

USO DEL MODELO QDM MODIFICADO EN UNA CUENCA CON ESCASA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN EL SUR DE CHILE

Yerel Morales¹

(1) Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile

Contacto autor principal: yerel.morales@uv.cl

RESUMEN. El análisis sobre la disponibilidad de recursos hídricos es una constante en la actualidad y para dar respuesta a las preguntas asociadas a ello, la modelación hidrológica es una herramienta de gran utilidad. Hoy en día existe una gran variedad de modelos hidrológicos, cada vez más detallados y específicos, pero ¿qué pasa cuando la información disponible es escasa o el tiempo de puesta en marcha es acotado? En el presente artículo se describe el modelo QMD Modificado, un modelo agregado, conceptual y que representa el proceso precipitación-escorrentía a nivel diario, el cual se utilizó para simular los caudales de la cuenca del río Lirquén en Cerro El Padre utilizando 2 años de calibración y una validación que comprende 10 años consecutivos, entregando resultados de NS en torno a los 0.7 tanto para calibración como para validación. A partir de lo anterior se concluye que el modelo QMD es una alternativa viable en cuencas con morfología regular.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo se han destinado grandes esfuerzos en lograr entender el ciclo hidrológico y poder modelarlo, con el fin de conocer a lo largo del tiempo la variabilidad del recurso hídrico y junto con ello su disponibilidad y/o eventos extremos. A esto se le suman los cambios que se han producido a nivel global y que afectan de manera importante las forzantes climáticas que influyen directamente en este ciclo, como lo son precipitación, temperaturas y evapotranspiración, entre otros.

Los inicios de la modelación hidrológica datan hacia fines de la década de los 60s, de la mano con mayor disponibilidad de computadores digitales, donde muchos de los proyectos de doctorados en universidades internacionales (USA, Reino Unido, entre otros) en el área de la hidrología apuntaban al desarrollo de alternativas conceptuales que permitieran caracterizar el problema de precipitación-escorrentía. Ejemplo de estos modelos son Stanford Watershed Model y programa de simulación en Fortran (HSPF) (Beven, 2019). Por su parte Chile no se quedaba atrás en este tipo de investigaciones, así lo demuestra el trabajo realizado por Ernesto Brown, Patricio Ferrer y Luis Ayala en el año 1973, donde como resultado se genera un modelo hidrológico mensual (MSH) en lenguaje Fortran que permitía obtener información mensual de la escorrentía total de una cuenca.

Conforme avanzó el tiempo, se desarrollaron una gran cantidad de modelos hidrológicos, los que pueden ser clasificados de acuerdo a su forma, aleatoriedad o su variabilidad espacio-temporal. En función de lo antes mencionado, existen diversas clasificaciones y a su vez una amplia gama de modelos que responden a estas características, por lo cual la selección de estas herramientas depende en gran medida de la información con la que se cuente para implementarlos

Actualmente existen diversos trabajos en los cuales se han implementado modelos tales como HEC-HMS (USACE, 2000), WEAP (SEI, 1988), VIC (Liang et al., 1994), entre otros. Cabe destacar que todos ellos requieren de una gran cantidad de información meteorológica, así como también información característica de las zonas de estudio en términos geomorfológicos, lo cual responde a su conceptualización, ya que corresponden a modelos semidistribuidos o distribuidos.

La pregunta es qué sucede cuando el acceso a la información de registros “in situ” es limitado o cuando los datos de productos grillados, como CR2Met, presentan una incertidumbre importante. Es en estas instancias donde aparecen como alternativas los modelos agregados, que requieren una cantidad menor de información para llevar a cabo el proceso de modelación de una determinada cuenca. Ejemplos de ellos son el modelo MHM, el modelo QMD o su versión modificada, los que se describirán en detalle más adelante.

El objetivo del presente trabajo es mostrar el desempeño de un modelo agregado a escala diaria, como QMD modificado, el cual fue calibrado el año 2009 con información de la década de los 90s y evaluar con información actualizada de las mismas estaciones, dado que hasta la fecha la disponibilidad de información medida “in situ” no ha variado.

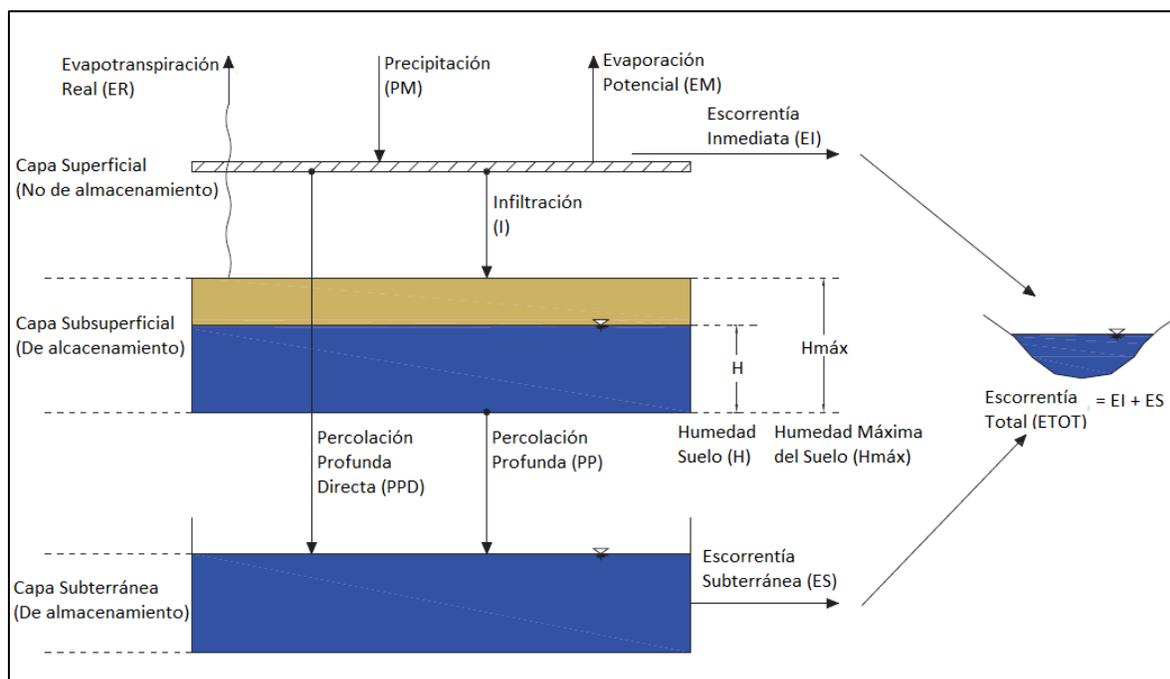


Figura 3. Modelo conceptual del MHM (adaptado de Ferrer et al. 1973)

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

El modelo hidrológico mensual MHM fue propuesto por Ferrer et al. (1973), es de carácter pluvial y utiliza dos estanques para caracterizar los procesos que suceden bajo la superficie y entregar información de escorrentía superficial y subterránea (ver Figura 1). Para el análisis de la escorrentía subterránea considera procesos de infiltración y percolación profunda, además de variaciones de humedad del suelo, lo que finalmente se traduce en una escorrentía subterránea, que sumada a la escorrentía inmediata, general la escorrentía total. Es un modelo agregado que considera como datos de entrada únicamente precipitación, evapotranspiración y área de la cuenca, lo cual disminuye en gran medida el tiempo requerido para analizar información disponible. Consta de 10 parámetros ajustables relacionados con los procesos al interior de la cuenca, ya sean superficiales o subterráneos y 2 variables de inicialización.

En el año 1995 Kuhlmann y Stöwhas toman como base MHM y lo llevan a escala diaria, lo cual tiene por resultado el modelo QMD, un modelo conceptual que consta de 11 parámetros ajustables y 2 variables de inicialización. Al igual que su símil mensual, contempla una escorrentía total está compuesta por flujo superficial y subterráneo, al que se le suma un flujo subsuperficial, contemplando procesos de evapotranspiración, infiltración y percolación profunda. Dado que es un modelo agregado los procesos son evaluados por unidad de área, generando resultados globales tan solo al final de la simulación, cuando se presenta la escorrentía superficial estimada.

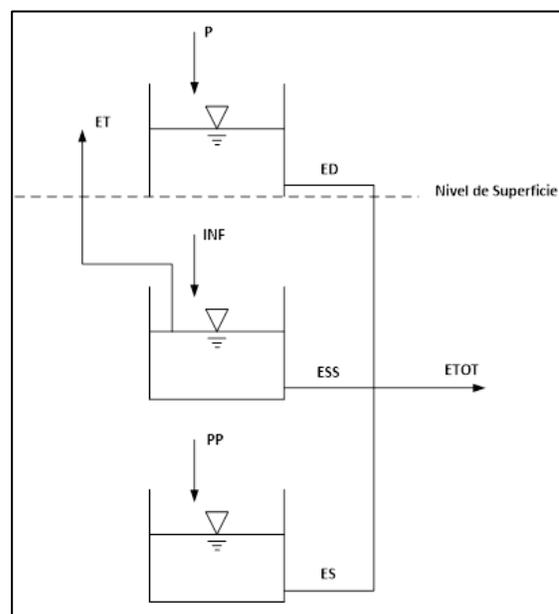


Figura 4. Esquema conceptual modelo QMD.

Posteriormente se le realizan modificaciones al proceso de infiltración Morales (2009), adoptando el método de Green Ampt con el fin de mejorar el comportamiento del modelo en los caudales bajos, incorporando 3 parámetros más al modelo original (14 parámetros de calibración).

Este modelo cuenta además con dos subrutinas que permiten hacer una búsqueda univariada (BUSCA) y evaluar el desempeño del modelo (SIMUL) a través de 3 funciones objetivo distintas, las cuales se presentan en las ecuaciones (1), (2) y (3).

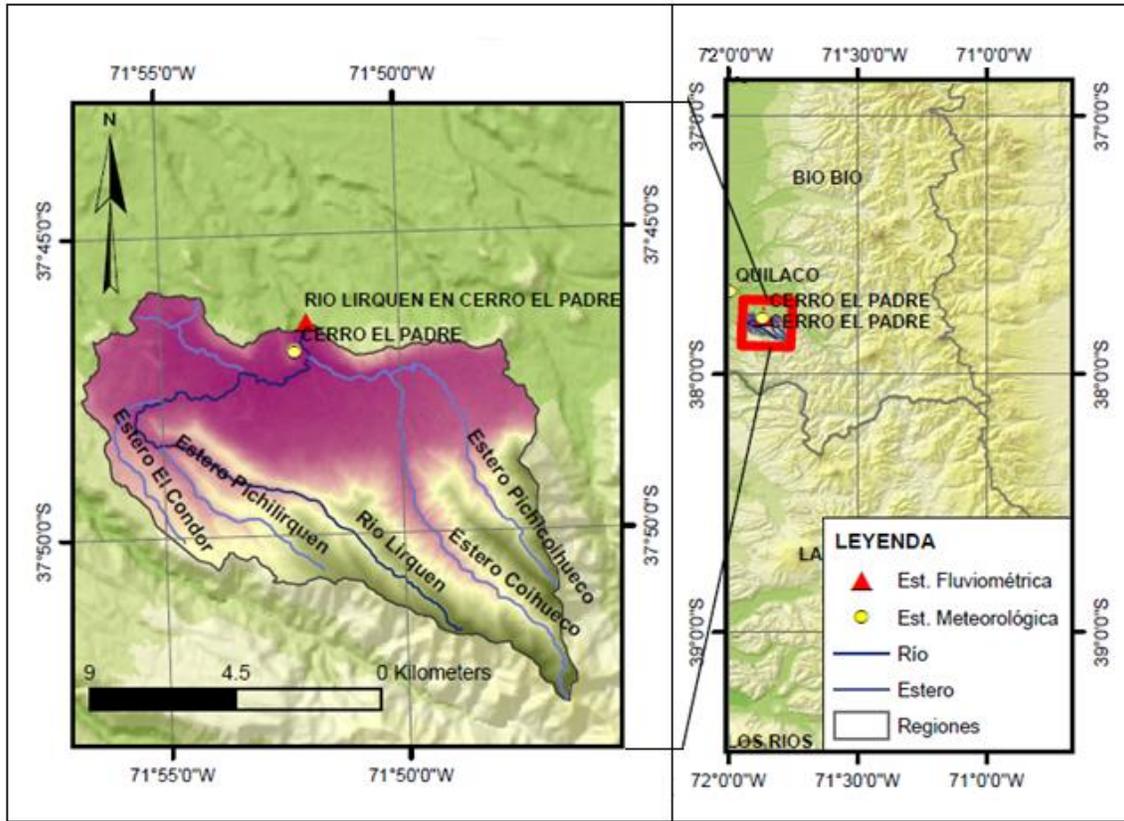


Figura 5. Zona de estudio, cuenca Río Lirquén en Cerro El Padre.

$$FOB = \sum \frac{|ETOT_{(i,j)} - QDIA_{(i,j)}|}{DIAQ} \quad (1)$$

$$FOB = \sum \frac{|ETOT_{(i,j)} - QDIA_{(i,j)}|}{DIAQ} \quad (2)$$

$$FOB = \sum \frac{|\ln[ETOT_{(i,j)}] - \ln[QDIA_{(i,j)}]|}{DIAQ} \quad (3)$$

Donde:

ETOT_(i,j): Caudal diario simulado.

QDIA_(i,j): Caudal diario observado.

DIAQ : Cantidad de días del periodo simulado.

DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde a la cuenca del Río Lirquén en Cerro El Padre, perteneciente a la Región del Biobío, Chile. El área aportante alcanza los 104,07 Km², con una elevación mínima de 319 msnm y una elevación máxima de 1426 msnm. Se encuentra controlada por la estación fluviométrica del mismo nombre, vigente desde el año 1942. La estación se ubica a 37°46'32" latitud Sur y 71°51'46" de longitud Sur (ver Figura 2).

En términos de uso de suelos, es una zona cubierta principalmente por bosque nativo y plantaciones forestales, las cuales cubren aproximadamente un 85% del área total.

Tabla 2: Estaciones meteorológicas y fluviométricas vigentes con información disponible para la modelación.

Código	Nombre	Variable Interés	Cuenca	Altura	Coordenadas	
				[msnm]	Lat. S	Lon. W
08317003-4	Cerro El Padre	Pp	Río Lirquén en cerro El Padre	346	37°46'47"	71°51'59"
08318002-1	Quilaco	E	Río Lirquén en cerro El Padre	231	37°41'06"	72°00'21"
08317002-6	Río Lirquén en cerro El Padre	Q	Río Lirquén en cerro El Padre	340	37°46'32"	71°51'46"

MATERIALES Y MÉTODO

Los datos de precipitación (Pp), evaporación (E) que se utilizarán para llevar a cabo las simulaciones, corresponden a información de las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA), así como también los datos de caudales (Q) para determinar el nivel de ajuste del modelo respecto a los datos registrados. El detalle de cada una de ellas se presenta en la Tabla 1. En Morales (2009) se utilizó para la calibración el criterio de ajuste 2 de la subrutina BUSCA del modelo QMD Modificado (ver ecuación 2), error cuadrático medio (RMS) y error cuadrático medio normalizado. En la actualidad, criterios de bondad de ajuste ampliamente utilizados en modelación hidrológica corresponde a Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe logarítmico (NS-Log), Porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente R2, criterios que serán incorporados en el presente trabajo

RESULTADOS

Como se mencionó en un principio, el proceso de calibración realizado en el año 2009 fue con información de la década de los 90s, específicamente en los años 1992 y 1993. Los resultados obtenidos en ese entonces se resumen en la Tabla 2, la cual incorpora también los nuevos indicadores de bondad de ajuste considerados. Las series de tiempo de caudales modelados y simulados del periodo de análisis se presentan en la Figura 4.

Tabla 3: Indicadores obtenidos en el proceso de calibración

Criterio	Valor
FOB	0,21
RMS	5,85
RMS_normalizado	0,06
NS	0,76
NS-Log	0,91
PBIAS	20,21
R ²	0,81

Al observar los indicadores de bondad de ajuste se consideran dentro del rango muy bueno, en el caso de NS y NSE, mientras que PBIAS está en un rango satisfactorio, según lo establecido en la literatura para modelación hidrológica (Moriasi, 2007; Molnar, 2011). Lo anterior coincide con el comportamiento de la serie temporal de caudales modelada, la cual representa adecuadamente la variabilidad de los caudales registrada en la estación, donde las principales deficiencias se observan en el ajuste logrado para los caudales peaks, lo que se ve reflejado en los valores de NS y PBIAS, donde este último muestra una clara subestimación de los flujos. Aun así, el valor de NS se encuentra en el rango muy bueno, lo cual tiene relación con que el modelo realiza una buena estimación de los caudales medios y bajos, por lo que se obtiene un buen indicador en

términos numéricos, pero el contrastar los valores de manera gráfica, permite identificar donde se presentan las deficiencias del mismo.

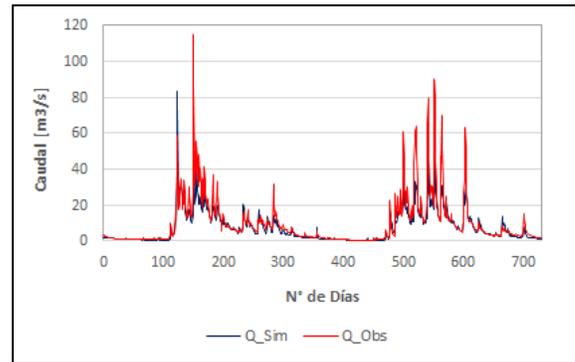


Figura 6.- Caudales observados y simulados proceso calibración.

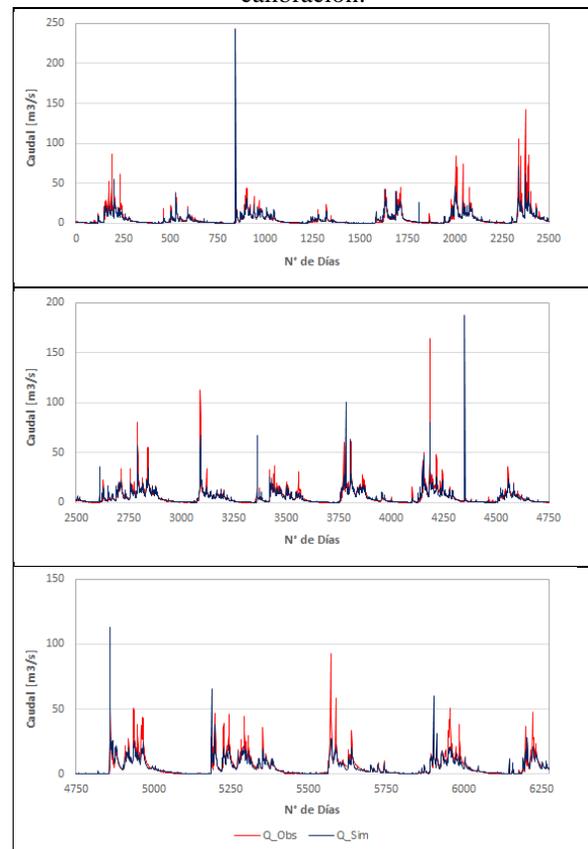


Figura 7. Caudales observados y simulados periodo de validación.

El proceso de evaluación con información actualizada se llevará a cabo con datos comprendidos entre los años 1995 y 2014. La estadística en este periodo se encuentra completa, sin necesidad de realizar procesos de relleno de información. Los resultados se presentan en la Figura 5.

Los resultados de los indicadores de bondad de ajuste correspondientes al periodo de validación se presentan en la Tabla 3. Según se observa, los resultados obtenidos con la información actualizada, sin considerar un nuevo

proceso de calibración, muestran que el modelo continúa representando de manera adecuada el comportamiento histórico de la cuenca y que la principal deficiencia está en la simulación de los valores peaks, pero esto también se traslada a los caudales bajos, lo cual se ve reflejado en una leve disminución del valor de NS logarítmico.

Tabla 4: Indicadores obtenidos en el proceso de validación

Criterio	Valor
FOB	0,67
RMS	2,49
RMS_normalizado	0,01
NS	0,71
NS-Log	0,86
PBIAS	12,23
R ²	0,63

En términos generales, considerando que el periodo de evaluación contempla una extensión de 10 años, se considera que el valor de PBIAS obtenido indica que existe una buena aproximación del volumen de escorrentía directa.

Analizando en detalle la serie de tiempo que se muestra en la Figura 5, se observa que a pesar de una notoria subestimación en la representación de los valores peaks, destaca una representación muy adecuada a lo largo del tiempo de la curva de recesión del hidrograma en los diferentes eventos de incremento de caudal o crecidas, lo cual da cuenta de adecuados procesos de simulación de infiltración y modelación del estanque correspondiente a las primeras capas de suelo, el cual involucra escorrentía subsuperficial y aporte a la percolación profunda. Por otra parte, al enfocarse en los años asociados a la megasequía (Garreaud, 2017) 2010-2014, se ve que existe una constante subestimación de los valores peaks, lo que sugiere la necesidad de un ajuste de los parámetros que sea más representativo de los procesos que se desarrollan en la cuenca ante años consecutivos de bajas precipitaciones. Esto a raíz de que los años utilizados para calibrar el modelo corresponden a años catalogados en el rango normales a húmedos, en términos de precipitación y caudal, por lo que la representación de condiciones de sequía se dificulta al no haber sido incorporadas en el periodo de calibración. La tendencia a la subestimación del modelo queda en evidencia de manera más clara en la Figura 6, donde es posible observar que la pendiente de la recta es menor a la unidad y además el coeficiente de correlación tiene un valor de 0,63; cabe destacar que esta tendencia es más marcada en los caudales superiores a los 40 [m³/s] aproximadamente y la mayor dispersión se presenta por sobre los 60 [m³/s]. En la serie de tiempo se observan 2 peaks que no coinciden con los valores observados de caudal, por lo que se considera que pueden ser posibles errores de medición, ya sea en precipitación o caudal.

DISCUSIÓN

El modelo QDM modificado presenta buenos resultados en la simulación para cuencas de morfología regular, es decir, con índices de compacidad menores a 1,5 (André, 2009). Los mejores desempeños se concentran en los caudales base y medios, presentando deficiencias en los valores peaks. A pesar de ello, los indicadores de desempeño se encuentran en el rango bueno para NS, muy bueno en el caso de NSE y para el caso de PBIAS en un rango bueno, donde la estimación no supera el 15% de variación respecto al volumen real de agua en un periodo de 10 años.

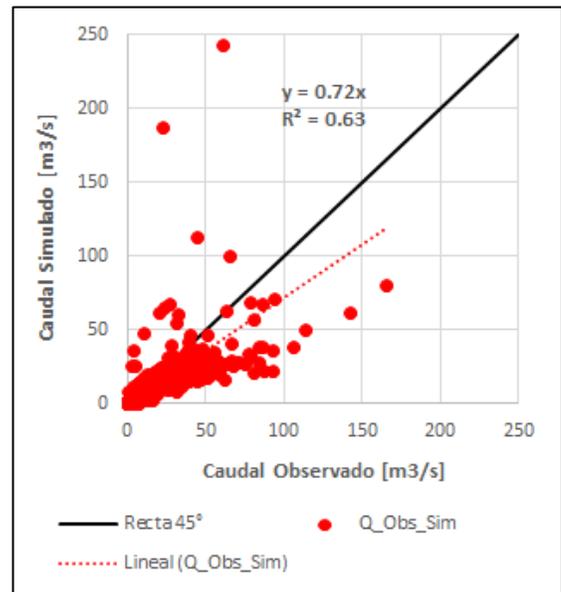


Figura 8: Correlación caudales observados y simulados – periodo de validación.

En estudios realizados con anterioridad (Morales, 2009) se observó que para cuencas con valores de coeficiente de compacidad mayores a 1,5, como es el caso del Estero Upeo, el modelo no presenta un desempeño adecuado, presentando deficiencias importantes tanto para caudales base como para caudales peaks, por lo que no se recomienda el uso de este modelo en cuencas con esas características.

Al observar en detalle los resultados obtenidos en el periodo inserto en la megasequía, se observó que existe una tendencia a la subestimación constante de los caudales peaks, ante escenarios de bajas precipitaciones prolongadas, pero los caudales medios y base siguen siendo representados de manera adecuada. Esto da pie para analizar la posibilidad de que los procesos hidrológicos que se generan en la cuenca ante escenarios de sequía no estén representados de buena forma, ya que como se mencionó anteriormente, condiciones de sequía no fueron abordadas en el proceso de calibración. Por lo antes mencionado, se considera adecuado realizar una revisión de los parámetros de calibración considerando en el proceso un conjunto de años que contemple

condiciones secas, normales y húmedas, así como también eventos consecutivos de bajas precipitaciones y verificar cómo cambian los valores de dichos parámetros, de manera tal de generar un modelo representativo de la cuenca a lo largo del tiempo con parámetros que tengan un mayor rango de validez.

CONCLUSIONES

Si bien en la actualidad la tendencia es al uso de modelos semi-distribuidos o distribuidos, que permitan captar en la modelación la heterogeneidad de la cuenca, el modelo QMD modificado se presenta como una alternativa viable para la simulación de caudales a nivel diario en cuencas que presentan un bajo nivel de información meteorológica, ya que los únicos datos que se requieren son precipitación, evaporación y caudales registrados. Esto es relevante, ya que aplicar modelos que requieren una mayor cantidad de información, si bien es posible estimarla a través de relaciones presentes en la literatura, es necesario tener en cuenta la incertidumbre que se genera en los resultados al incorporar estos procesos.

Por otra parte, QMD Modificado ha dado cuenta de que puede obtener resultados adecuados a través de periodos cortos de calibración (alrededor de 2 años). Esto hace que tenga una ventaja comparativa ante otros modelos disponibles en la actualidad, la cual tiene relación con un menor tiempo necesario para su puesta en marcha, en relación a los periodos de calibración y procesamiento de la información de entrada.

Finalmente, por lo antes mencionado es posible considerarlo como una alternativa viable cuando existen periodos cortos de información o tiempos de modelación acotados, siempre teniendo en cuenta las características recomendadas respecto a la forma de las cuencas y también su tendencia a la subestimación y mayor dispersión en los caudales peaks.

REFERENCIAS

- André, M. (2009). "Similitud Hidrológica y Transferencia de Información Fluviométrica en Cuencas de la Zona Central de Chile". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Valparaíso. UTFSM.
- Beven, K. (2019). How to make advances in hydrological modelling. *Hydrology Research*. doi:10.2166/nh.2019.134.
- Ferrer, P., Brown, E., Ayala, L. (1973). "Simulación de gastos mensuales en una cuenca pluvial". II Coloquio Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago. Agosto. Departamento de Obras Hidráulicas, Universidad Católica de Chile.
- Garreaud, R., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. (2017): "The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation". *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, doi:10.5194/hess-2017-191, 2017.
- Kuhlmann, J. (1995). "Modelo para la estimación de caudales medios diarios en cuencas pluviales". Memoria para optar a título de Ingeniero Civil. Valparaíso. UTFSM.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T. (2007). "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations" American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Morales, Y. (2009). "Análisis comparativo de modelos de estimación de caudales medios diarios en cuencas pluviales". Memoria para optar a título de Ingeniero Civil. Valparaíso. UTFSM.

Molnar, P. (2011). "Calibration, Watershed Modelling, SS 2011" Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.