

SIMULACIÓN CONTINUA DE MODELO HIDROLÓGICO AGREGADO CON HEC-HMS EN ZONAS CON DATOS ESCASOS. CASO DE ESTUDIO EN EL RÍO LA SILLA, MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO.

Daniel E. Villarreal J.^{1*}; Juan C. Salinas L.¹; Eliud R. Fernández E.¹; David C. López P.¹; José L. Bruster F.²; Adrián L. Ferriño F.²

¹Departamento de Hidráulica y ²Subdirección de Vinculación, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León. danielv95.dv@gmail.com, jsalinasl@uanl.edu.mx, efernandez@uanl.edu.mx, david.lopezprz@uanl.edu.mx, jose.brusterflr@uanl.edu.mx, adrian.ferrinofr@uanl.edu.mx

RESUMEN

El reto principal para la construcción de un modelo hidrológico es la cantidad y calidad de datos disponibles, así como la estimación y calibración de los parámetros del modelo. El objetivo es realizar una simulación continua de un modelo hidrológico agregado en una zona con datos escasos para utilizarlo en futuras investigaciones. El caso de estudio es el Río La Silla, en Monterrey, Nuevo León. Se utilizó HEC-HMS y se formaron dos modelos con datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA. Los parámetros fueron estimados con el tipo y uso de suelo y fueron calibrados manualmente, obteniendo un rango de parámetros similares. Se utilizaron diferentes indicadores del error estadístico para comparar los resultados de caudales simulados y observados, obteniendo un comportamiento satisfactorio para los periodos de calibración y validación en ambos modelos. En general, el modelo de CLICOM-MALLA muestra un mejor comportamiento para el periodo completo de datos de caudales observados.

INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica se realiza comúnmente con la integración de datos observados de diferentes variables meteorológicas, así como de diversos modelos matemáticos que representan los procesos físicos más importantes del ciclo hidrológico en una cuenca para determinar el caudal o cualquier otro proceso del ciclo del agua en uno o diferentes puntos de la cuenca. Por lo que se requieren datos de entrada, principalmente datos de precipitación, y se requiere una o varias ecuaciones para transformarlos y predecir los datos de salida, que normalmente son datos de caudal o escurrimiento.

Existen diferentes tipos de modelos hidrológicos y estos pueden clasificarse de acuerdo a su representación física, como físicos o abstractos; su tiempo de simulación, como continuos o por evento; su representación espacial, como agregados, semidistribuidos o distribuidos; su aleatoriedad, como determinísticos o estocásticos; y su representación matemática de los procesos físicos, como empíricos, conceptuales o basados en procesos físicos.

El reto principal para la construcción de un modelo hidrológico es la cantidad y calidad de los datos disponibles en la zona de estudio, así como las dificultades para la estimación y la calibración de los parámetros requeridos para la simulación de cada proceso hidrológico. La selección del tipo de modelo hidrológico a construir depende principalmente de los datos y recursos disponibles en el área de estudio y de los objetivos o usos finales que se le darán al modelo.

El objetivo de este estudio es la generación y calibración de una simulación continua de un modelo hidrológico agregado con el software HEC-HMS en una zona con datos escasos para posteriormente ser usado en futuras investigaciones y aplicaciones. Este modelo hidrológico se realizó para un caso de estudio en el Río La Silla, en Monterrey, Nuevo León.

Para la construcción de un modelo hidrológico continuo, es preferible contar con una buena cantidad y calidad de datos observados diarios de las diferentes variables climatológicas, como la precipitación, la temperatura, la radiación solar, etc., que se utilizan como insumos del modelo, así como datos observados diarios de la variable en estudio, en este caso de caudal. También es necesario estimar los parámetros de las ecuaciones de transformación para simular cada proceso hidrológico, como la infiltración, evapotranspiración, flujo base, escurrimiento superficial, entre otros.

Para resolver la falta de datos medidos en la cuenca, se utilizaron bases de datos climatológicos de acceso libre con cobertura nacional y cobertura global, con el objetivo de que se pueda replicar en otras regiones del país. Para simplificar la estimación de los parámetros necesarios en las ecuaciones de transformación, se decidió realizar un modelo agregado para así utilizar valores promedio de los diversos parámetros requeridos para simular cada proceso hidrológico, dependiendo principalmente del tipo y uso de suelo en la cuenca.

Posteriormente, este modelo podrá ser utilizado para diferentes investigaciones con propósitos como estimar el caudal en tiempo real y generar un sistema de alerta temprana contra inundaciones, pero el objetivo principal es para estimar periodos de retorno de caudal con datos de repronósticos climatológicos (Villarreal et al., 2022), entre otras posibles aplicaciones.

En la siguiente sección se muestra la metodología seguida para la construcción y calibración del modelo hidrológico, y para determinar el comportamiento del modelo. Después se presenta el caso de estudio con la descripción de la cuenca y los valores para cada parámetro del modelo. Luego se presenta la sección de resultados y discusión, mostrando la comparación de los datos climatológicos. Los resultados del análisis hidrológico y la calibración del modelo con las diferentes bases de datos. Finalmente, se muestran las conclusiones y recomendaciones para la realización de estudios similares en otras cuencas y las referencias bibliográficas consultadas.

METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio, primero se recopiló toda la información disponible en el área de estudio, desde modelos digitales de elevación hasta datos climatológicos de varios proveedores de libre acceso. Después se realizó la delimitación de la cuenca y se estimaron los parámetros iniciales del modelo hidrológico, de acuerdo al tipo y uso de suelo promedio en la cuenca. Para la modelación hidrológica, se usaron dos bases de datos para obtener las variables climatológicas de entrada y estas fueron comparadas entre ellas y con datos de estaciones meteorológicas cercanas. Finalmente se realizó la calibración del modelo hidrológico con ambas bases de datos comparando sus resultados con datos observados en una estación hidrométrica para comparar los resultados entre ambos modelos y se obtuvieron los valores más adecuados para los parámetros requeridos en cada componente del modelo hidrológico.

La información básica necesaria para el modelo hidrológico es el modelo digital de elevación (MDE) y los datos de tipo y uso de suelo, los cuales fueron obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El MDE utilizado fue generado a partir de los datos de la colección de Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, Terreno Grid, con resolución de 5 m. Los datos de tipo de suelo fueron obtenidos del Conjunto de datos edafológicos. Escala 1:1 000 000 serie I. Los datos de uso de suelo y vegetación fueron obtenidos del Conjunto de datos vectoriales de la carta Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Conjunto Nacional.

Los datos observados de precipitación acumulada en 24 horas y temperatura mínima y máxima diaria fueron obtenidos de una estación climatológica cercana a la cuenca en estudio. Estos datos son administrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se cuenta con alrededor de 5500 estaciones con información climatológica nacional y tienen registros disponibles desde el año 1900 hasta la fecha.

Los datos observados de caudal medio diario fueron obtenidos de una estación hidrométrica ubicada en el punto de análisis de la cuenca en estudio. Estos datos fueron extraídos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), actualizado por la CONAGUA a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el cual integra la red hidrométrica nacional con registros diarios de nivel de agua y caudal en los principales ríos de la República Mexicana.

Con respecto a los datos climatológicos requeridos para el modelo hidrológico continuo, aparte de la precipitación, es necesario tomar en cuenta las pérdidas por evapotranspiración en el modelo. Para esto se utilizó el método de Penman Monteith, el cual requiere de datos de radiación solar con longitud de onda corta y larga, así como datos de temperatura del aire y velocidad de viento.

Los datos de las variables meteorológicas fueron obtenidos de ERA5-Land del Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). Esta es una base de datos de reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de las variables terrestres. Los datos tienen una resolución espacial de 0.1° (~ 11 km) y una resolución temporal de 1 hora que van desde 1950 hasta la fecha. (Muñoz Sabater, 2019, 2021)

Además, con el objetivo de comparar las bases de datos disponibles en México, se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura de CLICOM-MALLA (Muñoz-Arriola et al., 2009; Zhu & Lettenmaier, 2007). Este utiliza datos de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para calcular la precipitación y la temperatura de manera distribuida, con una resolución temporal de un día y una resolución espacial de $1/8^\circ$ (~ 14 km).

Por lo tanto, el modelo hidrológico se realizó con dos diferentes bases de datos de entrada para comparar sus resultados y sus parámetros. En el primero se utilizaron todos los datos meteorológicos obtenidos de ERA5-Land del ECMWF, y en el segundo se utilizaron los datos de precipitación y temperatura de CLICOM-MALLA junto con los datos del ERA5-Land para las demás variables climatológicas. Para todas las variables se obtuvieron los promedios ponderados por área para poder introducirlas en el modelo hidrológico agregado.

Para la construcción del modelo hidrológico agregado y continuo se utilizó el software HEC-HMS 4.8 con el método de Copa de árboles Simple (SC) para el componente de la Copa de árboles (Canopy), el método de Superficie Simple (SS) para el componente de Superficie (Surface), el método de Contabilidad de la humedad del suelo (SMA) para el componente de Pérdidas (Loss) y el método de Depósito lineal (LR) para el componente de Flujo base (Baseflow).

Debido a la poca información disponible en la zona de estudio sobre los valores más adecuados para cada parámetro requerido en los componentes utilizados en el modelo hidrológico, la mayoría de estos fueron estimados a partir de tablas y datos genéricos obtenidos de la literatura, de acuerdo al tipo y uso de suelo en la cuenca.

Solo los parámetros de almacenamiento y coeficiente de recesión del flujo base para el componente de Pérdidas y para el componente de Flujo base fueron estimados a partir del análisis de recesión de datos históricos de caudal para diferentes eventos observados en una estación hidrométrica, como se muestra en Fleming et al. (2004)

Los parámetros estimados para cada modelo hidrológico fueron calibrados manualmente comparando el gasto calculado con los gastos observados en la estación hidrométrica, tomando como referencia diferentes indicadores del error estadístico. Principalmente se consideró el valor de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), pero también se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE), la relación RMSE-desviación estándar de observaciones (RSR), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la eficiencia de Kling-Gupta (KGE).

La Ecuación (1) corresponde al cálculo de NSE y relaciona el error cuadrático medio (MSE), que se calcula con la Ecuación (2) y la desviación estándar de los datos observados (σ_o), calculada con la Ecuación (3), mostradas a continuación.

$$NSE = 1 - \frac{MSE}{\sigma_o^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \quad (2)$$

$$\sigma_o = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \mu_o)^2 \quad (3)$$

Donde S_i es el gasto simulado, O_i es el gasto observado, n es el número de datos y μ_o es la media de los datos observados. El valor de NSE es un indicador adimensional que varía de 1 a $-\infty$, donde 1 corresponde al valor ideal, y 0 significa que el modelo tiene el mismo comportamiento que si se usara la media de los valores observados para predecir el resultado del modelo (Nash & Sutcliffe, 1970).

El valor de RSR, calculado con la Ecuación (4), es la relación del RMSE, que se calcula con la Ecuación (5), y la σ_o .

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma_o} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (5)$$

El valor de RSR estandariza el RMSE usando la desviación estándar de los valores observados. El RSR varía de 0 a ∞ , con 0 como el valor ideal, cuando el valor de RMSE es 0.

El PBIAS, calculado con la Ecuación (6), es el porcentaje de sesgo de los valores simulados con respecto a los observados. El valor varía de $-\infty$ a ∞ y el valor ideal es cuando PBIAS=0.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (6)$$

Adicionalmente, se calculó el valor de la eficiencia de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009), calculado con la Ecuación (7), la cual expresa la distancia desde el punto ideal del modelo y el punto obtenido por los tres componentes de la fórmula. Similarmente al NSE, el valor de KGE puede variar desde 1 hasta $-\infty$, con el valor de 1 como el valor óptimo, y un valor de -0.41 para cuando se utiliza la media para predecir el resultado del modelo. (Knoben et al., 2019)

El primer componente es el coeficiente de correlación de Pearson (R), calculado con la Ecuación (8), el cual depende de la covarianza (σ_{os}), que se calcula con la Ecuación (9), y de la desviación estándar de los valores observados y simulados. Los otros dos componentes son una medida de variabilidad del error (α), calculado con la Ecuación (10), y el sesgo (β), calculado con la Ecuación (11).

$$KGE = 1 - \sqrt{(R - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (7)$$

$$R = \frac{\sigma_{os}}{\sigma_o \cdot \sigma_s} \quad (8)$$

$$\sigma_{os} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \mu_o) \cdot (S_i - \mu_s) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (11)$$

Donde σ_s es la desviación estándar de los datos simulados, calculada similar a la Ecuación (3), y μ_s es la media de los datos simulados. También se realizó la comparación de los valores estadísticos como la media y la desviación estándar de las diferentes series de tiempo construidas con valores promedio y máximos de precipitación y caudal para un intervalo diario, mensual y anual.

Para clasificar el rendimiento o el comportamiento del modelo hidrológico, se utilizaron los indicadores NSE, RSR, PBIAS y KGE. Para esto se compararon las diferentes series de tiempo de caudal simulado y observado para los periodos de calibración, validación y todo el periodo completo disponible con datos de caudal observados. Adicionalmente, se obtuvo el R para las series de tiempo de caudal promedio anual y caudal máximo anual para el periodo completo de datos disponibles.

Primero se obtuvieron los valores de NSE, RSR y PBIAS y se compararon con los valores recomendados que se muestran en Moriasi et al. (2007). También se consideró el valor de KGE considerando las recomendaciones de Knoben et al. (2019). Los valores de R fueron comparados con valores estimados para determinar su correlación y su capacidad de estimar los valores promedio y máximos anuales. La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran los rangos de los indicadores utilizados para clasificar la correlación y el comportamiento del modelo hidrológico, respectivamente.

Tabla 1. Rango de valores generales para clasificar la correlación del modelo hidrológico.

Indicador	R*	
	Min	Max
Correlación		
Muy fuerte	±0.75*	±1
Fuerte	±0.5*	±0.75*
Moderada	±0.25*	±0.5*
Nula o Débil	0	±0.25*

* Valores propuestos

Tabla 2. Rango de valores generales para clasificar el comportamiento del modelo hidrológico.

Indicador	NSE ¹		RSR ¹		PBIAS (%) ¹		KGE ^{2*}	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Comportamiento								
Muy bueno	0.75	1	0	0.5	0	±10	0.65*	1
Bueno	0.65	0.75	0.5	0.6	±10	±15	0.5*	0.65*
Satisfactorio	0.5	0.65	0.6	0.7	±15	±25	0.3	0.5*
Insatisfactorio	-∞	0.5	0.7	∞	±25	∞	-∞	0.3

(1) Valores de NSE, RSR y PBIAS tomados de Moriasi et al. (2007)

(2) Valores de KGE tomados de Knoben et al. (2019)

* Valores propuestos

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio es el Río La Silla, ubicado al sur de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Este es considerado como el único río vivo de la ciudad y se ubica en uno de los costados del Cerro de la Silla. Se está tomando como punto de análisis la estación hidrométrica 24387 Los Lermas, la cual cuenta con datos de gasto medio diario por 22 años, de 1973 a 1994. La cuenca se encuentra a una elevación media de 650 msnm, tiene un área de 151.83 km² y la longitud del cauce principal es de 32.9 km. La Figura 1 muestra la ubicación de la cuenca, la red de drenaje y la estación hidrométrica considerada.

La ciudad de Monterrey se caracteriza por tener un clima seco y semiseco. De acuerdo a datos del SMN-CONAGUA, en la estación climatológica 19049 Monterrey, que es una de las más cercanas y con más datos en la zona de estudio, se tiene registrada una precipitación media anual de alrededor de 590 mm. La temporada húmeda está comprendida entre los meses de mayo y octubre, siendo el mes de septiembre el más lluvioso, con alrededor de un cuarto de la precipitación media anual.

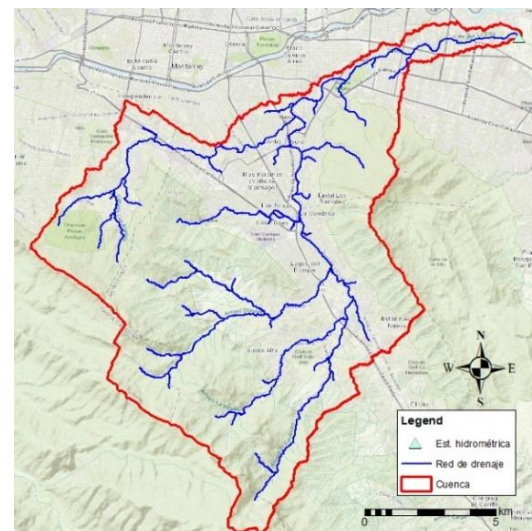


Figura 1. Cuenca, red de drenaje y estación hidrométrica en estudio.

La temperatura media anual es de 22°C, la temperatura diaria máxima anual promedio es de 32°C y la temperatura diaria mínima anual promedio es de 3°C. La Figura 2 muestra la gráfica climática de Monterrey con datos de la Estación 19049 del SMN-CONAGUA.

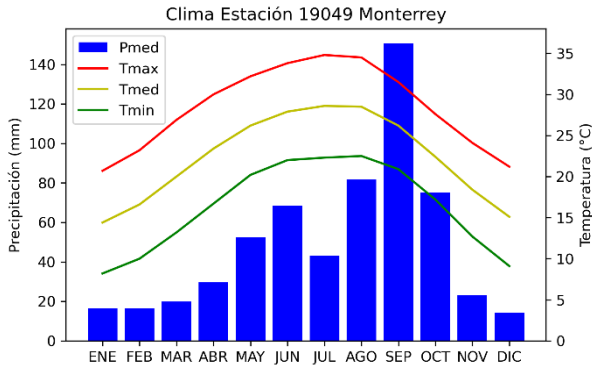


Figura 2. Gráfica climática de Monterrey con datos de la Estación 19049.

El tipo de suelo más común en la cuenca es el Litosol y la Rendzina, seguidos por Feozem y Vertisol, con una clase textural Media a Fina, por lo cual, en promedio para la cuenca en estudio corresponde a un suelo tipo C. Con respecto al uso de suelo en la cuenca, se tiene principalmente área urbana, bosque de encino y matorral xerófilo, considerando un porcentaje de área impermeable de 27.1%.

Con estos datos se pudieron estimar los parámetros necesarios para la construcción del modelo hidrológico. Los parámetros relacionados a las condiciones iniciales del modelo hidrológico fueron considerados como 0, debido a que la simulación inició en un periodo seco y es un río intermitente con caudal medio diario muy bajo, solo el flujo base inicial para el GW3 fue considerado como 0.6 m³/s. La Tabla 3 muestra el rango posible de los parámetros requeridos para la simulación del modelo hidrológico, que fueron estimados a partir de la literatura y de los datos disponibles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar los datos de precipitación y comparar las bases de datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA con los datos de la estación climatológica 19049, se puede observar que los patrones de precipitación y los promedios de precipitación mensual y anual acumulada varían en cierta medida. La Figura 3 muestra las gráficas climáticas de la zona de estudio para la base de datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA, respectivamente.

De acuerdo a los datos de ERA5-Land, se tiene una precipitación media anual de alrededor de 970 mm, una temperatura media anual de 19°C, temperatura diaria máxima anual promedio de 28°C y temperatura diaria mínima anual promedio de 3°C. Por el otro lado, con los datos de CLICOM-MALLA, se tiene una precipitación media anual de alrededor de 580 mm, una temperatura media anual de 21°C, temperatura diaria máxima anual promedio de 30°C y temperatura diaria mínima anual promedio de 5°C.

La precipitación media anual de ERA5-Land es aproximadamente 70% mayor a la observada en CLICOM-MALLA y la estación 19049. Estas últimas son muy similares porque los datos de CLICOM-MALLA son generados a partir de los datos de las estaciones climatológicas del SMN-CONAGUA.

Con respecto al patrón de la precipitación, en ERA5-Land se observa que tiene dos picos, uno en mayo y otro en septiembre, además que la precipitaciones en los meses secos es muy alta, pero la precipitación acumulada promedio en el mes de septiembre si coincide comparada con los datos históricos en la región. Para los datos de CLICOM-MALLA, solo se presenta un pico de precipitación en el mes de septiembre, como se muestra en los datos de SMN-CONAGUA.

Tabla 3. Rango de valores para parámetros del modelo hidrológico continuo utilizado en la zona de estudio.

Método: Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Obtenido/Estimado de:
SC: Max storage (mm)	2.54	38.1	(USACE, 1994)
SS: Max storage (mm)	0.254	12.7	(USACE, 1994)
SMA: Max infiltration (mm/hr)	0.6	10.7	(Hawkins et al., 2008)
SMA: Impervious (%)	27.1	27.1	Cálculo con áreas
SMA: Soil storage (mm)	23.8	450	(Westenbroek et al., 2018)
SMA: Tension storage (mm)	2.38	45	10% de Soil Storage
SMA: Soil percolation (mm/hr)	0.6	10.7	(Hawkins et al., 2008)
SMA: GW 1 storage (mm)	0	20	Cálculo con (Fleming et al., 2004)
SMA: GW 1 percolation (mm/hr)	0.6	10.7	(Hawkins et al., 2008)
SMA&LR: GW 1 coefficient (hr)	50	90	Cálculo con (Fleming et al., 2004)
SMA: GW 2 storage (mm)	40	240	Cálculo con (Fleming et al., 2004)
SMA: GW 2 percolation (mm/hr)	0.6	10.7	(Hawkins et al., 2008)
SMA&LR: GW 2 coefficient (hr)	190	530	Cálculo con (Fleming et al., 2004)
LR: GW 3 fraction	0.5	1.0	Estimado
LR: GW 3 coefficient (hr)	300	1000	Estimado

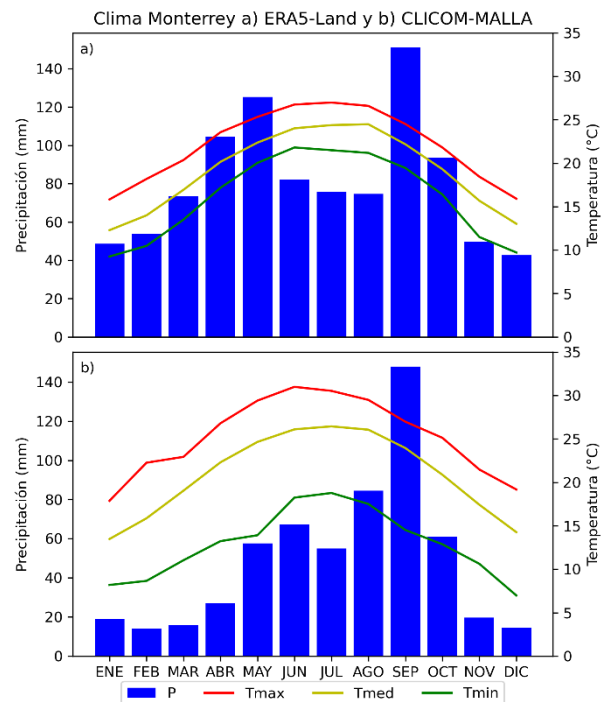


Figura 3. Gráfica climática de Monterrey con datos de a) ERA5-Land y b) CLICOM-MALLA.

Con respecto a las temperaturas, se puede observar que las temperaturas promedio son muy parecidas, pero la variación de la temperatura entre el mínimo y el máximo promedio mensual se observa más estrecha en los datos de ERA5-Land. La diferencia entre la temperatura mínima y máxima promedio para cada mes en ERA5-Land es de 6°C aproximadamente, cuando en los datos de CLICOM-MALLA este rango es de alrededor de 12°C.

Por lo tanto, los datos de CLICOM-MALLA generan una mejor representación del clima en la región, debido a que son obtenidos directamente de las estaciones climatológicas. Pero ambas bases de datos muestran un comportamiento similar en la precipitación promedio del mes de septiembre y la temperatura promedio mensual y anual. Con respecto a las temperaturas extremas se observa que ERA5-Land no representa correctamente la variación diaria de temperatura, manteniendo una temperatura más estable durante el día.

Al analizar los datos de caudal medio diario obtenidos de la estación hidrométrica, se observan años con caudales máximos muy extremos que alcanzan más de 90 m³/s y hasta 208 m³/s, comparados con otros años, donde el caudal máximo anual no superan los 40 m³/s. La Figura 4 muestra las series de tiempo del caudal medio diario observado en la estación hidrométrica 24387 Los Lermas.

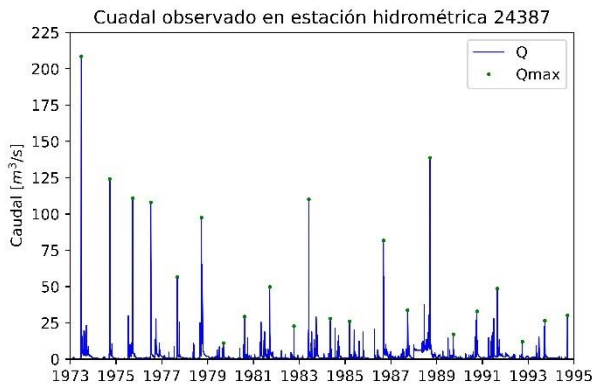


Figura 4. Serie de tiempo de caudal medio diario y caudal máximo anual de datos de la estación hidrométrica 24387 Los Lermas.

Debido a que el motivo principal del modelo hidrológico a construir es estimar periodos de retorno extremos de caudal con datos de repronósticos meteorológicos, el objetivo del modelo debe ser el de estimar los caudales más extremos en la cuenca. Por lo tanto, debido a que en los primeros años de los registros se presentan años consecutivos con caudales muy extremos, se consideraron los primeros 4 años, de 1973 a 1976, para el periodo de calibración de los parámetros, y los siguientes 2 años, de 1977 a 1978, para el periodo de validación del modelo.

Después de la calibración manual del modelo hidrológico para cada una de las bases de datos, se obtuvieron los parámetros más adecuados que producían el mejor resultado de NSE al comparar las series de tiempo de caudal simulado y observado en la estación hidrométrica. Principalmente fueron modificados los valores de los parámetros para el método de Contabilidad de la humedad del suelo (SMA) para el componente de Pérdidas (Loss), debido a que estos mostraban una mayor sensibilidad en el comportamiento del modelo. La Tabla 4 muestra los valores óptimos obtenidos para cada parámetro del modelo al utilizar cada una de las bases de datos.

Es importante mencionar que los parámetros de almacenamiento y el coeficiente de flujo base para los componentes de SMA y LR fueron estimados como el promedio de los valores obtenidos posterior al análisis de recesión de datos históricos de caudal para diferentes eventos observados en la estación hidrométrica. Por esta razón, estos parámetros se mantuvieron constantes para ambos modelos.

Tabla 4. Parámetros calibrados del modelo hidrológico para cada base de datos utilizada en la zona de estudio.

Método: Parámetro	ERA5-Land	CLICOM
SC: Max storage (mm)	7.62	7.62
SS: Max storage (mm)	2.54	2.54
SMA: Max infiltration (mm/hr)	9.2	4.6
SMA: Impervious (%)	27.1	27.1
SMA: Soil storage (mm)	200	100
SMA: Tension storage (mm)	20	10
SMA: Soil percolation (mm/hr)	9.2	4.6
SMA: GW 1 storage (mm)	10	10
SMA: GW 1 percolation (mm/hr)	4.6	2.3
SMA&LR: GW 1 coefficient (hr)	70	70
SMA: GW 2 storage (mm)	115	115
SMA: GW 2 percolation (mm/hr)	4.6	2.3
SMA&LR: GW 2 coefficient (hr)	300	300
LR: GW 3 fraction	0.9	0.9
LR: GW 3 coefficient (hr)	750	750

La Figura 5 y la Figura 6 muestran la precipitación obtenida de la estación climatológica y de las bases de datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA, así como el caudal observado en la estación hidrométrica y los obtenidos con la simulación del modelo hidrológico calibrado con los datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA para diferentes eventos en el periodo de calibración y validación, respectivamente.

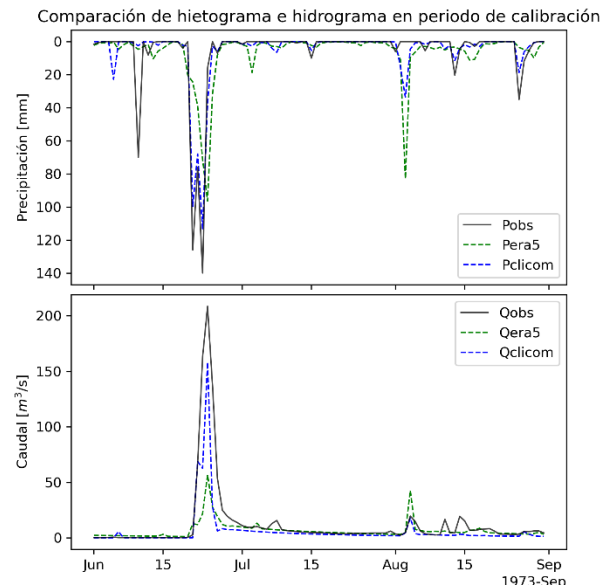


Figura 5. Hietogramas e hidrogramas observados y simulados de junio a septiembre de 1973 en el periodo de calibración.

En estas se puede observar que en general, los eventos máximos anuales de precipitación y caudal sí coinciden con los datos observados en las estaciones, pero es complicado de obtener la magnitud correcta para todos los eventos que se presentan.

Además, al comparar los datos estadísticos de cada serie de tiempo con diferentes intervalos para la precipitación y el caudal, se pueden observar algunas diferencias entre las diferentes bases de datos.

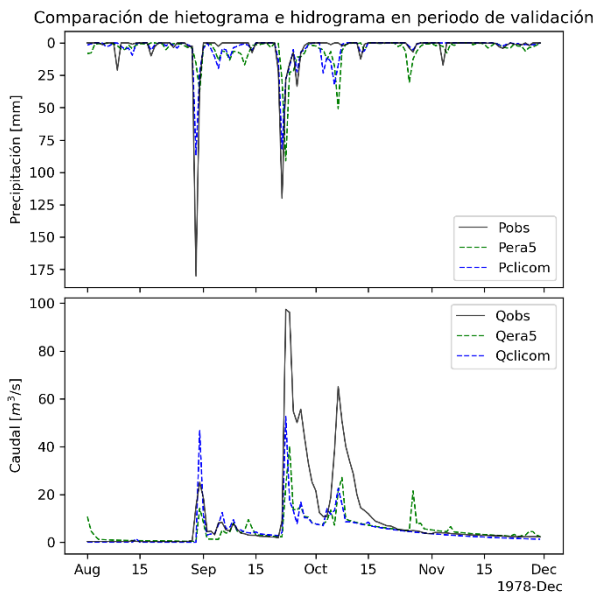


Figura 6. Hietogramas e hidrogramas observados y simulados de agosto a diciembre de 1978 en el periodo de validación.

Para el cálculo de los valores estadísticos y los indicadores del error estadístico del caudal en el periodo completo de datos observados, no se consideró el año 1988 debido a que el caudal medio diario observado mostraba un incremento en sus valores, por lo que se consideró como un error en los registros.

La Tabla 5 muestra el resumen de los principales valores estadísticos para las series de tiempo de precipitación acumulada diaria, mensual y anual, generadas a partir de los datos observados en la estación climatológica 19049 (Pobs), y de los datos obtenidos con ERA5-Land (Pera5) y CLICOM-MALLA (Pclicom).

Similarmente, la Tabla 6 muestra el resumen de los principales valores estadísticos para las series de tiempo de caudal promedio diario, mensual y anual, generadas con los datos observados en la estación hidrométrica 24387 (Qobs), y los generados con el modelo hidrológico construido con datos de ERA5-Land (Qera5) y con datos de CLICOM-MALLA (Qclicom).

La Tabla 7 y Tabla 8 muestran el resumen de resultados de indicadores del error estadístico para la clasificación del comportamiento del modelo hidrológico obtenidos con las diferentes series de tiempo de caudal medio diario y caudal medio mensual generadas con el modelo hidrológico calibrado para los datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA, respectivamente.

Tabla 5. Resultados de principales valores estadísticos para las series de tiempo de precipitación observada y obtenida de ERA5-Land y CLICOM-MALLA.

Variable	Precipitación acumulada (mm)								
	Diaria			Mensual			Anual		
	Datos	Promedio	Desv. Est.	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Máximo	Promedio	Desv. Est.
Pobs	1.72	8.20	183.90	50.47	57.29	449.60	603.33	145.36	887.00
Pera5	3.04	6.75	201.26	92.61	63.08	376.60	1107.13	203.86	1486.69
Pclicom	1.64	6.29	228.50	49.82	56.89	360.38	595.60	126.68	822.09

Tabla 6. Resultados de principales valores estadísticos para las series de tiempo de caudal observado y simulados con ERA5-Land y CLICOM-MALLA.

Variable	Caudal promedio (m³/s)								
	Diario			Mensual			Anual		
	Datos	Promedio	Desv. Est.	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Máximo	Promedio	Desv. Est.
Qobs	1.86	6.05	208.52	1.86	2.83	23.67	1.87	1.00	4.68
Qera5	2.05	3.35	117.83	2.05	1.82	12.41	2.06	0.82	3.95
Qclicom	1.18	3.78	158.12	1.18	1.68	12.00	1.19	0.46	2.13

Tabla 7. Resultados de indicadores estadísticos para la clasificación del comportamiento del modelo hidrológico con series de tiempo mensuales de caudal con datos de ERA5-Land.

Datos		ERA5-Land					
Periodo		Calibración		Validación		Completo	
Intervalo		Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Indicador	NSE	0.23	0.51	0.45	0.62	0.16	0.38
	RSR	0.88	0.70	0.74	0.61	0.92	0.79
	PBIAS (%)	-2.74	-3.02	-36.87	-36.83	10.37	10.31
	KGE	0.26	0.47	0.27	0.35	0.26	0.47
	R	-	-	-	-	0.42	0.62
Comportamiento		Satisfactorio		Satisfactorio		Insatisfactorio	

Tabla 8. Resultados de indicadores estadísticos para la clasificación del comportamiento del modelo hidrológico con series de tiempo mensuales de caudal con datos de CLICOM-MALLA.

Datos		CLICOM-MALLA					
Periodo		Calibración		Validación		Completo	
Intervalo		Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Indicador	NSE	0.66	0.64	0.37	0.64	0.53	0.63
	RSR	0.58	0.60	0.79	0.60	0.69	0.61
	PBIAS (%)	-49.94	-50.00	-42.86	-42.86	-36.29	-36.40
	KGE	0.34	0.30	0.35	0.39	0.42	0.44
	R	-	-	-	-	0.75	0.88
Comportamiento		Satisfactorio		Satisfactorio		Satisfactorio	

Al comparar los valores promedio y máximos de las diferentes bases de datos de precipitación, se confirma que los valores de CLICOM-MALLA son muy parecidos a los observados, y que los datos de ERA5-Land sobreestiman la precipitación acumulada anual, lo que incrementa los valores promedio, pero ambas bases de datos representan de manera similar los eventos máximos diarios.

Con respecto a los valores promedio y máximos de caudal, ambos modelos muestran diferencias al compararlos con el caudal observado. Por un lado, ERA5-Land muestra valores promedio mayores por el exceso de precipitación mencionado anteriormente, y el valor máximo no es muy bien representado con el modelo. Por el otro, CLICOM-MALLA muestra valores promedio menores a los observados, y el valor máximo tampoco es alcanzado. Esto se puede deber a una alta tasa de pérdidas debido a que los datos de velocidad de viento y radiación solar fueron tomados de ERA5-Land, los cuales pueden ser sobreestimados e incrementar la evapotranspiración.

En el caso del modelo simulado con datos de ERA5-Land, se obtienen valores de los indicadores del error adecuados para los periodos de calibración y validación, que indican un desempeño del modelo satisfactorio. Para el periodo completo de datos observados, se obtiene un comportamiento insatisfactorio, con valores de NSE y RSR que se encuentran por debajo de los valores recomendados.

De acuerdo a los resultados del modelo simulado con los datos de CLICOM-MALLA, se obtiene un comportamiento satisfactorio para los periodos de calibración, validación y el periodo completo de datos observados. En este caso, solo los valores calculados del PBIAS se encuentran fuera de los rangos recomendados.

Con respecto a los valores de R para ambos modelos, los valores obtenidos con el modelo de CLICOM-MALLA tuvieron un mejor comportamiento, indicando que los valores de caudal promedio diarios y caudal promedio mensual simulados y observados tienen una correlación muy fuerte, mientras que los resultados del modelo con ERA5-Land muestran una correlación de moderada a fuerte.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El reto principal para la construcción de este modelo hidrológico agregado fue la cantidad y calidad de datos disponibles, así como la estimación y calibración de parámetros para la simulación continua.

Al comparar los datos climatológicos disponibles de las bases de datos de ERA5-Land y CLICOM-MALLA, se observa que la precipitación y temperatura es mejor representada por los datos de CLICOM-MALLA. El problema que se presenta para la construcción de un modelo hidrológico continuo, es que también se requieren datos de velocidad del viento y radiación solar, los cuales no son proporcionados por esta base de datos. Por lo tanto, en este caso se utilizaron los datos de ERA5-Land, pero también se podrían analizar otras bases de datos que tengan una mejor representación de los datos climatológicos de la región.

Debido a la falta de información en la cuenca, se realizó un modelo agregado estimando los parámetros con valores genéricos de acuerdo al tipo y uso de suelo en la cuenca y estos fueron calibrados manualmente. Para ambos modelos se obtuvieron rangos de parámetros similares, y principalmente se cambiaron los valores de los parámetros para el método SMA para el componente de Pérdidas, debido a que estos mostraban una mayor sensibilidad en los resultados del modelo.

Por lo tanto, el modelo hidrológico puede ser mejorado para lograr una mejor representación del proceso hidrológico en la cuenca. Para esto se puede construir un modelo más complejo con otra configuración, o se puede realizar un modelo semi distribuido o distribuido, con el inconveniente de que se pueden requerir más parámetros y más información de la cuenca, haciendo más complicado el proceso de calibración. Con respecto a la calibración del modelo, también se podría mejorar este proceso utilizando diferentes técnicas de calibración, como las de aprendizaje autónomo.

De acuerdo a los resultados de caudal obtenidos, ambos modelos hidrológicos representan satisfactoriamente el proceso de lluvia-escurrimiento en la cuenca para los periodos de calibración y validación. Al comparar las series de tiempo de caudal simulados y observados en la estación hidrométrica y al calcular los valores de los diferentes indicadores del error estadístico para el periodo completo de datos de caudal observados, se puede decir que el modelo calibrado y simulado con los datos de CLICOM-MALLA muestra un comportamiento satisfactorio y el realizado con datos de ERA5-Land muestra un comportamiento insatisfactorio. Por lo tanto, es más apropiado utilizar los datos de CLICOM-MALLA para la construcción y calibración de un modelo hidrológico continuo.

REFERENCIAS

- Fleming, M., Asce, M., & Neary, V. (2004). Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9, 175–183.
- Gupta, H. v., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91.
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., & van Mullem, J. A. (2008). Curve Number Hydrology (R. H. Hawkins, T. J. Ward, D. E. Woodward, & J. A. van Mullem, Eds.). *American Society of Civil Engineers*.
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines

for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*, 50(3), 885–900.

Muñoz Sabater, J. (2019). *ERA5-Land hourly data from 1981 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Último acceso en 01-Nov-2021).

Muñoz Sabater, J. (2021). *ERA5-Land hourly data from 1950 to 1980*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Último acceso en 01-Nov-2021).

Muñoz-Arriola, F., Avissar, R., Zhu, C., & Lettenmaier, D. P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water Resources Research*, 45(11).

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.

USACE. (1994). *Engineering and Design: Flood-Runoff Analysis (Engineer Manual 1110-2-1417)*.

Villarreal, D., Salinas, J., Fernández, E., López, D., Bruster, J., & Ferriño, A. (2022). *Estimación de caudales extremos asociados a un periodo de retorno a partir de la modelación hidrológica continua de repronósticos climatológicos del ECMWF en zonas con datos escasos. Caso de estudio en el Río La Silla, Monterrey, México.*

Westenbroek, S. M., Engott, J. A., Kelson, V. A., & Hunt, R. J. (2018). *Water Availability and Use Science Program National Water Quality Program SWB Version 2.0-A Soil-Water-Balance Code for Estimating Net Infiltration and Other Water-Budget Components Book 6, Modeling Techniques.*

Zhu, C., & Lettenmaier, D. P. (2007). Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico: 1925-2004. *Journal of Climate*, 20(9), 1936–1946.