

Modelo de Evaluación Probabilística de los Recursos Hídricos Superficiales

J. M. Molina¹, L. A. Gurovich² y E. Varas²

¹ Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia
Cra. 32 Chapinero vía Candelaria, Palmira Colombia AA237

² Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal y

Facultad de Ingeniería, respectivamente. Pontificia Universidad Católica de Chile. Casilla 306-22, Santiago, Chile

Abstract

J. M. Molina, L. A. Gurovich, and E. Varas. A probabilistic model to assess surface water resources.

This paper outlines a probabilistic modeling proposal of the components and processes involved in surface water availability and demand of an irrigation system of Chile's central zone. The objective is aimed to develop a methodology for field water balance studies oriented to optimize available water resources allocation. The model includes relevant variables related to soil, crop, water availability, climatic data and hydraulic infrastructure. Hydrologic modeling tools are used for estimating water availability, describing time and spatial variation of surface water resources. A probability distribution model is applied for estimating flow rates associated to occurrence probabilities. Also, a time and spatial model for water requirements for the irrigation system studied has been developed, calculating different probabilities of exceedence based on the Penman-Monteith equation. This model was recently adopted and recommended by the FAO for the calculation of the reference crop evapotranspiration. The simulation model developed, is used both to obtain a better knowledge about the irrigation system actual situation and its water supply confidence, as well as for the evaluation of future situations and alternatives to promote the efficient use of water resources and optimize surface water availability.

Key words: Irrigation water requirements, water balance, water resources.

Cien. Inv. Agr. 32(1): 27-38. 2005

INTRODUCCION

La competencia por los recursos hídricos es cada vez más conflictiva en Chile, particularmente entre los sectores urbanos, generación eléctrica, uso industrial, ambiental y agrícola. Este último sector es el que utiliza los mayores volúmenes de agua, generalmente en forma poco eficiente. Esto tiene un importante impacto ambiental, social y económico, especialmente en años de sequía (Gurovich, 1999). Para minimizar los impactos negativos se requieren herramientas que permitan a las asociaciones de usuarios del agua administrar

este recurso sobre la base de su dinámica de oferta y demanda en dimensiones espacio - temporales históricas (CEPAL, 1999). Esta información es indispensable para diseñar e implementar medidas integrales de gestión y optimización del recurso agua.

En este artículo se describe un modelo integral de la oferta hídrica superficial, de las necesidades de agua de los cultivos y de los requerimientos hídricos de los sistemas de riego, desarrollado para representar y caracterizar las situaciones actuales y futuras de riego, la magnitud, fre-

cuencia y distribución del déficit hídrico y su relación con la seguridad de suministro.

MATERIALES Y METODOS

El modelo desarrollado en este trabajo se aplicó a un sistema de riego de la zona central de Chile, que incluye producción de vid (*Vitis vinifera* L.) regadas con técnicas convencionales superficiales, como también áreas regadas con métodos tecnificados presurizados. El estudio incluyó además, la descripción cuantitativa de los sistemas de captación, conducción, control de flujo y aplicación del riego y las características de la infraestructura hidráulica disponibles y requeridas para optimizar la eficiencia de uso del recurso. Las herramientas utilizadas en este trabajo incluyeron las ecuaciones de continuidad y balance de masas aplicados a los diferentes elementos del sistema, en sus tópicos de oferta y demanda. También consideró un modelo de distribución de probabilidades en el análisis de las variables aleatorias de clima y caudal, y el modelo de Penman–Monteith, recientemente adoptado y recomendado por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (Smith *et al.*, 1998; Allen, *et al.*, 1994).

Modelación de la oferta y requerimientos hídricos

La oferta hídrica de las fuentes superficiales se modeló en tres tópicos de estudio: 1. Análisis de antecedentes hidrológicos del río y de los canales principales, 2. Modelación de la oferta hídrica y 3. Análisis hidrológico del sistema terciario de riego a nivel predial (DGA, 2000; DICTUC, 1999; Shahin, 1993). Se utilizó el modelo Lognormal de dos parámetros, para asociar valores de probabilidad de excedencia a diferentes valores de caudal medio mensual en las fuentes. La ecuación (1) permitió calcular valores de caudal asociados a diferentes probabilidades.

$$X_T = \mu + K_T \cdot \sigma \quad (1)$$

Este modelo distribuye una variable aleatoria

X_T en función de los parámetros del modelo (promedio μ y desviación estándar σ de la variable original), y un coeficiente de frecuencia K_T que es función de la probabilidad de excedencia (al cual se asocia un factor z de una distribución normal) y del coeficiente de variación (Cv) de la variable original en la serie mensual respectiva (Shahin, 1993). El factor de frecuencia K_T de (1), se calculó con la ecuación siguiente:

$$K_T = \frac{1}{Cv} \left(\exp \left[-\frac{1}{2} \text{Ln}(1 + Cv^2) + z_T \sqrt{\text{Ln}(1 + Cv^2)} \right] \right) \quad (2)$$

La disponibilidad hídrica superficial en los canales internos del sistema terciario se estimó a nivel espacial y temporal mediante el uso de un modelo de oferta, que consideró los registros disponibles de caudal medio mensual en los canales principales, los derechos de aprovechamiento del agua de los canales internos sobre los sistemas principales, los antecedentes sobre el control de flujo en la red, las pérdidas de agua en la conducción y las recuperaciones en los canales de cota inferior. El análisis se centró en el período anual de desarrollo estacional de la vid (agosto-abril), discretizando los períodos de oferta a nivel decadal, por medio de una función de interpolación lineal sobre los datos de las series mensuales estimadas en los canales internos y considerando varias probabilidades de excedencia, en el rango de 1 a 95%.

La estimación de caudales probables en los canales internos con el modelo Lognormal, consideró los resultados del análisis de correlación entre los hidrogramas anuales de caudal mensual del río, y los flujos de los canales principales; estos últimos representaron una proporción de los flujos descritos en los hidrogramas del río. La modelación del esquema de oferta hídrica consideró nodos y tramos. Los tramos fueron: 1. El canal principal, 2. El canal secundario y 3. El canal interno o terciario. Los nodos correspondieron a las bocatomas de los canales, de los marcos partidores y a las compuertas sobre los canales de la red (Figura 1).

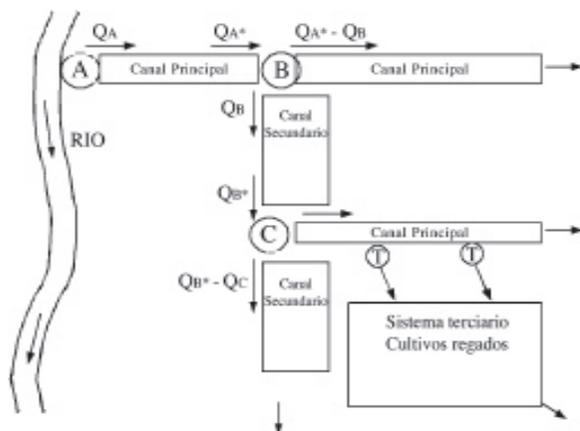


Figura 1. Esquema de la red de riego. Q_A es el caudal del canal principal medido en la bocatoma A, Q_B el caudal del canal secundario medido en la derivación o nodo B sobre el canal principal, Q_C el caudal del canal terciario a la entrada del sistema terciario o nodo C, Q_A^* el caudal que llega al nodo B (derivación secundaria) considerando el efecto de las pérdidas y recuperaciones en el canal principal, y Q_B^* el caudal que llega al nodo C (derivación terciaria) considerando el efecto de las pérdidas y recuperaciones en el canal secundario. Las pérdidas y recuperaciones en el canal terciario se aplicaron a las series de caudal obtenidas en el nodo C.

Figure 1. Schematic representation of the hydraulic net. Q_A is the main channel discharge at water inlet A; Q_B secondary channel discharge, measured at point B, on the main channel. Q_C is the tertiary channel discharge measured at point C, Q_A^* is the channel flow measured at point B, considering water losses and recuperations in the main channel, Q_B^* is the flow at point C, considering water losses and recuperations in the secondary channel. Water losses and recuperations in the tertiary channel are included in the outflow model at point C.

El planteamiento teórico adoptado para cuantificar las captaciones, extracciones, pérdidas y recuperaciones en los elementos de la red de riego, consistieron en la aplicación de la ecuación de continuidad a los diversos nodos y tramos, desde las bocatomas de los canales principales hasta los canales internos del sistema terciario.

La Figura 2 representa la modelación propuesta en el elemento tramo de la red de riego y la ecuación (3) presenta el modelo de continuidad.

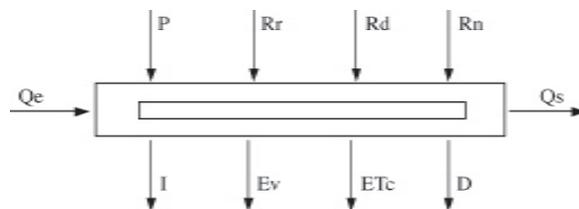


Figura 2. Modelación de un tramo. Q_e es el flujo superficial del canal al inicio del tramo, P es la precipitación sobre el tramo, R_r representa las recuperaciones de flujo por retornos de riego, R_d las recuperaciones por derrames desde fuentes sin regulación, R_n las recuperaciones por aportes provenientes de la napa freática, Q_s es el flujo superficial del canal al final del tramo, I las pérdidas por infiltración y percolación, E_v es la evaporación directa desde el tramo, ET_c es la evapotranspiración de la vegetación en las riberas del tramo, D las pérdidas por derrames en el tramo y $\Delta V/\Delta t$ representa la variación del almacenamiento del tramo en el intervalo de tiempo Δt .

Figure 2. Modeling an hydraulic net component. Q_e is the surface flow at the starting point, P is the effective precipitation, R_r represents flow recuperations from rainfall, R_d are recuperations from water spills from unregulated sources, R_n are water recuperations from the water table, Q_s is the channel discharge at the final point considered, I are water losses from infiltration and deep percolation, E is direct evaporation from the net component, ET_c is canopy evapotranspiration from areas surrounding the net component, D are water losses from spills and $\Delta V/\Delta t$ is the change in water storage in a specific time interval.

$$Q_e + P + R_r + R_d + R_n = Q_s + I + E_v + ET_c + D \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3)$$

De igual forma, la modelación en el tramo se definió con:

$$Q_e = Q_s + Q_d \quad (4)$$

Las variables generales del modelo de oferta hídrica definidas en (3), se ven afectadas por los porcentajes de flujo por percolación, derrames y recuperaciones en los diversos tipos de canales. Sobre la base del análisis estadístico y probabilístico de las series de disponibilidad hídrica en los canales internos, se estableció el aporte y la variación de caudales probables de cada canal en la temporada de cultivos. La información obtenida permitió analizar el comportamiento del balance

hídrico en los diferentes escenarios considerados en la simulación, especialmente en los eventos de oferta hídrica de alta probabilidad de excedencia, que caracterizan a los años hidrológicos secos.

FAO ha recomendado el modelo de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia ETo (Smith *et al.*, 1998). Utilizando datos climáticos promedios diarios o mensuales, la expresión de Penman-Monteith se simplificó de acuerdo con:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (5)$$

De donde, ETo = evapotranspiración del cultivo de referencia [ETo , (mm^{-1})], R_n = radiación neta en la superficie del cultivo [R_n , ($\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)], G = flujo del calor del suelo [G , ($\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)], T = temperatura promedio del aire [T , ($^{\circ}\text{C}$)], U_2 = velocidad del viento medida a 2 m de altura. [U_2 , ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)] = presión de vapor de saturación [e_s , (kPa)], e_a = la presión de vapor actual [e_a , (kPa)], Δ = pendiente de la curva de presión de vapor [Δ , ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)], γ = constante sicrométrica [γ , ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)] y 900 = factor de conversión.

Antecedentes meteorológicos

Se utilizó la información mensual disponible en la estación meteorológica ubicada en Pirque, Región Metropolitana, Chile, entre 1985 y 1999, para las variables de temperaturas media, máxima y mínima, humedad relativa, recorrido del viento, horas de sol diarias, evaporación total y precipitación total. Mediante la aplicación del software Cropwat-4W (Clarke *et al.*, 1998; Smith, 1993), se calcularon los valores medios de ETo a nivel mensual y para cada año, entre 1985 y 1999; los valores de ETo probables mensuales se estimaron con un modelo LogNormal y la discretización decadal se realizó con una herramienta de ajuste polinómico del software Cropwat-4W.

Sistema terciario Santa Rita

En la modelación espacial y temporal de los requerimientos hídricos de la vid y del sistema de

riego terciario Santa Rita, se incluyó información de campo y antecedentes sobre las áreas de cultivos, suelos, aspectos agronómicos y sistemas de riego; la evaluación de la demanda hídrica se realizó a nivel decadal y considerando diferentes probabilidades de excedencia.

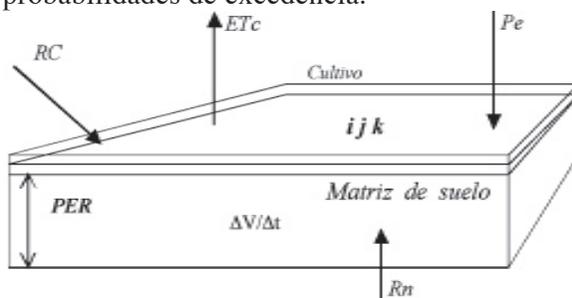


Figura 3. Modelación de una zona homogénea (elemento ijk) del sistema de riego terciario. i representa la zona determinada por la ubicación y tipo de suelo, j representa la zona determinada por el sistema de riego, k representa la zona determinada por la variedad de Vid, ETc es la evapotranspiración real del cultivo en el elemento ijk , Pe es la precipitación efectiva en el elemento ijk , RC es el requerimiento hídrico del cultivo en el elemento ijk , PER es la profundidad efectiva radical de la zona ijk , Rn son los aportes de la napa freática a la zona radical del elemento ijk y $\Delta V/\Delta t$ representa la variación del almacenamiento de agua para un intervalo de tiempo Δt en la zona de raíces con una profundidad PER , considerando los aportes de la precipitación efectiva Pe .

Figure 3. Modeling an homogeneous area (ijk element) in the tertiary irrigation system. i represents each area, according to its geographic location and soil type, j is the specific area, according to the irrigation system, k is the area corresponding to each vine cultivar. ETc is actual crop evapotranspiration at the ijk element, Pe is effective precipitation in the ijk element, RC is the crop water requirement at the ijk element, PER is the root effective depth in the ijk element, Rn are water inputs from the water table and $\Delta V/\Delta t$ are the soil water content differences for a specific time interval.

La existencia de distintos tipos de suelo, métodos de riego y variedades de vid, requiere diferentes frecuencias y láminas de riego y hace necesario modelar simultáneamente el sistema de riego terciario sobre la base de los requerimientos hídricos de los cultivos, y de los sistemas de riego; se establece así una subdivisión espacial del sistema de riego terciario en zonas relativamente homogéneas, de tal forma de que

cada una de ellas representa un elemento del sistema de riego donde ocurre el proceso evapotranspirativo y genera una determinada variación temporal del requerimiento hídrico. La Figura 3 esquematiza la superficie modelada del elemento (i-j-k), y las variables involucradas

La ecuación de continuidad aplicada al elemento i-j-k de la Figura 3 fue:

$$Pe + Rn + RC = ETc \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6)$$

La lluvia efectiva Pe , en la ecuación (6) se definió, de acuerdo con Dastane, (1978), como la porción efectiva de la precipitación total P en un período dado, la cual fue usada directa e/ o indirectamente en la producción de cultivos y en el sitio donde precipitó, pero extracciones desde fuentes superficiales o subterráneas.

Definiendo Kc como el coeficiente de evapotranspiración del cultivo ($Kc = ET_{real} \cdot ET_{potencial}^{-1}$), el valor de ETc ($mm \cdot día^{-1}$) se estimó según la ecuación (7) (Doorenbos y Pruitt, 1975; Smith *et al.*, 1998). La variación temporal del coeficiente Kc en función del desarrollo vegetativo del cultivo fue propuesta por FAO (Doorenbos y Pruitt, 1975).

$$ET = K \cdot FT \quad (7)$$

El modelo evapotranspirativo de FAO, definido por las ecuaciones (6) y (7), se aplicó en la obtención de una función espacial, temporal y probabilística para calcular la evapotranspiración del cultivo en el elemento i-j-k de la Figura 3. En la ecuación (8), se definió el requerimiento hídrico del cultivo de vid (RC en la ecuación 6), expresado en $mm \cdot (10 \text{ días})^{-1}$, con $Pexc$ de probabilidad de excedencia y d como el número de orden de la década (10 días), variando entre 1 y 22,7 décadas; Kcd fue el coeficiente de evapotranspiración de la vid en la década y ETd se expresa en mm por década.

$$RC_{d(ijk)}^{Pexc} = ETc_{d(ijk)}^{Pexc} = Kc_{d(ijk)} \cdot ETd_{d(ijk)}^{Pexc} \quad (8)$$

El requerimiento hídrico del cultivo de la ecuación (8) se afectó por la relación entre el área

específica de una zona homogénea, $A(i-j-k)$ y el área total cultivada en la zona de estudio, AT . De esta forma, la tasa parcial de riego TAR ($L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$), para una década d y probabilidad específica $Pexc$, se expresó como:

$$TAR_{d(ijk)}^{Pexc} = 1,1574 \cdot \frac{RC_{d(ijk)}^{Pexc} \cdot A_{(ijk)}}{Ea_{(ij)} \cdot A_t} \quad (9)$$

donde, $Ea(i-j)$ fue la eficiencia de aplicación determinada experimentalmente en un sistema de riego y en un determinado suelo (Gurovich, 1978, Gurovich, 1980; IAA, 2000). El coeficiente 1,1574 fue un factor de conversión de $mm \cdot década^{-1}$ a caudal ($L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$).

Los requerimientos de riego en una zona homogénea $RRdPexc(i-j-k)$ [$L \cdot s^{-1}$], se calcularon considerando la $TAR_{d(ijk)}^{Pexc}$ de la ecuación (9) y el área específica $A(i-j-k)$ del elemento considerado. La integración de los requerimientos parciales $RRdPexc(i-j-k)$ de cada uno de los elementos, constituyó el requerimiento de riego total, $RRTdPexc$ [$L \cdot s^{-1}$], para una década d y probabilidad específica $Pexc$:

$$RRT_d^{Pexc} = \sum_i \sum_j \sum_k RR_{d(ijk)}^{Pexc} \quad (10)$$

El sistema de riego Santa Rita, representativo de la zona central de Chile ($33^\circ 41' 9''$ a $33^\circ 43' 9''$ de latitud sur, y $70^\circ 37' 30''$ a $70^\circ 41' 0''$ de longitud oeste), a 520 m sobre el nivel del mar, correspondió a un sistema terciario de riego de 570,3 ha vid destinadas a la vinificación. Las fuentes actuales de agua son superficiales y subterráneas provenientes de la cuenca del río Maipo y de la napa subterránea del acuífero Maipo - Mapocho, respectivamente. El río Maipo es un río de montaña de alta pendiente, con un caudal medio mensual (1912-1999) de $100,7 \text{ m}^3 \cdot s^{-1}$, medido en la estación fluviométrica La Obra, Región Metropolitana de Chile. El máximo aporte de la cuenca del río Maipú ocurre entre diciembre y enero, debido al derretimiento de la nieve.

La zona de estudio tiene un clima mediterráneo semi-árido (Santibañez y Uribe, 1990), con 7 a 8 meses secos. El 80% de las precipitaciones

anuales se producen otoño e invierno (mayo a agosto), con un promedio anual de 420 mm y un 50% de probabilidad de ocurrencia.

En este estudio, el análisis consideró solamente los recursos hídricos superficiales, y por lo tanto se planteó un enfoque de sistema donde la fuente de agua para riego fue en su totalidad de origen superficial. La fuente de agua superficial riega en la actualidad el 90% del área total cultivada y está compuesta por los canales principales Huidobro y Unidos de Buin, Región Metropolitana. Las aguas de estos dos sistemas son captadas en la primera sección del río Maipo mediante dos bocatomas independientes.

El sistema Huidobro recibe adicionalmente las aguas excedentes del río Clarillo. La primera sección del río Maipo es propietaria de la totalidad del agua y distribuye sus derechos de aprovechamiento en 8133 acciones entre ocho grandes usuarios o sistemas principales. La distribución del caudal disponible entre los usuarios, se efectúa de acuerdo a una proporción de las acciones totales sin atender a las necesidades hídricas de los cultivos o las capacidades de conducción efectiva de la infraestructura de riego existente (DICTUC, 1999).

Los canales secundarios Huidobro y Santa Rita se derivan de los canales principales Huidobro y Unidos de Buin, respectivamente, y llegan hasta la entrada del sistema de riego terciario, en el extremo Nor-Occidente de la viña Santa Rita, donde se convierten en canales terciarios, los que alimentan los sistemas de aplicación del riego. Existe un sistema de conducción sin revestimiento en toda la red excepto los sitios con estructuras de repartición y control de flujo (marcos partidores) que se encuentran revestidos en concreto.

En el sistema Santa Rita riega 320,64 ha (56,2%) por surcos, y 249,66 ha (43,8%) por goteo. El período sin riego durante el receso invernal se extiende entre el 20 de abril a inicios de septiembre para las vides tintas, y desde inicios de abril a mediados de agosto para las vides blancas (Gurovich, 1991). El área cultivada se compone de 47 sectores, cada uno de ellos con una o más

cultivares de vid; existen 11 cultivares tintos (Cabernet Sauvignon, Cabernet Franc, Merlot y Carménère) y 5 blancos (Chardonnay, Sauvignon Blanc y Sauvignonasse).

Según la información edafológica disponible, se zonificó la superficie cultivada en tres áreas. Los suelos presentan dos a tres estratos en el primer metro del perfil, con una variabilidad de texturas entre franco a franca arcillosa en la superficie y franca a arcillosa en el segundo estrato. En algunos sectores se encuentra pedregosidad superficial inferior al 15% en volumen.

La metodología del modelo de simulación consistió en la aplicación de un balance de masas entre la disponibilidad superficial de agua y la demanda de riego en la zona de estudio. En el enfoque determinístico, las respuestas del modelo propuesto se obtuvieron a partir de varias simulaciones con variaciones en los valores de los parámetros de la oferta y demanda hídrica, tales como las eficiencias de aplicación (E_a) en los sistemas de riego por surcos y goteo, el coeficiente de evapotranspiración de la vid (K_c) en la fase de desarrollo, el porcentaje de pérdidas de flujo por percolación en canales principales (P_{cm}), la tasa de pérdidas de flujo por percolación en canales secundarios e internos (TP_{ci}) y el porcentaje de pérdidas de flujo por derrames (P_d); en el enfoque determinístico se consideró la situación de un año promedio con probabilidad de excedencia del 50%, tanto en la oferta como la demanda hídrica.

En el enfoque probabilístico, los parámetros considerados incluyeron los del modelo de probabilidad LogNormal que se utilizan para ajustar los datos de las series de clima y caudal. En este enfoque se consideró el evento representativo de requerimientos con probabilidad del 50%, pero incluyendo diferentes años hidrológicos de la oferta, con especial énfasis en aquellos años que caracterizan los períodos de escasez. Desde el punto de vista de la oferta hídrica, la seguridad de riego se analiza para probabilidades de excedencia altas, iguales a 80, 90 y 95%. El análisis de frecuencia definido con el enfoque probabilístico, permitió establecer las seguridades de riego del sistema Santa Rita.

RESULTADOS

La variación estacional del caudal probable medio mensual en los dos canales internos de este estudio,

presentó diferencias (Figura 4), a pesar de que los canales matrices de los cuales se derivan, captan el caudal bajo el mismo esquema de reparto y sus bocatomas se encuentran relativamente cerca la una de la otra.

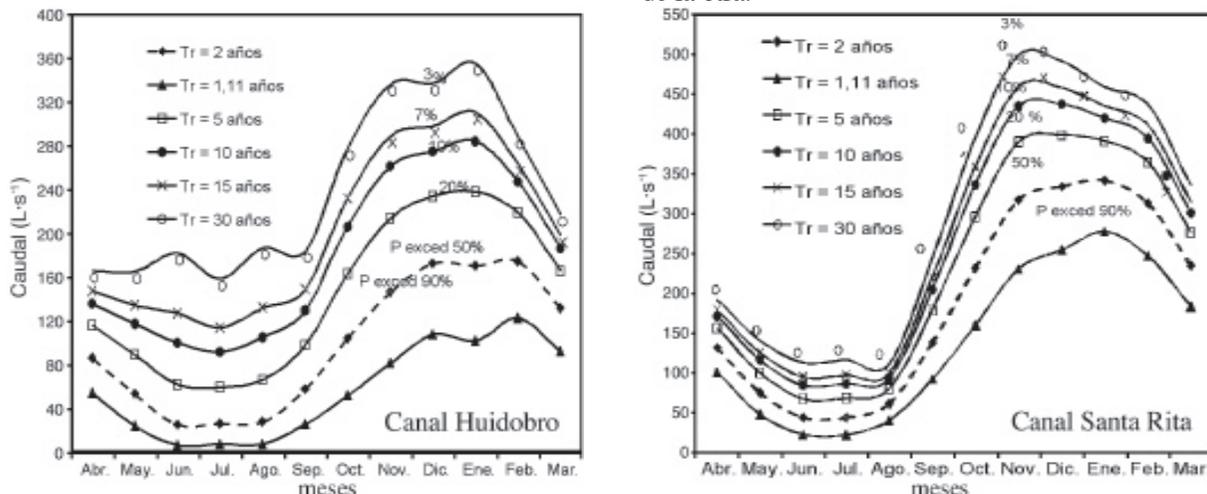


Figura 4. Hidrograma probabilístico de caudal medio mensual en los canales internos Huidobro y Santa Rita. Tr es el número de años con probabilidad estadística de ocurrencia.

Figure 4. Probabilistic hydrograms for average monthly flow in Huidobro and Santa Rita channels. Tr is the number of years with a statistic probability of occurrence.

Las curvas del coeficiente de variación mensual Cv en el río Maipo, entre 1912 y 1999 y entre 1990 y 1999, fueron bastante similares en magnitud y simetría (Figura 5). En el canal Unidos de Buin, la curva de Cv presentó cierta proporcionalidad en magnitud y simetría con respecto a las curvas del río Maipo, excepto en-

tre noviembre y febrero, en que la variación fue opuesta a las observadas en el río. El canal Huidobro en el período mayo - noviembre presentó siempre valores de Cv mucho mayores que los del río, lo que implica muy probablemente una fuerte influencia de las captaciones que recibe del río Clarillo.

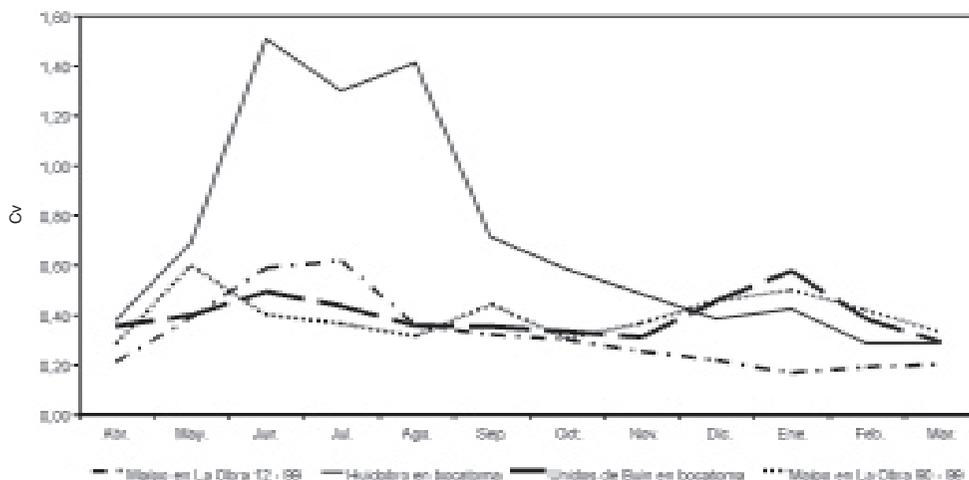


Figura 5. Coeficientes de variación (Cv) de las series mensuales en el río y canales principales.

Figure 5. Variation coefficients (Cv) for monthly series in the Maipo river and on the main irrigation channels.

Los resultados del análisis probabilístico de ETo señalaron que la variación de ETo entre años consecutivos fue relativamente baja. Así, para un mes de alta evapotranspiración potencial como diciembre, se obtuvo diferencias sobre la tasa promedio de ETo de un 11,4%, considerando un evento correspondiente a un período de retorno de 20 años. En el Cuadro 1 se presenta el resumen de los requerimientos probables de riego total en el sistema actual, una vez integrados los requerimientos de los sistemas de surcos y goteo. Los resultados de caudal del Cuadro 1 corresponden a flujos continuos durante la década respectiva. Fernández (1991), definió para la zona central

de Chile el carácter periódico de las series de demanda hídrica, considerándolas constantes de un año a otro, y variables para las diferentes cuencas de la zona. Teniendo en cuenta la poca variación de magnitud de los requerimientos de riego entre eventos con diferentes probabilidades de excedencia, en este estudio los requerimientos de los cultivos para cada una de las décadas del período se consideran constantes entre un año a otro, adoptándose como evento representativo de los requerimientos del sistema, aquel correspondiente a una probabilidad de excedencia del 50%, para el análisis del balance hídrico en los diferentes escenarios evaluados en la simulación.

Cuadro 1. Requerimientos de riego totales en el sistema Santa Rita ($L \cdot s^{-1}$), Región Metropolitana, Chile, para diferentes probabilidades de excedencia (Pexc) o períodos de retorno (Tr).

Table 1. Total irrigation water requirements at the Santa Rita irrigation system ($L \cdot s^{-1}$), for different exceedence probabilities (Pexc) or return periods (Tr).

Fecha	Caudales Requeridos							
	Pexc=50% Tr=2años	Pexc=20% Tr=5años	Pexc=10% Tr=10años	Pexc=7% Tr=15años	Pexc=5% Tr=20años	Pexc=3% Tr=30años	Pexc=2% Tr=50años	Pexc=1%
Tr=100años								
17/ago - 26/ago	11,1	12,1	12,7	13,0	13,2	13,4	13,7	14,1
27/ago - 05/sep	13,5	14,6	15,3	15,6	15,8	16,1	16,5	16,9
06/sep - 15/sep	76,8	83,0	86,6	88,3	89,5	91,1	93,0	95,3
16/sep - 25/sep	89,8	96,8	100,7	102,7	104,0	105,8	107,9	110,5
26/sep - 05/oct	105,4	113,3	117,7	119,9	121,4	123,3	125,8	128,6
06/oct - 15/oct	125,9	134,8	139,9	142,4	144,1	146,4	149,1	152,4
16/oct - 25/oct	160,0	171,0	177,1	180,2	182,3	185,1	188,4	192,4
26/oct - 04/nov	216,7	231,0	238,9	243,0	245,6	249,3	253,6	258,8
05/nov - 14/nov	287,0	305,2	315,2	320,5	323,9	328,5	334,0	340,6
15/nov - 24/nov	356,2	378,0	389,8	396,0	400,0	405,6	412,1	420,0
25/nov - 04/dic	421,3	446,1	459,3	466,4	470,9	477,2	484,6	493,4
05/dic - 14/dic	461,6	487,5	501,3	508,7	513,5	520,1	527,7	537,0
15/dic - 24/dic	473,4	498,9	512,2	519,4	524,0	530,6	537,9	546,9
25/dic - 03/ene	478,7	503,3	516,1	523,1	527,7	533,9	540,9	549,7
04/ene - 13/ene	468,5	492,4	504,9	511,6	516,1	522,0	528,8	537,3
14/ene - 23/ene	452,5	475,4	487,4	493,8	498,0	503,7	510,1	518,2
24/ene - 02/feb	431,9	453,5	464,7	471,7	474,7	480,1	486,2	493,9
03/feb - 12/feb	406,7	426,9	437,5	443,0	446,7	451,8	457,4	464,5
13/feb - 22/feb	378,0	396,6	406,2	411,3	414,6	419,3	424,5	431,0
23/feb - 04/mar	345,0	361,6	370,4	375,0	378,0	382,2	386,9	392,7
05/mar - 14/mar	307,6	322,2	330,0	333,9	336,6	340,4	344,5	349,6
15/mar - 24/mar	264,5	277,0	283,6	287,0	289,2	292,4	295,9	300,3
25/mar - 03/abr	206,4	216,0	221,1	223,7	225,5	228,0	230,7	234,0
04/abr - 13/abr	139,4	145,9	149,3	151,0	125,2	153,9	155,7	157,9
14/abr - 24/abr	80,7	84,4	86,4	87,3	88,0	89,0	90,1	91,3
Q promedio	272,6	287,5	295,5	299,6	302,4	306,2	310,5	315,8
Q máximo	487,7	503,3	516,1	523,1	527,7	533,9	540,9	549,7
Q mínimo	11,1	12,1	12,7	13,0	13,2	13,4	13,7	14,1

Q = caudal.

De acuerdo con la información de la Figura 6, para el evento promedio del balance hídrico en la situación actual se obtuvo un nivel de seguridad de la disponibilidad superficial del 100% durante toda la temporada de riego. Otros resultados, en los que se analizan los eventos de oferta de menor probabilidad de excedencia, presentan significativos incrementos en la magnitud del caudal por encima del 50% de probabilidad, pero muestran que los recursos hídricos de las fuentes superficiales son igualmente suficientes para satisfacer directamente los requerimientos actuales.

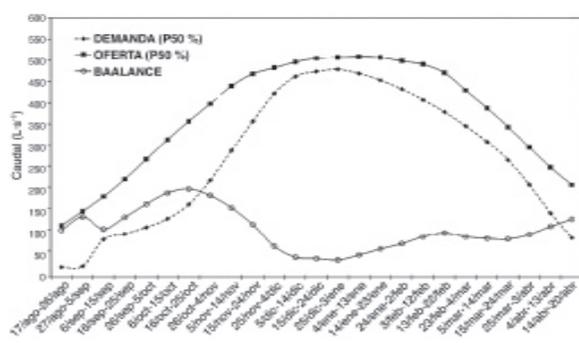
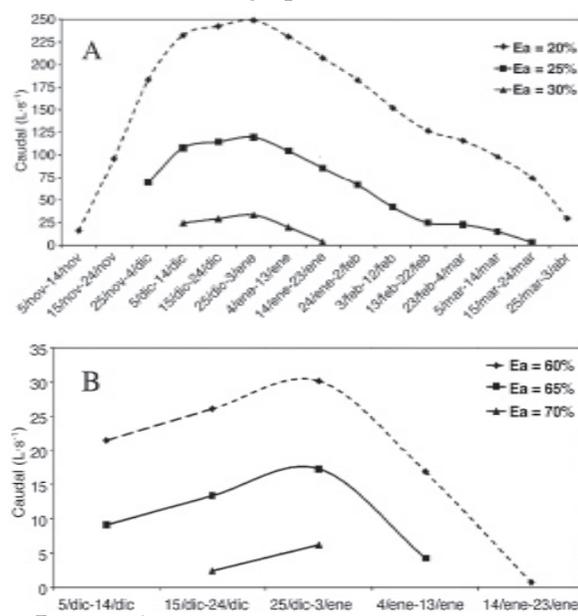


Figura 6. Balance hídrico promedio de la situación actual de riego en el sistema Santa Rita, Región Metropolitana, Chile. Con una probabilidad de excedencia del 50% (P 50%).

Figure 6. Mean water balance for the present situation at the Santa Rita irrigation system with 50% excedence probability (P 50%).

Los resultados del balance hídrico en el enfoque determinístico, demostraron que los parámetros de mayor sensibilidad en la magnitud y distribución de los déficit hídricos fueron: la eficiencia de aplicación (Ea) en riego por surcos y el coeficiente de evapotranspiración (Kc) entre es estado de pinta y la cosecha de la vid. En la Figura 7A, los resultados del balance hídrico fueron deficitarios cuando los valores de Ea en riego por surcos fue inferior al 33%. El excesivo escurrimiento superficial observado al final del surco durante el evento de riego en el sistema Santa Rita, fue ocasionado por el uso de caudales demasiados grandes que aceleran el avance del agua en el surco y/o por tiempos de duración del riego exagerados. Esta situación disminuyó

considerablemente la eficiencia de aplicación en este sistema de riego, y sería un aspecto susceptible mejorar en situación de déficit de agua de riego (Gurovich, 1999). Los mayores valores de déficit hídrico en todas las simulaciones del enfoque determinístico se presentaron siempre entre la última semana de diciembre y la primera semana de enero. La sensibilidad del déficit a las variaciones de Ea en el sistema de riego por goteo (Figura 7B), resultó mucho menor que la sensibilidad estimada para las variaciones de Ea en el sistema de riego por surcos.



valores de Ea (eficiencia de aplicación) en riego por surcos y riego por goteo.

Figures 7A and B. Water deficits for different Ea values in furrow and drip irrigation.

Los resultados de la simulación con el enfoque probabilístico demostraron que los balances hídricos a lo largo de la temporada del cultivo, entre el evento representativo de requerimientos de riego *RRT50* y los eventos hidrológicos para años secos Q80, Q90 y Q95, presentaron diferentes niveles de déficit en magnitud y distribución. En la Figura 8 se presenta la ubicación, distribución y magnitud de los excesos y déficit para un año hidrológico de 80% de probabilidad de excedencia. El déficit del recurso se mantuvo desde finales de noviembre hasta inicios de febrero, con un máximo faltante de $67 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ durante

diciembre. El volumen de déficit acumulado o severidad durante el período de duración de esta sequía fue 305.788 m³ aproximadamente. Si se tiene en cuenta el volumen de excesos del período que antecede a esta sequía desde el inicio de la temporada, se tendría suficiente capacidad para suplir tal escasez, si el sistema Santa Rita tuviera alguna obra hidráulica de almacenamiento, con una capacidad del orden de 0,35 hm³, si se considera un factor de seguridad del 15% sobre el volumen de déficit acumulado.

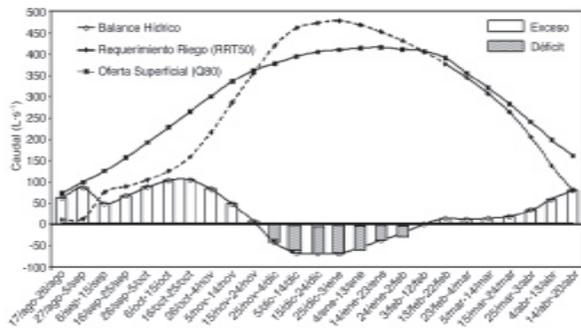


Figura 8. Balance hídrico de la situación actual en el sistema Santa Rita, Región Metropolitana, Chile, para un año seco Con una probabilidad de excedencia del 80%.

Figure 8. Water balance at the present Santa Rita irrigation system, for a dry year with 80% excedence probability.

Un cambio de de riego por surcos a riego por goteo, especialmente en la zona B, donde se presentan las mayores demandas de agua actuales del sistema, permitiría reducir drásticamente los requerimientos de éste y optimizar la disponibilidad del recurso agua, eliminando el déficit estimado para los años extremadamente secos (Figura 9), con una seguridad de suministro de 100%, sin necesidad de regulación y embalses adicionales. En términos generales, los años secos presentan períodos deficitarios decadales de déficit significativos durante la temporada de cultivo, distribuidos con un mayor impacto entre los meses de diciembre y enero. Los volúmenes sobrantes, que potencialmente se podrían almacenar en los primeros meses de la temporada, e inclusive en meses invernales antes de ésta, serían suficientes para abastecer

los requerimientos hídricos del sistema (Figura 9), pero sería necesario invertir importantes recursos para construir las obras hidráulicas de almacenamiento requeridas con este fin.

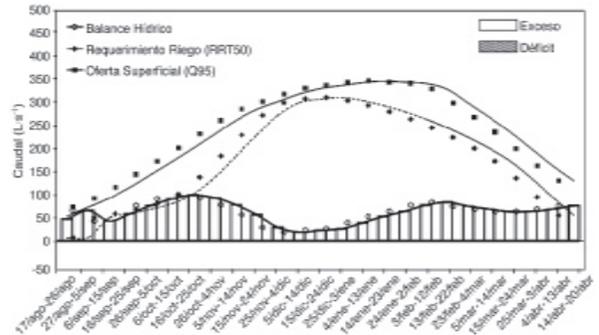


Figura 9. Balance hídrico de una situación futura de riego en el sistema Santa Rita, Región Metropolitana, Chile, para un año muy seco con probabilidad de excedencia 95%. cambiando las 234,21 ha actuales en riego por surcos a riego por goteo.

Figure 9. Water balance for a future scenario at the Santa Rita irrigation system, for a very dry year with 95% excedence probability if the 234.21 ha now under furrow irrigation are modified to drip irrigation.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los mayores caudales probables para el canal interno Huidobro se presentan en enero y febrero en años húmedos y secos respectivamente, mientras en el canal interno Santa Rita los mayores caudales probables ocurren en enero para años secos y entre noviembre y diciembre en años húmedos. El canal interno Santa Rita aporta más de las dos terceras partes de la oferta total en años secos; por lo tanto reviste mayor importancia y contar con su disponibilidad hídrica es indispensable. En años secos se observan niveles significativos de déficit hídrico en el sistema Santa Rita, dada la insuficiencia de flujos en los canales internos para abastecer directamente la demanda hídrica. El mes de diciembre es el más afectado por las sequías hidrológicas. Sin embargo, en la misma temporada de cultivos y antes del período de sequía, existen recursos superficiales potencialmente embalsables, que

garantizan el abastecimiento del déficit. En el evento promedio del balance hídrico y para años húmedos, se presenta una seguridad de riego del 100% durante toda la temporada de cultivos, sin necesidad de realizar inversiones en infraestructura de riego adicional. La transformación de los sistemas actuales de riego por surcos a riego por goteo, también aseguran una disponibilidad de 100% del recurso, aun en los años más secos esperables. Los parámetros del modelo de simulación que mayor sensibilidad presentaron en los resultados del déficit hídrico fueron la eficiencia de aplicación en riego por surcos (E_a), y el coeficiente de evapotranspiración de la vid en la tercera etapa de desarrollo (K_c).

RESUMEN

Este trabajo describe una propuesta metodológica para modelar en forma probabilística los componentes y procesos involucrados en la disponibilidad de agua superficial y la demanda hídrica para sistemas de riego en la zona central de Chile. El objetivo fue desarrollar una metodología para estudiar el balance hídrico en campos agrícolas que permita optimizar la asignación del agua disponible. Con este propósito se desarrolló un modelo de distribución probabilística que estimó los flujos hídricos asociados a probabilidades de ocurrencia. Asimismo, se desarrolló un modelo espacial y temporal para simular los requerimientos hídricos de los cultivos, que permitió calcular las probabilidades de excedencia basadas en el modelo Penman-Monteith sugerido por la FAO. El modelo incluyó las características físico-hídricas de los suelos, la evolución temporal de los requerimientos hídricos de la vid (*Vitis vinifera*), la variabilidad temporal y espacial de los recursos hídricos disponibles y de la demanda evaporativa de la atmósfera, así como las capacidades físicas de la infraestructura hidráulica disponible. El modelo de simulación desarrollado en este trabajo se utilizó para evaluar la situación actual y la seguridad de riego en viñedos (Alto Jahuel, Región Metropolitana, Chile), y para evaluar futuros escenarios y alternativas de inversiones en nuevos equipos de riego mecánico y en nuevas

plantaciones para promover el uso eficiente de los recursos hídricos y para optimizar la disponibilidad de agua superficial. El modelo obtenido permitió decidir la superficie máxima que la empresa puede plantar con nuevos viñedos, decidir las inversiones alternativas en nuevos equipos de riego, con una consideración probabilística de diferentes escenarios de disponibilidad de recursos de agua.

Palabras clave: balance hídrico, demanda de riego, recursos hídricos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno Japonés y al Banco Mundial, a través de una beca en el área Tecnológica-Ambiental, por el financiamiento recibido para la ejecución de estos trabajos.

LITERATURA CITADA

- Allen, R.G., M. Smith, A. Perrie, and L. S. Pereira. 1994. An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. ICID Bulletin. 43: 35-92.
- CEPAL 1999. El Código de Aguas de Chile: Entre la Ideología y la Realidad (LC/R. 1897/Rev.1). Santiago de Chile.
- Clarke D., M. Smith and K. El-Ashari. 1998. CropWat for Windows. versión 4.2: User Guide <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/wcrop.htm>
- Dastane, N. G. 1978. Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. Estudio FAO Riego y Drenaje No 25. FAO, Roma - Italia. 48 pp.
- DGA, 2000. Modelo de Simulación Hidrológico Operacional: Cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Ayala, Cabrera y asociados. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 87 pp.
- DICTUC, 1999. Estudio Hidrológico de Fuentes Superficiales y Subterráneas de Aguas Cordillera. Informe presentado a la empresa Aguas Cordillera S.A. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 56 pp.
- Doorenbos J. y W. O. Pruitt. 1975. Crop Water

- Requirements. Estudio FAO Riego y Drenaje No 24. FAO, Roma - Italia. 112 pp.
- Fernández, B. 1991. Sequías en la Zona Central de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. Informe final de proyecto, 94 pp.
- Gurovich, L. 1978. Effects of improved field practices on crop yield, water use and profitability of irrigation. *Irrigation Science* 1: 77-90.
- Gurovich, L. 1980. Economic impact of irrigation technology. *Acta Horticulturae* 89: 47-56.
- Gurovich, L. 1991. Manual de Riego Programado de los Frutales: Evaluación y Operación Programada del Riego en Plantaciones Frutales. Edición CORFO. Santiago, Chile. 134 pp.
- Gurovich, L. 1999. Riego Superficial Tecnificado. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 650 pp.
- IAA. 2000. IAA's Definition of Irrigation Efficiency. Irrigation Association of Australia. Consultado el 20 de enero, 2005. <http://www.irrigation.org.au>.
- Santibañez, F. y J. Uribe. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Santiago, Chile. 256 pp.
- Shahin, M., H. J. L. van Oorschot, and S. J. Lange. 1993. *Statistical Analysis in Water Resources Engineering*. A. A. Balkema, Rotterdam - The Netherlands. 189 pp.
- Smith, M., R. G. Allen, J. L. Monteith, A. Perrier, L. S. Pereira, and A. Seegeren, A. 1998. Report of the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. FAO, Rome, Italy, 54 pp.
- Smith, M. 1993. CROPWAT, Programa de Ordenador para Planificar el Riego. Estudio FAO Riego y Drenaje No 46. FAO, Roma, Italia. 125 pp.
- Smith, M., R. G. Allen, L. A. Pereira, and D. Raes, D. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Estudio FAO Riego y Drenaje No 56. FAO, Rome , Italy. 211 pp.