

USO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EN LA PLANIFICACIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA ELECTRICO EN CHILE

Bonifacio Fernández
Escuela de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica de Chile
bfernand@ing.puc.cl

Recibido para evaluación: 23 de Julio de 2004 / Aceptación: 03 de Septiembre de 2004 / Recibida versión final: 13 de Septiembre de 2004

RESUMEN

Se muestran los resultados de una revisión detallada de los antecedentes hidrológicos empleados en la modelación del sistema eléctrico de Chile, indicando las precauciones a considerar en los modelos. Se hace entonces una descripción general de las propiedades hidrológicas de la zona y se destacan los aspectos importantes que debieran considerarse para que la información hidrológica empleada represente razonablemente condiciones de escasez y sequías.

PALABRAS CLAVES: Condiciones Hidrológicas, Sistema Eléctrico de Chile, Modelamiento, Condiciones de Escasez y Sequías.

ABSTRACT

The results of a detailed revision of the hydrologic methodologies used in the modeling of the Chilean power system are presented. Some precaution to be considered in the modeling process are also presented. A general description of the hydrologic properties of the region are discussed. Some important aspects are also discussed that should be included in order that the used hydrologic information adequately represents the critical conditions.

KEY WORDS: Hydrologic Conditions, Chilean Electric System, Modeling, Critical Conditions.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la operación del sistema a precios de mercado regulados por la CNE ha habido interés por la información hidrológica empleada en la modelación de los procesos de planificación y operación. Para ello tanto la CNE, como el CDEC y las empresas generadoras, han efectuado múltiples estudios. En particular se destacan los orientados a mejorar los pronósticos de caudales de deshielo, al análisis de los datos utilizados y al empleo de nuevos modelos para la planificación y operación del sistema. Por otra parte también ha quedado en evidencia la importancia de esta información en la definición de los precios y en los planes de obras, de manera que las empresas y el ente regulador han sido extremadamente cautelosos para efectuar cambios en la base de datos originalmente sugerida por las empresas a principios de la década de 1980. Rudnik et al, 1996, muestran que la utilización de series simuladas en lugar de datos históricos tiene un efecto importante en los precios spot. Sólo después de variados análisis en los que han quedado en evidencia los problemas detectados en las series originales, en 1997 la CNE indicó la necesidad de usar series de 40 años de longitud y no más de dos años de antigüedad. Hasta entonces se empleaban los datos de las series de 1941 a 1981. También llevan varios años los estudios destinados a proponer nuevas metodologías para representar más adecuadamente la hidrología relevante para los modelos de operación del SIC, basados fundamentalmente en el empleo de matrices de información hidrológica sintéticas (Minder, 1997) las que al incorporar la incertidumbre de la información hidrológica posibilitan la obtención de un perfil de costos marginales que reflejan las características de estas series y su variabilidad.

Este trabajo muestra los resultados de una revisión detallada de los antecedentes hidrológicos empleados en la modelación del sistema, indicando las precauciones a considerar en los modelos. Para ello se hace una descripción general de las propiedades hidrológicas de la zona y se destacan los aspectos importantes que debieran considerarse para que la información hidrológica empleada represente razonablemente condiciones de escasez y sequías.

2. DESPACHO HIDROTÉRMICO Y CÁLCULO DE COSTOS MARGINALES

La normativa vigente en Chile exige que la operación del SIC tenga por objetivo abastecer la demanda a un mínimo costo, respetando condiciones de seguridad, de

calidad de servicio y de entorno. En este sentido, las necesidades de modelación para la operación del SIC son satisfechas por las empresas generadoras y por el CDEC mediante la utilización del modelo OMSIC (CDEC-SIC, 1991). Más recientemente se ha buscado incorporar un modelo de operación económica multiembalse y con restricciones de transmisión usando Programación Dinámica Dual Estocástica, SDDP, (Power System Research Inc., 1994)

El modelo OMSIC es un modelo de operación del SIC (CDEC-SIC, 1991) que utiliza programación dinámica, considera un consumo centrado en una barra única, trabaja con cuatro etapas semanales al comienzo del horizonte de planificación y con etapas mensuales en el resto del periodo. Este modelo fundamentalmente optimiza las extracciones del Lago Laja, que es el de mayor volumen de regulación del sistema, de manera de minimizar el costo esperado de generación termoeléctrica y la probabilidad de falla en todo el horizonte de planificación. En este modelo la hidrología se considera independiente entre meses en el periodo de invierno (Abril-Septiembre) y dependiente en el periodo de verano (Octubre-Marzo, meses de deshielo), y las decisiones se toman en la modalidad azar-decisión. Este modelo considera dos etapas, una de optimización y otra de simulación. En la fase de optimización se busca minimizar los costos presentes y futuros de operación del sistema, mediante la utilización de programación dinámica. En la fase de simulación del modelo se utiliza el método de Montecarlo, seleccionando para ello hidrologías probables observadas en la base de datos. El modelo entrega como resultados una tabla de costos marginales esperados, tabla de cotas finales esperadas en el Lago Laja y la generación esperada por central. Recientemente se ha propuesto la utilización del modelo SDDP-PSRI (Programación Dinámica Dual Estocástica, Power Systems Research Inc.). Es del tipo de despacho hidrotérmico con restricciones de transmisión y multiembalse (Power Systems Research, 1994, y Gorestin et al., 1992). En particular, el modelo para el tratamiento de la hidrología (Pereira y Pinto, 1985) que se presenta en el modelo SDDP-PSRI es uno del tipo PAR (Periódico Autorregresivo), el cual se basa en lo desarrollado por Box y Jenkins, 1976.

El modelo SDDP se compone de dos módulos principales: i) El cálculo de la política de operación hidrotérmica para lo cual determina la política operativa más económica para los embalses, teniendo en cuenta las incertidumbres

en las afluencias futuras y las restricciones en la red de transmisión. ii) La simulación de la operación del sistema a lo largo del periodo de planificación, para distintos escenarios de secuencias hidrológicas. Calcula índices de desempeño tales como el promedio de los costos operativos, los costos marginales por barra y por bloque de carga, y los intercambios óptimos entre empresas.

3. PROPIEDADES HIDROLÓGICAS DE LA ZONA

En la zona central de Chile, ubicada en la transición climática entre el norte árido y el sur húmedo, se concentran las principales actividades económicas del país, sobre todo la agricultura de riego, el SIC y las grandes poblaciones, las que dependen para su desarrollo de la disponibilidad de recursos hídricos, principalmente superficiales. Las cuencas de la zona son de escasa superficie con ríos prácticamente paralelos que nacen en la cordillera de Los Andes y drenan los valles hasta descargar al mar, con pendientes relativamente altas y pequeñas planicies de inundación, (Fernández, 1996).

Las lluvias, que constituyen el origen de los recursos superficiales en Chile central, varían de manera

impresionante tanto de norte a sur como de este a oeste. Esto último producto de la presencia de la cordillera de Los Andes que es el gran almacén de recursos hídricos superficiales en toda la región. El incremento de la precipitación de norte a sur va desde unos 10 mm en Copiapó hasta más de 3000 mm anuales en el bosque valdiviano, de manera que la parte norte puede considerarse como una región desértica y la del sur definitivamente húmeda. La Figura 1a muestra valores promedio de la cantidad de lluvia anual en función de la latitud, de norte a sur, de acuerdo a los registros de varias estaciones pluviométricas de la zona entre Copiapó y Temuco. Además existe una diferencia importante en la forma en que cambia la cantidad de lluvia de un año a otro. La Figura 1b indica la variabilidad entre distintos años, expresada como la razón entre la desviación típica de la lluvia anual en relación al promedio. En la zona norte estos cambios son muy grandes en relación a los valores medios, mientras en el sur son pequeños, con una transición suave a lo largo del territorio. Las figuras permiten observar como en el norte las lluvias son pocas y con grandes diferencias interanuales y a medida que aumentan las precipitaciones hacia el sur disminuye su variación en el tiempo, de manera que además de ser más abundantes, pueden considerarse más seguras.

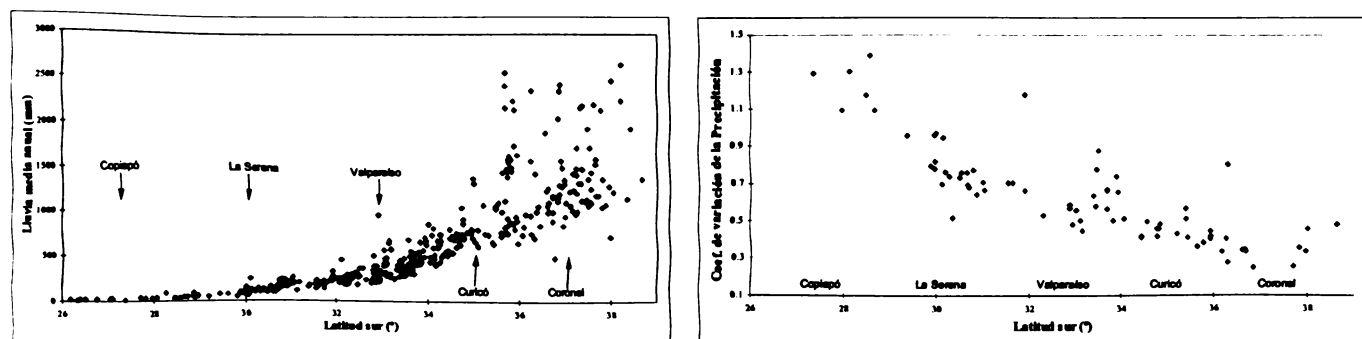


FIGURA 1. a) Comportamiento de la precipitación media anual en función de la latitud, según registros de estaciones pluviométricas de la zona. b) Comportamiento del coeficiente de variación de la precipitación anual en función de la latitud.

Una vez que el agua precipita sobre las cuencas, estas se encargan de concentrarla en los cauces de quebradas, esteros y ríos, haciendo más fácil su aprovechamiento por parte del hombre. Sin embargo no toda el agua que precipita como lluvia o nieve termina escurriendo por los ríos. Parte de ella queda en las primeras capas del suelo y posteriormente se evapora, o es consumida y evaporada por las plantas. La Figura 2 muestra cómo se

reparte la precipitación total entre escurrimiento y evapotranspiración en 15 de las principales cuencas de la zona central, ordenadas de norte a sur. En ella se aprecia que la precipitación prácticamente se transforma toda en evaporación en las cuencas del norte y sólo al sur de los 33°S se genera escurrimiento significativo, dejando en evidencia el carácter transicional de esta zona. Se hace notar que los ríos del norte, además de recibir

una escasa precipitación, la mayor parte de ella se evapora al caer en suelos secos, escurriendo por los cauces una pequeña proporción, generalmente con ocasión de las grandes crecidas. Es así como si bien en las cuencas del sur la precipitación anual es sólo unas diez veces la que precipita sobre las del norte, los ríos respectivos conducen volúmenes de agua casi quinientas

veces superiores. En este sentido los escurrimientos en los ríos tienden a aumentar las diferencias entre el norte y el sur ya detectadas en las precipitaciones. Siguiendo este comportamiento los desarrollos hidroeléctricos han ido desplazándose hacia el sur, alejándose de los principales centros de consumo.

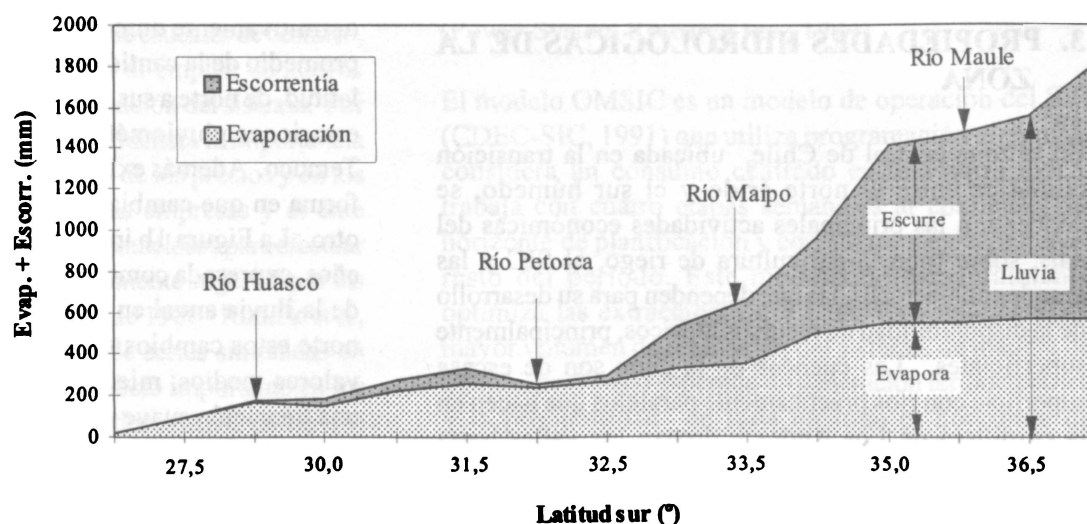


FIGURA 2. Distribución de la precipitación total entre escurrimiento y evapotranspiración en las cuencas principales en función de la latitud.

Si bien las cuencas exageran las diferencias espaciales, su capacidad de almacenamiento les permite, al mismo tiempo, amortiguar las variaciones temporales de las precipitaciones, mejorando las condiciones de disponibilidad de agua en relación a la de las lluvias. Sin embargo en una zona de tan disímiles propiedades como la de Chile central los escurrimientos en los ríos también presentan importantes diferencias en las series cronológicas de caudales medios anuales y mensuales.

En el norte se trata de ríos de escaso caudal con escurrimientos esporádicos en los cuales los recursos importantes provienen de unas pocas crecidas con intervalos de escasez relativamente prolongados. En la zona sur los ríos son de régimen permanente con inviernos abundantes y periodos de estiaje anual. Las Figuras 3a y 3b muestran series cronológicas de caudales medios mensuales de un río del norte y otro del sur en las cuales se pueden apreciar estas diferencias de comportamiento.

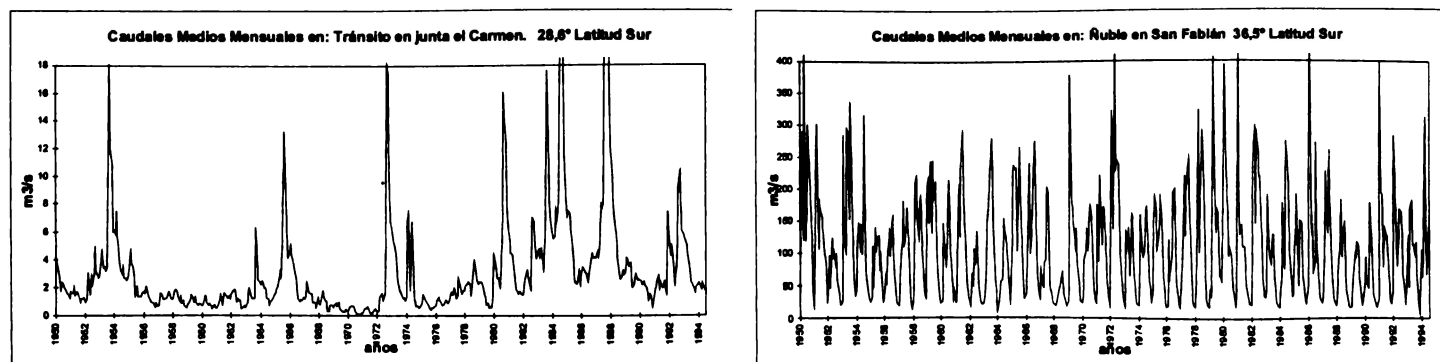


FIGURA 3. a) Series cronológicas típicas de caudales medios mensuales de un río de la parte norte de la zona central, en la Cuarta región. b) Series cronológicas típicas de caudales medios mensuales de un río de la parte sur de la zona central, en la Octava región.

Una manera de caracterizar el comportamiento de la disponibilidad de recursos hídricos superficiales en la zona central de Chile consiste en observar lo que ha ocurrido en los últimos años simultáneamente en varias cuencas de toda la región, (Fernández, 1997). Para ello se divide la zona en unidades homogéneas en cuanto a sus características climáticas y de oferta de recursos y se clasifica la oferta de cada año ordenándola en relación a las del periodo. Así lo que ha ocurrido en los 45 años desde 1950 hasta 1994, se aprecia en la Figura 4. En ella cada cuadrado representa un lugar y un año específico. La unidad 1 se ubica al norte de Copiapó y la 48 en Temuco. Comparando la cantidad de agua disponible en cada año con la de los otros años se ha coloreado ese cuadrado de manera que los años más secos les corresponde el rojo intenso, a los siguientes, no tan secos, el rojo, y así sucesivamente hasta el azul oscuro para los más húmedos. Aunque en la figura se muestra una mayor diferenciación, con percentiles de 0,10, puede considerarse arbitrariamente el comportamiento de los recursos clasificando los estados de acuerdo a lo siguiente: muy húmedo (azul oscuro y azul), húmedo (azul claro y celeste), normal (verde y amarillo), seco (naranja y rosado) y muy seco (rojo y rojo intenso).

Se puede apreciar que existe una agrupación regional importante de las épocas de escasez, reflejo de la alta dependencia espacial de las series cronológicas de oferta de recursos entre unidades vecinas, y una mucho más

débil agrupación temporal como consecuencia de la escasa dependencia interanual de los aportes. Cuando se observa una agrupación temporal de años secos, menos marcada que la espacial, pero notoria en los episodios de sequías importantes, se generan impactos tremendos sobre los usuarios de los recursos. En términos prácticos las sequías, y también la abundancia, se plantean en el gráfico de la Figura 4 como manchas de forma alargada en el sentido espacial y reducida en el temporal. Queda en evidencia la gran cobertura espacio temporal de la sequía de fines de la década de 1960, (1968-1972) que tuvo una gran repercusión en las actividades agrícolas en la zona central de Chile, afectando fundamentalmente a la zona centro norte. También es posible observar la cobertura y duración de la sequía de fines de la década del 80 (1987-1990), con un efecto más importante en la parte centro sur y consecuencias sobre la producción eléctrica ya que en ella se ubican las mayores centrales hidroeléctricas del sistema interconectado central. Debido a que cuando falta agua en una unidad generalmente lo mismo ocurre en las vecinas, es evidente que para enfrentar las sequías son mejores los almacenamientos temporales en las mismas unidades que los trasvases desde cuencas vecinas, o sino el respaldo debe proveerse de cuencas muy alejadas. Lo mismo ocurre con los periodos muy húmedos, de manera que cuando hay una sobre oferta de agua en una cuenca, algo similar está ocurriendo en sus vecinas.

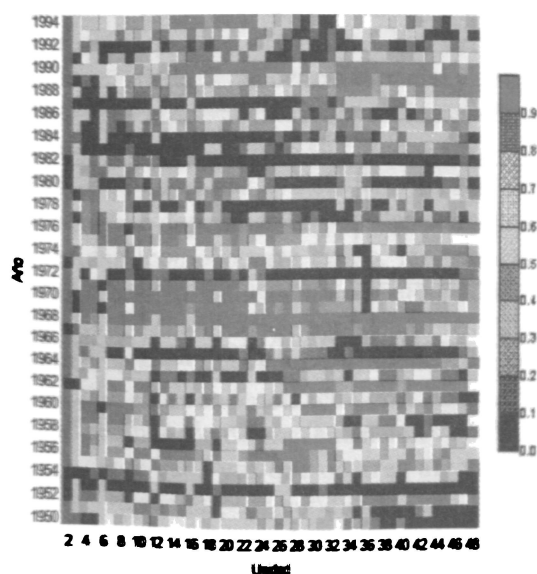


FIGURA 4. Comportamiento de la disponibilidad de recursos hídricos en la zona central de Chile en base a la distribución espacio-temporal de la probabilidad de excedencia de la oferta anual en 48 cuencas desde Copiapó a Temuco durante el periodo 1950,..., 1994.

4. CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS HIDROLÓGICAS

La operación de los modelos actualmente en uso para colaborar en la gestión del sistema interconectado central requiere de información hidrológica que represente la oferta de agua al sistema, en particular las condiciones de escasez que son las que condicionan los riesgos de falla. Esta información se representa mediante caudales medios en diferentes secciones de las cuencas que participan con su oferta al sistema de centrales y embalses que forman el SIC. En la actualidad los modelos utilizan como información básica series cronológicas de valores medios semanales de 40 años de extensión, organizadas por años hidrológicos (de Abril a Marzo). Estas series de información de caudales disponibles provienen de mediciones que se han realizado en las diversas cuencas del país. Los valores considerados en esta base de datos son obtenidos fundamentalmente de tres formas: a) Medición directa de la serie en estaciones fluviométricas ubicadas en el lugar considerado; b) obtención de los valores a través de la adición y substracción de flujos medidos en otros lugares de la cuenca (dado que en el lugar de interés no se cuenta con mediciones directas), de manera de completar la información necesaria, en base a relaciones de continuidad, y c) estimaciones a partir de otras mediciones (Ej.: filtraciones, superficies de hoyas, precipitaciones, etc.), empleando para ello regresiones,

o relaciones de distintos tipos. Para ser empleadas en la operación y planificación del SIC es necesario que las series hidrológicas representen adecuadamente las propiedades estadísticas básicas, especialmente aquellas que tiene mayor efecto sobre la caracterización de los periodos de escasez.

4.1. Propiedades estadísticas de las series hidrológicas y las sequías

Entre las propiedades estadísticas importantes para caracterizar las sequías en los aportes de ríos de una región se encuentran el promedio, la varianza, la asimetría, la dependencia temporal y la espacial. El promedio, representativo del valor esperados de recursos disponibles, tiene un efecto evidente en relación a las demandas. De manera similar la varianza como indicador de las probabilidades de disponer en un periodo cualquiera del agua necesaria. El efecto de la asimetría no siempre es bien considerado, sobre todo dadas las dificultades que existen para estimarlo y reproducirlo. Sin embargo sus consecuencias sobre las sequías son importantes, como puede apreciarse en las series de la Figura 5, las que se diferencian básicamente en el coeficiente de asimetría, siendo iguales los promedios, varianzas y coeficiente de auto correlación. Se aprecia que a medida que el coeficiente de asimetría aumenta se generan sequías mas largas.

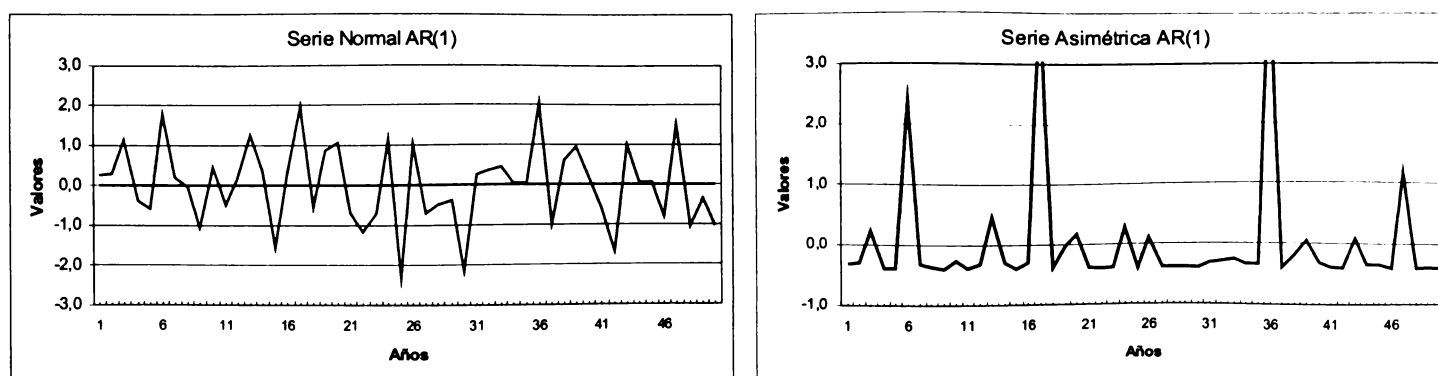


FIGURA 5. Efecto de la asimetría sobre las sequías. a) serie normal, $g=0$, independiente. En 50 años se observan 12 sequías bajo el promedio, con una duración máxima de 4 años; b) serie asimétrica, $g=3,6$ independiente. En 50 años se observan 11 sequías con una duración máxima de 8 años.

La importancia de la dependencia temporal puede apreciarse al comparar las series de la Figura 6. La cantidad de años secos en ambos casos es la misma, sin

embargo la dependencia hace que haya menos sequías pero más prolongadas.

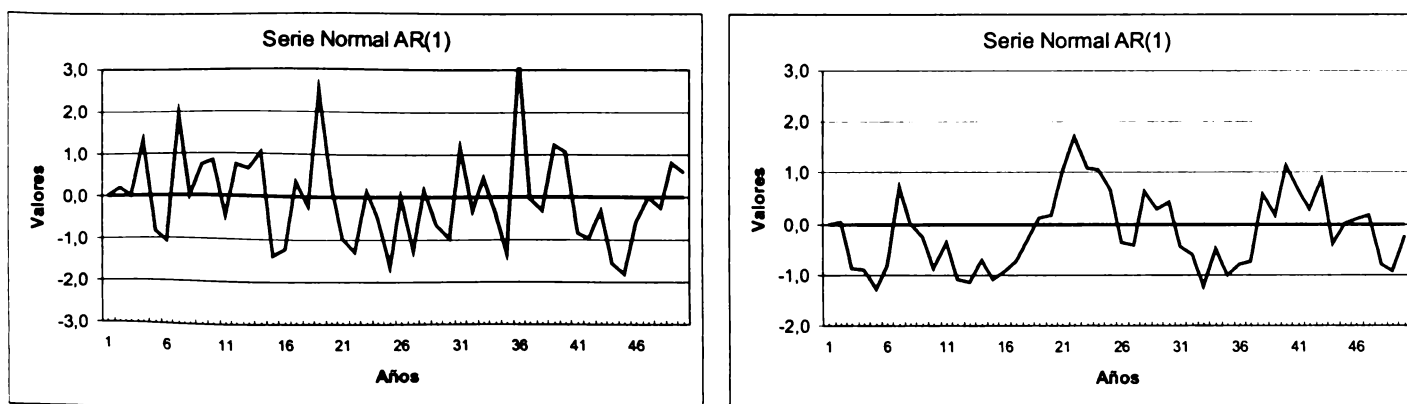


FIGURA 6. Efecto de la dependencia temporal sobre las sequías. a) Serie normal independiente. En 50 años se observan 12 sequías bajo el promedio, con una duración máxima de 7 años; b) Serie normal dependiente, coef. de auto correlación 0,65. En 50 años se observan 6 sequías con una duración máxima de 11 años.

Especial cuidado debe tenerse con la dependencia temporal y espacial en sistemas multivariados, en los cuales interesa el comportamiento conjunto de los recursos de varios ríos. Los efectos de estas variables sobre el comportamiento de las sequías pueden apreciarse en la Figura 7, en la cual se muestran las sequías identificadas en un conjunto de cuencas durante varios años. Cada fila horizontal representa una cuenca y cada columna un año. La cantidad de años secos en el conjunto de cuencas es igual en todos los casos y solo difieren en la forma en que se organizan las sequías como consecuencia de la dependencia espacial y temporal. Si las series son temporalmente independientes y las cuencas no están relacionadas entre sí, como ocurre en 7a, hay muchas sequías cortas y aisladas. Si las series son temporalmente dependientes pero las cuencas no están relacionadas, como ocurre en 7c, las sequías que se observan afectan durante tiempos prolongados a algunas cuencas, mientras otras permanecen libres de ellas. Si por otra parte ocurre una gran dependencia espacial, entre cuencas, con independencia temporal, como se muestra en 7d, las sequías son de gran extensión y corta duración, de manera que cada vez que ocurren afectan a muchas cuencas. Quizás la peor condición para la gestión de sequías es lo que ocurre en 7b, cuando existe dependencia espacial y temporal importante, porque en estos casos las sequías, aunque pocas, son de larga duración y afectan a muchas cuencas simultáneamente, de manera que es

difícil compensar sus efectos temporalmente, con almacenamiento, o regionalmente, con trasvases o con la operación de otras centrales en zonas cercanas.

4.2. Problemas detectados en las series de datos del SIC

Las series de datos empleadas por el SIC hasta 1998 consideraban 40 años de valores pseudos históricos del periodo 1941 hasta 1981. Muchas de las series habían sido rellenadas para el periodo común de la estadística con diferentes procedimientos, generalmente por correlación con series de referencia más largas de la misma región. La Figura 8 muestra la cantidad de series medidas con que se cuenta en la base de datos. Se observa que solo desde 1991 todas las series tienen el respaldo de una medición directa y que antes de 1960 más de la mitad tienen datos rellenados. Cabe destacar que el relleno de datos en sí no es el problema, sino que el problema es que éste fue realizado sin la preocupación de reproducir momentos de mayor orden que el primero. En efecto, con los rellenos hechos se reprodujeron promedios, pero no desviación estándar, asimetría, curtosis, etc.; por lo que se tiene como consecuencia que las series rellenadas son menos fluctuantes (menor desviación estándar) que las reales. Tampoco existía una preocupación por reproducir la asimetría, de manera que en esa información se puede esperar sequías más cortas que las naturales. Además, las series rellenadas presentan una mayor

dependencia temporal y espacial debido a que las técnicas de regresión y uso de relaciones empíricas se utilizaron sin tener en cuenta estos aspectos. Como consecuencia

de esto último en esos años hay en el registro sequías más largas y de mayor extensión.

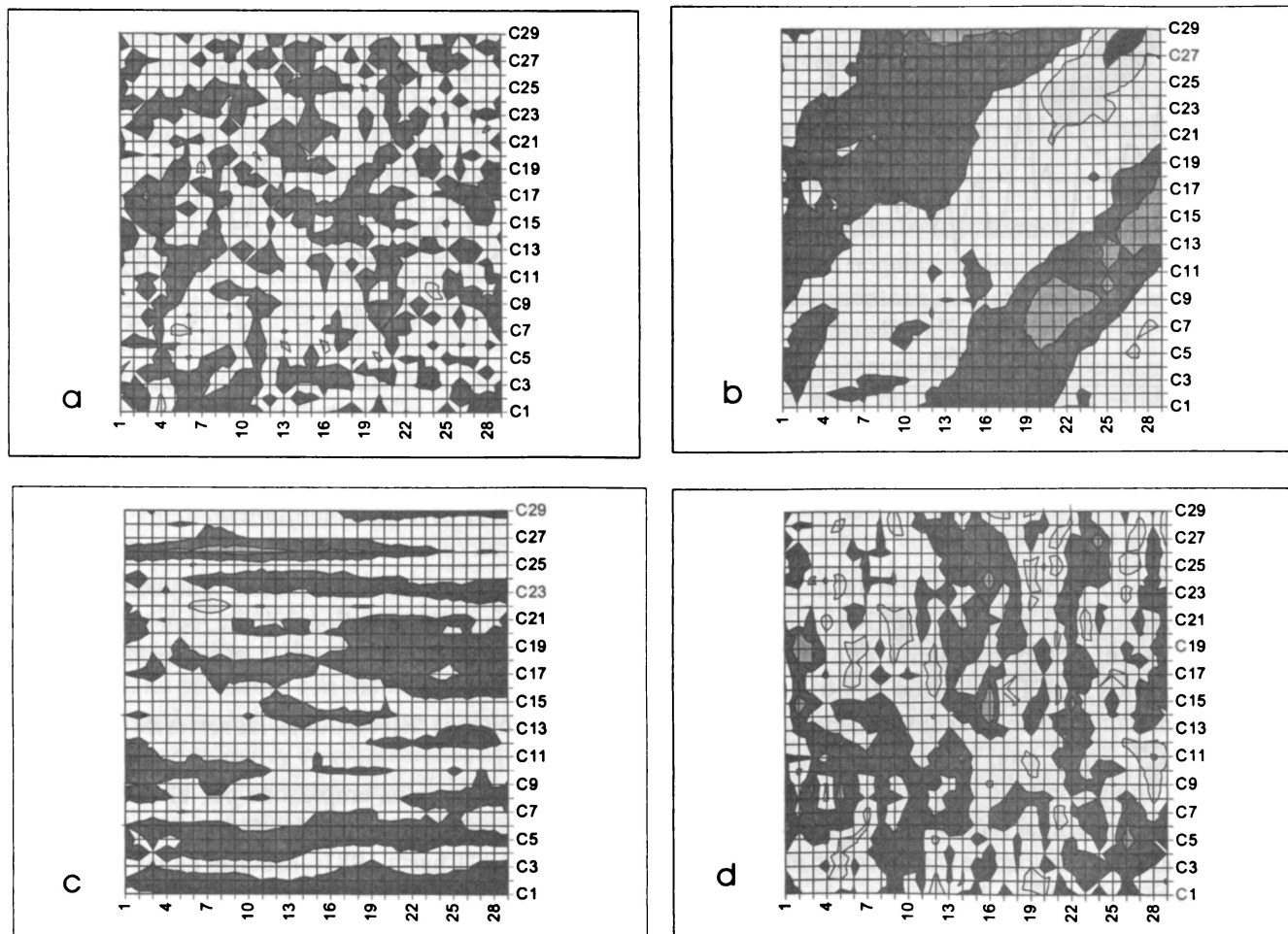


FIGURA 7. Efectos de la dependencia temporal y regional sobre las sequías. a) Situación de independencia temporal y espacial, b) Situación de gran dependencia espacial y temporal; c) Dependencia temporal importante y regional despreciable, d) Dependencia temporal despreciable y regional importante.

Otro aspecto importante a destacar es la representatividad de las sequías incluidas en la base de datos. Los modelos OMSIC y GOL emplean información hidrológica de 40 años, y para incluir la aleatoriedad consideran los mismos 40 años cuando se está en situaciones de independencia, periodo de invierno, o seleccionan los más parecidos a los volúmenes totales pronosticados de deshielo cuando se está en condiciones de dependencia. Por lo tanto no tienen capacidad de incorporar otras hidrologías no existentes en la base de datos. La zona central de Chile sufrió entre 1967 y 1971 una gran sequía que afectó gravemente la actividad económica de la parte centro y

norte de esta región, principalmente la agricultura. Figura 9a. En esos años además el 60% de la potencia instalada del SIC se encontraba en cuencas afectadas por esa sequía, principalmente en las cercanas a Santiago. En base a ello se entendía que para los efectos de riesgo de falla las condiciones de una sequía importante estaban consideradas en el sistema, ya que ella estaba incluida en la base de datos hidrológicos. Era común escuchar que el sistema era razonablemente seguro ya que se consideraba capaz de responder a situaciones de sequía como las de 1967, o que las condiciones de seguridad se contrastaban con la hidrología de esos años. En 1987

una sequía que afectó a las cuencas del sur, pero que fue de una magnitud menor en la zona central, tuvo importantes efectos sobre la producción del SIC, ya que los centros de generación se habían desplazado a estas cuencas y solo e 25% de la potencia instalada se

encontraba en ese entonces en las cuencas que habían sido afectadas por la sequía del 67. De manera que una sequía objetivamente menos importante pero que afectó principalmente a las cuencas de los nuevos centros de generación tuvo efectos no revistos en la base de datos.

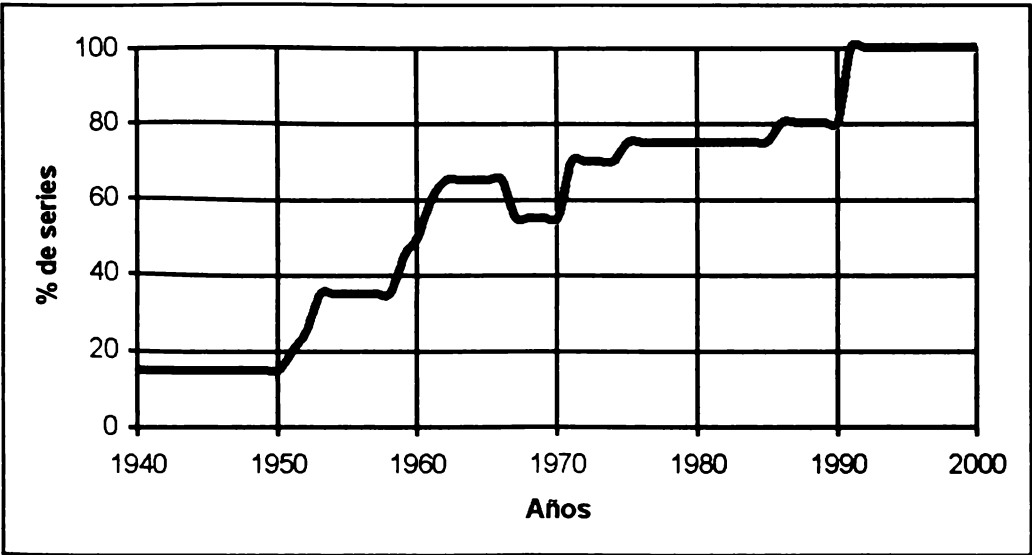


FIGURA 8. Proporción de series de datos hidrológicos medidos en las series utilizadas por el SIC. En el recuadro las series empleadas hasta el año 1998, que consideraban información desde 1941 a 1980.

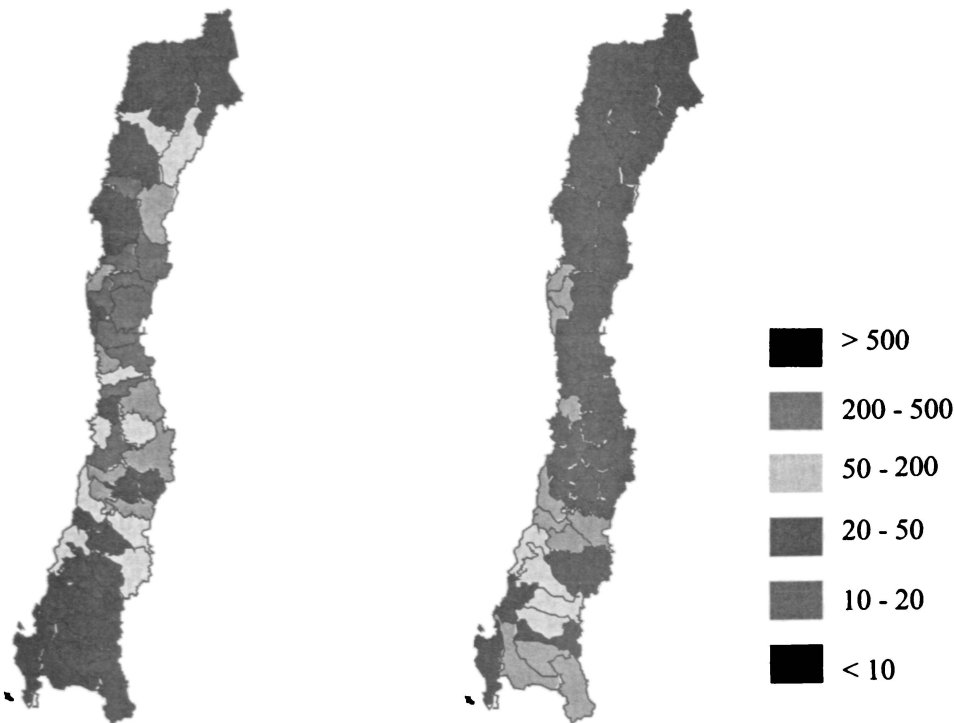


FIGURA 9. Sequías recientes observadas en Chile Central. Periodos de retorno de las sequías en cada subcuenca. a.- Sequía de los años 1967 a 1971, que afectó mayormente a la zona centro norte. b.- Sequía de los años 1987 a 1990, que afectó a la zona centro sur.

El análisis detallado de la hidrología de la zona, y de las propiedades de las sequías en la región es fundamental para respaldar el uso de los datos en la operación del SIC. Ello condujo a incentivar la medición de los recursos empleados por el sistema y a utilizar como series de datos las más recientes a partir de 1998. Sin embargo también debiera impulsarse el uso de series simuladas para disponer de condiciones no necesariamente reflejadas en los datos disponibles.

5. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE CAUDALES

La modelación de una serie cronológica consiste en seleccionar un modelo que reproduzca adecuadamente las características estadísticas de la serie. Dado que las posibilidades están restringidas a los modelos conocidos (cuyo desarrollo puede ser encontrado en las referencias (Salas et al., 1985, y Hipel y McLeod, 1994), en la mayor parte de las situaciones se supone un cierto modelo y se verifica si es el adecuado. En este sentido, no se trata de encontrar el modelo que ha generado la serie en cuestión, sino más bien elegir por comparación, entre los posibles modelos, el que mejor represente las características consideradas relevantes. Para el caso de los modelos lineales existe una metodología de modelación propuesta por Box y Jenkins, 1976, que es ampliamente aceptada. Ésta consiste en tres etapas que son: identificación del orden, estimación de parámetros y validación. A esto Salas et al., 1985, agregan dos etapas previas: composición del modelo y selección del tipo. La modelación general es complementada con el uso del modelo, ya sea en simulación o pronóstico. En el caso de la simulación, ésta se realiza mediante la generación de series sintéticas (matrices hidrológicas con los datos obtenidos a partir de la utilización de los modelos ajustados que se suponen equiprobables a las series empleadas en su construcción), a partir de los modelos construidos Rudnick et al, 1996, utilizan esta metodología para generar series que posteriormente son utilizadas como datos de entrada para el modelo OMSIC, lo que permite representar condiciones hidrológicas probables pero diferentes a las observadas en los datos y con ello obtener distintos valores de costo marginal para cada una de las hidrologías generadas a partir de los modelos. A continuación se presentan los pasos necesarios para la generación de las matrices sintéticas [Sala85] utilizadas para alimentar el modelo OMSIC y sus posibles efectos sobre el comportamiento del sistema.

a) *Modelación temporal de cada serie.* Con la modelación temporal se busca representar la dependencia que tiene la serie consigo misma, de tal manera de obtener ruidos independientes temporalmente, aunque dependientes espacialmente. En esta etapa se abordan los siguientes pasos: normalización de los valores, estandarización, selección del orden del modelo, estimación de los parámetros y representación de los efectos periódicos.

Una vez ajustados a cada una de las series un modelo de este tipo que representa su comportamiento temporal se obtiene en cada sitio una matriz de residuos temporalmente independientes, manteniéndose la dependencia espacial entre las distintas series. Si los supuestos de independencia y normalidad no son satisfechos satisfactoriamente la forma del modelo e incluso el tipo de modelo deberá ser cambiado y será necesario repetir esta revisión hasta que el modelo adecuado es encontrado. Conviene destacar la importancia de que los residuos sean normales, ya que ellos serán utilizados en la construcción de la estructura espacial. Si la serie resulta ser no normal se debe aplicar una transformación que la convierta en ese tipo de distribución.

b) *Modelación espacial del conjunto de series.* Cuando existen varias series, en varios lugares diferentes de una región de la misma variable como es el caso de los aprovechamientos del SIC, o de diferentes variables en un mismo lugar, o combinaciones similares, que presentan dependencia entre los valores de las series, se deben considerar modelos multivariados. Considerando los valores de los ruidos a los que ya ha sido removida la dependencia temporal, se construye la matriz de coeficientes espaciales, considerando un modelo contemporáneo, según un esquema sugerido por Salas, 1985.

c) *Generación de series de tiempo sintéticas.* A partir de esta etapa se debe aplicar en sentido inverso lo hecho en las etapas anteriores, verificando el cumplimiento de las hipótesis en cada paso. Para la generación de series sintéticas, lo primero es generar un conjunto de números independientes idénticamente distribuidos normales estándar, $IIN(0,1)$, de acuerdo a algunas de las técnicas descritas en la literatura (Sala, 1985).

Utilizando los parámetros del modelo y descartando los primeros valores para inicializar los datos se reconstruye la serie de valores que son normales de media cero y desviación estándar uno. Si se le aplicó una

transformación para normalizar la serie se debe desnormalizar dicha serie aplicando la transformación inversa. A casi todas las series del SIC se les debe aplicar una transformación para normalizarlas (en general del tipo Box-Cox, pero en muchos casos una serie de ellas incluyendo la de Willson Hilferty). Una vez que las series están desnormalizadas se debe desestandarizarlas. Lo que resulta es una serie de tiempo sintética para cada uno de los lugares escogidos. Finalmente, es fundamental verificar la reproducción de los estadísticos relevantes en cada etapa.

6. CONCLUSIONES

La información hidrológica empleada para a planificación y operación de sistemas eléctricos complejos, como el SIC en Chile central, tiene importantes efectos sobre los precios y las inversiones que realizan los agentes que participan. Ello hace que en general sea difícil modificarlas ya que varias de las inversiones realizadas se han hecho bajo supuestos de operación condicionados por esta información. Para lograr un desarrollo racional del sistema es importante avanzar en el conocimiento del comportamiento hidrológico de los recursos hidráulicos en uso, lo que requiere un esfuerzo interdisciplinario por parte de quienes participan en el sistema, incluyendo hidrólogos, operadores, las empresas generadoras y los reguladores. Es necesario convencer a todos ellos de la importancia de contar con antecedentes medidos y avanzar lo más posible en el conocimiento del sistema, incluyendo fundamentalmente el comportamiento de los recursos en condiciones de escasez, sequías, que son las que condicionan la operación en situaciones de falla, y cuyo comportamiento no siempre es bien entendido. Para estas últimas es necesario un análisis de las situaciones observadas en los registros, conocer sus probabilidades de ocurrencia así como las propiedades básicas de duración, intensidad, magnitud y periodo de retorno. Debido a la gran variabilidad de muestreo que presentan estos fenómenos, es evidente que las sequías observadas en los registros típicos, que consideran series de 30 a 50 años de longitud, son poco representativas de las sequías que pueden ocurrir en el sistema, de manera que es necesario avanzar a metodologías que utilicen simulación para presentar opciones que van más allá de las observadas en la historia reciente.

La construcción de un modelo estocástico para representar datos hidrológicos se realiza de manera de

imitar las propiedades estadísticas de las series de datos disponibles. En esta forma la solución del modelo de optimización del sistema depende de manera relevante de los datos disponibles. Es, por lo tanto, importante que esa información sea revisada cuidadosamente para asegurar que no existen valores rellenados que no aportan información o que la distorsionan. Por otra parte, la construcción del modelo debiera ser una oportunidad única para la revisión de la información. Este tipo de modelos trata de reproducir los valores esperados, las varianzas, asimetrías, las covarianzas o dependencias temporales en una misma serie y las espaciales entre series cercanas.

Es sabido por otra parte que la estadística de caudales en Chile es relativamente corta y que sólo se dispone de unas pocas series completas para el periodo de análisis, de manera que muchas de ellas contienen datos rellenados mediante diferentes técnicas. Estas técnicas, en general, mejoran la estimación de los valores esperados, pero introducen sesgos en las estimaciones de la varianza y las dependencias. Estos dos aspectos son esenciales en el modelo estocástico de caudales planteado para ser empleados en la operación del sistema. Si esto no se revisa cuidadosamente el modelo reproducirá estas distorsiones. Es por ello importante que para la construcción del modelo se verifique y separe los datos reales de los datos rellenados y completados, y se asegure que las estimaciones de las varianzas y las dependencias temporales y espaciales sean las correctas. Adicionalmente, es altamente recomendable agregar datos de mediciones más recientes si se busca ampliar la muestra.

Para la modelación hidrológica de los aportes al SIC resulta fundamental considerar que la tarea de modelación es muy diferente a la de simulación, debiendo el modelo en sí ser único si los datos lo son y sólo se podría pensar en modificarlo si se cuenta con nuevos antecedentes. Además, dadas las altas asimetrías existentes en las series de datos chilenos resulta adecuado aplicar las transformaciones sobre los datos y no sobre los residuos, ya que esto permite además tener un mayor control sobre la calidad de los datos al poder detectar en las primeras etapas del proceso la existencia de outliers o información anómala, la que al ser removida al principio no altera la estimación de parámetros ni la identificación de los modelos. Al utilizar matrices sintéticas se puede generar más de una matriz hidrológica para cada serie de tiempo

teniendo la certeza que ellas son igualmente válidas (equiprobables), por la manera en que se ha realizado su construcción. La ventaja que presenta este hecho es que, dejando el resto de las variables constantes se puede obtener información acerca de la sensibilidad de los modelos de operación y planificación respecto de las posibles condiciones hidrológicas, a través de la obtención de un perfil de costos marginales. Cabe destacar que esta utilización en la simulación de la operación resulta imposible de realizar con las matrices hidrológicas reales, o con la reordenación de ellas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Box, G. y Jenkins, G., 1976. Time Series Analysis, Forecasting and Control. Revised Edition.
- CDEC-SIC, 1991. Modelo OMSIC. CDEC-SIC.
- CDEC – SIC, 1999. Estadísticas de Operaciones 1989 a 1998. Santiago, Chile.
- Fernandez B. 1997. Los esquivos recursos hídricos de Chile central. Revista Universitaria, Primera Entrega, N56, pp 39-44.
- Fernandez, B. L., 1997. Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. Ingeniería del Agua, Vol. 4, Nro. 4, diciembre, pp 37-46.
- Groestlin, B. G.; Campodonlco, N. M.; Costa, I.P. y Pereira, M. V. F., 1992. Stochastic Optimization of a Hydro- Thermal System Including Network Constrains. Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992.
- Hipel, K. y Mcleod, A., 1994. Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Elsevier; Amsterdam, London, New york, Tokyo.
- Minder, E., 1997. Modelación hidrológica en el Sistema Interconectado Central. M. Sc. Tesis, Catholic University of Chile.
- Pereira, M. V. F.; Pinto, L. M. V. G., 1985. Stochastic Optimization of a Multireservoir Hydroelectric System, a Decomposition Approach. Water Resources Research, Vol. 21, No. 6.
- Power Systems Research Inc., 1994. Modelo de despacho hidrotérmico con restricciones de transmisión- SDDP/CDEC. Power Systems

Research Inc.

- Rudnick, H., Fernandez, B. y Minder, E., 1996. Modelación Hidrológica y su efecto en la Determinación de Precios Spot.
- Salas, J.; Delleur, L.; Yevjevich, V; y Lane, W., 1985. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publication.