

# COMPARACIÓN DEL USO DE DATOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS Y PROCESADOS EN MALLA EN LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS EN UNA CUENCA EN MÉXICO

Juan Alberto Velázquez Zapata<sup>1\*</sup> ; Edgar Talledos Sánchez<sup>2\*</sup>

## 6.1. Resumen

Los sistemas de alerta hidrológica ante inundaciones están basados generalmente en modelos hidrológicos con los cuales se predice el caudal que pueden afectar a la población. Estos modelos, requieren de datos meteorológicos observados para su implementación en un sistema operacional. En México, como en otros países, los datos meteorológicos observados presentan características (como datos faltantes o baja densidad de estaciones) que dificultan su uso en la modelación hidrológica, por lo que los datos meteorológicos procesados en malla se han visto como una alternativa a las observaciones directas. Esta investigación compara el uso de datos meteorológicos observados con dos bases de datos interpolados en malla y datos de un reanálisis (simulaciones de un modelo numérico) en la simulación hidrológica de caudales medios y extremos en una cuenca de México. Los resultados muestran que los datos en malla presentan diferencias importantes respecto a las observaciones, dado que la temperatura y la precipitación son generalmente subestimadas y el ciclo anual no es correctamente representado. En un segundo paso, las bases de datos seleccionadas se usaron

---

1 E-mail: javelazquezza@conacyt.mx.

2 E-mail: etalledossa@conacyt.mx.

\* Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – El Colegio de San Luis. Parque de Macul 155 Fracc. Colinas del Parque. C.P. 78294. San Luis Potosí S.L.P., México. 5301.

como datos de entrada del modelo hidrológico GR4J para simular caudales diarios con los que se calcularon indicadores hidrológicos medios y extremos. Los resultados muestran que el caudal medio puede ser correctamente estimado con todas las bases de datos, mientras que los indicadores de caudal extremo tienen errores importantes cuando se usan datos meteorológicos procesados, especialmente con el reanálisis, por lo que estos deben usarse con cautela.

**Palabras clave:** Simulación hidrológica; Datos meteorológicos interpolados; reanálisis.

## 6.2. Abstract

Flood Warning Systems are often based on hydrological models fed by numerical model data for near future. The hydrological models should be calibrated and validated with observed data before their use in an operational warning system. However, the meteorological data in Mexico often presents problems such as a lack of data or even a low density of stations. Therefore, the post-processed gridded meteorological data could be an alternative source of data for the hydrological modelling. This work compares the use of observed meteorological data with two post-processed gridded data sets and one reanalysis data set in the simulation of mean and high flows over a Mexican basin. Results show that the selected post-processed gridded data sets present important differences with the observed meteorological data, so the precipitation and temperature are generally underestimated and the annual cycle is not well represented. In a next step, the selected meteorological data sets were used to feed the conceptual lumped hydrological model GR4J in order to simulate daily discharge. In addition, four hydrological indicators, the overall mean flow and the 2-yr, 5-yr and 10-yr return period high flow were computed with the hydrological simulations. Results show that the mean flow can be correctly estimated with all meteorological data bases; however, high flow indicators present important errors when the post-processed meteorological data is used, especially with the reanalysis; therefore, they should be used with caution in the calibration and validation of hydrological models.

**Keywords:** hydrological modelling; post-processed meteorological data; reanalysis

### 6.3. Introducción

Las inundaciones fluviales se generan cuando el agua de los ríos desborda hacia la superficie cercana (CENAPRED, 2004). En México, las zonas donde podrían esperarse inundaciones frecuente son la Planicie Tabasqueña, la cuenca baja del Río Bravo, la cuenca baja del Río Pánuco y la cuenca baja del Río Coatzacoalcos, entre otras, cubriendo un área en el país de 162 000 km<sup>2</sup> (Arreguín-Cortés *et. al.*, 2016).

En México, actualmente operan diversos sistemas de alerta hidrometeorológica ante riesgos de inundación. Estos sistemas se basan en una red telemática para monitorear la precipitación y los niveles de los ríos en la cuenca, y en algunos casos, incorporan un modelo hidrológico para estimar la cantidad de agua que escurre. En estos sistemas, si el caudal exceda determinado umbral, se activará una alarma (CENAPRED, 2004). Uno de los sistemas de alerta hidrometeorológica implementado en México se encuentra en la cuenca del Bajo Pánuco, el cual monitorea la región localizada entre los estados de Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz. El sistema es operado por la Comisión Nacional del Agua y basa su funcionamiento en la medición de los niveles de los ríos de la región en 34 puntos (CONAGUA 2017 b). En caso de alerta, la información es enviada a las autoridades de protección civil. Este sistema se basa la información de los caudales medidos en un momento determinado, y, por lo tanto, no proporciona información de pronósticos de caudales con anticipación. Al medir solamente niveles de agua, el sistema no está adaptado como sistema de predicción ante inundaciones (OCDE, 2013).

Para efectuar predicciones hidrológicas, un sistema de alerta necesita datos meteorológicos e hidrométricos y de modelos hidrológicos. Un modelo hidrológico es una representación simplificada de la relación entre la lluvia y el escurrimiento en una cuenca dada. Para su uso en la simulación del escurrimiento, estos modelos hidrológicos son calibrados y validados con observaciones para verificar que son eficientes para reproducir los caudales históricos. Los modelos hidrológicos son utilizados también para estimar los caudales futuros en base en las últimas condiciones observadas en la cuenca (caudales, niveles de agua, de precipitación y temperatura) así como en predicciones de precipitación y temperatura en el futuro próximo (Velázquez *et. al.*

2009). Actualmente, los esfuerzos en el desarrollo de sistemas de predicción hidrológica están enfocados en la utilización de productos como el ensamble de predicciones meteorológicas para realizar una predicción probabilista de caudales (Schaake *et. al.* 2007). Existen sistemas operativos de predicción hidrológica implementados en la Unión Europea que busca brindar información de caudales con un avance de 3 y 10 días (Thielen *et. al.*, 2009). Por otro lado, en Bangladesh se implementó un sistema de predicción hidrológica de 10 a 15 días en avance (Webster *et. al.*, 2010).

Para la implementación de un sistema de predicción hidrológica es necesario tener datos meteorológicos de calidad. Todos los países, tanto desarrollados como en desarrollo, enfrentan retos para obtener, almacenar, manejar y distribuir los datos meteorológicos que requiere un sistema de predicción hidrológica (Pagano *et. al.*, 2014). Uno de los principales problemas es la obtención de datos históricos que alimentan los modelos hidrológicos. En México, a menudo las series temporales de observaciones meteorológicas presentan una gran cantidad de datos faltantes. Otra de las características de los sistemas de medición hidrometeorológica en México es su distribución desigual, dado que hay una gran cantidad de estaciones localizadas en el centro y sur del país, y una cantidad menor de estaciones en el norte. Ante estos problemas en las redes meteorológicas, recientes líneas de investigación en hidrología han evaluado el uso de datos meteorológicos interpolados procesados en malla como datos de entrada en los modelos hidrológicos. Estos datos meteorológicos procesados se obtienen aplicando un método de interpolación estadística a los datos observados en las estaciones meteorológicas para obtener como producto una estimación de las variables en una malla espacialmente distribuida.

Diversos estudios han comparado los datos meteorológicos en malla con datos meteorológicos observados. Por ejemplo, el trabajo de Koutsouris *et. al.*, (2016) comparó siete bases de datos en malla con las observaciones de una región de África y sus resultados muestran diferencias importantes en la precipitación en la temporada de lluvias.

El uso de estos datos meteorológicos en malla en la estimación de caudales ha sido también evaluado, por ejemplo Fekete *et. al.* (2004) usando un modelo global de balance hídrico, encontró que la incertidumbre en la estimación de la precipitación se

traslada a los caudales simulados. El estudio de Velázquez y Dávila (2017) evaluó la diferencia en caudales diarios simulados con observaciones y con una base de datos en malla en dos cuencas de México utilizando un modelo hidrológico. Sus resultados muestran que los caudales diarios medios y altos pueden ser correctamente simulados con ambos tipos de datos, sin embargo el modelo hidrológico representa el régimen hidrológico de manera distinta según el tipo de datos utilizado, por lo que los autores recomiendan evaluar los datos meteorológicos antes de ser usados en una modelación hidrológica. Por otra parte el estudio de Grusson *et. al.* (2017), usando un modelo hidrológico distribuido en una cuenca en Francia, evaluó la eficiencia del modelo en la estimación de caudales promedio mensuales usando datos meteorológicos observados y datos meteorológicos procesados en malla de diferente resolución. Sus resultados muestran que con los datos procesados en malla se obtiene una mejor eficiencia del modelo hidrológico que usando las observaciones meteorológicas. Sin embargo, los autores recomiendan evaluar y seleccionar la base de datos en malla que mejor describan las características climáticas de la cuenca de estudio.

Los estudios anteriores, usando diferentes tipos de datos meteorológicos, evaluaron la eficiencia de un modelo hidrológico para simular caudales diarios y caudales mensuales. Esta investigación se enfoca en la evaluación de cuatro tipos de bases de datos meteorológicas en la estimación de caudales altos en una cuenca de México. La estimación de caudales altos permite conocer los caudales que podrían causar afectaciones debido al desbordamiento de ríos y que son los principales caudales de interés en la predicción de los sistemas de alerta temprana hidrológicos. Así, si dichos caudales son similares, las bases de datos meteorológicos procesados podrían utilizarse con cierta confianza en la implementación de los modelos hidrológicos en un sistema operacional.

Este artículo está dividido de la siguiente forma: la sección "materiales y métodos" describe la cuenca de estudio, las bases de datos meteorológicas seleccionadas, el modelo hidrológico y los indicadores hidrológicos utilizados en esta evaluación. En la sección resultados se comparan las observaciones y las bases de datos seleccionadas en la simulación hidrológica de caudales medios y extremos en la cuenca de estudio. Finalmente la sección conclusiones cierra el manuscrito.

## 6.4. Materiales y métodos

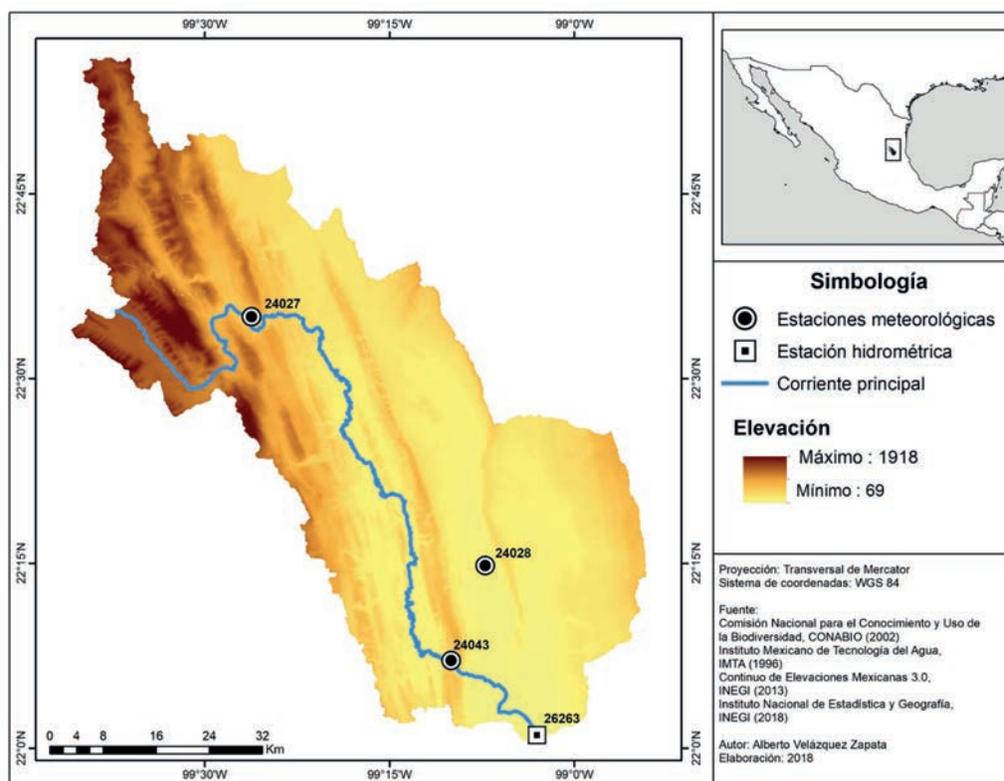
### 6.4.1. La cuenca de estudio

La cuenca de estudio es la cuenca del Río Valles (3521 km<sup>2</sup>), que se localiza principalmente en el Estado de San Luis Potosí (Gráfica 6.1). El Río Valles fluye de norte a sur a través de la Sierra Madre Oriental y descarga en el Río Tampoán, siendo el principal tributario del mismo. A su vez, el Río Tampoán converge con el río Moctezuma y toma el nombre de Río Pánuco, el cual desemboca en el Golfo de México. Los datos de caudales diarios fueron obtenidos del Banco de Aguas Superficiales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en la estación Santa Rosa (I.D. 26263). La cuenca del Río Valles tiene una precipitación media anual de 1323 mm y una temperatura media anual de 23.6°C y presenta climas tipo Tropical Savanna (Aw) y Tropical Monsoon (Am, Peel *et al.*, 2007). A pesar de localizarse en una región con altas precipitaciones y corrientes superficiales, la cuenca tiene problemas de escasez en la distribución del agua debido a una mala gestión (Jabardo y Padilla 2016). La cuenca del Río Valles se encuentra localizada en una región cárstica que se caracteriza por un flujo de aguas subterráneas de las regiones altas en la Sierra de Álvarez, al oeste de la cuenca, hacia el Golfo de México (Morán- Ramirez *et al.*, 2013).

La cercanía de la cuenca del Río Valles con el Golfo de México la hace susceptible a la influencia de las precipitaciones ocasionadas por los ciclones tropicales que entran a tierra por la costa norte de Veracruz y la costa sur de Tamaulipas. Así, el área urbana de ciudad Valles, localizada en las márgenes del Río Valles, se ha visto afectada por inundaciones ocasionadas por diversos ciclones tropicales. Por ejemplo, los huracanes Janet e Hilda en 1955 (ambos categoría 5) ocasionaron daños a carreteras y cultivos, 8 000 muertos y más de 1000 casas destruidas (Blanco Loredo, 2011). Recientemente otros eventos hidrometeorológicos, como las lluvias provocadas por frentes fríos, han provocado que desborden ríos y se provoquen importantes afectaciones a viviendas e infraestructuras. Dado que la cuenca del río Valles es susceptible de afectaciones por fenómenos meteorológicos, ésta es monitoreada como parte del Sistema de Alerta en Tiempo Real para la Protección a Centros de Población con alto grado de riesgo en la Cuenca Baja del Río Pánuco.

#### 6.4.2. Datos meteorológicos

Los datos de precipitación diaria y temperatura media diaria usados en esta investigación provienen de cuatro fuentes como se muestra en la Cuadro 6.1. Las observaciones (Do) se obtuvieron de tres estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) localizadas dentro de la cuenca de estudio (ver Gráfica 6.1) vía la web del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). Además, se recuperaron las variables meteorológicas de dos bases de datos en malla en diferente resolución: la base de datos D1 ha sido presentada por Zhu and Lettenmaier (2007), la cual interpola las variables meteorológicas de 5000 estaciones del SMN usando el peso ponderado de todos los registros disponibles dentro de una celda dada para obtener precipitación y temperatura diaria; la bases de datos D2 fue propuesta por Livneh *et. al.* (2015) y se basa la interpolación de datos de las estaciones meteorológicas del SMN incorporando un ajuste topográfico para tomar en cuenta la precipitación orográfica. Finalmente, la base de datos D3 es un reanálisis, esto es, simulaciones de variables meteorológicas provenientes de un modelo numérico que incorpora datos de satélite, radiosonda y observaciones de estaciones meteorológicas. En este estudio, se utilizó el reanálisis CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) del NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de los Estados Unidos (Saha *et. al.* 2010). Las variables simuladas provenientes del reanálisis han sido usadas en modelación hidrológica sustituyendo a las observaciones directas o a los datos procesados en malla. Por ejemplo, el estudio de Fuka *et. al.*, (2014) reporta que las simulaciones de caudales obtenidas con CFSR son iguales o mejores a las simulaciones de caudales obtenidas con variables observadas en cuencas localizadas en Estados Unidos y Etiopía. Para esta investigación, se usó el periodo 1979-1996 el cual es común a todas las bases de datos.



Gráfica 6.1. Localización de la cuenca del río Valles. Elaboración propia con información de la CONABIO, IMTA e INEGI. Las estaciones meteorológicas están identificadas con su número en el sistema CLICOM (CISESE 2017)

### 6.4.3. Modelo hidrológico

El modelo hidrológico seleccionado es GR4J (Perrin *et al.*, 2003) el cual es un modelo del tipo conceptual agregado, esto es, el modelo toma en cuenta a la cuenca como una unidad con características homogéneas en tipo de suelo y variables meteorológicas. El modelo GR4J simula el caudal a paso diario y utiliza como datos de entrada la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación promedio diaria en la cuenca. Para este estudio, la ETP fue estimada con la fórmula propuesta por Oudin *et al.*, (2005) la cual requiere datos de temperatura promedio diaria y de radiación solar. El modelo GR4J ha sido evaluado por Pagano *et al.*, (2010) en su capacidad para predecir caudales en horizontes de 14 días en 240 cuencas en Australia.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS; Nash y Sutcliffe, 1970) fue utilizado para la evaluar la simulación de caudales en la cuenca de estudio utilizando

las bases de datos meteorológicas seleccionadas. La ecuación siguiente describe el coeficiente NS:

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q}_{obs,i})^2}$$

Ecuación 6.1

Donde  $Q_{obs,i}$  y  $Q_{sim,i}$  son el caudal observado y el caudal simulado respectivamente en el paso de tiempo  $i$ , y  $n$  es el número total de observaciones. El valor de NS tiene un rango de  $-\infty$  a 1, siendo el valor de NS=1 el correspondiente a un ajuste perfecto entre caudal observado y simulado.

Para esta investigación se seleccionaron cuatro indicadores hidrológicos: Qm: es el caudal promedio diario; HF2, HF5 y HF10 son los caudales con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años respectivamente. Para calcular estos tres indicadores de caudal extremo, las series de caudales diarios se ajustaron a la distribución de probabilidad de log Pearson III.

## 6.5. Resultados y Discusión

El modelo GR4J requiere de una serie de tiempo de la precipitación promedio diaria de la cuenca. Para obtenerla, en el caso de los datos D1, D2 y D3 se realizó el promedio de los puntos de la malla que se encuentran dentro de la cuenca. En el caso de las observaciones de las estaciones meteorológicas (Do), la precipitación promedio se obtuvo con el método de los Polígonos de Thiessen (OMM, 1994). En el caso de la temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) se obtuvo el promedio simple en cada base de datos.

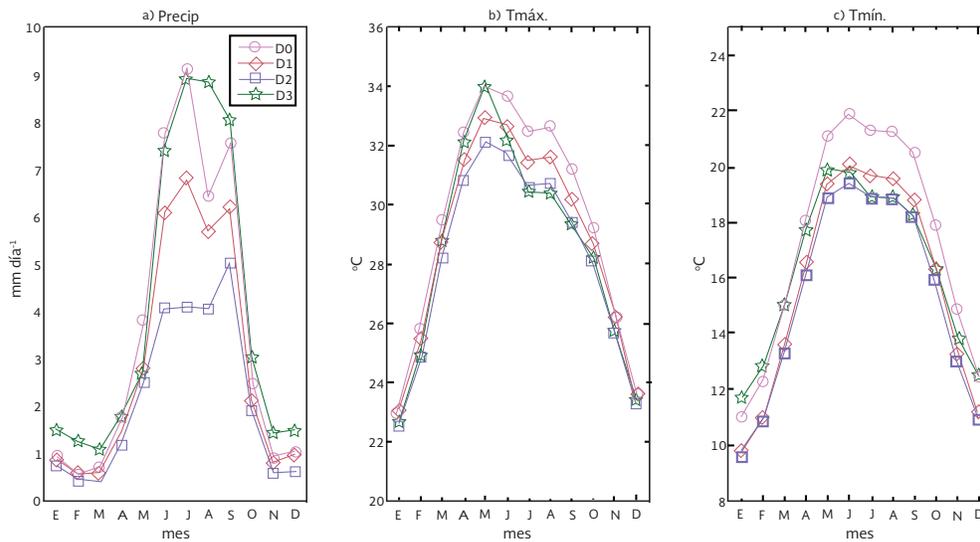
La Gráfica 6.2 muestra el promedio mensual de las variables meteorológicas en la cuenca de estudio. Los datos procesados en malla D1 y D2 subestiman la precipitación observada en temporada de lluvias (de mayo a octubre). Por ejemplo, la precipitación promedio para el mes de junio es de 9 mm día<sup>-1</sup> para los datos observados y 6.8 y 4 mm día<sup>-1</sup> para D1 y D2 respectivamente. En el caso del reanálisis (D3), la precipitación

del mes de junio es  $8.9 \text{ mm día}^{-1}$  el cual es cercano al valor observado, sin embargo la precipitación del reanálisis en los meses de noviembre a mayo (temporada seca) es sobreestimada.

Cuadro 6.1. Bases de datos usadas en este estudio

ID	Tipo de datos	Referencia
Do	Datos meteorológicos observados en tres estaciones meteorológicas	CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (CICESE 2017a)
D1	Datos meteorológicos interpolados en una malla de $1/8^\circ$	CLICOM en malla (CICESE 2017b ; Zhu and Lettenmaier, 2007; Muñoz-Arreola <i>et. al.</i> , 2009)
D2	Datos meteorológicos interpolados en una malla de Malla de $1/16^\circ$	L15 hydrometeorological data set for Mexico, the U.S., and Southern Canada (Livneh <i>et. al.</i> 2015)
D3	Datos de reanálisis en malla de $1/2^\circ$	Climate Forecast System Reanalysis (CFSR); Saha <i>et. al.</i> , 2010.
	Caudales de la estación hidrométrica Santa Rosa.	(CONAGUA 2017 a) Banco Nacional de Aguas Superficiales

Fuente: elaboración propia



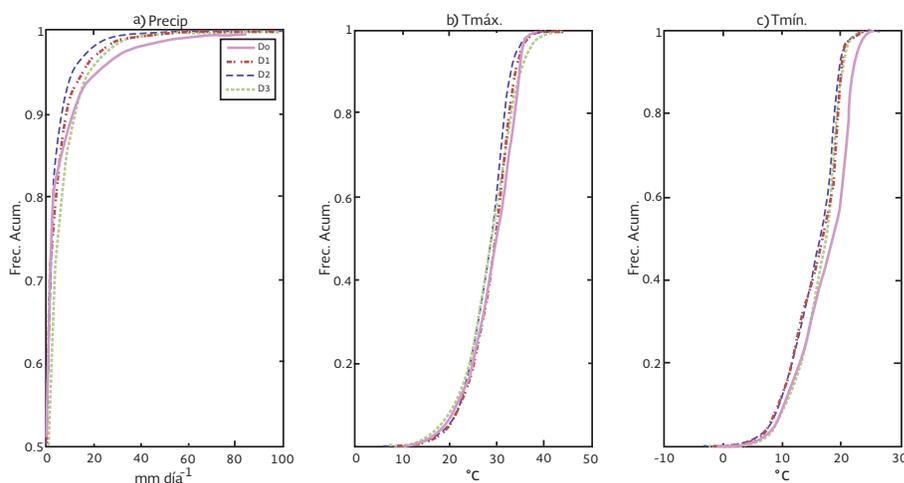
Gráfica 6.2. Promedio mensual (1979-1996) obtenido con las bases de datos meteorológicas seleccionados para a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima. Fuente: elaboración propia con las bases de datos meteorológicas seleccionadas para este estudio.

La Gráfica 6.2 muestra que la precipitación promedio mensual observada (Do) presenta dos picos en junio y septiembre, y una disminución en agosto correspondiente al periodo de canícula. En la Gráfica 6.2a se muestra que D1 estima el periodo de

canícula, mientras que D2 presenta solo un pico en septiembre y D3 no simula la disminución de precipitación en agosto.

Respecto a la temperatura, la Gráfica 6.2b y Gráfica 6.2c muestran, en general, una subestimación de los datos procesados en malla respecto a la temperatura observada (Do). Por ejemplo, la temperatura máxima observada en julio es 33.6°C mientras que el valor es 32.6°C, 31.8°C y 32.2°C para D1, D2 y D3 respectivamente.

La Gráfica 6.3 muestra la función de distribución acumulada para las variables meteorológicas obtenidas con las observaciones y con los datos procesados en malla, y el Cuadro 6.2 muestra diversos cuantiles de interés. Podemos observar que en el caso de la precipitación, el cuantil 50 de las observaciones (Do) es sobrestimado por todas las bases de datos procesados en malla dado que la mediana de la precipitación de Do es 0 mm. En el caso de los extremos de precipitación, el cuantil 95 también muestra una subestimación de 5.49, 8.93 y 1.98 mm día<sup>-1</sup> para D1, D2 y D3 respectivamente. En el caso de la temperatura máxima, el cuantil 90 es subestimado en 1.4°C, 2.3°C y 0.4°C para D1, D2 y D3 respectivamente. En general las bases de datos procesados en malla muestran diferencias importantes con las observaciones de las estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio. A continuación se evalúa estas diferencias en la simulación hidrológica.



Gráfica 6.3. Función de distribución acumulada obtenida con las bases de datos seleccionadas para a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima en el periodo 1979-1996. Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6.2. Percentiles para la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima obtenidos con las bases de datos seleccionadas en el periodo 1979-1996.

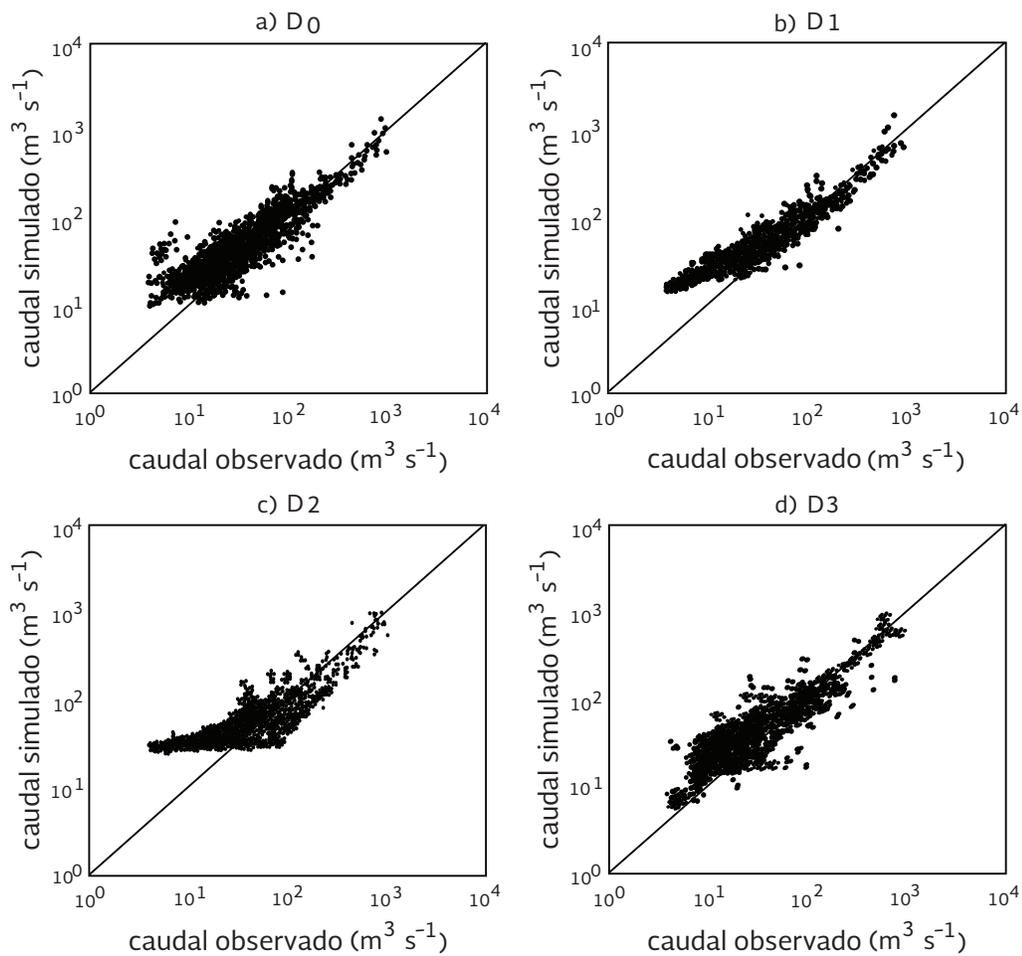
Precipitación (mm día <sup>-1</sup> )				
Percentil	Do	D1	D2	D3
q50	0	0.29	0.15	0.70
q75	1.39	2.28	1.66	4.30
q95	20.61	15.12	11.68	18.63
Temperatura máxima (°C)				
Percentil	Do	D1	D2	D3
q10	22.0	22.5	22.2	20.8
q50	30.3	29.5	28.9	29.1
q90	35.5	34.1	33.2	35.1
Temperatura mínima (°C)				
Percentil	Do	D1	D2	D3
q10	10.5	9.4	9.3	10.7
q50	18.6	16.5	16.5	17.4
q90	22.1	19.6	19.7	20.2

Fuente: elaboración propia con las bases de datos meteorológicas seleccionadas.

El Cuadro 6.3 muestra el coeficiente de eficiencia NS obtenido con los caudales simulados con observaciones (Do) y con los datos en malla, en el periodo de calibración y validación de GR4J. Podemos observar que el modelo puede ser calibrado correctamente con todas las bases de datos, obteniendo valores de NS entre 0.7 (D3) y 0.86 (Do). En el periodo de validación, se obtiene un valor NS alto para Do y D1, y un valor NS bajo para D2. Por otro lado D3 (reanálisis) tiene un valor NS negativo, lo que muestra una falta de eficiencia para modelar los caudales en un periodo independiente.

La Gráfica 6.4 muestra los caudales diarios observados y simulados con las observaciones y los datos en malla en el periodo de calibración. En este diagrama de dispersión, la cercanía de los puntos a la línea 1:1 significa una buena correspondencia entre observaciones y simulaciones. En la Gráfica 6.4 se muestra que, si bien se obtiene una buena eficiencia en la simulación (en términos de NS) con D1 y D2, los caudales diarios bajos no son correctamente modelados dado que hay una fuerte sobreestimación de los caudales observados. La simulación con Do (observaciones) (Gráfica 6.4a) también sobrestima ligeramente los caudales bajos mientras que con el reanálisis (Gráfica 6.4d) se obtiene una mejor representación de éstos. Los caudales medios y altos son correc-

tamente simulados con todos los tipos de bases de datos. La cuenca de estudio es una cuenca del tipo cárstico, por lo cual el caudal de la cuenca puede tener aportaciones o pérdidas debido al intercambio de agua subterránea. El modelo GR4J toma en cuenta este intercambio, y el análisis de los parámetros calibrados del modelo muestra que usando las variables observadas, GR4J estima que la cuenca tiene aportación de agua subterránea al caudal. Por otro lado, GR4J calibrado con D1 y D2 estima aportaciones 4.1 y 5.5 más grandes respectivamente que la aportación estimada con las observaciones. En cambio, con D3 el modelo GR4J estima que el modelo tiene pérdidas de caudal hacia el agua subterránea. Las diferencias entre la precipitación entre los tipos de datos meteorológicos da como resultado que el modelo simule el comportamiento hidrológico de la cuenca de manera muy diferente según el tipo de datos considerado.



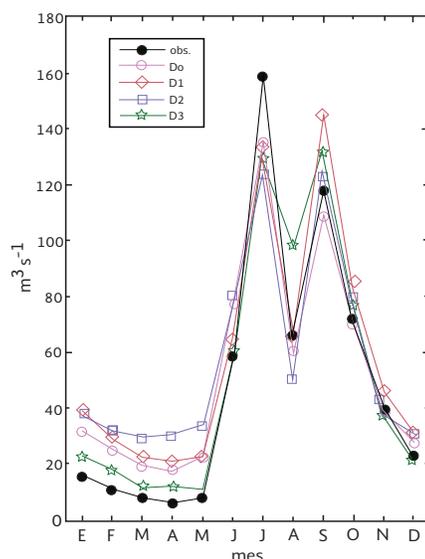
Gráfica 6.4. Caudales diarios observados y simulaciones hidrológicas para el periodo de calibración (1990-1994) obtenidos con las bases de datos seleccionadas.

Cuadro 6.3. Coeficiente de Nash Sutcliffe para las simulaciones hidrológicas diarias obtenido con los datos meteorológicos seleccionados en los periodos de calibración (Cal.) y validación (Val.).

Datos	Coeficiente Nash-Sutcliffe	
	Cal. (1990-1994)	Val. (1986-1989)
Do	0.86	0.75
D1	0.82	0.85
D2	0.85	0.42
D3	0.70	-0.93

Fuente: elaboración propia.

La Gráfica 6.5 muestra el caudal promedio mensual observado (i.e. medido en la estación hidrométrica) y el caudal simulado con las bases de datos seleccionadas. Al igual que con la precipitación, el caudal observado muestra dos picos en julio y septiembre, y un decremento en agosto. El pico de julio es subestimado por todas las simulaciones, mientras que el pico de septiembre es correctamente representado por la simulación con los datos meteorológicos observados (Do). El decremento en agosto no es simulado correctamente por el reanálisis (D3) dado que la precipitación de esta base de datos tampoco estima la cañícula. En los meses de enero a marzo donde se presenta el caudal bajo es, en cierta medida, subestimado por todas las bases de datos.

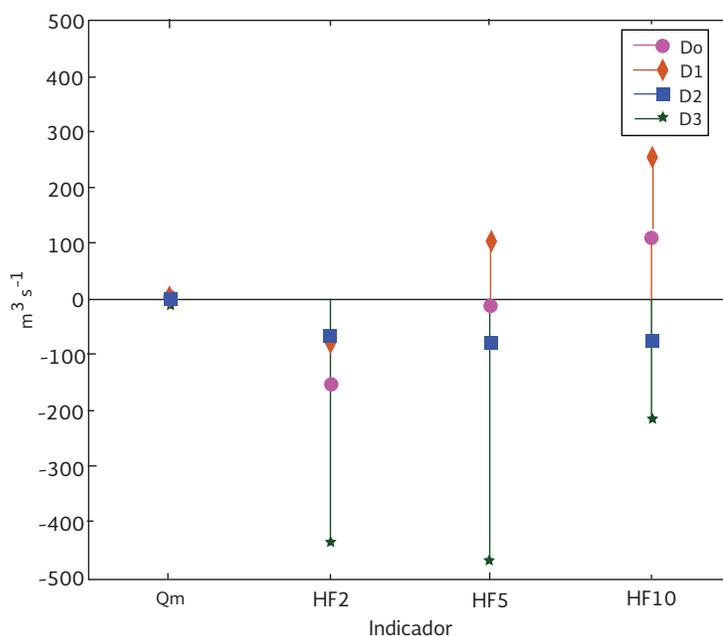


Gráfica 6.5. Caudal mensual observado (obs) y simulados en el periodo para el periodo de calibración (1990-1994) obtenidos con las bases de datos seleccionadas.

Fuente: elaboración propia

El análisis del error entre en los indicadores hidrológicos calculados con el caudal observado y el indicador calculado con las simulaciones hidrológicas se muestra en la Gráfica 6.6. Así, el caudal medio de la cuenca tiene un error (respecto al caudal medio observado) entre  $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y  $8.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Por otro lado, la Gráfica 6.6 muestra que el error es mayor con los indicadores extremos; por ejemplo, para HF2 el intervalo del error se encuentra entre  $-70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  con D2 y  $-434 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  con D3. En el caso de HF5, el error se encuentra entre  $-11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  con Do y  $-466 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  con D3. El error en el indicador HF10 es menor para las simulaciones con observaciones (Do) y con D2, si bien en este indicador el error es tanto positivos como negativo. Estos resultados muestran que, para la cuenca de estudio, el caudal medio de la cuenca puede ser evaluado correctamente con cualquiera de las bases de datos meteorológicos, tanto observaciones como datos meteorológicos procesados o el reanálisis. Los resultados en los indicadores extremos son mixtos: las simulaciones con las observaciones (Do) y con D2 presentan los errores menores, mientras que con el reanálisis la subestimación es importante.



Gráfica 6.6. Error calculado entre el indicador hidrológico obtenido con el caudal observado y los indicadores hidrológicos obtenidos con las bases de datos meteorológicas seleccionadas para el periodo de calibración del modelo (1990-1994). Fuente: elaboración propia

## 6.6. Conclusiones

En México, como en otros países del mundo, los registros hidrometeorológicos se caracterizan por tener datos incompletos que dificultan su uso para obtener conocimiento local del clima. Además, en el país existe una distribución desigual en la red de estaciones hidrometeorológicas que concentra las estaciones en las regiones húmedas del país (centro y sur) mientras que la red en la zona árida del país (norte) tiene una densidad mucho menor. Otro de los problemas que enfrenta la red de medición meteorológica es el abandono de las estaciones existentes. Un recorrido de campo en la zona de estudio de esta investigación (zona Huasteca de San Luis Potosí) identificó diversos problemas: por ejemplo, de comunicación para reportar datos diarios medidos a la central de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o bien la falta de reposición del equipo dañado.

Ante los problemas en los registros hidrometeorológicos en diversas zonas del mundo, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) insta a la investigación y desarrollo de bases de datos meteorológicos procesados en malla (IPCC, 2014). Así, esta investigación evalúa el uso de datos procesados en malla en la simulación hidrológica y en indicadores de caudal medio y extremo en una cuenca del centro-este de México. Esta evaluación es un indicador del posible uso de este tipo de datos en la modelación hidrológica para sistemas de alerta operacionales ante riesgos de inundación.

En un primer paso, se comparó la base de datos de observaciones con dos bases de datos meteorológicos interpolados en malla y datos obtenidos de un reanálisis (simulaciones de un modelo numérico). Nuestros resultados muestran una subestimación de la precipitación por parte de las bases de datos interpolados, mientras que los datos del reanálisis no simulan correctamente el ciclo anual observado. Respecto a la temperatura, en general se encontró una subestimación de los datos evaluados respecto a las observaciones.

En un segundo paso, las bases de datos seleccionadas se usaron para simular caudales diarios mediante un modelo hidrológico. Los resultados muestran que se el

modelo hidrológico puede ser calibrado correctamente con todas las bases de datos seleccionadas mostrando niveles de eficiencia altos. En la validación del modelo en un periodo independiente, se encontró que solamente una base de datos meteorológicos interpolados obtiene buenos resultados de eficiencia. El análisis de los parámetros calibrados del modelo muestra que, si bien se obtiene en general una buena eficiencia del modelo en el periodo de calibración, el comportamiento hidrológico simulado por el modelo en la cuenca es diferente entre sí, según la base de datos considerada.

Finalmente, se evaluaron diversos indicadores obtenidos con las distintas simulaciones hidrológicas. Los resultados muestran que, en general, hay una sobreestimación de los caudales bajos en la época seca y una subestimación en el pico del mes de julio. Además, el caudal medio puede ser correctamente representado por todas las bases de datos seleccionadas. Por el contrario, en los caudales extremos el resultado es mixto: el error es menor cuando se usan las observaciones meteorológicas y una de las dos bases de datos interpolados en malla, mientras que al usar los datos de reanálisis el error es muy grande.

El uso de datos procesados en malla en la simulación hidrológica debe usarse con cautela dado que con ellas se representa el régimen hidrológico de la cuenca de manera distinta. Si bien los productos de datos meteorológicos procesados en malla pueden ser de ayuda cuando se evalúa caudal medio, su uso en indicadores extremos es menos confiable. Los resultados de esta investigación deben ampliarse a otras cuencas de México con diferentes condiciones climáticas y usando diferentes modelos hidrológicos y bases de datos meteorológicos.

## 6.7. Agradecimientos

Los autores agradecen a los grupos de investigación que desarrollaron e hicieron accesibles las bases de datos hidrometeorológicos usadas en este estudio.

## 6.8. Referencias

- Arreguín-Cortés, F., López-Pérez, M. y Marengo-Mogollón, H. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 5-13. Recuperado de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1267>
- Blanco Loredó, H. (2011). *Vulnerabilidad de la Huasteca potosina ante el impacto de huracanes* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- CENAPRED (2004). Inundaciones. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- CICESE (2017 a). Base de datos del CLICOM. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- CICESE (2017 b). CLICOM-malla. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/malla/>
- CONAGUA (2017 a). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- CONAGUA (2017 b). Sistema de alertamiento en Tiempo Real SATR. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/satr2/>
- Fekete, B., Vörösmarty, C., Roads, J. and Willmott, C. (2004). Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. *Journal of Climate*, 17(2), 294-304. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0294:UIPATI>2.0.CO;2
- Fuka, D., Walter, M., MacAlister, C., Degaetano, A., Steenhuis, T and Easton Z. (2014). Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613–5623. DOI: 10.1002/hyp.10073
- Grusson, Y., Ancil, F., Sauvage, S. and Sánchez, J. (2017). Testing the SWAT Model with Gridded Weather Data of Different Spatial Resolutions. *Water*, 9(1), 54. DOI: 10.3390/w9010054
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

- Jabardo, V., y Padilla L. (2016). La escasez de agua en la Huasteca Potosina (México): conflictos locales. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(2), 133-165. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/3832/383249118006.pdf>
- Koutsouris, A., Chen, D. and Lyon S. (2016). Comparing global precipitation data sets in eastern Africa: a case study of Kilombero Valley, Tanzania. *International Journal of Climatology*, 36(4), 2000-2014. DOI: 10.1002/joc.4476
- Livneh B., Bohn T., Pierce D., Muñoz-Arriola F., Nijssen B., Vose R.,... and Brekke L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the U.S., and Southern Canada 1950-2013. *Scientific Data*, 2, 150042. DOI: 10.1038/sdata.2015.42.
- Morán-Ramírez, J., Ramos-Leal, J., López-Álvarez, B., Carranco, S., and Santacruz-De León G. (2013). Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 71-82. Recuperado de: [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6501/\(6\)Moran.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6501/(6)Moran.pdf)
- Muñoz-Arriola, F., Avissar, R., Zhu, C., and Lettenmaier, D. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water Resources Research*, 45(11). DOI: 10.1029/2007WR006783
- Nash, J., and Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- OCDE. (2013), Estudio de la OCDE sobre el Sistema Nacional de Protección Civil en México. Recuperado de: [https://read.oecd-ilibrary.org/governance/estudio-de-la-ocde-sobre-el-sistema-nacional-de-proteccion-civil-en-mexico\\_9789264200210-es#page2](https://read.oecd-ilibrary.org/governance/estudio-de-la-ocde-sobre-el-sistema-nacional-de-proteccion-civil-en-mexico_9789264200210-es#page2)
- OMM (Organización Meteorológica Mundial) (1994) *Guía de prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicciones y otras aplicaciones*. Recuperado de: [ftp://ftp.conagua.gob.mx/CambioClimatico/PONENCIAS/Publicaciones\\_DanielAllasia/WMOSPA.pdf](ftp://ftp.conagua.gob.mx/CambioClimatico/PONENCIAS/Publicaciones_DanielAllasia/WMOSPA.pdf)
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil F. and Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—

- Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1), 290-306. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- Pagano, T., Hapuarachchi, P. and Wang Q.J. (2010). *Continuous rainfall-runoff model comparison and short-term daily streamflow forecast skill evaluation*. Recuperado de: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP103545&dsid=DS1>
- Pagano, T., Wood, A., Ramos, M.E., Cloke, H., Pappenberger, F., Clark, M.,... Verkade, J. (2014). Challenges of Operational River Forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1692-1707. DOI: 10.1175/JHM-D-13-0188.1
- Peel, M., Finlayson, B. and McMahon T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007
- Perrin C., Michel C. and Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4), 275-289. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., J. Wang, J., Nadiga, S.,... Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91 (8) 1015-1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1
- Schaake, J., Hamill, T., Buizza, R. and Clark, M. (2007). HEPEX: The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(10), 1541-1547. DOI: 10.1175/BAMS-88-10-1541
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H and de Roo, A. (2009). The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 125-140. DOI: 10.5194/hess-13-125-2009
- Velázquez, J., y Dávila, R. (2017). Uncertainty related to processed gridded meteorological data: implications for hydrological modelling. *Ingeniería, Investigación, y Tecnología*, XVIII (2), 199-208. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/404/40450393007.pdf>
- Velázquez, J., Petit, T., Lavoie, A., Boucher, M.-A., Turcotte, R., Fortin, V., and Anctil, F. (2009). An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11),

2221-2231. Recuperado de: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/2221/2009/hess-13-2221-2009.pdf>

Webster, P., Jian, J., Hopson, T., Hoyos, C., Agudelo, P., Chang, H.R., ...Subbiah, A.R. (2010). Extended-range probabilistic forecasts of Ganges and Brahmaputra floods in Bangladesh. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(11), 1493-1514. DOI: 10.1175/2010BAMS2911.1

Zhu, C. and Lettenmaier, D.(2007). Long-Term Climate and Derived Surface Hydrology and Energy Flux Data for Mexico: 1925–2004. *Journal of Climate*, 20(9), 1936-1946. DOI: 10.1175/JCLI4086.1