una interesante expansión a este trabajo.

Se recomienda también hacer un estudio de sensibilidad más acabado para los factores que acompañan a las variables en la función objetivo, con el fin de encontrar una combinación que permita un mejor desempeño del modelo en este sentido.

Otro resultado que llama la atención es el modulador de demanda de la segunda sección de la cuenca, el cual se muestra muy sensible a la incertidumbre llegando a ser binario en ciertos casos. Además presenta una conducta sumamente distinta a su homólogo de la primera sección, teniendo ambos programaciones muy similares.

Tómese en cuenta el caso en que todo el caudal de entrada por Aconcagua en Chacabucuito es desviado por el canal revestido U hacia el sector de consumo de la primera sección R1 en todo el año, lo que no permite flujo por la recuperación del río A1N3, dejando sólo disponible de manera superficial el caudal que entra por el río Putaendo. Aunque este caudal fuese compuesto únicamente por sus mínimos, se podría satisfacer una parte de la demanda del sector de consumo de la segunda sección R2 tal como se muestra en la tabla 5.1, la que considera la eficiencia de transporte de los canales de la segunda sección del 88%, calculado en la sección 3.2.2.8.

**Tabla 5.1.** Demanda satisfecha por P mín.

Mes	Q min P [m <sup>3</sup> /s]	Demanda R2 [m <sup>3</sup> /s]	Demanda satisfecha
Ago	0.17	0.00	1.00
Sep	0.20	0.95	0.19
Oct	0.32	2.35	0.12
Nov	0.57	3.94	0.13
Dic	0.63	4.98	0.11
Ene	0.52	4.76	0.10
Feb	0.41	4.39	0.08
Mar	0.29	2.46	0.11

Pese a esto, el modulador de la demanda de la segunda sección  $b(t)$  toma valores de cero para la mayoría de los meses con demanda. Septiembre, de hecho, es el único mes que tiende a estos límites inferiores bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP aunque noviembre y febrero convergen a estos valores al usar estos modelos hidrológicos cuando se considera 50 realizaciones en la optimización.

Lo anterior implica que se produce algún efecto numérico que hace que se decida no regar cuando hay una muestra grande de la incertidumbre. No obstante, es extraño que sólo afecte al modulador de la demanda de la segunda sección y no el de la primera ya que se tratan de la misma forma dentro de la función objetivo.

El problema puede residir en la evaluación del nodo N3, donde se tienen muchas variables de estado que son función tanto de la realización como del mes que se está evaluando (el caudal del río Aconcagua N2N3, el ingreso por el río Putaendo P, la recuperación desde el acuífero A1N3 y el flujo hacia Romeral N3N4) y sólo el flujo por el canal N3R2 depende únicamente del mes. Se recomienda una separación de este nodo para disminuir las variables comprometidas y poder estudiar cómo éstas afectan al comportamiento del modulador de la demanda  $b(t)$ .

Por último, es interesante notar que el término *sensibilidad a la incertidumbre* es casi sinónimo de *más seco* en cuanto al comportamiento del MOGIHA refiere. Es que las decisiones tomadas por el modelo de gestión están sumamente dominadas por los meses secos que se pueden encontrar entre las realizaciones que se consideran dentro de la optimización.

Esto es un problema intrínseco del método de las realizaciones múltiples, en donde por la formulación se da una importancia mucho mayor a caudales menores que presenta la entrada, mientras que los flujos altos prácticamente desaparecen del análisis cuando se toman varias realizaciones en una muestra. Siendo todas las distribuciones de probabilidad de error utilizadas simétricas en torno a su media, esta cualidad deja fuera una parte importante de lo que se consideraría como la *incertidumbre real del modelo hidrológico*.

Desde el punto de vista de la toma de decisiones, es válido preguntarse si este enfoque es demasiado conservador en la distribución de aguas ya que no sólo toma el peor caso, si no que la composición de los peores casos (los meses más secos de las distintas realizaciones). En este sentido, la mejor muestra de la conducta de la operación del MOGIHA ocupando todo el rango de la incertidumbre es cuando se considera sólo una realización, donde el método de las realizaciones múltiples se convierte en un proceso de Montecarlo.

## 5.2. Resultados del MOGIHA bajo el modelo hidrológico RNA.

A lo largo de todas las pruebas realizadas, los resultados de este modelo fueron consistentemente distintos a los obtenidos con los caudales generados a partir de los modelos hidrológicos DGA y WEAP, como si siempre tuviese caudales de entrada muy altos en comparación con los demás. Esto es probable si se recuerda la propiedad que tienen las variables aleatorias que siguen una normal:

$$\text{Si } X \sim N(\mu, \sigma^2) \text{ y } \{a, b\} \in \mathbb{R} \Rightarrow (aX + b) \sim N(a\mu + b, a^2\sigma^2) \quad (58)$$

Por lo tanto si se considera los datos de la distribución del error en los meses del modelo RNA que se muestran en la tabla 3.3 y la fórmula de la regresión lineal que se muestra en la figura 3.13 se obtienen los valores de las medias y desviaciones que se muestran en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Medias y desviaciones estándar de los errores del modelo RNA en Aconcagua en Chacabucuito.

Mes	$\mu$ [m <sup>3</sup> /s]			$\sigma$ [m <sup>3</sup> /s]
	Pex 20%	Pex 50%	Pex 85%	
Ago	13.68	12.08	10.89	0.93
Sep	13.91	12.24	10.76	1.35
Oct	27.49	21.92	16.97	8.87
Nov	48.59	41.03	31.73	8.38
Dic	80.96	62.66	46.41	17.91
Ene	118.62	92.20	75.72	24.18
Feb	131.68	114.31	102.56	5.18

Aunque las desviaciones estándar son del orden de los parámetros de escala de las distribuciones de probabilidad de los errores de los otros modelos hidrológicos, las medias son bastante más altas, en especial en el caso del mes de febrero. Esto se debe a que este mes está muy sobrestimado por los pronósticos de este modelo hidrológico. Así que el MOGIHA sí puede haber respondido de manera distinta al resto por este factor. Esto mismo pudo causar problemas numéricos en la solución de las optimizaciones que provocaron el extraño comportamiento que tuvo cuando se tomaron 200 realizaciones en los años húmedos. Además esto explica cómo es que podía regar con agua superficial durante el mes de febrero sin importar el tamaño de la muestra.

Sin embargo, hay otro factor que considerar al estudiar los valores de los resultados del MOGIHA bajo el modelo hidrológico RNA y es que la incertidumbre muestreada tiene la interferencia de la regresión lineal ocupada como función de transferencia entre Juncal en Juncal y Aconcagua en Chacabucuito. Tal como se explicó en la sección 3.1.4.1, esta regresión está caracterizada por estimadores de los estadísticos reales y presenta un intervalo de confianza al 95% de  $\pm 34$  [m<sup>3</sup>/s] en la estimación de los caudales en la entrada al modelo de gestión. Este intervalo es tan grande que puede apantallar toda la incertidumbre proveniente del modelo hidrológico restándole validez a los resultados en función de ésta que se obtuvieron.

Considerando lo anterior se recomienda buscar una función de transferencia que presente una incertidumbre propia menor que la utilizada en este estudio, para estudiar de buena manera la conducta

de la gestión en función de la incertidumbre del modelo hidrológico., o bien construir el pronóstico en Aconcagua en Chacabuquito con el modelo hidrológico RNA de ser posible.

Tomando en cuenta todo lo discutido en esta sección, no se recomienda el uso de este modelo hidrológico para la gestión de la primera y segunda sección de la cuenca del río Aconcagua. Consecuentemente, se omitirá los resultados de este modelo en los análisis que siguen.

### 5.3. Diferencias en la operación bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP.

Debido a la semejanza de los resultados obtenidos en la operación del MOGIHA bajo los modelos hidrológicos DGA y WEAP, se realizaron los test de hipótesis del capítulo 3.4 para determinar si existen diferencias significativas entre ellos.

Los resultados de los tests, disponibles en el Anexo C, indican que, aunque en ciertos momentos no se pueden rechazar las hipótesis de igualdad de media, en la generalidad las diferencias sí son estadísticamente significativas, lo que indica que las operaciones encontradas mediante los dos modelos hidrológicos estudiados son distintas entre sí ya sea en los distintos escenarios como con las diferentes realizaciones consideradas.

Por lo tanto, se puede decir que sí importa el modelo hidrológico escogido para optimizar el funcionamiento del sistema en el modelo de gestión creado, y que éstos se comportan de manera distinta frente a su propia incertidumbre.

Ahora bien, frente a la pregunta de cuál ocupar para un modelo de gestión la respuesta es más subjetiva. Los caudales generados a partir de los pronósticos del modelo WEAP, a pesar de tener un sesgo de sobreestimación de los caudales reales, debido a los grandes parámetros de escala de las distribuciones de probabilidad de los errores se comportan de forma más seca que los del modelo hidrológico DGA. Por esto, el MOGIHA bajo el modelo hidrológico WEAP se muestra más sensible a su propia incertidumbre. Esto es indeseable desde el punto de vista de la estabilidad en la gestión, ya que con leves incrementos en la muestra, las diferencias en la operación del sistema son muy importantes en especial en años secos.

Sin embargo, las capacidades para modelar los componentes de una cuenca que tiene el software WEAP, más la opción de modificar los parámetros hidrológicos para obtener mejores resultados; hacen de éste una herramienta muy poderosa si se maneja todo el modelo. Del modelo hidrológico DGA, por otra parte, no se tiene más información que sus resultados.

Las dispersiones de los resultados de ambos modelos son similares, aunque el modelo WEAP tiende a mostrar menores desviaciones estándar debido a su ya mencionada calidad de más seco.

Si sólo se dispone de la información de los caudales pronosticados para Aconcagua en Chacabucito a principios de la temporada de riego de ambos modelos hidrológicos, se recomienda utilizar los que entrega la DGA. Además esta información es gratis y está disponible en internet. Si se puede acceder a la formulación completa del modelo WEAP para su ampliación y actualización, se recomienda este modelo como ayuda en la gestión.



#### 5.4. Operación del canal revestido.

Al estudiar en detalle la forma que toman los valores de los caudales que circulan por el canal revestido  $U$  en función del caudal entrante  $I$ , se observa que ésta es independiente del modelo utilizado, tal como se observa en la figura generada con todas las series de los modelos WEAP y DGA para el mes de marzo considerando una realización, 5.1. El eje de este gráfico fue deliberadamente cortado en 30  $[m^3/s]$  por razones de espacio, lo demás son sólo zeros.

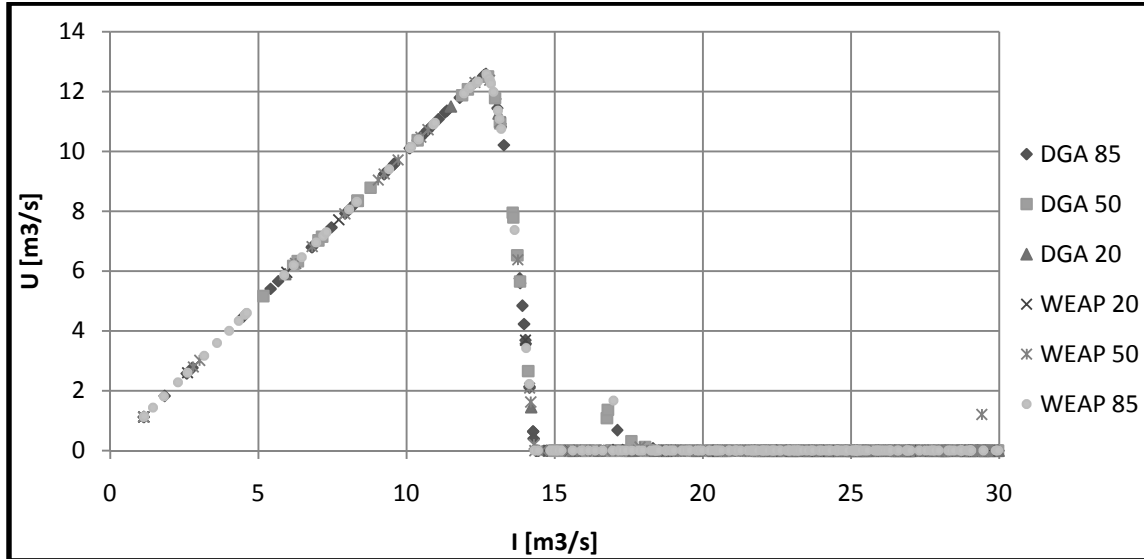


Figura 5.1. Valores de  $U$  en marzo en función de  $I$  para los modelos DGA y WEAP con una realización.

Se ha optado por describir los resultados obtenidos por las optimizaciones que consideran sólo una realización para aprovechar la dispersión completa, tanto positiva como negativa con respecto a la media, de los caudales generados. Sin embargo, esto no representa una pérdida de información ya que el comportamiento de esta variable es igual para los otros casos, sólo que se considera el menor caudal medio mensual entre las realizaciones consideradas.

La función  $U(I)$  puede ser escrita, de forma simplificada, como:

$$U(I_t) = \begin{cases} I_t & I_t \leq I_t^* \\ 0 & I_t > I_t^* \end{cases} \quad (59)$$

Donde  $I_t^*$  es función de la demanda de riego mensual y de la eficiencia de transporte de los canales del sector. Se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\frac{D1_t}{\eta c_1} = I_t^* - 0.349 I_t^{*0.6} \quad (60)$$

Esta expresión fue obtenida a partir del momento en que el caudal por el canal tradicional N2R1 no es capaz de satisfacer completamente la demanda de la primera sección D1 por sí solo. Este valor corresponde, en la figura 5.1, al lugar donde  $U$  ya terminó de bajar y comienza a tomar valores de cero. Se ha omitido la baja de esta función para simplificar el análisis, sin embargo se puede observar que sigue una forma parabólica. Los valores de  $I_t^*$  para todos los meses y una eficiencia de canales igual a 0.94 se muestra en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3.** Valores de  $I_t^*$  por mes y la probabilidad de obtener valores menores.

Mes	$I_t^*$ [m <sup>3</sup> /s]	Modelo DGA			Modelo WEAP		
		Pex 20%	Pex 50%	Pex 85%	Pex 20%	Pex 50%	Pex 85%
Sep	4.39	0.40%	2.73%	14.92%	11.69%	21.91%	38.27%
Oct	10.62	4.91%	19.39%	56.72%	13.39%	23.15%	35.53%
Nov	18.00	10.01%	29.98%	71.37%	10.24%	18.98%	30.93%
Dic	23.64	1.24%	5.82%	23.51%	3.05%	9.79%	28.07%
Ene	23.15	0.08%	1.67%	15.79%	0.15%	2.70%	22.10%
Feb	21.51	0.06%	2.38%	15.74%	0.40%	5.69%	22.22%
Mar	14.37	0.01%	0.40%	4.34%	0.32%	2.33%	7.69%

Ya que la forma de la función es independiente del modelo o escenario en que se evalúe, la operación del canal revestido queda definida de inmediato por ésta. Ahora bien, como los datos de entrada a esta función son variables aleatorias,  $U$  también obtiene esta categoría y su función de densidad de probabilidad corresponde a evaluar los posibles valores de  $I$  en la función  $U(I)$ .

Así, como se muestra en la tabla 5.3, la probabilidad de obtener valores menores o iguales que  $I_t^*$  en los distintos modelos y escenarios varía enormemente lo que da distribuciones muy distintas de  $U$ , en especial si se recuerda que lo único que varía entre los escenarios es el caudal base elegido. El efecto de considerar valores más altos de  $S_{sz}$ , es que los caudales de entrada se mueven hacia la izquierda ya que la optimización toma los caudales más bajos del mes entre las realizaciones. Esto tiende a concentrar los caudales en la zona donde  $U$  es mayor.

Una forma de trabajar con esta función en la operación del sistema podría ser generar un intervalo alrededor de la estimación hecha por el modelo hidrológico, con las distribuciones de error encontradas en el capítulo 3. Si  $I_t^*$  pertenece al intervalo, tomar la decisión más conservadora de llevar el mayor caudal posible por  $U$  para asegurar el riego en la primera sección.

Por ejemplo, si el pronóstico de la DGA da un valor de 70 [m<sup>3</sup>/s] para el mes de diciembre, se puede establecer un intervalo de error con un 95% de confianza de [-60.4, 70.56] [m<sup>3</sup>/s], por lo que el valor mínimo que podría tomar el verdadero valor del caudal medio en ese mes podría ser de 9.6 [m<sup>3</sup>/s]. Este valor es inferior a  $I_{\text{diciembre}}^*$  por lo que se opta por desviar por  $U$ , a priori, todo el caudal que venga por el río con un máximo en lo necesario para irrigar la primera sección considerando la pérdida en los canales: 21.31 [m<sup>3</sup>/s]. Claramente se puede cambiar la decisión a medida que se observan los caudales reales, o bien trabajar con intervalos más pequeños según lo conservador que sea el que tome la decisión.

En cuanto a las demás decisiones de la primera sección se puede decir que si los caudales de entrada son mayores a  $I_t^*$ , se seca el canal revestido y se permite el flujo del río hasta el nodo 2 donde se toma el caudal necesario para el suministro del sector de consumo R1. Por otra parte, el bombeo se utiliza cuando el caudal desviado por  $U$  no es suficiente para satisfacer la demanda de la primera sección, por lo que muestra una conducta lineal entre cero y su límite superior 1.7 [m<sup>3</sup>/s]. Si entre ambos no pueden regar completamente R1, baja el modulador de la demanda  $a(t)$ . No obstante, el modelo presenta resultados que indican, tal como se discutió previamente, una preferencia a bajar los moduladores antes de alcanzar el límite del bombeo. La gestión de la segunda sección ya fue discutida en el punto 5.1.

## **6. Conclusiones.**

A partir la metodología presentada en el capítulo 3, los resultados obtenidos a partir de ésta mostrados en el capítulo 4 y de la discusión de dichos resultados del capítulo anterior, se exponen las principales conclusiones relacionadas con el modelo de gestión creado y sus resultados. Posteriormente se realizan algunas recomendaciones que podrían mejorar el desempeño del modelo.

### **6.1. Características del modelo de gestión.**

Se creó un modelo de gestión de aguas para las dos primeras secciones de la cuenca del río Aconcagua (MOGIHA), que incluye tanto a los componentes superficiales como subterráneos de la zona. Este modelo consiste en una representación matemática de los elementos y relaciones del sistema real, dispuestos como restricciones en un problema de optimización. Dicho problema reside en encontrar la mejor distribución del recurso hídrico entre los componentes para asegurar la mayor satisfacción de la demanda de los sectores de consumo, minimizando la explotación de las napas que subyacen el lugar.

Además este modelo de gestión es capaz de incorporar la incertidumbre asociada a los caudales de entrada al sistema, generados por modelos hidrológicos externos a este estudio. La forma de incorporar esta incertidumbre es mediante el método de las realizaciones múltiples (Feyen & Gorelick, 2004), adaptado para trabajar con aguas superficiales.

Los mencionados modelos hidrológicos corresponden al modelo de Pronóstico de Disponibilidad de Agua Temporada de Riego de la Dirección General de Aguas (DGA); el modelo de Pronóstico de Volúmenes de Deshielo Mediante Redes Neuronales Recurrentes e Imágenes Satelitales MODIS, (Cartes, 2009) (RNA); y al modelo de la primera y segunda sección de la cuenca del río Aconcagua realizado en el software Water Evaluation And Planning System (WEAP) por Schuster. Los caudales ocupados en este estudio se crearon a partir de las distribuciones de probabilidad de los errores en la predicción de los flujos de estos modelos, instaurándose escenarios de años húmedos, normales y secos.

Todo esto se implementó en el software GAMS y fue manejado desde MATLAB para manejar la gran cantidad de información generada. Los resultados del modelo en las pruebas preliminares de calibración y validación fueron satisfactorios por lo que se procedió al análisis de los modelos hidrológicos.

## 6.2. Resultados generales.

Se corrieron 300 optimizaciones por conjunto de realizaciones, para cada modelo hidrológico siguiendo lo recomendado (Feyen & Gorelick, 2004). Así se pudo obtener una cantidad suficientemente grande de resultados para ser estudiados mediante técnicas estadísticas.

Se estudió el comportamiento de los valores medios y de la dispersión de las siete variables de decisión del MOGIHA, que corresponden a las decisiones que se toman con respecto al manejo de los caudales superficiales y subterráneos para la satisfacción de la demanda. Estas decisiones son mensuales y son únicas sin importar la cantidad de realizaciones consideradas en la optimización. Dichas variables son: los moduladores de la demanda de riego en la primera y segunda sección,  $a(t)$  y  $b(t)$  respectivamente; el caudal desviado por un hipotético canal revestido que unifica las bocatomas de la primera sección hacia el sector de riego R1, U; los caudales desviado por canales tradicionales hacia el consumo de R1 y R2, N2R1 y N3R2 respectivamente; y los bombeos utilizados en los dos zonas de riego, A1R1 para la primera sección y A2R2 para la segunda.

En general, el modelo prefiere nutrir los canales del sector de consumo de la primera sección con el canal tradicional, que permite la infiltración desde el río, cuando hay caudales altos de entrada, y con el canal revestido cuando hay bajos. Los bombeos en la primera sección son bastante escasos, ocupándolos principalmente bajo el modelo WEAP. La segunda sección presenta un comportamiento inusual, donde es muy frecuente la decisión de no llevar agua al sector de consumo bajo los tres modelos, en los tres escenarios.

En cuanto al comportamiento de las variables a lo largo del eje de la incertidumbre, mientras más muestras se consideran en la optimización, más secas se vuelven las medias de los resultados. Esto indica que el MOGIHA está muy dominado por los meses secos que se encuentran entre las realizaciones. A cómo reacciona el sistema con respecto al número de realizaciones se le llamó sensibilidad a la incertidumbre y está relacionado con cuán seco son los meses generados por los modelos hidrológicos. Los resultados bajo el modelo WEAP son los que presentan este fenómeno de forma más fuerte, seguido por los obtenidos bajo el modelo hidrológico DGA. Al utilizar los caudales generados mediante el modelo hidrológico RNA, el MOGIHA se muestra prácticamente insensible al número de realizaciones.

Esto concuerda con los resultados que muestran que las medias del MOGIHA bajo WEAP corresponden a las más secas entre los modelos, seguido por las del modelo DGA. Bajo RNA, el MOGIHA muestra medias completamente distintas a la de sus pares, como si el río llevase siempre mucha agua, aún en el escenario de años secos.

### 6.3. Análisis de los resultados relevantes.

El modelo de gestión muestra una importante aversión al bombeo, prefiriendo en ocasiones modular la demanda antes de bombear al límite de capacidad. Esto tiene origen en el castigo al bombeo que se da en la función objetivo de la optimización y pese a que se buscaron formas alternativas de plantear el problema, no se encontraron soluciones más satisfactorias que la propuesta en este informe.

El modulador de la demanda de la segunda sección salta rápidamente entre 1 y 0 a pesar de contar con agua suficiente como para mantener un riego mínimo sobre el sector de consumo de la segunda sección. La contrariedad parece venir de la evaluación del nodo N3, donde confluyen muchas variables de estado que dependen tanto de la realización como del mes donde se generan, implicando gran cantidad de variables a evaluar cuando se tienen muchas realizaciones simultáneas.

El método de las realizaciones múltiples implica una dominación de los caudales bajos en las decisiones, lo cual presenta la importante dificultad de excluir del análisis de la incertidumbre a las sobreestimaciones que producen los modelos hidrológicos. La única situación en donde la incertidumbre total de los modelos hidrológicos se refleja en los resultados es cuando se considera sólo una realización, en el resto los meses más secos mandan.

El modelo hidrológico RNA tiende a la sobrestimación de los caudales generados en Aconcagua en Chacabucito, tanto por la naturaleza de su error, como por la función de transferencia que se usó para pasar los caudales que genera en Juncal en Juncal al punto de entrada del MOGIHA. Además, la incertidumbre que agrega esta función, calculada mediante una regresión lineal simple de las observaciones en ambas estaciones fluviométricas, es tan alta que puede apantallar toda la incertidumbre propia del modelo. Por todo esto, este modelo hidrológico no es recomendable para ocuparlo en la gestión de la primera sección de la cuenca del río Aconcagua.

Pese a la similitud de sus resultados, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las operaciones obtenidas con los caudales generados a través de los pronósticos del modelo DGA y WEAP, lo que indica que la gestión no es indiferente a la elección del modelo hidrológico. Debido a que los resultados obtenidos a través de él presentan una menor sensibilidad a la incertidumbre y a que los errores de sus predicciones son menos dispersos, se recomienda el uso de los pronósticos del modelo de la DGA para la gestión de la primera sección de la cuenca.

Se encontró que la forma de la función que rige la conducta de U es independiente tanto del modelo hidrológico como del escenario probado, pero sí depende del mes en que es evaluada. Por consiguiente, se propone una operación del canal revestido que considera la forma de la función de U y la distribución de probabilidad del error encontrada para los meses de los modelos DGA y WEAP.

#### **6.4. Limitaciones y posibles extensiones.**

Para evitar la generación de años compuestos por meses muy secos seguidos por meses muy húmedos, se propone un estudio de los errores que correlacione a éstos dentro de un año. Asimismo, a medida que se tenga una mayor cantidad de muestras de los caudales pronosticados por los distintos modelos, se recomienda realizar un estudio de los errores en función del tipo de año ya que es muy frecuente encontrar correlaciones entre sobre/sub estimaciones y años secos o húmedos.

Se aconseja la construcción de un modelo que incluya los meses entre las temporadas de riego para funcionar de forma continua, ya que reflejaría de mejor forma al sistema en estudio, sobre todo en lo que se refiere a los balances de masa en los acuíferos. También, la inclusión de las variables climáticas permitiría la obtención de resultados más apegados a la realidad.

La incertidumbre aportada por la regresión lineal entre Juncal en Juncal y Aconcagua en Chacabucito vuelve imposible un estudio detallado de la incertidumbre generada por el modelo hidrológico RNA, por lo que se recomienda encontrar una nueva función de transferencia entre estas estaciones que logre minimizar este efecto; o de ser posible, la generación a través de este modelo hidrológico de los caudales en Aconcagua en Chacabucito.

La topología del modelo de gestión fue dejada bastante sencilla para facilitar la programación del método de las realizaciones múltiples, pero se puede mejorar de muchas formas. Se recomienda aumentar los detalles de la sección de Putaendo en cuanto a su consumo y a su acuífero. Considerar las otras demandas del sector en estudio, aparte de la de riego daría mayor realismo al modelo. Se recomienda una modelación completa del sistema acuíferos/río para toda la sección en estudio para volverlo un modelo completo de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

Un análisis de sensibilidad de los factores internos del sistema debe ser llevado a cabo para comprender de mejor manera y perfeccionar su comportamiento.

Como parte del estudio de lo que sucede en la segunda sección, se recomienda separar el nodo N3 para determinar si éste es el causante del extraño comportamiento del modulador de la demanda de la segunda sección o bien si en un problema numérico de la función objetivo.

Con relación a la función objetivo, se aconseja probar con alternativas no lineales para los moduladores de demanda. Esto para obligar al modelo de gestión a cumplir de mejor forma con los requerimientos de riego y evitar los problemas con los bombeos que se observaron en este trabajo.

Por último, sería interesante probar otras alternativas para la evaluación de la incertidumbre en el modelo de gestión que no sean tan dominadas por los caudales bajos como el método de las realizaciones múltiples

## 7. Referencias.

- Belaine, G., R. Peralta, and T. Hughes (1999). "Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(3), 154 – 161.
- Cartes, M. (2009). "PRONÓSTICO DE VOLÚMENES DE DESHIELOS MEDIANTE REDES NEURONALES RECURRENTE E IMÁGENES SATELITALES MODIS". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos y Medio Ambiente Hídrico. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Coe, J. J. (1990). "Conjunctive Use – Advantages, Constrains, and Examples." *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, 116(3), 427 – 443.
- CADE – IDEPE (2007), "Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Puntilla del Viento, Informe Final".
- DGA (1979 – 2009). "Pronóstico de Disponibilidad de Agua Temporada de Riego".
- DGA (2001). "EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA". S.D.T. Nº 101
- DGA (2002). "ANÁLISIS DEL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA". Departamento de Estudios y Planificación. S.I.T. Nº 79.
- DGA (2004a). "Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Aconcagua". Departamento de Administración de Recursos Hídricos. S.D.T. Nº 165.
- DGA (2004b). "DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD, CUENCA DEL RIO ACONCAGUA".
- Espinoza, C. (2008). "Tema 3: Movimiento del Agua Subterránea". *Apuntes del Curso CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento*. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Evans, M., N. Hastings, and B. Peacock (2000). *Statistical Distributions*. Wiley – Interscience.
- Ferris, M. C. (2008). "MATLAB and GAMS: Interfacing Optimization and Visualization Software". Recuperado el 26 de 11 de 2009, de <http://www.cs.wisc.edu/mathprog/matlab.html>
- Feyen, L. and S. M. Gorelick (2004). "Reliable groundwater management in hydroecologically sensitive areas". *Water Resour. Res.*, 40, W07408.
- Li, Y. P., G. H. Huang and X. Chen (2008). "Multistage scenario-based interval-stochastic programming for water resources allocation". *Stoch. Environ. Res. Risk Asses*, 23: 781 – 792.
- Matsukawa, J., B. Finney, and R. Willis (1992). "Conjunctive – Use Planning in Mad River Basin, California." *J. Water Resour. Planning and Mgmt.*, 118(2), 115 – 132.
- Metropolis, N. and Ulam, S. (1949), "The Monte Carlo method", *J. Am. Stat. Assoc.*, 44, N 247, 335 – 341.
- McPhee, J., and W. W. –G. Yeh (2006). "Experimental design for groundwater modeling and management". *Water Resour. Res.*, 42, W022408.
- Pulido – Velázquez, M., M. W. Jenkins, and J. R. Lund (2004). "Economics values for conjunctive use and water banking in southern California." *Water Resour. Res.*, 40(3), W03401.
- Pulido-Velázquez, M., J. Andreu, and A. Sahuquillo (2006). "Economic Optimization of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater at the Basin Scale." *Water Resour. Res.*, 132(6), 454 – 467.

- Shoups, G., C. L. Addams, J. L. Minjares, and S. M. Gorelick (2006). "Sustainable conjunctive water management in irrigated agriculture: Model formulation and application to the Yaqui Valley, Mexico". *Water Resour. Res*, 42, W10417.
- Walpole, R. E. (1999). "*Probabilidad y estadística para ingenieros*". Mexico: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA S.A
- Zeleny, M. (1986)., "Optimal system design with multiple criteria: De Novo programming approach", *Engineering Costs and Production Economics*, 10, 89–94.
- Zhang, Y.M., G. H. Huang, and X. D. Zhang (2008). "Inexact de Novo programming for water resources system planning". *European Journal of Operational Research*, 199: 531 – 541.



## **ANEXOS DIGITALES**

## **Anexo A. Información hidrológica.**

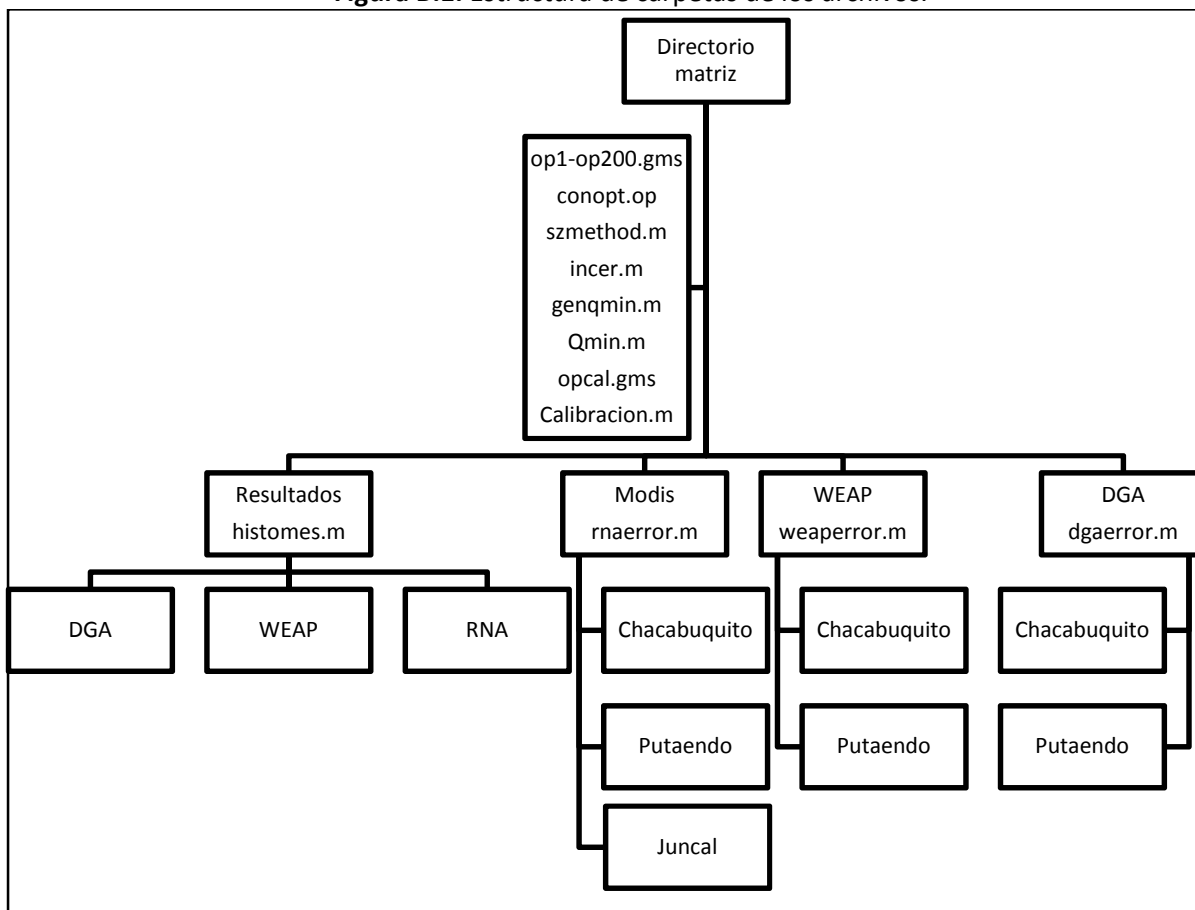
La información hidrológica correspondiente a las estaciones fluviométricas de Juncal en Juncal, Aconcagua en Chacabuquito, Aconcagua en San Felipe, Aconcagua en Romeral y Putaendo en Resguardo los Patos; más la información de los pronósticos de los modelos hidrológicos puede ser encontrada en la carpeta Anexo A dentro del disco compacto adjunto al final de este documento.

Esta información se encuentra en planillas de cálculo con el formato de Microsoft Excel 2007. Si no se dispone de este software para abrir los archivos, se pueden abrir con Google Docs o bien en OpenOffice.

## Anexo B. Programación del modelo.

Por razones de comodidad, tanto de presentación como de revisión, se ha preferido realizar este anexo de forma virtual, pudiéndose encontrar en la carpeta Anexo B dentro del disco compacto adjunto al final de este documento. La estructura que tienen los archivos es la presentada en la figura B.1. Todos los archivos pueden ser vistos y editados con un editor de texto si no se dispone del software con que fueron creados. El nombre de la carpeta Modis viene de una denominación que se usó en un principio para llamar al modelo RNA.

**Figura B.1.** Estructura de carpetas de los archivos.



## **Anexo C. Resultados.**

Debido a la gran cantidad de resultados obtenidos, se ha preferido entregarlos en formato digital en archivos de Microsoft Excel 2007, en la carpeta Anexo C dentro del disco compacto adjunto al final de este documento. Si no se dispone de este software para abrir los archivos, se pueden abrir con Google Docs o bien en OpenOffice.