

Modelización Hidrológica de una Cuenca Intermitente ubicada en la VIII Región de Chile

Duque L.F.*; Vázquez R.F.**

*COCASINCLAIR EP, Subgerencia Ambiental y Responsabilidad Social, Quito, Ecuador
e-mail: felipeduque_48@hotmail.com

** Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales/Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador (Tel: 593-(0)7-405-1000 ext: 4496/2343; e-mail: raulfvazquez@yahoo.co.uk)

Resumen: Se presentan los resultados principales de la modelización hidrológica de la cuenca del río Lonquén, de régimen intermitente, ubicada en el norte de la VIII región (Bio-Bio) de Chile, que se llevó a cabo con el fin de cuantificar la oferta hídrica de la cuenca en el contexto de la planificación de un embalse para riego que abastecería alrededor de 2315 has. El protocolo de modelización que se empleó es de tipo determinístico/estocástico, en base a simulaciones Monte Carlo, considerando un modelo agregado basado en el código WaterEvaluation And PlanningSystem (WEAP). El estudio reveló la presencia de "equifinalidad" ya que no se pudo identificar un único juego óptimo de parámetros para el modelo numérico de la cuenca de estudio. El estudio reveló además que la mayoría de los parámetros analizados son insensibles a las predicciones numéricas del modelo y que los límites de predicción asociados al modelo pueden catalogarse como aceptables aunque existen períodos de simulación con límites de predicción holgados, en particular donde acontecen caudales prácticamente nulos (lo cual da el carácter de intermitente al río estudiado). En cualquier caso, y en un contexto global, la calidad del presente modelo hidrológico parece bastante prometedora.

Palabras clave: Secano, régimen intermitente, modelización hidrológica, WEAP, análisis de sensibilidad, simulaciones Monte Carlo, GLUE.

Abstract: It is presented herein the main results of the hydrological modelling of the Lonquén river basin, with an intermittent regime, located in the northern region VIII (Bio-Bio) of Chile, which was conducted with the purpose of quantifying the water capacity of the basin in the context of the planning of an irrigation reservoir that is to irrigate about 2315 hectares. A deterministic / stochastic modelling protocol was used; it is based on Monte Carlo simulations and considers an aggregate model developed on the basis of the Water Evaluation And Planning System (WEAP) code. The study revealed the presence of "equifinality" since a single optimal parameter set for the numerical model of the study basin could not be identified. The study also revealed that most of the parameters inspected are insensitive to the numerical model predictions and that the prediction limits associated with the model may be categorized as acceptable despite the fact that there are periods of coarse prediction limits, particularly where nearly no-discharge occurs (which makes the hydrological regime of the studied site being intermittent). Nevertheless, in a global context, the quality of the current hydrological model looks quite promising.

Keywords: Rainfed, intermittent regime, hydrological modelling WEAP, sensitivity analysis, Monte Carlo simulations, GLUE.

1. INTRODUCCIÓN

La zona de la región del Bío-Bío pertenece a la zona agrícola de secano que abarca desde la quinta (V) a la octava (VIII) región de Chile, ésta se caracteriza por tener muchos pequeños productores y por el limitado desarrollo de la agricultura a causa de las condiciones naturales del medio ambiente, como las escasas lluvias, que se concentran en el invierno, y la erosión de los suelos producidas por las lluvias y el mal manejo al que han sido sometidos[14]. Así esta región es conocida como secano interior, la cual ha estado al margen del desarrollo agrícola que ha tenido Chile en los últimos 30 años. Entre las posibles causas que se pueden atribuir a este fenómeno se puede citar la reducida superficie cultivable que pertenece a cada agricultor, la limitada capacidad de inversión de cada agricultor, la topografía

irregular (cerros y lomajes) y el alto riesgo de erosión de sus tierras [8]. Bajo este contexto el estado Chileno ha venido impulsando proyectos para reactivar la economía agrícola de la región y con esto lograr su inserción en el desarrollo del país.

El "Proyecto de regadío Lonquén" establecido para las comunas de Ninhue, San Nicolás y parte de San Carlos (Fig. 1) se encuentran dentro del área secano interior centro – sur, que corresponde a una zona agroecológica que abarca parte de la vertiente oriental de la cordillera de la costa del país[8]. Tomando en cuenta que Ninhue es considerada una de las comunas más pobres del país[3], el proyecto de riego mencionado es de mucha importancia para las poblaciones beneficiarias ya que su puesta en marcha reactivaría la economía agrícola de la zona y con esto mejoraría su estilo de vida actual.

2. MATERIALES

2.1 La cuenca de estudio

Para la estimación de los recursos hídricos disponibles, en el contexto de la construcción de embalses, se puede considerar desde el escenario más favorable, el cual supone que se cuenta con información histórica aforada en el punto de represamiento, hasta el más desfavorable, donde no existe información hidrológica en el punto de interés. Considerando que este último escenario es el que suele ocurrir en la mayoría de las ocasiones, el cálculo de la oferta hídrica se convierte en la parte con mayor incertidumbre en los proyectos de riego. Así, se han desarrollado métodos de cálculo para la estimación de las aportaciones totales (caudal base + caudal superficial) en base a información meteorológica[12]. En esencia, dichos métodos tratan de simular el comportamiento o respuesta de una cuenca a un evento climático en base a un período de tiempo (diario, mensual, anual). Como es de suponer, la simulación de los procesos hidro-bio-geo-químicos en una cuenca no es una actividad trivial y la correcta representación de estos procesos necesitaría el uso de múltiples parámetros característicos de la zona de estudio. En este sentido, se puede encontrar en la literatura desde metodologías de cálculo que se basan en fórmulas empíricas hasta la utilización de modelos conceptuales hidrológicos complejos que presentan una fuerte parametrización como su principal característica[12].

En el presente artículo se detalla la elaboración de un modelo hidrológico agregado mediante el empleo del código WaterEvaluation And PlanningSystem (WEAP)[16] aplicado a una cuenca de régimen intermitente ubicada en la VIII región de Chile (Fig. 1). Para ello se ha establecido un protocolo de modelización que incluye un procedimiento determinístico/estocástico basado en simulaciones Monte Carlo con el fin de analizar la sensibilidad de los parámetros del modelo numérico en relación a las predicciones del mismo y, además, de establecer límites de predicción que brinden una cuantificación del grado de confianza en el modelo como potencial herramienta para la estimación de la oferta hídrica en la cuenca, lo cual es necesario en vista de que en la cabecera de la misma se pretende emplazar un embalse para riego.

El lugar donde se pretende realizar el proyecto de regadío se encuentra al norte de la región del Bio-Bío en la provincia de Ñuble, específicamente en la cuenca del río Lonquén. No se dispone de una estación hidrológica en el punto donde se plantea embalsar las aguas, por lo que se procedió a caracterizar hidrológicamente la cuenca de estudio (aguas arriba del embalse proyectado) a partir de la estación Lonquén en Treguaco, ubicada aguas abajo del punto de embalsamiento (Fig. 1). Todo esto con el fin de facilitar el proceso de modelización hidrológica.

El río Lonquén con una extensión aproximada de 686 km, se origina en la cordillera de la costa siendo uno de los mayores tributarios del río Itata. Su cuenca está afectada en su régimen natural por cuatro pequeños asentamientos humanos (Fig.1): Quirihue, Portezuelo, Treguaco y Ninhue, siendo éste último el de mayor población.

La ubicación aproximada del embalse proyectado corresponde a las coordenadas $36^{\circ} 17'$ de latitud y $72^{\circ} 24'$ de longitud, el cual tomaría las aguas del río Lonquén en la parte alta de la cuenca.

Las áreas de captación (Fig.1) tanto de la subcuenca del embalse como de la cuenca del río Lonquén, en la estación hidrológica Lonquén en Treguaco con coordenadas $36^{\circ} 25'$ de latitud y $72^{\circ} 40'$ de longitud, son 297 km^2 y 881 km^2 , respectivamente.

La cuenca del río Lonquén en Treguaco posee una estación hidrológica y dos estaciones pluviométricas (Fig. 1). La escasa información histórica y las malas condiciones de la estación de descarga para medir caudales pequeños, característicos de las épocas de estiaje (Diciembre-Marzo), sugiere que la modelización de la cuenca conlleva una incertidumbre significativa derivada de la mala calidad de los datos hidrológicos.

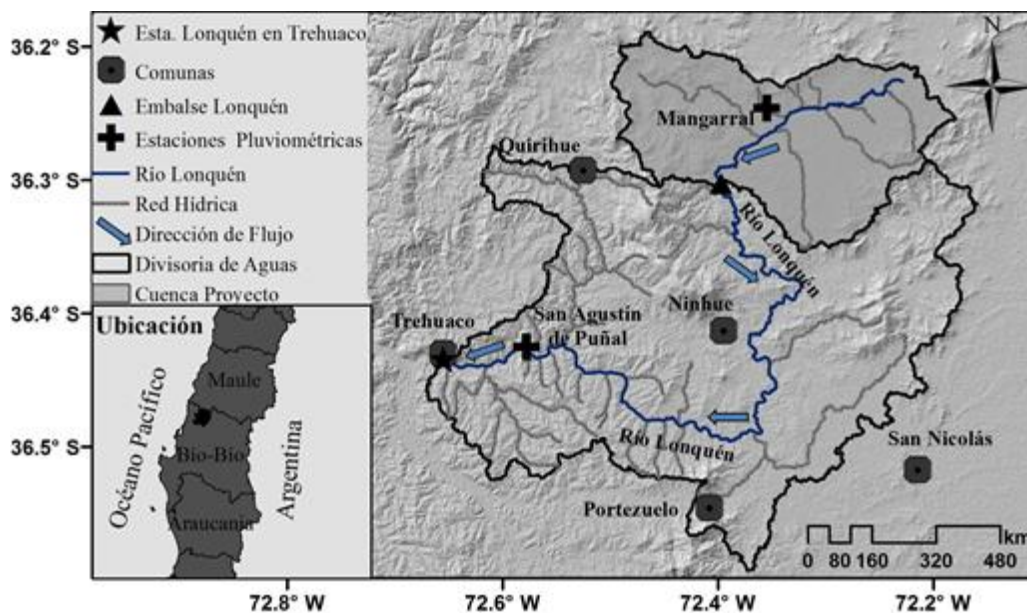


Figura 1. Ubicación del proyecto de regadío Lonquén en la cuenca del río Lonquén (Chile).

El análisis de precipitación areal mediante isoyetas señala que en la cuenca llueve en promedio aproximadamente 873 mm al año, existiendo una época seca comprendida entre los meses de Diciembre y Marzo y una húmeda en el período Abril-Septiembre. En cuanto a la temperatura se observa un valor promedio aproximado de 14.3°C.

Considerando los valores estimados a partir de la información del Atlas Agroclimático de Chile [13] y de [6], la subcuenca del embalse posee un valor de evapotranspiración potencial (EVP) areal anual de 1290 mm [15]. Por otra parte, según la información del balance hídrico de Chile [7] en el lugar se producen valores anuales de evaporación de tanque de 1500 mm.

Los caudales mínimos del río Lonquén producidos en épocas secas se estiman en promedio en $0.1\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, llegando a ser nulos en algunos meses del registro. Mientras que el promedio de caudal en épocas húmedas es de $19.7\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Por otra parte, el valor medio anual es de $12.3\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Estos valores nos indican en primera instancia que el río no tiene aportes importantes del flujo subterráneo.

Para una mejor visualización del carácter intermitente del río Lonquén, se presenta en la Fig. 2 los caudales promedios estacionales, desde abril 1986 hasta marzo de 2011, según los registros de la estación hidrológica Lonquén en Treguaco para cada año hidrológico (Abril-Marzo). La Fig.2 sugiere una diferencia significativa entre la época húmeda (Abril-Septiembre) y la época seca (Octubre-Marzo) en cada año hidrológico; en la mayoría de los años estudiados el caudal de la época seca es nulo (y sólo en el año hidrológico 1996-1997 se registró un caudal promedio diferente de cero). Adicionalmente, en seis de los años estudiados se dieron condiciones hidrológicas bastante desfavorables con caudales máximos en el orden de apenas $5\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ o menos.

2.2 Módulo hidrológico del código WEAP

En el código WEAP, el módulo de hidrología a través del método de humedad del suelo representa el proceso precipitación-escorrentía en una unidad de respuesta hidrológica (cuenca) por medio de dos estanques, que representan los reservorios superficiales y subterráneos.

En la Fig. 3 se ilustra la conceptualización del método y las diferentes ecuaciones y criterios que conforman la estructura del módulo. En la figura, Pes la precipitación (mm); DN es el derretimiento de nieve (mm); R es la recarga de riego (mm); ETr es la evapotranspiración real (mm); ET_0 es la evapotranspiración potencial de cultivo de referencia (mm); Kc es el coeficiente del cultivo (-); Z_1 es el porcentaje de agua en el estanque superior (%); Z_2 es el porcentaje de agua en el estanque inferior (%); K_1 es la conductividad hidráulica del estanque superior (mm.mes^{-1}); K_2 es la conductividad hidráulica del estanque inferior (mm.mes^{-1}); Df es la dirección preferencial del flujo (-), parámetro que separa el flujo superficial del subterráneo; y FR es el coeficiente de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo (-).

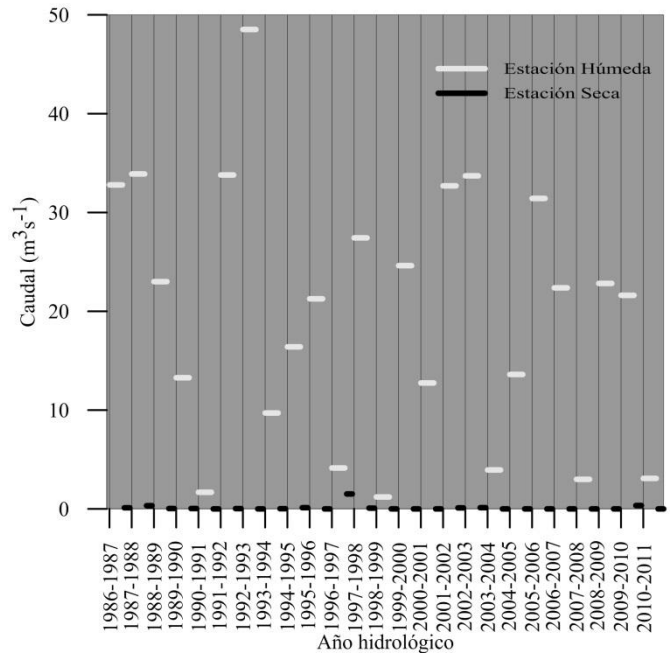


Figura 2. Caudales estacionales en la estación de aforo Lonquén en Treguaco (estación húmeda: Abril-Septiembre; estación seca: Octubre-Marzo).

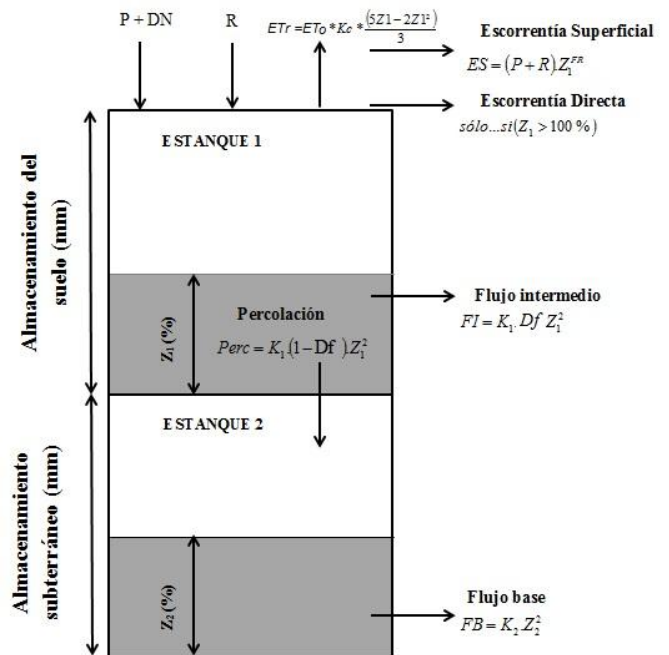


Figura 3. Conceptualización del método de humedad del suelo para una unidad de respuesta hidrológica en el módulo hidrológico de WEAP (en base a [16])

Las ecuaciones de balance en cada estanque son:

$$Z_{1max} \cdot \frac{dZ_1}{dt} = \left[Pe(t) - ET_0 \cdot K_c \cdot \frac{5 \cdot Z_1 - 2 \cdot Z_1^2}{3} \right] - Pe(t) \cdot Z_1^{FR} \quad (1)$$

$$- Df \cdot K_1 \cdot Z_1^2 - K_2 \cdot (1 - Df) \cdot Z_1^2$$

$$Z_{2max} \cdot \frac{dZ_2}{dt} = K_2(1 - Df)Z_1^2 - K_2 \cdot Z_2^2 \quad (2)$$

$$Q_t = Q_b + Q_e \quad (4)$$

, donde Z_{1max} es la capacidad del estanque superior (mm); Pe es la precipitación y el derretimiento de nieve (mm); y Z_{2max} es la capacidad del estanque inferior (mm).

El valor de la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_0) en mm.día⁻¹ se lo obtiene de la fórmula de Penman-Monteith[1]

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

, donde R_n es la radiación neta (MJ.m⁻².día⁻¹); G es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ.m⁻².día⁻¹); T es la temperatura media diaria (°C); u_2 es la velocidad del viento medida a 2 m de la superficie del suelo (m.s⁻¹); e_s es la presión de saturación de vapor de agua (kPa); e_a es la presión de vapor actual (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa.°C⁻¹); y γ es la constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹). WEAP calcula la evapotranspiración potencial de cultivo (ET_c) mediante el método 56 de la FAO[1] que considera la siguiente relación multiplicativa: $ET_c = ET_0(Kc)$. En este método el cultivo de referencia para el cual se define ET_0 es el pasto o hierva con una altura de desarrollo de 0.12 m.

3. METODOLOGÍA

3.1 Desarrollo del modelo de la cuenca y determinación inicial de los valores de los parámetros

Como ya se mencionó anteriormente, se elaboró un modelo hidrológico agregado de la cuenca del río Lonquén utilizando el código WEAP, el mismo que se lo ajustó con los datos de la estación Lonquén en Treguaco a una escala mensual. La distribución espacial de temperatura se realizó a través de gradientes altitudinales, mientras que para la distribución de la precipitación se utilizó isoyetas. Tomando en cuenta el año hidrológico (Abril-Marzo) se definieron los periodos de calibración, Abril 1986-Marzo 2005, y validación, Abril 2005-Marzo 2011. Se debe aclarar que no se utilizó un período de calentamiento (“warming up period”) previo al de calibración ya que en el presente análisis se decidió incluir los parámetros iniciales (Z_1 y Z_2) en el contexto de la calibración estocástica en base a las simulaciones Monte Carlo.

Dado que se tiene una estación de aforo aguas abajo de la cuenca del embalse del proyecto, el modelo está definido por esta estación. Por ende, con la intención de definir series hidrológicas para el sitio de presa, a pesar de que WEAP es un código agregado, se optó por discretizar espacialmente a la cuenca en dos unidades de respuesta hidrológica: cuenca baja y alta, siendo esta última la cuenca del embalse del proyecto de regadío, mientras que la cuenca baja está definida por la estación Lonquén en Treguaco (Fig. 1) para la cual existen registros históricos, definiéndose el caudal de salida de la cuenca (Lonquén en Treguaco) mediante la siguiente ecuación:

, donde Q_t es el caudal en el punto de aforo (L³.T⁻¹); Q_b es el caudal de aporte de la subcuenca baja (L³.T⁻¹); y Q_e es el caudal de aporte de la subcuenca del embalse (L³.T⁻¹). Es esta última serie temporal la que se requiere para los respectivos procesos de planificación del embalse y las dotaciones de riego.

Dado que en la cuenca no existen aportaciones de nieve y riego (trasvase), el estudio se basa en un análisis simple de lluvia-escorrentía. Los parámetros que se describen en el presente análisis son los que normalmente se modifican en la etapa de calibración y han sido escogidos en base a experiencias de trabajos anteriores[2][24][18][9]. La descripción de cada uno de ellos así como el rango de sus valores, se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de variación de los valores de los parámetros incluidos en el presente análisis.

Parámetro	Acrónimo	Unidad	Rango de valores	
			Límite inferior	Límite superior
Factor del coeficiente de cultivo	K_{cc}	-	0.5	2
Factor de resistencia al escurrimiento	FR	-	0.5	30
Capacidad del estanque superior	Z_{1max}	mm	10	4320
Capacidad del estanque inferior	Z_{2max}	mm	1	500
Conductividad en la zona radicular (estanque 1)	K_1	mm.mes ⁻¹	1	600
Conductividad hidráulica en la zona profunda (estanque 2)	K_2	mm.mes ⁻¹	1	500
Dirección preferencial del flujo	Df	-	0	1
Contenido de agua inicial en el estanque 1	$Z_{1inicial}$	%	0	100
Contenido de agua inicial en el estanque 2	$Z_{2inicial}$	%	0	100

Cabe señalar que en el presente análisis se consideró un parámetro adicional de balance de agua, el factor del coeficiente de cultivo (K_{cc}), el mismo que afecta el valor del coeficiente de cultivo (Kc) y por ende tiene una consecuencia directa al momento de definir ET_c mediante el método 56 de la FAO. Esto se ha llevado a cabo para reflejar la incertidumbre asociada a la definición del valor de Kc en base a información disponible en la literatura especializada y examinar la sensibilidad de la estructura del código WEAP a la evapotranspiración. Por otra parte se debe mencionar que si bien la documentación de WEAP recomienda valores entre 0.1 y 10 para el factor FR , se decidió ampliar el rango de valores de 0.1 a 30, considerando experiencias anteriores citadas en la literatura [24][17].

3.2 Descripción de la metodología GLUE

El procedimiento determinístico/estocástico aplicado en el presente estudio se basa en la metodología conocida como "Generalised Likelihood Uncertainty Estimator (GLUE)" [5][4][21], la cual analiza la sensibilidad de los parámetros del modelo a las predicciones del mismo y estima límites de predicción asociados al modelo.

Como parte del procedimiento GLUE y en el ámbito de un proceso de simulaciones Monte Carlo, se muestrean varios juegos de parámetros de acuerdo a sus distribuciones de probabilidad, asumidas a priori. A continuación, se procede a correr las simulaciones correspondientes a los conjuntos de parámetros muestreados y se evalúan las predicciones respectivas versus las observaciones existentes. A todas las simulaciones (y sus juegos de parámetros asociados) que exceden un umbral dado de bondad de ajuste (entre la predicción y las observaciones respectivas), se les asigna un peso de confiabilidad positivo, es decir, se les cataloga como "aceptables" y como tal se les retiene para consideración adicional en el contexto del análisis GLUE. Las funciones de distribución tanto de los valores de los parámetros como de las variables predichas se pueden calcular para un nivel de confianza dado en base a estos juegos de parámetros "aceptables" [20].

La metodología GLUE permite la integración de información adicional en el análisis principal mediante una aproximación de tipo Bayesiano para la actualización de los pesos de confiabilidad (bondad de ajuste) y de los límites de predicción. La aproximación de tipo Bayesiano [4], que se ha considerado en el presente estudio se define como:

$$L_p(\Omega_i | Q) = \frac{L_o(\Omega_i) L_Q(\Omega_i | Q)}{c_{GL}} \quad (5)$$

, ecuación que permite la combinación de información preliminar con pesos de confiabilidad basados en nuevas observaciones para producir valores posteriores de pesos de confiabilidad. En (5), $L_o(\Omega_i)$ es la distribución preliminar de pesos de confiabilidad del juego de parámetros i (Ω_i); $L_Q(\Omega_i | Q)$ es el peso de confiabilidad de Ω_i , dadas las nuevas observaciones (Q) y estimado en el nuevo período de observaciones; $L_p(\Omega_i | Q)$ es la distribución posterior de pesos de confiabilidad del juego de parámetros i ; y c_{GL} es una constante de escala para asegurar que la suma de los pesos de confiabilidad posteriores sea igual a la unidad.

3.3 El proceso para estimar los límites de predicción

Con respecto al proceso de muestreo de parámetros, se adoptaron distribuciones uniformes para todos los parámetros incluidos en el análisis, reflejando de esta forma el desconocimiento de distribuciones más apropiadas. En el presente estudio, se muestrearon un total de 100000 juegos de parámetros, número que se considera apropiado para el presente estudio, en base al número de parámetros incluidos en el análisis determinístico-estocástico.

Para caracterizar la bondad de ajuste de WEAP simulando la hidrología de la cuenca de estudio, se empleó una medida de confiabilidad proporcional al Coeficiente de Eficiencia (EF_2 ; [11][17]):

$$L_Q(\Omega_i | Q) \propto EF_2 \quad (6)$$

EF_2 se define como [19]:

$$EF_2 = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

, donde P_i es la predicción i en función del juego de parámetros Ω_i ; O_i es la observación i ; n es el número total de observaciones disponibles en el período considerado. El rango de variación de EF_2 es $-\infty < EF_2 < 1.0$, con una variación que tiene sentido entre 0 y 1 y con un valor óptimo de 1. Aunque este índice es menos sensitivo a la simulación de picos que otros índices comúnmente empleados en la literatura científica, calculados en base al cuadrado de los errores de la modelización (o residuos), tales como el Coeficiente de Correlación (" R^2 " o " r^2 "; [10]), se ve todavía afectado por esta sobre-sensibilidad [23] a la simulación de valores extremos. A pesar de ello, en este análisis se ha seleccionado el índice EF_2 porque brinda una medida combinada de los errores sistemáticos y los aleatorios [23] [22] es fácil de calcular y permite la comparación de resultados con otros reportados en la literatura científica.

Los juegos "aceptables" de parámetros se definieron en base a un umbral de la bondad de ajuste (o "confiabilidad") que se definió subjetivamente en este estudio igual a 0.5.

El valor añadido de la información adicional al momento de redefinir los límites de predicción se inspeccionó mediante el empleo de la relación tipo Bayesiana indicada en (5). En este sentido WEAP se ejecutó una segunda vez a lo largo del período de evaluación (y de forma continua a lo largo del período anterior de calibración), considerando tan sólo los juegos de parámetros "aceptables" que fueron definidos en base a la corrida anterior de WEAP durante el proceso de calibración.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto al análisis GLUE, 6618 simulaciones "aceptables" (de un total de 100000) se obtuvieron para el período de calibración. Luego de la actualización de las distribuciones de parámetros mediante el proceso tipo Bayesiano indicado en (5), el número de simulaciones (y por ende de juegos de parámetros) "aceptables" disminuyó hasta 4221. Los diagramas de dispersión ("dotplots"; [4]) para cada uno de los parámetros estudiados, obtenidos en función de las simulaciones "aceptables" en el período de calibración, se muestran en la Fig. 4.

Cabe mencionar que cada punto en cada uno de los diagramas ilustrados representa una simulación y por ende

uno de los juegos de parámetros muestreados en el contexto de análisis de simulaciones Monte Carlo. El rango de cada uno de los diagramas corresponde al rango de variación adoptado en este estudio para cada parámetro. Los diagramas muestran que se registraron pesos de confiabilidad bastante elevados en el orden de 0.90, cercanos al valor óptimo de 1. Los diagramas sugieren además que todos los parámetros estudiados, excepto K_1 y Z_{1max} , son insensibles a las predicciones del modelo ya que sus respectivos diagramas muestran una distribución de los pesos de confiabilidad con un extremo superior plano.

Esto parece cuestionar el concepto de obtener un solo juego de parámetros óptimo luego de la calibración de un modelo numérico, a favor del concepto de “equifinalidad” [4] que implica que debido entre otros aspectos a errores en la definición de condiciones de contorno, en la estructura del código numérico y en los datos empleados en la modelación se obtienen pesos de confiabilidad similares para distintos juegos de parámetros. El concepto de “equifinalidad” es una de las premisas de la metodología GLUE [4]. Por otro lado, el diagrama correspondiente a Z_{1max} muestra un pico, lo cual sugiere que este parámetro es sensible a la predicción del modelo, ya que existe un sub-rango de variación de los valores del parámetro en donde se registran mejores pesos de confiabilidad.

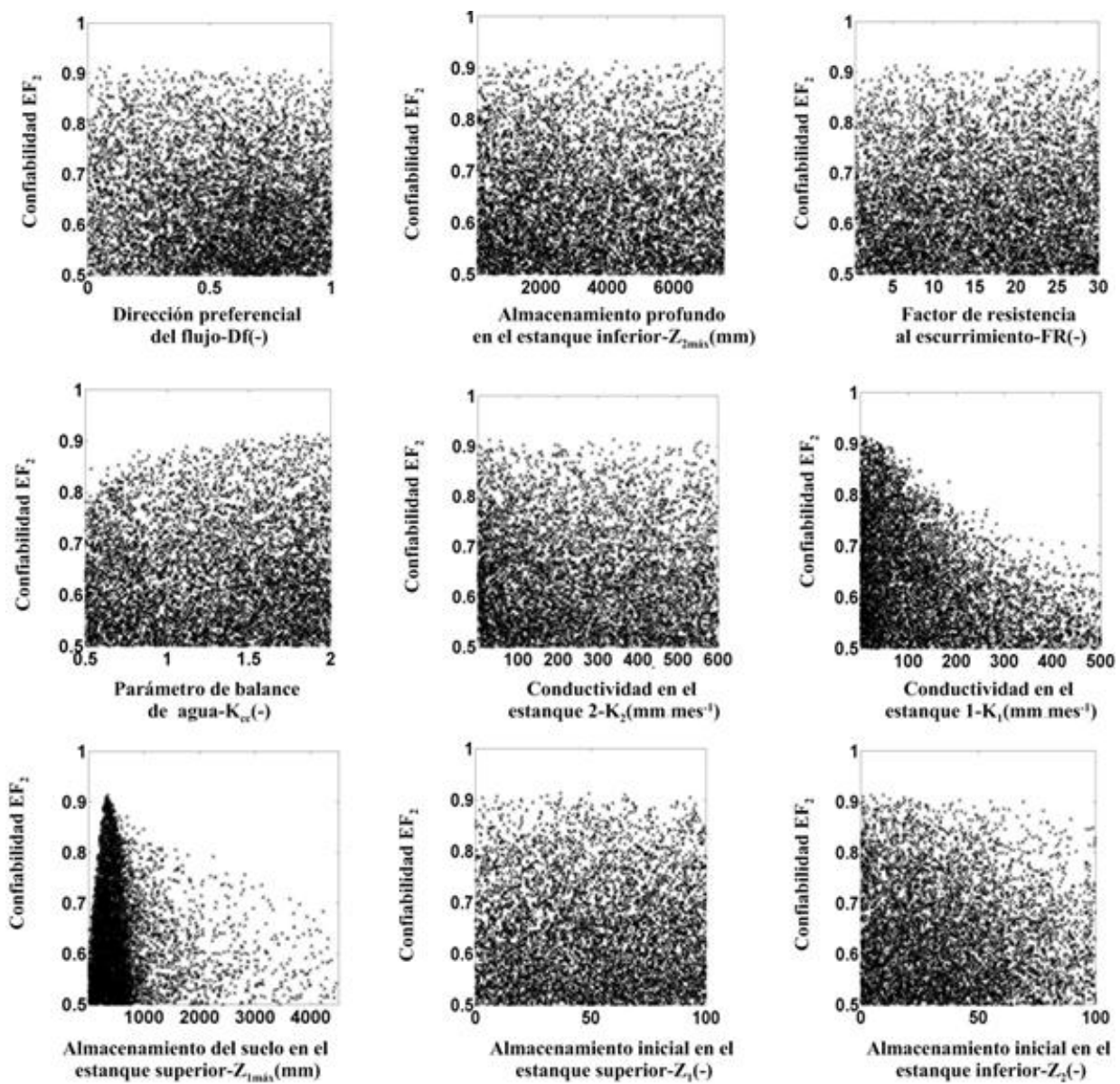


Figura 4. Diagramas de dispersión de la confiabilidad EF_2 en función de los parámetros estudiados, para el período de calibración.

Esta sensibilidad, aunque en menor grado, se aprecia también en el caso de K_7 , en vista de que el diagrama correspondiente muestra una zona en particular, dentro del rango de variación del parámetro, en la que se tiende a obtener las mejores predicciones del modelo (es decir, mejores pesos de confiabilidad EF_2).

La Fig. 5 muestra los resultados relacionados a la definición de los límites de predicción del presente modelo hidrológico. En este contexto, la Fig. 5a muestra los límites de predicción para el período de validación, condicionados a la simulación del caudal a la salida de la cuenca de estudio (estación de aforo Lonquén en Treguaco) y luego de la actualización de las distribuciones de parámetros y de los pesos de confiabilidad, mediante la ecuación tipo Bayesiana (5).

La Fig. 5 indica que en general las predicciones del modelo son aceptables aunque existen períodos de simulación con límites de predicción holgados, lo cual sugiere que WEAP ha tenido problemas al simular la cuenca intermitente en los mismos, particularmente en la zona de intermitencias, donde se puede apreciar que varias de las simulaciones han arrojado resultados bastante mayores a cero. De todas formas, en un contexto global, los resultados obtenidos son halagadores y como tal la utilización del presente modelo hidrológico para la cuantificación de la oferta hídrica en la cuenca del embalse del proyecto Lonquén parece prometedora, en particular si en el futuro se logra refinar el análisis de tal forma que los juegos de parámetros aceptables se determinan considerando algún aspecto del balance hídrico para el cual se cuenten con datos medidos adicionales a los disponibles para la presente modelización. De esta forma se podrían definir límites de predicción más angostos que los actuales, que se ajusten de mejor manera a las observaciones históricas.

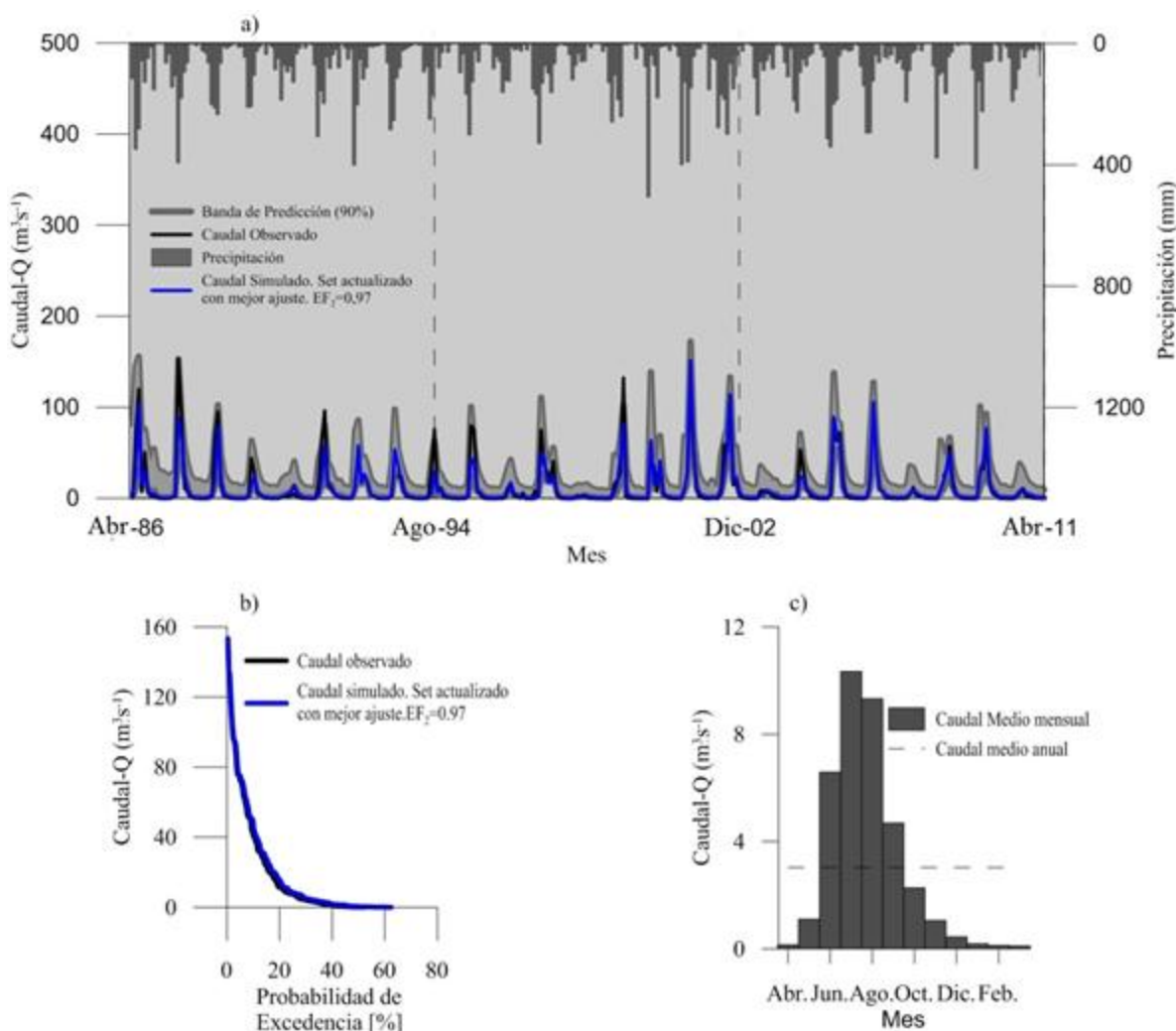


Figura 5. Resultados de la modelación hidrológica: a) límites de predicción del modelo para el período de validación y caudales simulados considerando el conjunto de mejor ajuste ($EF_2 = 0.97$); b) curva de duración; y c) caudales medios mensuales en el punto de embalsamiento considerando el juego de parámetros con mejor ajuste ($EF_2 = 0.97$).

La modelización con mejor ajuste tiene una confiabilidad $EF_2 = 0.97$ después del proceso de actualización de la distribución de parámetros y de pesos de confiabilidad (Fig. 5a). El modelo determinístico correspondiente a este conjunto de parámetros óptimo simula adecuadamente los caudales observados y por lo tanto sus probabilidades de ocurrencia, tal como lo muestran las respectivas curvas de duración (Fig. 5b). En base a este conjunto de parámetros óptimo se estimó un caudal promedio anual de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en la cuenca del embalse del proyecto de riego Lonquén, con valores de 4.4 y $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en la estación húmeda y seca respectivamente (Fig. 5c).

5. CONCLUSIONES

La modelización hidrológica de una cuenca de régimen intermitente se ha llevado a cabo en el contexto de un protocolo de modelización determinista/estocástico que consideró la metodología conocida como GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimator), basada en simulaciones Monte Carlo y en el uso (en el contexto de la modelización) de nuevas evidencias a través de un proceso tipo Bayesiano.

El estudio reveló la presencia de “equifinalidad” en vista de que se identificaron varios juegos de parámetros con los cuales la estructura del modelo es capaz de producir simulaciones (predicciones) comparables en relación a las observaciones disponibles. Esto pone en tela de duda la teoría tradicional de que se puede identificar un único juego de parámetros que optimice la representación del sistema modelado y como tal de los métodos tradicionales (y nuevos) para la optimización automática de modelos numéricos, aunque este es un aspecto a explorar de mejor manera en trabajos futuros.

El estudio reveló además, mediante el examen preliminar en base a los diagramas de dispersión (Fig. 4), que la mayoría de los parámetros incluidos en el estudio son insensibles a las predicciones numéricas del modelo. En este sentido, es importante acotar que es necesario en el futuro llevar adelante un estudio más adecuado de la sensibilidad de los parámetros ya que los diagramas de dispersión constituyen simples proyecciones de una superficie multidimensional muy compleja [13] y por ende sería interesante complementar el presente análisis mediante alguna prueba estadística o gráfica que permita aislar el peso de cada parámetro.

Los límites de predicción muestran que en general las predicciones del modelo numérico pueden catalogarse como aceptables aunque existen períodos de simulación con límites de predicción holgados. De todas formas, en un contexto global, la calidad del presente modelo hidrológico para la cuantificación de la oferta hídrica en la cuenca del embalse del proyecto Lonquén parece prometedora, en particular si en el futuro se logra redefinir límites de predicción más estrechos que los actuales, que se ajusten de mejor manera a las observaciones históricas.

En este contexto, en el fenómeno de equifinalidad demostrado en el presente análisis, así como en cualquier otro proceso de calibración manual o automática, puede darse el caso de que existan varios conjuntos de parámetros que arrojen resultados del modelo hidrológico aceptables, sin

embargo, estos pueden o no representar adecuadamente el balance hídrico de la cuenca, por lo cual, para la selección de un juego de parámetros óptimo o un conjunto de juegos óptimos de parámetros, se debe analizar la simulación de los diferentes componentes principales del balance hídrico en caso de que existan mediciones o estimaciones aceptables para los mismos. Este es un aspecto que se tendrá presente en etapas posteriores de la investigación actual a fin de auscultar la disponibilidad adicional de información de campo sobre alguno de los componentes del balance hídrico que no se ha considerado en el presente trabajo y por ende la posibilidad de evaluar de mejor manera la calidad de las simulaciones hidrológicas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección General de Agua (DGA) de Chile por la información hidroclimática proporcionada, así como a la Universidad de Chile a través de su departamento de Recursos y Medio Ambiente Hídrico por el acceso a información valiosa y de soporte. El primer autor desea agradecer en especial a la Ing. Ximena Vargas por la asesoría brindada para la ejecución de esta investigación. Parte del análisis que aquí se detalla se desarrolló en el contexto del proyecto "Establecimiento de modelos numéricos para casos selectos de la gestión de recursos hídricos", dirigido por el segundo autor y financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC).

REFERENCIAS

- [1] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*, FAO. 2006.
- [2] A. Ayala, “Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico de la laguna Laja.” MSc. Dept. Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2011.
- [3] J. Bengoá, “Pobreza en Chile, identificación de situaciones de pobreza por comuna.” *Archivos Chile*, 2003. [Online]. Available: http://www.archivochile.com/Ideas_Autores/bengoaj/bengo0005.pdf. [Accessed: 10-Sep-2014].
- [4] K. Beven, “Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling.” *Adv. Water Resour.*, pp. 41–51, 2003.
- [5] A. Binley, K. Beven, A. Calver, and L. Watts, “Changing Responses in Hydrology: Assessing the Uncertainty in Physically Based Model Predictions,” vol. 27, 1991, pp. 1253–1261.
- [6] CNR, *Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile*, Santiago, Chile: CIREN-CORFO, 1997.

- [7] DGA, "Balance Hídrico de Chile," 1987.
- [8] P. Grau, *Cultivo del Cerezo en el Secano Interior de la Región del Bio-Bio*, Chillán, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, 2007, pp. 176.
- [9] E. Ingol-Blanco and D. McKinney, "Hydrologic Model for the Rio Conchos Basin: Calibration and Validation," CRWR, 2009.
- [10] D. Legates and G. McCabe, "Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrological and hydroclimatic model," 35, vol. 1, 1999, pp. 233–241.
- [11] J. Nash and J. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles," 3, vol. 10, April 1970, pp. 282–290.
- [12] R. Dal-Ré, *Pequeños embalses de uso agrícola*, vol. 1, Madrid, España: Mundi-Prensa, 2003, pp. 389.
- [13] F. Santibáñez, M. Uribe, and M. Vicencio, *Atlas agroclimático de Chile*, Santiago, Chile: Universidad de Chile, 1993.
- [14] Y. Shinomi and C. Pérez, *Métodos y estrategias para el desarrollo sustentable del secano*, Chillán, Chile: INIA, 122, 2004, pp.26.
- [15] SMI Ingenieros, "Estudio de diseño de construcción regadío Lonquén VIII Región.," DGA-DOH, 2009.
- [16] Stockholm Environment Institute, "WEAP user guide," 2008.
- [17] L. Thompson, M. Escobar, C. Mosser, D. Purkey, D. Yates, and P. Moyle, "Water Management Adaptations to Prevent Loss of Spring-Run Chinook Salmon in California under Climate Change.," 5, vol. 138, 2012, pp. 465–478.
- [18] Universidad Católica, *Modelación hidrológica y de recursos hídricos de la cuenca del río Paute.*, Santiago, Chile: 2009, PP. 86.
- [19] R. Vázquez, "Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems," K. U. Leven, Bélgica, 2003, pp. 335.
- [20] R.F. Vázquez, "Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano," MASKANA, 1, vol. 1, 2010, pp. 79–90.
- [21] R.F. Vázquez, K. Beven, and J. Feyen, "GLUE based assessment on the overall predictions of a MIKE SHE application," vol. 23, May 2009, pp. 1325–1349.
- [22] R.F. Vázquez and J. Feyen, "Application of distributed hydrologic models". En: Pilar García-Navarro, P., E. Playán (Eds.): Numerical modelling of Hydrodynamics for Water Resources. *Taylor & Francis*, Londres, Reino Unido, 2008, pp. 153-174
- [23] R.F. Vázquez, L. Feyen, J. Feyen, and J. Refsgaard, "Effect of grid-size on effective parameters and model performance of the MIKE SHE code applied to a medium sized catchment," 16, vol. 2, 2002, pp. 355–372.
- [24] C. Young, M. Escobar, M. Fernandes, B. Joyce, M. Kiparsky, J. Mount, V. Metha, D. Purkey, J. Viers, and D. Yates, "Modeling the Hydrology of Climate Change in California's Sierra Nevada for Subwatershed Scale Adaptation," vol. 45, 2009, pp. 1409–1423.