

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN CHILE CENTRAL

Bonifacio Fernández Larrañaga¹

RESUMEN: En este artículo se hace una caracterización espacial y temporal del comportamiento de los recursos hídricos superficiales en la zona central de Chile orientada a identificar las sequías ocurridas en el pasado reciente para posteriormente evaluar sus propiedades. Se considera la oferta de agua en base a series cronológicas de caudales medios mensuales en zonas homogéneas y se identifican las sequías en planos espacio temporales a escala anual y mensual en los que se muestran las probabilidades de excedencia de los recursos disponibles en cada lugar y cada intervalo de tiempo. Las sequías detectadas en cada zona se caracterizan en cuanto a sus propiedades de duración, intensidad y severidad. Además se estima el periodo de retorno de las peores sequías observadas en la historia reciente de la región.

INTRODUCCIÓN

Las sequías son fenómenos de relativa complejidad que afectan de manera importante el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en una región. Si bien existen innumerables definiciones de sequías, en general se está de acuerdo en considerarlas como períodos prolongados de escasez de recursos hídricos capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos (Yevjevich *et al.*, 1978; Beran y Rodier, 1985). Tienen la particularidad de ser de lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, lo que hace difícil precisar con exactitud su duración y extensión mientras ocurre el fenómeno, dificultando la adopción oportuna de medidas concretas para paliar sus efectos. Estos límites pueden establecerse con precisión una vez que la sequía ha transcurrido totalmente y se le observa desde una perspectiva histórica. Si bien su ocurrencia no provoca el colapso ni la falla destructiva de las obras, puede condicionar la operación de los sistemas de utilización de recursos hídricos imponiendo muchas veces condiciones más exigentes que las de diseño con graves consecuencias económicas y sociales. El carácter no destructivo de las sequías, en comparación con las crecidas, es probablemente responsable de que la comunidad esté dispuesta a asumir mayores riesgos frente a ellas. Mientras se habla de crecidas milenarias, decamilenarias y hasta de la crecida máxima probable, es habitual que se consideren como condiciones de diseño para las sequías situaciones similares a las observadas en el pasado reciente, cuya frecuencia media corresponde a

períodos de retorno de 20 a 50 años. Entonces cuando ocurren situaciones de escasez prolongada se generan polémicas que comparan la situación existente con las condiciones más desfavorables observadas en las últimas décadas, aceptando que no existirían responsabilidades de diseño u operación si lo que se observa es peor que lo registrado (Hernández y Llamas, 1995).

En este artículo se caracteriza regional y temporalmente el comportamiento de los recursos hídricos en condiciones de escasez en la zona central de Chile, en base a la disponibilidad de recursos superficiales observados en registros fluviométricos. También interesa una estimación de la frecuencia con que pueden presentarse algunas sequías ocurridas en el pasado para lo cual se estima el período de retorno de los peores eventos observados en las series cronológicas disponibles. La caracterización del comportamiento de la oferta de recursos hídricos superficiales en la zona tiene por objeto detectar las condiciones de escasez que pueden afectar el desarrollo productivo o tener impactos económicos y sociales adversos, como manera de priorizar los lugares que requieran acciones específicas de gestión de los recursos hídricos, ya sean trasvases o almacenamientos, y de proporcionar una idea cuantitativa de la magnitud de tales acciones, para lo cual este análisis debería necesariamente complementarse con otros que aborden aspectos económicos y sociales.

La zona central de Chile se ubica en la transición climática entre el norte árido y el sur húmedo templado. En

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile Casilla 306, Correo 22. Santiago, Chile

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.4 Num.4 (diciembre 1997), páginas 37-46, recibido el 1 de julio de 1997 y aceptado para su publicación el 3 de diciembre de 1997. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

ella se concentran las principales actividades económicas del país, las que se ven expuestas a la acción de sequías frecuentes. Para identificar y caracterizar cuantitativamente las sequías hidrológicas recientes en la zona central de Chile, se ha seleccionando como oferta de agua las disponibilidades de recursos hídricos superficiales en unidades de análisis convenientemente definidas, representándola en cada una de ellas por series cronológicas de gastos medios mensuales de 45 años de extensión, entre 1950 y 1994. Como demanda se consideran caudales mensuales para diferentes probabilidades de excedencia y la regionalización se aborda observando simultáneamente el comportamiento de los recursos en toda la zona en estudio, en un esquema tridimensional de déficit, espacio y tiempo. Esquemas similares han sido aplicados en diversas áreas continentales (Yevjevich *et al.*, 1983) y específicamente en Chile para la caracterización de sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas (Fernández y Velásquez, 1987; Fernández *et al.*, 1988; Fernández *et al.*, 1990; Fernández *et al.*, 1996).

CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE SEQUÍAS

Las sequías son el resultado de un proceso complejo en el que intervienen tanto la oferta, o disponibilidad de recursos hídricos, como la demanda, o necesidades de un sistema de aprovechamiento en particular. La primera está gobernada por fenómenos naturales y depende de las condiciones climatológicas, meteorológicas o hidrológicas del lugar. La segunda es función de las actividades humanas y los niveles de desarrollo o utilización del agua. Para un análisis cuantitativo y objetivo de ellas se recurre a la definición propuesta por Yevjevich (1967), según la cual, dada una serie cronológica que representa

la oferta de agua y otra la demanda, una sucesión de períodos en que la oferta no satisface la demanda puede considerarse como una sequía. Desde el punto de vista de la caracterización estadística de series cronológicas este tipo de análisis también se denomina como de procesos de truncamiento o análisis de sucesiones (Yevjevich, 1972; Schwager, 1983; Tallaksen *et al.*, 1997). Para la aplicación práctica de este esquema Dracup *et al.*, (1980a, 1980b), proponen definir cuatro condiciones básicas que incluyen la selección de la variable que representa la oferta, la caracterización numérica de la demanda, el intervalo de tiempo para discretizar las series y la forma en que se abordan aspectos regionales. Siguiendo estas recomendaciones las sequías en un punto se pueden caracterizar observando una serie temporal de oferta menos demanda como la que se muestra en la *Figura 1*. Una sucesión de intervalos con deficit en los cuales la variable oferta menos demanda se mantiene negativa, es decir durante los cuales la oferta no alcanza a satisfacer la demanda, define una sequía. Cada uno de estos eventos se puede caracterizar cuantitativamente mediante varias propiedades. Algunas de ellas son evidentes como ocurre con el instante de inicio, el de termino y la duración. El tiempo que transcurre desde el inicio de la serie hasta que se completa, o termina por primera vez, una sequía de propiedades dadas es un atributo de interés relacionado con la frecuencia o período de retorno de las sequías. En particular el valor esperado, en sentido estadístico, del mencionado intervalo corresponde al período de retorno de esa sequía (Fernández y Salas, 1994). Otras propiedades son la intensidad de la sequía, que corresponde al valor máximo del déficit, y la magnitud representada por el volumen total de agua faltante. Todas estas propiedades se pueden generalizar al caso en que se considere una región.

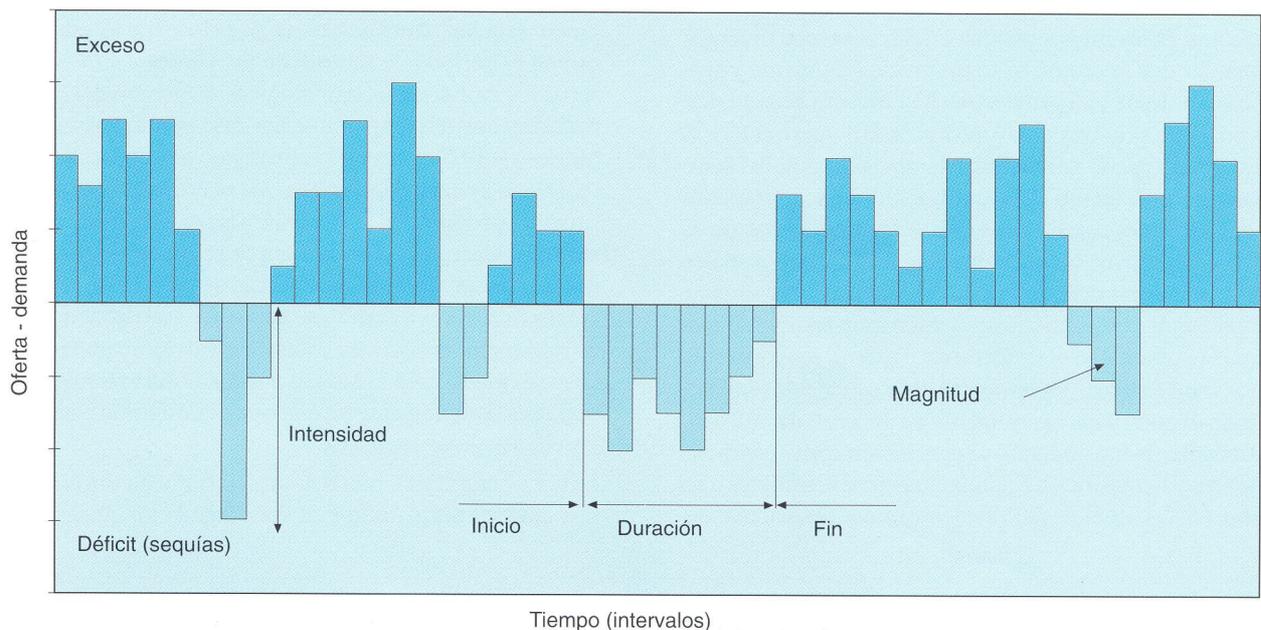


Figura 1. Serie cronológica de oferta menos demanda en un lugar para la identificación y caracterización de las sequías según el método de truncamiento o de las sucesiones.

Para extender estos conceptos a una región y asignar un valor numérico a estas propiedades supóngase que se tiene un plano definido por los ejes espacio ($j = 1, 2, \dots, M$) que corresponde a lugares conocidos de la región ordenados arbitrariamente, y tiempo ($t = 1, 2, \dots, N$) que representan una secuencia de meses o años consecutivos durante los cuales se efectúa el análisis. A cada uno de estos puntos de coordenadas (j, t) se le asigna un valor del déficit, o falta de recursos, calculado mediante:

$$F_{j,t} = \begin{cases} D_{j,t} - O_{j,t} & \text{si } D_{j,t} > O_{j,t} \\ 0 & \text{si } D_{j,t} \leq O_{j,t} \end{cases} \quad (1)$$

donde $D_{j,t}$ representa la demanda y $O_{j,t}$ la oferta en el lugar j durante el intervalo t . En este plano las sequías quedan identificadas por conjuntos de pares (j^*, t^*) para los cuales la oferta no alcanza a satisfacer la demanda, rodeados por otros puntos en los cuales el déficit es cero. Es decir una sequía corresponde a una agrupación espacio temporal de varios puntos o instantes con déficit. Esta agrupación puede darse en el espacio, si en un mismo instante el déficit ocurre en varios lugares contiguos, o en el tiempo, si en un lugar el déficit se prolonga durante varios intervalos sucesivos, o en ambos, cuando en una región, o conjunto de lugares cercanos, la escasez se mantiene durante varios intervalos en todos ellos, no necesariamente de igual duración.

La duración total de la sequía regional corresponde al tiempo máximo que la condición de déficit ha permanecido en la zona afectada, calculable como:

$$T = \text{Max}(t^*) - \text{Min}(t^*) \quad (2)$$

La extensión total corresponde a una forma de contabilizar los lugares afectados y puede calcularse como la distancia entre los puntos más alejados afectados por la sequía, o la suma de las áreas representativas de los lugares afectados:

$$E = \sum_{j \in j^*} A_j \quad (3)$$

Siendo A_j el área de influencia asignada al lugar j .

La intensidad corresponde al valor máximo del déficit:

$$I = \text{Max}\{F_{j,t}\} \text{ donde } j, t \text{ pertenecen al conjunto } (j^*, t^*) \quad (4)$$

Una medida de la severidad de la sequía es su magnitud, que corresponde al volumen total necesario para suplir el déficit de agua:

$$M = \sum_{j \in j^*} \sum_{t \in t^*} F_{j,t} \quad (5)$$

Varias de estas propiedades no son independientes entre sí y además sus valores están estrechamente vinculados al nivel de demanda o de explotación de los recursos en una región.

PROPIEDADES DE LA ZONA EN ESTUDIO

Chile se ubica en el extremo sur occidental de América, entre el océano Pacífico y la cordillera de Los Andes. La zona en estudio específicamente abarca sólo la parte central de Chile, entre los paralelos 26 y 38 de latitud sur, inmediatamente al sur del desierto de Atacama hasta la cuenca del Bio Bio (Figura 2). Presenta una extensión de 1350 km. de norte a sur y aproximadamente 200 km. de ancho entre la cordillera y el mar. Al norte de esta zona se encuentra el desierto de Atacama en el cual la escasez de agua superficial es casi total. Hacia el sur existe una relativa abundancia que hace pensar en un menor impacto de las sequías sobre las actividades productivas. Esta zona concentra la mayor parte de las actividades productivas del país intensivas en el uso de recursos hídricos. Efectivamente, en ella habita prácticamente el 70% de la población de país, se encuentra la gran mayoría de la superficie regada con 1,15 millones de hectáreas, y casi el total de los 4500 Mw de la potencia hidroeléctrica instalada. 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, de pendientes relativamente altas y pequeñas planicies de inundación.

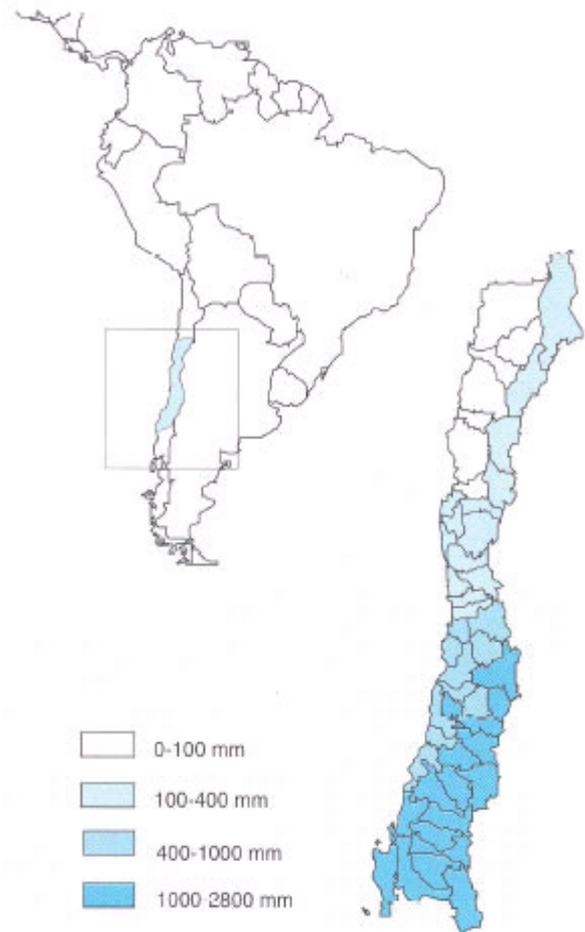


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y de las unidades homogéneas de análisis. Distribución espacial de las precipitaciones medias anuales

Para el estudio de las sequías hidrológicas se ha dividido toda la zona en 48 unidades de análisis, de manera que pueda considerarse en cada una de ellas un comportamiento homogéneo de los recursos hídricos superficiales, teniendo en cuenta los límites naturales de las cuencas, la división administrativa, la ubicación de las principales demandas y las secciones en que se registran los caudales disponibles en cada unidad. En cada una de ellas la oferta se ha caracterizado por una sola serie cronológica, calculada en cada caso en base a series de datos medidos en las cuencas involucradas en la unidad, de manera que representen los aportes totales en condiciones de régimen natural.

Las precipitaciones en esta región varían de manera impresionante tanto de norte a sur como de este a oeste,

(DGA, 1987). Esto último es producto de la presencia de la cordillera de Los Andes que es la gran reguladora de los recursos hídricos superficiales en toda la región. El incremento de la precipitación de norte a sur va desde unos 10 mm hasta más de 2000 mm anuales, con una alta variabilidad temporal, de manera que la parte norte puede considerarse como una región semidesértica y la del sur definitivamente húmeda. La *Figura 3* muestra valores medios de la precipitación anual y su coeficiente de variación en función de la latitud de acuerdo a los registros de varias estaciones pluviométricas en la zona.

En el norte los recursos son pocos y con una gran variabilidad interanual. A medida que aumentan las precipitaciones hacia el sur disminuye su variabilidad, de manera que además de ser más abundantes, los recursos

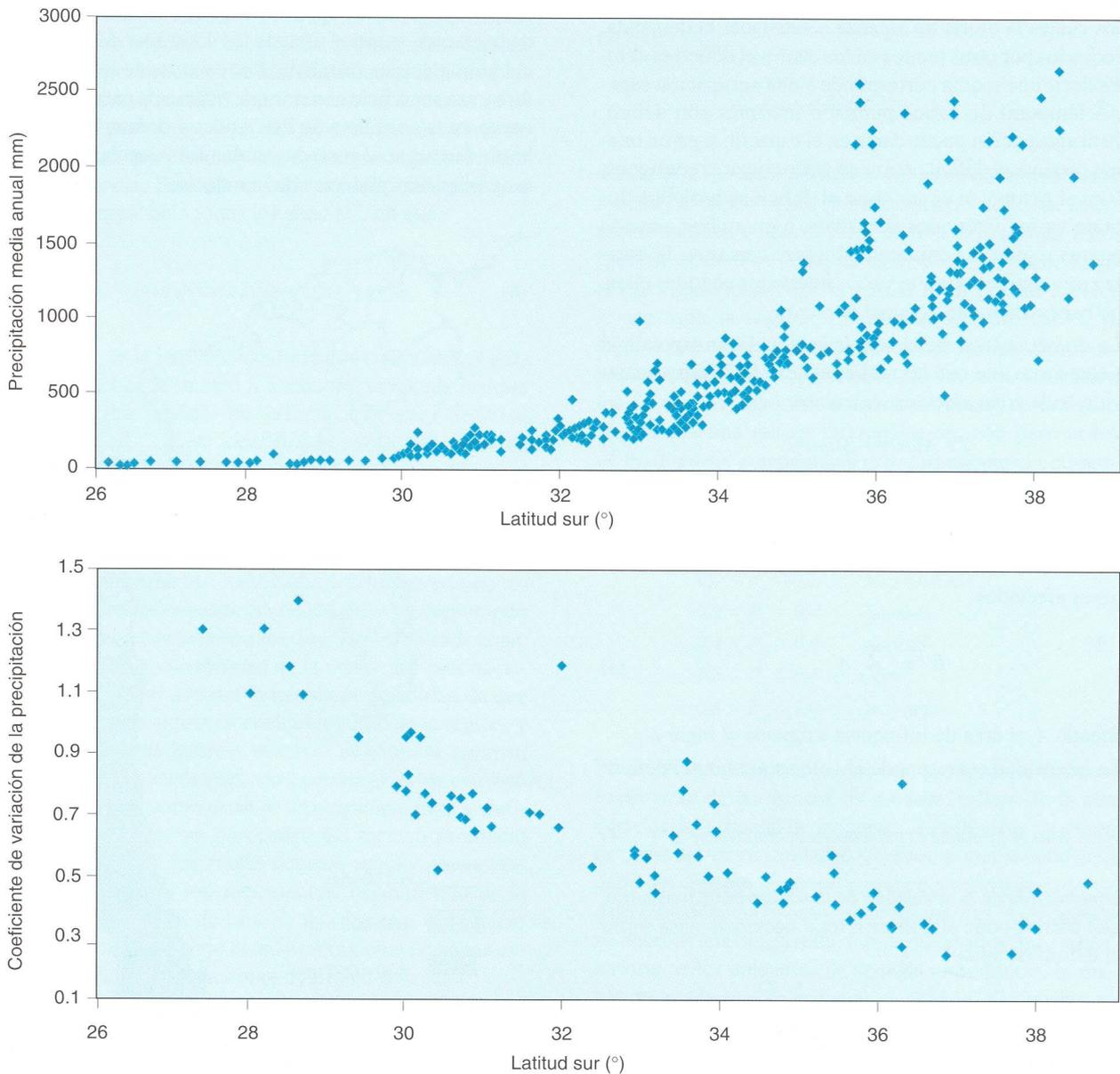


Figura 3. Comportamiento de la precipitación media anual (arriba) y del coeficiente de variación respectivo (abajo) en función de la latitud, según registros de estaciones pluviométricas de la zona. La variación con la longitud, de Este a Oeste, se refleja en la dispersión de los puntos para una misma latitud.

son más seguros. La *Figura 4* muestra la distribución de la precipitación total entre escurrimiento y evapotranspiración en 15 de las principales cuencas ordenadas de norte a sur, en la cual se aprecia que la precipitación total prácticamente se transforma en evaporación en las cuencas del norte y sólo al sur del paralelo 32 se genera escurrimiento, o un exceso de precipitación, apreciable, dejando en evidencia el carácter transicional de la zona en estudio. Los escurrimiento en los ríos también presentan una gran variación en cuanto a las propiedades de las series cronológicas de caudales medios anuales y mensuales. En el norte se trata de ríos de escaso caudal específico 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 periodos de estiaje anual. La *Figura 5* compara una serie cronológica de caudales medios mensuales de un río del norte y otro del sur en los cuales se pueden apreciar estas diferencias de comportamiento.

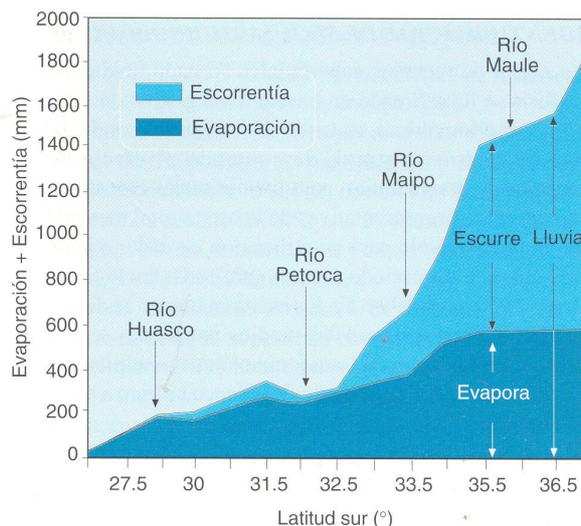


Figura 4. Distribución de la precipitación total entre escurrimiento y evapotranspiración en las cuencas principales en función de la latitud. (DGA, 1987).

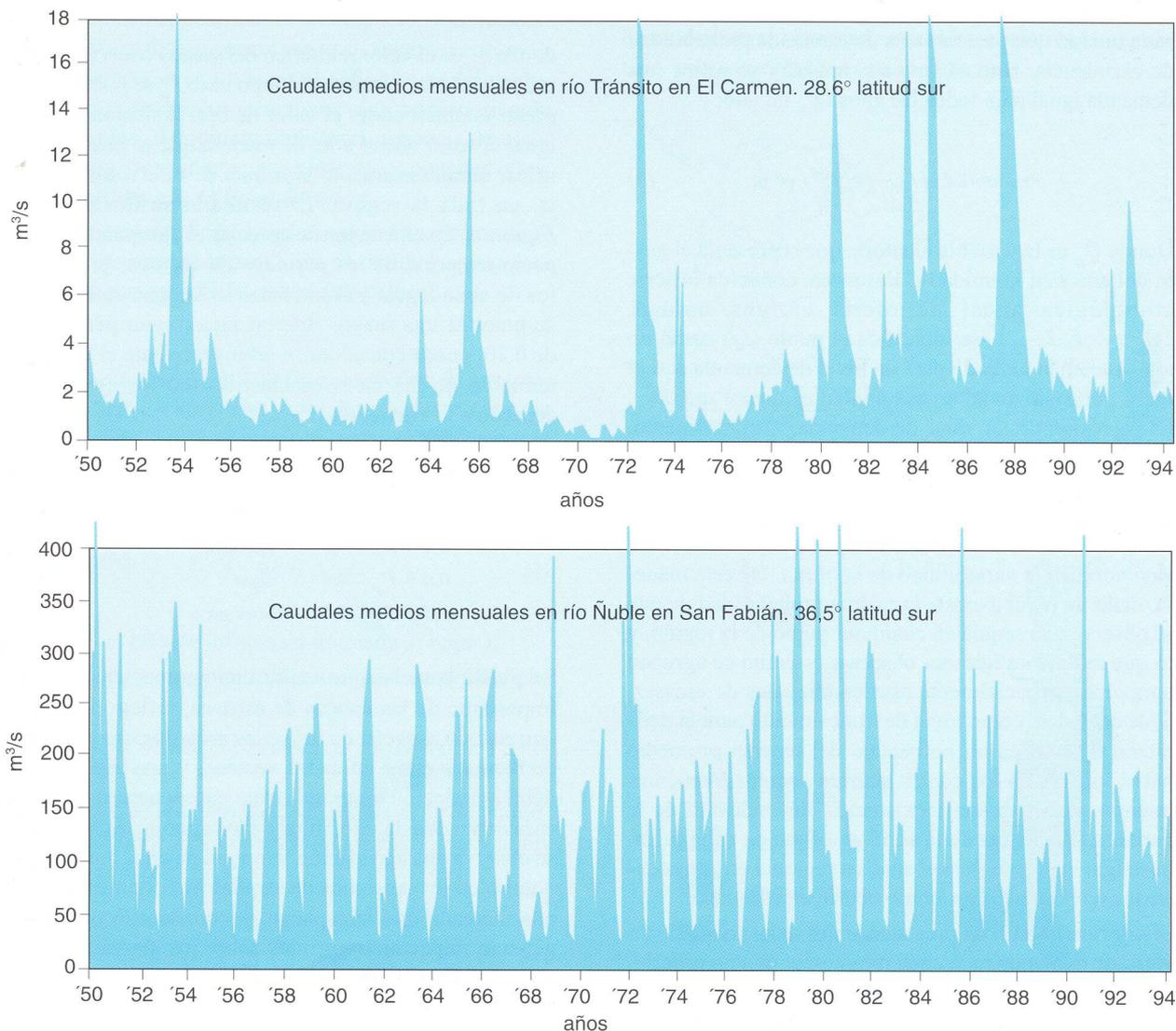


Figura 5. Comparación de series cronológicas típicas de caudales medios mensuales en ríos de la zona norte, arriba, y sur, abajo

IDENTIFICACIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

La oferta de recursos superficiales en cada unidad de análisis se ha estimado en base a los registros de estaciones fluviométricas, tratando de reflejar las condiciones de régimen natural, descontando el efecto de embalses y derivaciones, para formar series cronológicas agregadas representativas de la oferta total mensual de agua disponible para su utilización en cada unidad, que abarque un período común para todas incluyendo desde 1950 hasta 1994. En los casos en que no se dispone de registros los caudales medios mensuales se han estimado en base a una transformación de precipitación en escorrentía con un modelo de balance hídrico a escala mensual.

Para identificar los períodos de escasez, o sequías, disponiendo de la oferta de agua superficial en cada una de las unidades, se ha considerado la definición de sequías propuesta por Yevjevich (1967) con las observaciones metodológicas de Dracup *et al.*, (1980a, 1980b), como ha sido descrito anteriormente. Se han identificado sequías a nivel anual y mensual. En el primer caso la demanda se ha supuesto igual a un valor del gasto anual de oferta en cada unidad que presenta una determinada probabilidad de excedencia. Esto es, en cada unidad *j* se define una demanda igual para todos los años D_j^α tal que:

$$Probabilidad(Q_{j,t} \geq D_j^\alpha) = \alpha \quad (6)$$

Donde $Q_{j,t}$ es la variable aleatoria que representa el gasto del año *t* en la unidad *j*. Entonces, conocida la serie cronológica anual de oferta en una unidad, $\{Q_{j,t}; t = 1, 2, \dots\}$, se identifica el punto (t, j) como un año seco en la unidad *j* para un nivel de demanda α si el valor del gasto anual en esa unidad es menor que D_j^α . La selección de un valor de demanda, o truncamiento, ligado a la probabilidad de excedencia de la serie de oferta permite uniformar las condiciones de sequía en una región climatológicamente no homogénea, incorporando no sólo el nivel de los recursos disponibles en cada zona, sino también la variabilidad de la oferta. De esta manera, dado un nivel α existe la misma probabilidad de que se observe una sequía en cualquier punto de la región, y lo que realmente interesa observar es como se agrupan temporal y espacialmente esas condiciones de escasez. Si se considera como nivel de truncamiento para la definición de sequías un porcentaje del recurso promedio habrá lugares en los cuales ocurren sequías frecuentes mientras en otros son inexistentes, dependiendo de la varianza estadística de la serie de oferta en cada lugar, haciendo más complejo el análisis regional en zonas extensas no homogéneas, como ocurre en este caso.

Similamiente para valores mensuales se ha adoptado un valor de demanda para cada mes con el mismo criterio. En este caso la demanda es periódica, dada por $D_{j,\tau}^\alpha$ con $\tau = 1, 2, \dots, 12$, de manera que se cumple para cada mes en cada unidad que:

$$Probabilidad(Q_{j,t} \geq D_{j,\tau}^\alpha) = \alpha \quad (7)$$

donde $Q_{j,\tau}$ es la variable aleatoria que representa el gasto del mes τ en la unidad *j*. Las sequías así identificadas, tanto anuales como mensuales, pueden caracterizarse de acuerdo a sus propiedades de duración, magnitud, intensidad y frecuencia entre otras.

La selección de un valor α permite identificar sequías de ese nivel en toda la región. Sin embargo una visión general de las características espacio temporales de los recursos superficiales relacionadas con su disponibilidad, y por lo tanto con las sequías en cuanto a su aleatoriedad, se obtiene al calcular para cada unidad, en cada año de la serie cronológica de oferta disponible, la probabilidad de excedencia del caudal medio anual registrado, y presentar estos valores en un gráfico de espacio, unidades 1 a 48, y tiempo, años 1950 a 1994. Esto es, se estima para cada unidad $j = 1, 2, \dots, 48$, y cada año $t = 1950, 1951, \dots, 1994$, la probabilidad $P_{j,t}$ de excedencia del gasto observado en el año *t* en esa unidad *j*, tal que:

$$P_{j,t} = Probabilidad(Q_{j,t} > q_{j,t}) \quad (8)$$

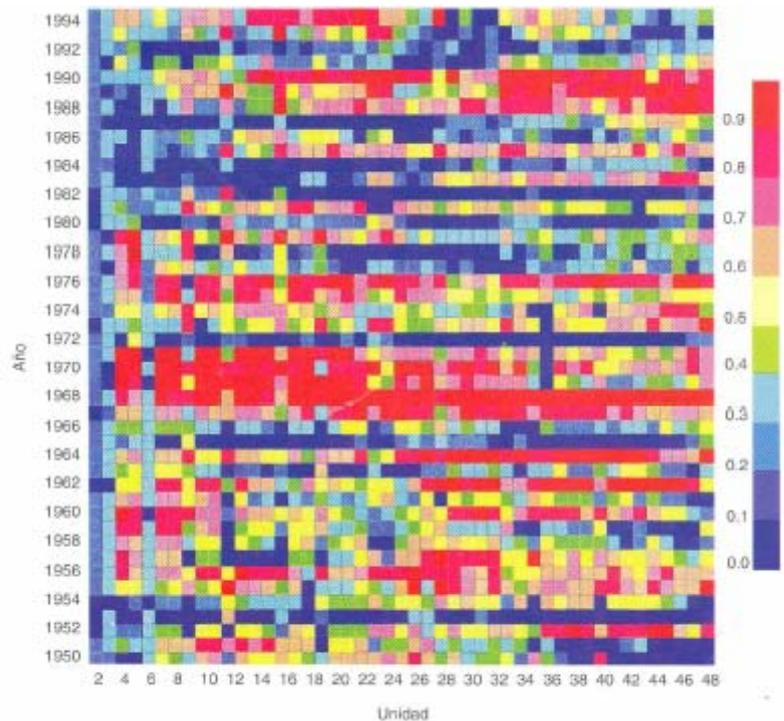
donde $q_{j,t}$ es el valor numérico del gasto observado en la unidad *j* el año, o mes, *t*. En todo caso $P_{j,t}$ se puede interpretar también como el valor de α si la demanda fuera igual al valor observado, de manera que se puede identificar simultáneamente la sequía de diferentes niveles α en toda la región. El resultado se ilustra en la Figura 6. En ella se puede apreciar el agrupamiento espacio-temporal de los períodos de escasez, y también los de abundancia y los normales. 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:

$$\begin{array}{ll} 0,0 < P_{j,t} < 0,2 & \text{muy húmedo } 0,2 \\ 0,2 < P_{j,t} < 0,4 & \text{húmedo} \\ 0,4 < P_{j,t} < 0,6 & \text{normal} \quad (9) \\ 0,6 < P_{j,t} < 0,8 & \text{seco} \\ 0,8 < P_{j,t} < 1,0 & \text{muy seco} \end{array}$$

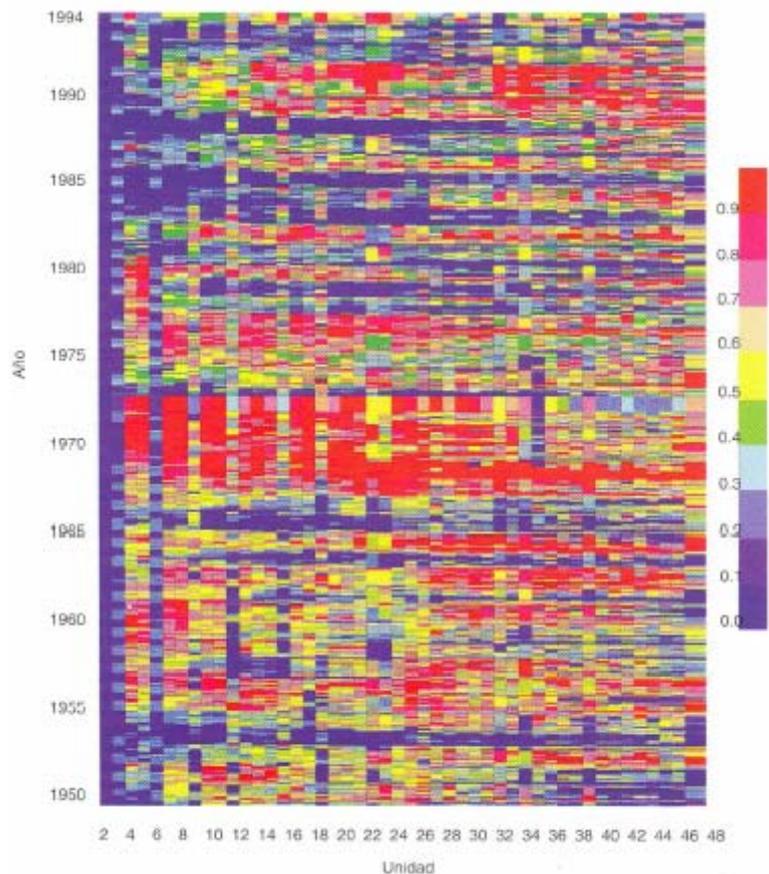
Se puede apreciar que existe una agrupación regional importante de las épocas de escasez, reflejo de la alta correlación espacial de las series cronológicas de oferta de recursos entre unidades vecinas, y una mucho más débil agrupación temporal como consecuencia de la escasa dependencia interanual de los aportes. Aún cuando se observa una agrupación temporal de años muy secos, notoria en los episodios de sequías importantes, es menos marcada que la espacial, y cuando ello ocurre 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 6 como manchas de forma alargada en el sentido espacial y reducida en el temporal. Además el hecho de que las recesiones sean más prolongadas que las crecidas se tra-

duce en que las épocas de abundancia afectan gran parte del territorio pero en períodos cortos y generalmente aislados. 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 (1988-1990), 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.

La *Figura 7* muestra resultados similares a los descritos pero considerando intervalos de tiempo mensuales y tiene por objeto apreciar el efecto de la disponibilidad de recursos sobre actividades que tienen una gran estacionalidad, como ocurre con la agricultura de riego. A pesar de que las sequías aparecen más irregulares es posible apreciar un agrupamiento espacial y temporal de las condiciones de escasez similar al observado en el caso en que se utilizan intervalos de tiempo anuales. En este caso se aprecia con más notoriedad que los períodos de abundancia de recursos son bastante más cortos y concentrados temporalmente que los de escasez, como consecuencia de la brevedad de las crecidas, durante las cuales se producen los grandes aportes. También adquieren relevancia aspectos de detalle en la identificación de sequías por el método del truncamiento de series cronológicas de oferta, como es el caso de si una misma condición de sequía termina cuando la oferta sobrepasa a la demanda durante períodos breves de tiempo, dentro de una condición de escasez generalizada, de manera que conviene agrupar, y considerar como una sola, las sequías separadas por intervalos de pocos meses. Este tema ha sido abordado por Zelenhasic y Salvai (1987) y Tallaksen *et al.* (1997) entre otros. Por ahora en este artículo interesa observar en general el comportamiento espacio temporal de estos períodos de escasez en una región relativamente extensa. Adicionalmente se aprecia que existen períodos más amplios de características singulares. Por ejemplo desde 1967 a 1976 es una década especialmente seca, mientras la década siguiente de 1977 a 1987 concentra lo más húmedo del registro con pocas sequías aisladas y breves. Frente a estas características queda la impresión que para definir las condiciones normales en una región como esta, se requieren series cronológicas relativamente largas, idealmente de más de 40 años.



Figuras 6 y 7. Identificación de sequías en base a la distribución espacio-temporal de la probabilidad de excedencia de la oferta anual de recursos hídricos en todas las unidades de análisis (1,2,3,...,48) durante todo el plazo de estudio (1950,...., 1994).



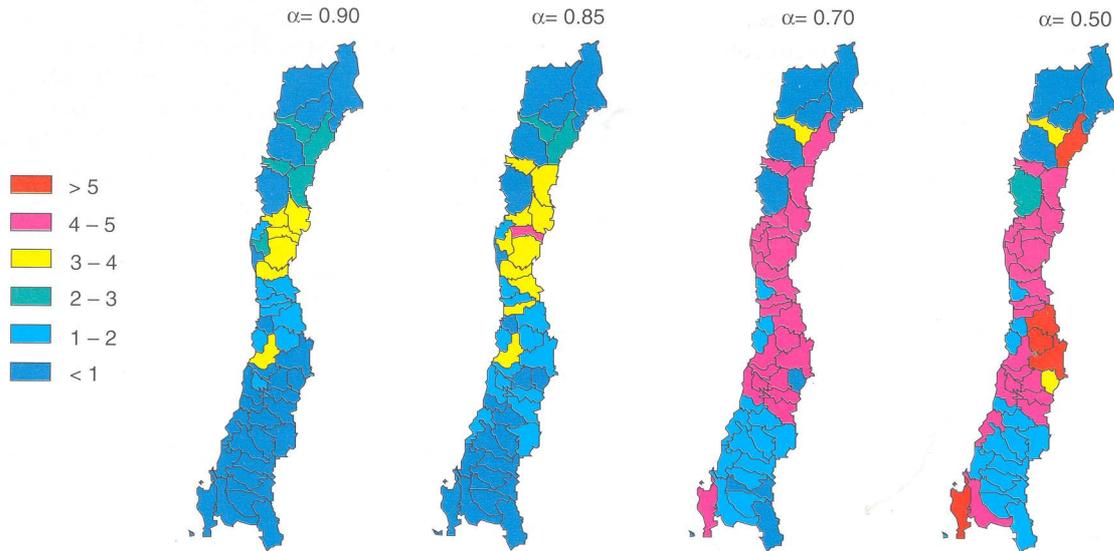


Figura 8. Distribución espacial de la duración de sequías con los aportes de recursos de 1967 a 1972, para diferentes niveles de demanda crecientes

Al efectuar un análisis regional una misma sequía, por ejemplo la de fines de los años 60, tiene una sola duración total, sin embargo presenta diferentes duraciones en cada una de las unidades de análisis afectadas, dependiendo a su vez del nivel de demanda considerado. La Figura 8 muestra la distribución espacial de las duraciones, en años, de la mencionada sequía para niveles de demanda de $\alpha=0,90$; $0,85$; $0,70$; y $0,50$.

El primer caso corresponde a una demanda baja, equivalente en cada unidad a caudales que tienen una probabilidad de excedencia de 0,90. Con esta demanda y la oferta registrada en esos años, se produce una sequía que afecta solo a las unidades centrales con duraciones de 2 y 3 años. Si la demanda aumenta a un nivel 0,85, que es la que habitualmente se considera para desarrollar proyectos de riego en la región, la sequía se extiende a unidades vecinas hacia el sur. Para demandas de 0,70 prácticamente toda la zona central del país queda involucrada y las duraciones en las unidades más afectadas llegan a 5 años. Finalmente si la demanda es igual al promedio de los recursos disponibles, toda la zona queda en condiciones de sequía con duraciones que superan los 5 años en varias unidades. En resumen la figura muestra lo que podría ocurrir en la zona central de Chile si se vuelven a presentar condiciones de escasez de oferta como las observadas a fines de los 60 y principios de los 70, y el desarrollo de la región presenta niveles crecientes de uso de los recursos hídricos superficiales. Aquí queda de manifiesto una de las características de las sequías, cual es que a medida que se desarrolla una zona las sequías son más extensas y más largas, si esos incrementos en las demandas no se ven aparejados con aumentos en los volúmenes de regulación o de trasvases entre cuencas.

La distribución espacial de las intensidades más agudas y las mayores magnitudes de las sequías detectadas en

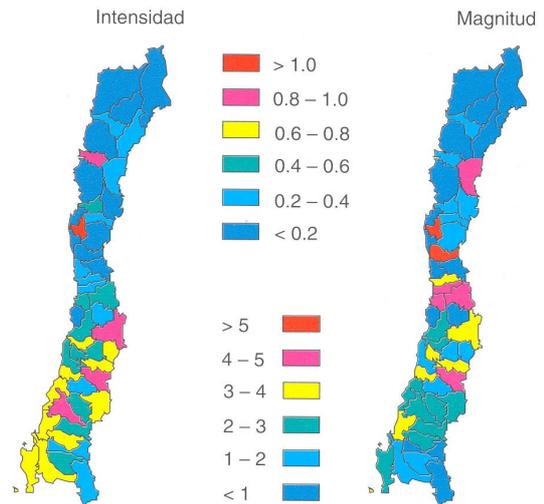


Figura 9. Distribución espacial de los valores relativos de las peores condiciones detectadas de intensidad y magnitud de las sequías observadas entre 1950y 1994 para un nivel de demanda de $\alpha=0,85$.

los 45 años de análisis en cada una de las unidades, para un nivel de demanda del 0,85 se muestran en la Figura 9. Las propiedades mostradas en cada esquema no necesariamente corresponden a la misma sequía. Ambas propiedades se comparan en términos relativos a la disponibilidad global en cada unidad. La intensidad, relacionada con las necesidades de trasvases, ya que puede entenderse como el máximo de caudal extra que sería necesario aportar a la unidad durante el mes de mayor déficit de la sequía para suplir la demanda, se expresa en relación al caudal medio anual de esa misma unidad. Los peores valores relativos de intensidad son del orden

del 80 al 100% del caudal medio anual, y ocurren preferentemente en las unidades australes de la zona estudiada. En relación a las magnitudes, que comparan el volumen total necesario para paliar una condición de déficit, también se expresan como una proporción de los aportes anuales en cada unidad. Ellos reflejan el volumen de agua que sería necesario tener almacenado para sobrepasar las peores condiciones de sequía observadas en los últimos 45 años. Estos valores en general son del orden de 2 a 3 veces al aporte anual promedio, llegando en el peor de los casos a superar las 4 veces ese aporte.

PERÍODO DE RETORNO

La estimación de la probabilidad de ocurrencia de sequías es un tema que ha recibido menos atención en la literatura hidrológica que su similar para el caso de crecidas. Muchos sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos se diseñan asumiendo un riesgo de que operativamente se presenten fallas, aunque no destructivas, cuando ocurren períodos prolongados de escasez de recursos. Este riesgo se estima en general en base a estudios de simulación del sistema frente a diferentes escenarios. El cálculo del período de retorno de sequías hidrológicas anuales, y por lo tanto del riesgo de que ocurran durante la vida útil del sistema, presenta la dificultad de que se trata de fenómenos que tienen duraciones superiores a un período y además la variable que caracteriza la oferta o disponibilidad tiene dependencia estadística no despreciable, de manera que no son directamente aplicables los procedimientos de cálculo desarrollados para estimar los períodos de retorno de las crecidas que pueden considerarse como instantáneas e independientes. Para superar estas dificultades Saldarriaga y Yevjevich (1970), propusieron la idea de período representativo en reemplazo del período de retorno y desarrollaron algoritmos de cálculo para el caso de series autorregresivas estacionarias. Sen (1980) presenta un procedimiento para calcular probabilidades asociadas a sequías críticas en procesos con cierta estructura de dependencia conocida. Recientemente se han propuesto algoritmos de cálculo recursivos para determinar el período de retorno de sucesiones de duración dada en series con dependencia, como ocurre con las series de caudales medios anuales (Fernández y Salas, 1994; Fernández, 1995), basados en un algoritmo desarrollado por Schwager (1983) para sucesiones en series con dependencia markoviana.

Estos algoritmos consideran las sequías como una corrida, o sucesión de unidades de tiempo seguidas, en las cuales la oferta no alcanza a satisfacer la demanda. El largo de la sucesión es igual a la duración de la sequía. El tamaño de la demanda se relaciona a la magnitud de la sequía. Lo que se estima es el período de retorno para una sucesión de largo similar, dada una serie cronológica que presenta las mismas propiedades estadísticas de la oferta de agua. En la estimación del período de retorno influyen tres aspectos básicos: la duración de la sequía, la probabilidad de que la demanda sea satisfecha y la dependencia de la serie oferta. Manteniendo los otros

aspectos inalterados, a mayor duración de una sequía mayor es su período de retorno. Similarmente cuanto mayor es la probabilidad de excedencia de la demanda también el período de retorno es mayor. La dependencia de la serie de oferta se puede medir con el coeficiente de autocorrelación de la serie cronológica de caudales. Este factor tiene el siguiente efecto: si la serie es independiente, coeficiente igual a cero, es relativamente simple que se pase de un estado normal a uno de escasez y viceversa; en cambio si la dependencia es importante, coeficientes distintos de cero y positivos, es fácil que la serie se mantenga en un mismo estado, de manera que cuando comienza un período de escasez, puede fácilmente prolongarse en el tiempo. De esta manera en lugares con alta dependencia es más probable que se presenten sequías prolongadas, o sequías de igual duración y demanda tienen períodos de retorno menores que en lugares en que la oferta es independiente.

Con estos algoritmos recursivos se han estimado los períodos de retorno de las dos sequías más importantes detectadas en cada una de las unidades para una misma demanda. Muchas veces se considera que el período de retorno de la peor sequía detectada en un registro de longitud dada es igual al largo del registro, lo que no es cierto ya que ello está fuertemente influido por la variabilidad muestral. Además estas condiciones críticas se consideran muchas veces en el diseño de sistemas que aprovechan estos recursos, sin que se establezca el riesgo que se asume con ello. Parece entonces importante para la gestión de los recursos hídricos en la zona, establecer el período de retorno de este tipo de eventos para tener un valor objetivo de la probabilidad de que se vuelvan a presentar tales condiciones en el futuro inmediato. El procedimiento antes descrito se aplica a cada unidad de análisis, sin considerar la simultaneidad es-

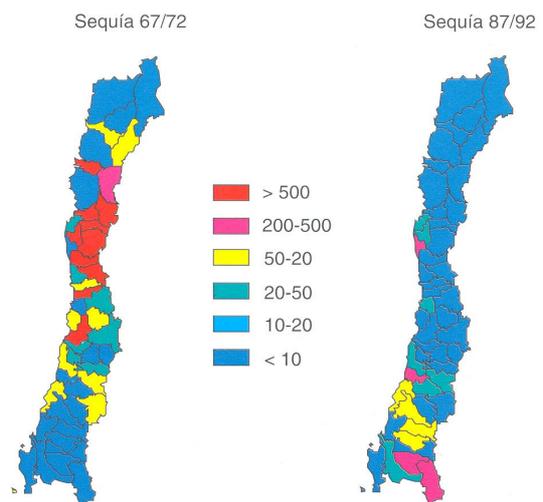


Figura 10. Período de retorno de las peores sequías observadas en el registro histórico reciente en cada unidad de análisis, para demandas con probabilidad de excedencia de $a = 0,85$.

pacial, o de ocurrencia contemporánea en otras unidades de la región. Para las peores sequías observadas en el registro de 1950 a 1994, que corresponden a la de fines de los 60 y de fines de los 80, se han calculado los períodos de retorno en cada una de las unidades de análisis, considerando un nivel de demanda equivalente al gasto medio anual con probabilidad de excedencia 0,85. Estos resultados se muestran en la *Figura 10*. Se aprecia que algunas de las condiciones observadas en las unidades centrales durante la sequía de fines de la década de 1960 presentan una muy baja probabilidad de ocurrencia, no así las observadas durante la sequía de fines de los 80, las que tendrían un menor período de retorno y por lo tanto pueden ser más habituales en la zona.

CONCLUSIONES

Las sequías son fenómenos complejos de la realidad hidrológica de una región para las cuales existen procedimientos objetivos de análisis y estudio cuantitativo que permiten identificarlas y cuantificar sus principales propiedades. En este artículo se muestran resultados de la aplicación de estos métodos en la identificación de sequías recientes en la zona central de Chile. Ello requiere disponer de series cronológicas que representen la oferta de agua en la zona, definir la demanda de manera que refleje condiciones homogéneas de uso para toda la región, seleccionar un intervalo para la discretización de estas series y abordar aspectos específicos relativos a la regionalización del estudio. Si bien la zona central de Chile tiene ciertas propiedades de linealidad espacial que facilita la presentación gráfica de algunos resultados, como son los mapas espacio-temporales de disponibilidad de recursos a escala anual y mensual, los métodos expuestos son aplicables para el estudio de las sequías en amplias regiones continentales de diferente clima.

AGRADECIMIENTOS

Los aspectos teóricos de este artículo forman parte de un estudio sobre "Período de retorno y riesgos de eventos hidrológicos complejos" desarrollado en el marco del proyecto FONDECYT 1950983. Algunos de los resultados numéricos de su aplicación a la zona central de Chile que se muestran se han obtenido de un estudio sobre "Impacto Económico de las Sequías Hidrológicas" elaborado para la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

REFERENCIAS

Beran, M.A. y Rodier, J.A. (1985) Hydrological aspects of droughts. Studies and reports in hydrology, N39. Unesco, WMO.

D.G.A., (1987) Balance Hídrico de Chile. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

Dracup, J.A., Lee, K.S. and Paulson, E.G. (1980a) On the Definition of Droughts. Water Resources Research, vol. 16-2:297-302.

Dracup, J.A., Lee, K.S. and Paulson, E.G. (1980b). On the Statistical Characteristics of Droughts Events. Water Resources Research, vol. 16-2:289-294

Fernández, B. (1995) Return Period and Risk of Low Flows. Hydra 2000, XXVIth IAHR Congress, London. J. Gardiner, editor. Vol. 4:42-47.

Fernández, B. y Velasquez, M. (1987) Identificación y caracterización de sequías meteorológicas en la zona central de Chile. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Vol. 2: 15-28.

Fernández, B., Carvallo, A. y Donoso, E. (1988) Evaluación del riesgo de sequías en cultivos de secano. XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba, 5-9 Julio. Vol. 2:400-411.

Fernández, B., Gebhardt, A. y Vial, A. (1990) Características de las sequías hidrológicas en Chile. XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay, Noviembre, Vol. 2: 827-836.

Fernández, B. y J.D. Salas. (1994) Período de Retorno y Riesgo de Eventos Hidrológicos. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile. Noviembre. Vol. 3:221-232.

Fernández, B., Benítez, D. y C. Salazar. (1996) Identificación de sequías recientes en Chile. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador. 21-25 Oct., Vol. 2: 77-87.

Hernández, M.E. y Llamas, M.R. (1995) Contribución al conocimiento de las sequías de Madrid. Ingeniería del Agua, Vol. 2, N2:17-36.

Saldarriaga, G. and V. Yevjevich, (1970) Application of run length to hydrological series. Hydrology Paper 40, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Schwager, S.J. (1983) Run Probabilities in Sequences of Markov Dependent Trials. JASA, 78:168-175.

Sen, Z. (1980) Statistical analysis of hydrologic critical droughts. J. of Hyd. Div. ASCE. Vol 106 (HY1), 99-115.

Tallaksen, L.M., Madsen, H. and B. Clausen, (1997) On the definition and modeling of streamflow drought duration and deficit volume. Hyd. Sciences Journal, Vol. 42 (1): 15-33.

Yevjevich, V. (1967) An Objective Approach to Definition and Investigation of Continental Droughts. Hydrology Paper 23, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Yevjevich, V., (1972) Stochastic processes in Hydrology. WRP; Littleton, Colorado.

Yevjevich, V, L. Cinha, and E. Vlachos. (1983) Coping with Droughts. Water Resources Publication. Littleton, Colorado.

Yevjevich, V., Hall, W.A. and J.D. Salas. Editores. (1978) Drought Research Neds. WRP, Littleton, Colorado.

Zelenhasic, E. and Salvai, A. (1987) A method of streamflow drought analysis. Water Resources Research. Vol. 23 (1): 156-168.