



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

## POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

### MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA CUENCA RIO CHAPINGO

#### TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

**ERICK GIOVANNI MARTÍNEZ ESQUIVEL**

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: **JORGE VICTOR PRADO HERNANDEZ, Dr.**



**APROBADA**



CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2023

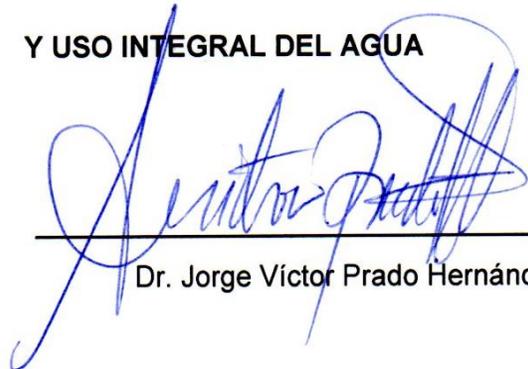


**MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LA CUENCA RÍO  
CHAPINGO**

Tesis realizada por **Erick Giovanni Martínez Esquivel** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA  
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

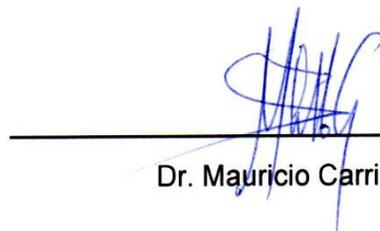
**DIRECTOR:**



---

Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

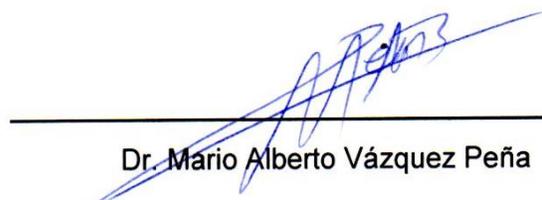
**ASESOR:**



---

Dr. Mauricio Carrillo García

**ASESOR:**



---

Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Literatura citada .....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1. Medición en cuencas de México .....	8
2.2. Modelación hidrológica .....	9
2.3. Modelación hidrológica-hidráulica.....	9
2.4. Precipitación .....	13
2.5. Escorrentía superficial .....	14
2.6. Infiltración .....	15
2.6.1. Método de Número de Curva .....	16
2.7. Evaluación del desempeño de los modelos.....	17
2.7.1. Coeficiente de determinación.....	18
2.7.2. Error Cuadrático Medio .....	18
2.7.3. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe .....	18
2.8. Literatura citada .....	20
3. EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE NUMERO DE CURVA MEDIANTE EL MODELO IBER EN LA CUENCA RIO CHAPINGO.....	26
3.1. Resumen .....	26
3.2. Abstract.....	27
3.3. Introducción .....	28
3.4. Materiales y métodos.....	29
3.4.1. Área de estudio .....	29

3.4.2.	Estrategia de modelación.....	30
3.4.3.	Modelo Matemático .....	32
3.4.4.	Altimetría y discretización espacial de la cuenca .....	32
3.4.5.	Escorrentía superficial medida .....	33
3.4.6.	Precipitación.....	34
3.4.7.	Área de influencia de los pluviómetros.....	35
3.4.8.	Caracterización del coeficiente de rugosidad y Número de curva.	36
3.4.9.	Condiciones iniciales y de frontera del modelo .....	37
3.4.10.	Calibración del modelo.....	38
3.4.11.	Validación.....	38
3.4.12.	Evaluación del desempeño del modelo .....	39
3.5.	Resultados y discusión .....	39
3.5.1.	Calibración .....	39
3.5.2.	Validación .....	43
3.6.	Conclusiones .....	47
3.7.	Literatura citada .....	48

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Criterios de desempeño del modelo propuestos por Molnar (2011) en función del NSE. ....	19
Cuadro 2 Porcentaje de los usos de suelo y vegetación de la cuenca del Rio Chapingo (Piza, 2017). ....	29
Cuadro 3 Características de los dispositivos de medición de precipitación instalados en la cuenca. ....	34
Cuadro 4 Área de influencia de los pluviómetros instalados.....	35
Cuadro 5 Valores calibrados del coeficiente de rugosidad (n). ....	41
Cuadro 6 Evaluación del desempeño estadístico de los modelos calibrados..	43
Cuadro 7 Precipitación total e intensidad de precipitación de eventos validados. ....	43
Cuadro 8 Evaluación del desempeño estadístico de los modelos validados con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 agosto de 2022. ....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo Hidrológico .....	7
Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de modelación hidrológica e hidráulica. .....	31
Figura 3 Tamaños definidos de los elementos triangulares en la cuenca. ....	33
Figura 4 Distribución de pluviómetros instalados dentro de la cuenca Río Chapingo. ....	35
Figura 5 Caracterización de usos del suelo y vegetación de la cuenca Rio Chapingo para la asignación del coeficiente de rugosidad de Manning y del Número de Curva.....	36
Figura 6 Valores calibrados de Número de Curva del día 21 de agosto. ....	40
Figura 7 Valores calibrados de Número de Curva del día 25 de agosto. ....	40
Figura 8 Hidrograma medido e hidrograma calibrado del día 21 de agosto. ....	42
Figura 9 Hidrograma medido e hidrograma calibrado del día 25 de agosto. ....	42
Figura 10 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 30 de agosto con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022.....	44
Figura 11 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 13 de septiembre con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022. .	44
Figura 12 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 18 de septiembre con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022. .	45
Figura 13 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 25 de agosto con parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022.....	46

## *Dedicatorias*

*A mis padres Lucio y Luz, por ser mi más grande motivación para seguir adelante, por el apoyo incondicional que siempre me brindan, les dedico con todo mi cariño todos mis triunfos y metas logradas.*

*A mi hermana Brenda, por siempre estar a mi lado en los momentos difíciles, por el cariño y apoyo que me brinda en mis decisiones.*

*A mi novia Fared, por su cariño y apoyo que me ha brindado y por todo el tiempo que me ha regalado a su lado.*

*A mis amigos, que me han apoyado y me han demostrado su gran amistad durante mucho tiempo.*

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por la beca otorgada que permitió la realización de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por brindarme la oportunidad y los medios necesarios para continuar mi formación académica y profesional.

Al Dr. Jorge Víctor Prado Hernández por guiar la presente tesis, por su amistad, consejos y apoyo a mi formación profesional.

Al Dr. Mauricio Carrillo García por los consejos y apoyo en la realización de este proyecto de investigación y por su aportación a mi formación académica y profesional.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por los consejos y disposición para realizar este proyecto de investigación y por su aportación a mi formación académica y profesional.

A la comunidad de Tequexquináhuac que de manera desinteresada me brindaron su apoyo en la realización del presente trabajo.

## DATOS BIOGRÁFICOS



### Datos personales

Nombre	Erick Giovanni Martínez Esquivel
Fecha de nacimiento	15 de agosto de 1996
Lugar de Nacimiento	Distrito Federal
No. Cartilla Militar	D-3926762
CURP	MAEE960815HDFRSR06
Profesión	Ingeniero en Irrigación
Cédula profesional	12616856

### Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.

Licenciatura: Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2015-2019.

## Resumen General

Es fundamental caracterizar la respuesta espacio-temporal de la escorrentía superficial a la presencia de precipitaciones a nivel cuenca para mejorar la gestión del recurso hídrico y del suelo. La relación precipitación-escorrentía superficial en una cuenca es muy compleja porque en ella ocurren varios fenómenos hidrológicos e hidráulicos; para lo cual la modelación matemática se plantea como una opción para su representación y entendimiento. Existen diversas propuestas de modelos matemáticos para simular la escorrentía superficial las cuales son integradas y resueltas por programas computacionales; sin embargo, recientemente el programa Iber destaca por la flexibilidad en su uso y por su acceso gratuito. Por lo anterior, se realizó la calibración y validación de un modelo hidrológico-hidráulico distribuido en la cuenca Río Chapingo, de 1547 ha, con el programa Iber; empleando el método de Número de Curva en el modelo hidrológico para calcular la escorrentía superficial. El programa se alimentó con precipitación medida en cuatro sitios estratégicos a lo largo de la cuenca, con equipos automatizados de alta precisión y resolución. La calibración del modelo propuesto consistió en ajustar los valores del Número de Curva y el coeficiente de rugosidad de Manning para minimizar los errores entre los hidrogramas observados y simulados en la salida de la cuenca. El modelo se calibró y validó con dos grupos de eventos de intensidades de lluvia diferentes; en ambos grupos se obtuvo un desempeño bueno a muy bueno en la calibración y validación, según el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y los criterios de desempeño Molnar. Se observó un comportamiento dinámico del Número de Curva y del coeficiente de rugosidad como respuesta a las características de la lluvia. El modelo Iber representó adecuadamente el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca de estudio y ello lo sugiere como una herramienta útil en cuencas no aforadas pequeñas.

**Palabras Clave:** modelación en cuencas, escorrentía superficial, Iber, Número de Curva, coeficiente de rugosidad, hidrograma

---

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Erick Giovanni Martínez Esquivel

Director: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

## Abstract

It is essential to characterize the spatio-temporal response of surface runoff to the presence of precipitation at the basin level to improve water and soil resource management. The precipitation-surface runoff relationship in a basin is very complex because several hydrological and hydraulic phenomena occur in it; for which mathematical modeling is proposed as an option for its representation and understanding. There are various proposals for mathematical models to simulate surface runoff integrated and solved by computer programs; however, the Iber program recently stands out for its flexibility and free access. Therefore, the calibration and validation of a hydrological-hydraulic model distributed in the Río Chapingo basin, of 1547 ha, was developed with the Iber program; using the Curve Number method in the hydrological model to calculate surface runoff. The program was fed with precipitation data measured at four strategic sites throughout the basin, with high-precision, high-resolution automated equipment. The calibration of the proposed model consisted of adjusting the Curve Number and the Manning roughness coefficient values to minimize the errors between the observed and simulated hydrographs at the outlet of the basin. The model was calibrated and validated with two groups of events of different rainfall intensities; in both groups, good to very good performance of the model was obtained in calibration and validation, according to the Nash-Sutcliffe efficiency index and Molnar performance criteria. A dynamic behavior of the Curve Number and the roughness coefficient was observed in response to the characteristics of the rain. The Iber model adequately represented the study basin's hydrological and hydraulic behavior, suggesting it as a useful tool in small ungauged basins.

**Keywords:** basin modeling, surface runoff, Iber, Curve Number, roughness coefficient, hydrograph.

---

Master's Degree Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Erick Giovanni Martínez Esquivel

Advisor: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más importantes que incide directamente con la calidad de vida de la población (Cruz & Martínez, 2015); por lo que es fundamental medirlo y reconocer su valor, e incorporarlo en la toma de decisiones para lograr su gestión sostenible y equitativa (UNESCO, 2021).

Como componente principal de la creación y el intercambio de conocimientos, los datos e información relacionados con el agua son fundamentales para comprender y valorar el recurso. Se requieren esfuerzos e inversiones adicionales para mantener la cadena de suministro de datos e información, su recopilación, análisis, intercambio y aplicación en todos los sectores y escalas (UNESCO, 2021).

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país, por tal motivo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional, en la cual se registra el nivel y cantidad de agua que pasa a determinada hora en los principales ríos de la República Mexicana (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016). No obstante, la información almacenada en la base de datos BANDAS enfrenta algunos problemas, como la calidad de datos, huecos de información, la fragmentación de los registros de las estaciones en archivos separados, lo que dificulta su utilidad para realizar análisis de estudios a nivel regional (Salas-Aguilar & Paz-Pellat, 2018)

La relación precipitación-escorrentía superficial es muy compleja; las variables hidrológicas involucradas se pueden obtener mediante métodos directos e indirectos, una de las desventajas de los métodos directos es que suelen ser sumamente costosos, y en los métodos indirectos es que pueden ser imprecisos si no se calibran y validan adecuadamente. Los diferentes métodos difieren tanto

en su fiabilidad como en su complejidad; por lo que a más información utilizada más complejidad y fiabilidad y viceversa (Ibáñez et al., 2011).

Para predecir los flujos de agua en una cuenca se puede recurrir al uso de modelos matemáticos, los cuales requieren ser probados bajo diversas condiciones ambientales, tales como el clima, la topografía, la composición del suelo y la vegetación (Darji et al., 2019). Los modelos hidrológicos en cuencas son una herramienta básica con la que se puede realizar estimaciones de la escorrentía superficial en la salida de una cuenca a partir de datos de precipitación; sin embargo, diversos estudios han señalado acerca de la sensibilidad de los modelos hidrológicos a la distribución espacial de las precipitaciones y la discretización espacial de la cuenca (Cervantes & Martínez, 2021; Fraga et al., 2019; Shen et al., 2012). De igual forma, Haberlandt & Gattke (2004) mencionan que la simplicidad de los modelos hidrológicos puede limitar el efecto de las precipitaciones en las estimaciones de escorrentía, sugiriendo el uso de modelos distribuidos con base física.

Uno de los problemas para hacer modelación matemática en México, es la falta de información operativa y sintetizada que permita a los investigadores generar datos relevantes para sus campos de interés (Salas-Aguilar & Paz-Pellat, 2018). En los países que aún se encuentran en desarrollo, el desafío radica en obstáculos conceptuales, tecnológicos y culturales, que limitan la difusión de la información proveniente de múltiples fuentes, además de ser un proceso muy costoso (Mendoza et al., 2002; Vargas et al., 2017).

Lo más elemental es incluir en el método la entrada de agua a partir de datos de precipitación. Esto es una función que la mayoría de los modelos ya tienen incorporada y que abre la posibilidad de realizar una modelización conjunta de la hidrología y de la hidráulica de una cuenca. Con la integración de la modelización hidráulica-hidrológica, se puede discretizar una cuenca con una malla irregular que emplee elementos de gran tamaño en la mayor parte de la cuenca, y elementos más finos en la zona del cauce (Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

Por esta razón, la modelación hidrológica - hidráulica en cuencas es un área que ha cobrado interés desde hace algún tiempo. Con el avance en la capacidad computacional, su aplicación ha cobrado mayor interés adaptando los modelos distribuidos con información ráster y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para una mejor representación de procesos como infiltración, escorrentía superficial, flujo subsuperficial, estrés hídrico, entre otros.

Actualmente existen diversos programas computacionales para la resolución del flujo superficial, algunas de las más consolidadas son Mike-21, TufLOW2D, Flo-2D, Sobek, entre otros; estos utilizan esquemas numéricos de diferencias finitas o elementos finitos, sin embargo, actualmente la tendencia se inclina hacia la solución numérica con volúmenes finitos debido a que permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales de una forma eficaz, algunos de los programas computacionales que utilizan este esquema numérico son Infoworks2D, Guard2D e Iber (Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

La elección del modelo en cuencas depende del objetivo deseado, la complejidad del problema, la disponibilidad y calidad de los datos para su aplicación y validación, así como de los resultados esperados (Torres-Bejarano et al., 2016). Esto se debe a que en cauces naturales el flujo atraviesa diversas composiciones de materiales, vegetación y variaciones topográficas, lo que implica que los parámetros hidrológicos e hidráulicos varíen a lo largo de la cuenca. En este sentido, la estimación de estos parámetros en cauces naturales se vuelve más compleja, requiriendo de un proceso de calibración y validación para aplicarlos de una forma confiable.

Para este estudio se eligió el modelo Iber por su versatilidad de uso, capacidad de procesamiento, alto desempeño computacional y por su disponibilidad gratuita. Además, el modelo ha sido ampliamente validado y ha demostrado su eficacia en diversos estudios hidráulicos e hidrológicos en cauces (Areu-Rangel et al., 2019; Bermúdez et al., 2017; García Feal et al., 2017; Garrote et al., 2016; A. Z. Hernández et al., 2017).

Por lo expuesto previamente, el objetivo principal de este estudio fue evaluar un modelo hidrológico-hidráulico en la cuenca Río Chapingo mediante el programa computacional Iber bidimensional, con el uso del método de Número de Curva para estimar la escorrentía superficial en el modelo hidrológico. El modelo fue alimentado con información de precipitación medida con pluviógrafos de alta precisión y resolución, instalados en sitios estratégicos de la cuenca, y la escorrentía superficial simulada fue comparada con hidrogramas obtenidos con una estación de aforo automatizada de alta precisión ubicada a la salida de la cuenca. En el proceso de evaluación, el modelo se calibró y validó para analizar su adaptabilidad y representatividad del fenómeno lluvia-escorrentía, con el fin de contar con una herramienta de simulación confiable en cuencas pequeñas no aforadas como la de estudio.

### 1.1. Literatura citada

- Areu-Rangel, O., Cea, L., Bonasia, R., & Espinosa-Echavarría, V. (2019). Impact of Urban Growth and Changes in Land Use on River Flood Hazard in Villahermosa, Tabasco (Mexico). *Water*, 11, 304. <https://doi.org/10.3390/w11020304>
- Bermúdez, M., Neal, J. C., Bates, P. D., Coxon, G., Freer, J. E., Cea, L., & Puertas, J. (2017). Quantifying local rainfall dynamics and uncertain boundary conditions into a nested regional-local flood modeling system. *Water Resources Research*, 53(4), 2770–2785. <https://doi.org/10.1002/2016WR019903>
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del Agua*, 18(1), Article 1. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Cervantes, G. E., & Martínez, E. G. (2021). *Evaluación del método SCS-CN para estimar escorrentía superficial en la cuenca RÍO CHAPINGO, con precipitación puntual y distribuida espacialmente*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Cruz, A. C. P., & Martínez, P. C. C. (2015). El recurso agua en el entorno de las ciudades sustentables. *Cultura Científica y Tecnológica*, 31, 15–25.
- Darji, K., Khokhani, V., Prakash, I., Mehmood, K., & Pham, B. (2019). Rainfall-Runoff Modelling Using HEC-HMS Model: An Application of Regression Analysis. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(5), 226–234.

- Fraga, I., Cea, L., & Puertas, J. (2019). Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall–runoff models. *Hydrological Processes*, 33(1), 160–173. <https://doi.org/10.1002/hyp.13319>
- García Feal, O., Gonzalez-Cao, J., Cea, L., Formella, A., & Domínguez, J. (2017). *Iber as a tool to analyse flooding scenarios*. 4841. <https://doi.org/10.3390/CHyCle-2017-04841>
- Garrote, J., Alvarenga, F. M., & Díez-Herrero, A. (2016). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541, 611–625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.006>
- Haberlandt, U., & Gattke, C. (2004). *Spatial interpolation vs. Simulation of precipitation for rainfall-runoff modelling – a case study in the Lippe river basin*. Hydrology: Science and practice for the 21st century, Proceedings of the British Hydrological Society International Conference, London.
- Hernández, A. Z., Balvanera, E. M., Jiménez, R. E. H., Broca, G. L. L., & Alavez-Ramírez, J. (2017). Simulación de lluvia extrema utilizando herramientas GIS e Iber en Jalpa de Méndez, Tabasco. *Boletín de La Sociedad Mexicana de Computación Científica y Sus Aplicaciones*, 3(2), 20–27.
- Ibáñez, A. S., Moreno, R. H., & Gisbert, B. J. M. (2011). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c)*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2016). *Procesamiento de información de variables hidrológicas (BANDAS)*. Gobierno de México. <http://www.gob.mx/imta/acciones-y-programas/procesamiento-de-informacion-de-variables-hidrológicas-bandas>
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. A. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: Una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones geográficas*, 47, 36–58.
- Salas-Aguilar, V. M., & Paz-Pellat, F. (2018). Base de datos para la estimación de sedimentos en subcuencas de México. *Elementos para Políticas Públicas*, 2(2), 85–92.
- Shen, Z., Chen, L., Liao, Q., Liu, R., & Hong, Q. (2012). Impact of spatial rainfall variability on hydrology and nonpoint source pollution modeling. *Journal of Hydrology*, 472–473, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.019>
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de*

*Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(3), 163–172.  
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>

UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: EL VALOR DEL AGUA*.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890>

Vargas, R., Alcaraz-Segura, D., Birdsey, R., Brunsell, N. A., Cruz-Gaistardo, C. O., de Jong, B., Etchevers, J., Guevara, M., Hayes, D. J., Johnson, K., Loescher, H. W., Paz, F., Ryu, Y., Sanchez-Mejia, Z., & Toledo-Gutierrez, K. P. (2017). Enhancing interoperability to facilitate implementation of REDD+: Case study of Mexico. *Carbon Management*, 8(1), 57–65.  
<https://doi.org/10.1080/17583004.2017.1285177>

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

La cuenca hidrográfica se define como una unidad del territorio que capta la precipitación y por esta transitan los escurrimientos superficiales hasta un punto de salida en el cauce principal (Granados et al., 2013).

El ciclo hidrológico se puede considerar parte fundamental de la hidrología. El agua constantemente se mueve a través de varias vías en la atmosfera, la biosfera y litosfera, conformando una serie de flujos naturales conocidos como ciclo hidrológico. Este proceso puede ser analizado a nivel cuenca hidrográfica analizando el proceso de lluvia-escorrentía, donde ocurren fenómenos físicos tales como la precipitación, evapotranspiración, retención de agua por follaje y pequeñas depresiones, infiltración y almacenamiento. Una manera concisa y visual de representar el ciclo hidrológico es a través de una ilustración, como se observa en la Figura 1.

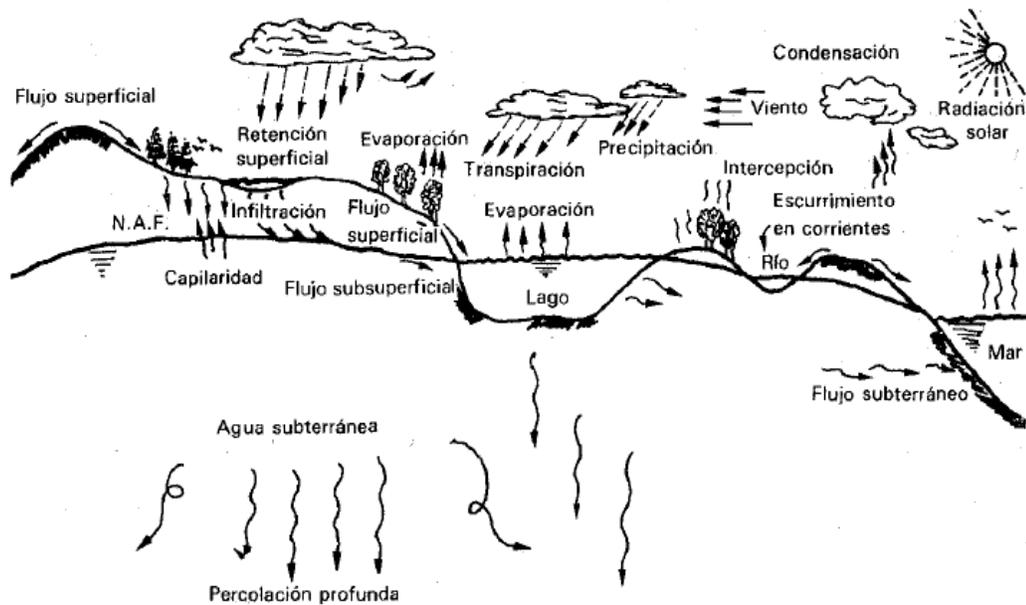


Figura 1 Ciclo Hidrológico Fuente: Aparicio (1992)

El ciclo hidrológico resalta principalmente cuatro fases básicas de interés: precipitación, evaporación y transpiración, escorrentía superficial y agua subterránea. A pesar de describirse como un proceso continuo y secuencial, el

movimiento del agua presenta variaciones tanto espacialmente como temporalmente. Es debido a esta irregularidad lo que resalta la importancia de comprenderla tanto cualitativamente como cuantitativamente, considerando las interrelaciones entre diversos factores para poder predecir el efecto de la actividad humana sobre estas relaciones (Linsley et al., 1977). Por lo anterior la precipitación es un componente importante del ciclo del agua, además, la cuantificación fiable y la distribución espacial y temporal de la precipitación, es fundamental para poder analizar los fenómenos hidrológicos de manera efectiva (Zubieta et al., 2018)

### **2.1. Medición en cuencas de México**

La disponibilidad de información climática precisa resulta fundamental para el avance de la investigación en diversas áreas como Hidrología, Agronomía, Climatología, entre otras. En México se dispone de datos de temperatura, precipitación y escurrimiento superficial; sin embargo, la calidad de esta información se ve afectada debido a factores relacionados con la cobertura temporal y espacial de los datos, así como la falta de uniformidad en los métodos empleados para registrar la información (Leal-Nares et al., 2010).

La variabilidad espacio-temporal del clima subraya la importancia de contar con bases de datos y sistemas de información hidroclimatológica que permitan caracterizar adecuadamente dicha variabilidad (Ruiz-Corral et al., 2018). A pesar de ello, de acuerdo con la información del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de Conagua, en colaboración del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en 2006 México contaba con 2,070 estaciones hidrométricas (BANDAS, 2006). Sin embargo, informes recientes del Sistema de Información Hidrológica (SIH) indican que actualmente solo se cuentan con 1,189 estaciones activas en todo el país (CONAGUA, 2019). Esta situación representa un desafío al querer calibrar y validar modelos matemáticos para estimar adecuadamente la respuesta hídrica de una cuenca ante diferentes escenarios de precipitación y usos de suelo.

## **2.2. Modelación hidrológica**

Un modelo hidrológico a nivel cuenca, tiene como objetivo representar los procesos relacionados con la distribución de la precipitación y escurrimiento (Jorquera et al., 2012). No obstante, Loaiza Quintero (2016) menciona que la modelación hidrológica enfrenta limitaciones basadas en la precisión de las relaciones para simular los procesos que ocurren dentro de la cuenca, así como en la disponibilidad de adecuada información para su implementación y uso efectivo. Debido a esto, la modelación hidrológica se plantea principalmente en forma agregada, es decir, asumiendo que la cuenca es homogénea y representándola como un solo elemento de características constantes. Sin embargo, el nivel de confianza, especialmente en ambientes de alta variabilidad espacial de las propiedades físicas de las cuencas, todavía no está bien definido.

## **2.3. Modelación hidrológica-hidráulica**

Torres & Granados (2019) mencionan que, tradicionalmente, el análisis hidrológico se fundamenta en la disponibilidad de información climatológica, condiciones geológicas, ambientales y geográficas para gestionar el recurso hídrico de manera integral. Sin embargo, en muchas partes del mundo se carece de instrumentación y por ende las cuencas no cuentan con registros hidrométricos o están incompletos, este vacío de información dificulta la simulación para analizar el recurso hídrico de formas indirectas y a veces con poco sustento científico. Las metodologías empleadas para estas estimaciones tienden a ser inciertas al tratar de estimar la oferta hídrica en zonas carentes de información, basándose en supuestos de comportamientos similares y vecindad.

Vásquez-Ramírez & Vásquez-Paredes (2023) coinciden en que la estimación confiable de la oferta hídrica, especialmente en cuencas no calibradas, es muy importante para la adecuada la gestión y planificación ambiental. Debido a esto, es de gran importancia conocer el comportamiento del caudal en diferentes puntos del río a través del tiempo para realizar la planeación, diseño y gestión de los recursos hídricos en una cuenca (F. M. Hernández et al., 2021) y de esta forma respaldar la toma de decisiones.

Vásquez-Ramírez & Vásquez-Paredes (2023) mencionan que en los últimos tiempos ha surgido la necesidad de hallar nuevos métodos capaces de mejorar la precisión en las estimaciones del caudal; esto se relaciona en gran medida a los avances tecnológicos desarrollados hasta el momento. Estas herramientas deben ser precisas para poder proporcionar datos útiles, así como computacionalmente eficientes y de esta manera obtener resultados en tiempos computacionales razonables (García-Feal et al., 2018).

La evaluación de los recursos hídricos en una cuenca se puede realizar a través de un modelo hidrológico-hidráulico distribuido, pues la simulación matemática se postula como una herramienta eficiente para la gestión de los recursos hídricos ya que permite llevar a cabo análisis de diversos hidrogramas y así conocer la conducta hidrológica e hidráulica en ríos a través del espacio-tiempo (Sanz-Ramos, Bladé, et al., 2018).

La modelación hidrológica-hidráulica es una herramienta que emplea ecuaciones matemáticas para describir, en diverso grado de detalle, las complejas relaciones entre el agua, la energía, el relieve y la vegetación, simplificando así el funcionamiento del sistema natural (Viviroli et al., 2009). Estos modelos son una opción rápida y de bajo costo para estimar el escurrimiento superficial; sin embargo, los modelos deben ser previamente evaluados (Montiel Gonzaga et al., 2019), ya que estos modelos tienen la capacidad de simular el proceso lluvia-escorrentía teniendo en cuenta diferentes procesos hidrológicos e hidráulicos (Sanz-Ramos, Amengual, et al., 2018), llevando una mayor preocupación con respecto a la precisión e incertidumbre de los datos de entrada (Fraga et al., 2019).

Los modelos de simulación se pueden clasificar en dos grandes grupos, agregados y distribuidos. La distinción principal entre ambos radica en que en los modelos agregados el flujo se estima como una función del tiempo en un punto específico, mientras que en los modelos distribuidos, el flujo se estima como una función del espacio-tiempo (Chow et al., 1993). Fernández-Pato et al. (2019) mencionan que, al utilizar modelos distribuidos de simulación, usualmente se

necesita una malla que contenga un gran número de celdas para lograr resultados con una alta precisión. En este contexto, Lacasta et al. (2014) y García-Feal et al. (2018) mencionan que con el objetivo de reducir el tiempo computacional se emplea el uso tanto de la unidad de procesamiento central (CPU por sus siglas en inglés) como de la unidad de procesamiento grafica (GPU por sus siglas en inglés) para la aceleración de resolución de las ecuaciones, manteniendo la misma precisión y aprovechando la capacidad de las tarjetas gráficas.

Los modelos de parámetros espacialmente distribuidos utilizan alguna forma de la ecuación de balance definida en todos los puntos para modelar el flujo. Un enfoque típico es el empleo de las ecuaciones de Saint Venant para un flujo de agua poco profunda, donde se conservan la masa y cantidad de movimiento (Riccardi et al., 2013).

Existen distintos modelos hidrológicos-hidráulicos, tales como Mike-21, Sobek, Telmac, Iber, InfoWorks, Flo-2D (Muñoz & Serrano, 2014); sin embargo, las cualidades distintivas de Iber incluyen su flexibilidad de uso, su capacidad de procesamiento, alto rendimiento computacional y su disponibilidad gratuita. Así mismo, Iber aprovecha diferentes estrategias de procesamiento tanto en CPU como en GPU para acelerar los cálculos, manteniendo la misma precisión que el modelo original (García-Feal et al., 2018).

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial (Bladé, Cea, Corestein, et al., 2014) que resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas de Saint-Venant utilizando el método de volumen finito. El modelo ha sido ampliamente validado y aplicado a estudios de inundaciones de ríos (Areu-Rangel et al., 2019; Bermúdez et al., 2017; García Feal et al., 2017; Garrote et al., 2016; Sopelana et al., 2018).

El modelo Iber permite la definición de geometrías de estructuras y secciones de canales en una o dos dimensiones de manera relativamente simple con la ventaja

de apoyarse en métodos numéricos, permitiendo el uso de herramientas como son la dinámica de fluidos computacional (CFD) de una manera sencilla de comprender en comparación de otros programas (Portal et al., 2021). Además, Iber consta de distintos módulos de cálculo: calidad de aguas, drenaje urbano, erosión de suelos, transporte de sedimentos, hábitat y procesos hidrológicos; estos módulos se acoplan junto con el modelo hidrodinámico, permitiendo simular múltiples procesos ambientales.

La base del módulo hidrológico es el módulo hidrodinámico, al que se le han añadido los procesos de precipitación e infiltración del agua como nuevos términos en la ecuación de conservación de masa Ecuación (1). De este modo, el exceso de precipitación se desplaza a través del terreno y cauces de acuerdo con las ecuaciones de aguas poco profundas en dos dimensiones como se puede observar en las Ecuaciones (2) y (3). El agua infiltrada pasa a formar parte del subsuelo, donde se realiza un balance de masa de agua distribuido en el espacio a nivel de elemento de la malla de cálculo (Sanz-Ramos et al., 2022). Las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant referidas, cuya solución permite conocer el comportamiento espacio-temporal del caudal (o velocidad) y el tirante, se escriben como sigue:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - f \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_y \quad (3)$$

donde  $h$  es el tirante de agua [L];  $q_x$  y  $q_y$  son los caudales unitarios en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente [ $L T^{-1}$ ];  $|q|$  es un caudal modular, introducido para respetar el sentido del flujo;  $R$  es la intensidad de precipitación [ $L T^{-1}$ ];  $f$  es la tasa de infiltración [ $L T^{-1}$ ];  $z_b$  es la cota del fondo del cauce [L];  $g$  es la aceleración de la gravedad [ $L T^{-2}$ ];  $t$  es el tiempo [T];  $n$  es el coeficiente de fricción de Manning.

Sanz-Ramos et al. (2022) señalan que Iber cuenta con diferentes esquemas numéricos para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant, tales como Roe de orden 1 y orden 2, DHD y DHD basin, recomendando preferiblemente el uso del esquema DHD basin en aplicaciones que impliquen la transformación lluvia-escorrentía. Los algoritmos implementados en el modelo Iber han sido ampliamente validados y aplicados en estudios previos relacionados con inundaciones, corrientes de mareas y modelación de lluvia-escorrentía (Bladé, Cea, & Corestein, 2014; Bodoque et al., 2016; Cea & Bladé, 2015; Cea & French, 2012).

La solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant requieren de la siguiente información: topografía del terreno de manera que se pueda definir la pendiente y la geometría de las corrientes, el coeficiente de rugosidad de la superficie del terreno, las condiciones iniciales de flujo y las condiciones de frontera. Las condiciones de frontera pueden ser hidrogramas, limnigramas o relaciones caudales-tirante. Las condiciones de frontera aguas arriba (generadas en cada elemento del espacio discretizado) pueden ser hidrogramas (escorrentía a través del tiempo) los cuales resultan de restar la tasa de infiltración ( $f$ ) a la tasa de precipitación ( $R$ ).

#### **2.4. Precipitación**

La estimación de hidrogramas de avenida a través de modelos de transformación de lluvia-escorrentía demanda una caracterización precisa de como evoluciona la precipitación tanto espacial y temporalmente (Fraga et al., 2015). En el modelo Iber la información de precipitación puede definirse mediante series de intensidad, precisando la cantidad de pluviómetros como el usuario deseé; dicha información se asigna por el mismo usuario a distintas partes del modelo, esto con el objetivo de precisar manualmente la distribución espacial de la precipitación. Como mencionan Fraga et al. (2019), los datos de precipitación es uno de los insumos con mayor impacto en el desempeño del modelo y, sin embargo, es uno de los datos con mayor grado de incertidumbre debido a la falta de información y errores de medición.

El desarrollo de las metodologías han permitido incluir la incertidumbre de los datos de precipitación en los cálculos hidrológicos; sin embargo, múltiples estudios han puesto notoriedad de la sensibilidad de los modelos hidrológicos a la distribución espacial de las precipitaciones y a la discretización espacial de la cuenca (Fu et al., 2011; Shen et al., 2012). Es por esto que Haberlandt & Gattke (2004) recomiendan el uso de modelos distribuidos con base física, especialmente en aquellas cuencas sujetas a eventos climáticos de lluvia variables.

## **2.5. Escorrentía superficial**

Como bien se sabe, la precipitación que llega a la superficie del suelo penetra al mismo por medio de la infiltración; sin embargo, cuando la proporción de agua precipitada es superior a la capacidad del suelo para absorberla, el agua comienza a acumularse en la parte superior, generando de esta manera pequeños charcos o en caso de tener pendiente habrá escorrentía superficial hacia zonas bajas. En el caso de las cuencas hidrológicas la escorrentía fluye laderas abajo en la que discurre por estrechos canales delimitados por márgenes laterales.

Existen diversos métodos para medir o estimar la escorrentía superficial. Para medir la escorrentía de manera directa se utiliza el aforo, es decir, determinar a través de mediciones el gasto que pasa por una sección dada; actualmente este método se implementa con ayuda de sensores con diferentes principios de funcionamiento (mecánico, capacitivo, conductivo, presión, ultrasónicos, ópticos y radar), dichos sensores pueden medir una o más variables que permiten obtener el gasto.

Es muy común que no se cuente con registros adecuados de escorrentía en los sitios de interés o que generalmente los registros de precipitación son los únicos con lo que se cuenta. Es por esto que es entendible que, dependiendo de la duración de la modelización, el tamaño de la cuenca y los datos de entrada, se apliquen diferentes herramientas para obtener resultados fidedignos (Olivares et al., 2019).

De la misma forma, es crucial definir la humedad del suelo antecedente, ya que un mismo evento de escorrentía puede originarse por lluvias intensas sobre un suelo relativamente seco o por lluvias moderadas sobre un suelo saturado (Fraga et al., 2021). La mejoría en la simulación de la transformación lluvia-escorrentía cuando los modelos incorporan información de humedad ha sido destacada en diversos estudios (Cea & Fraga, 2018; Massari et al., 2015). En Iber se pueden modelar frentes húmedo-seco, tanto estacionarios como no estacionarios, que pueden aparecer en el dominio trabajando con una malla de volúmenes finitos, y permitiendo que los volúmenes puedan tener agua o no dependiendo de las condiciones de flujo (Caro et al., 2016). Además, el modelo Iber, incluye un módulo hidrológico, el cual es capaz de simular el comportamiento temporal y espacial de la escorrentía superficial en una cuenca mediante la resolución de las ecuaciones poco profundas bidimensionales, considerando también el comportamiento espacio-temporal de la precipitación.

## **2.6. Infiltración**

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. La tasa de infiltración es una medida a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación (Úbeda Rivera & Delgado Dallatorre, 2018). Medir la infiltración directamente es complicado debido a una multitud de factores involucrados y por la escala de las mediciones, es por esto por lo que existen diversos métodos para estimarla; el modelo Iber incluye cuatro de ellos los cuales son: lineal, Green-Ampt, Número de Curva (SCS-CN) y Horton.

El modelo lineal permite introducir pérdidas iniciales seguidas de una infiltración potencial constante en el tiempo, este método puede ser adecuado para eventos cortos en los cuales puede considerarse la infiltración aproximadamente lineal. El método de Green-Ampt genera una infiltración potencial elevada inicialmente, la cual va decayendo de forma aproximadamente exponencial en el tiempo, hasta llegar a un mínimo valor de infiltración igual a la permeabilidad saturada del suelo, este método se basa en parámetros físicos que se relacionan con propiedades del terreno. El método de Número de Curva del Servicio de Conservación de

Suelos (SCS) es un modelo ampliamente utilizado en la modelación hidrológica debido a que su principal ventaja es que depende de un único parámetro, cuyo valor puede ser relacionado con el tipo y uso de suelo. Finalmente, el método de Horton es similar al de Green-Ampt en cuanto a capacidad de infiltración generada, pero sus parámetros no están directamente relacionados con las características del suelo (Sanz-Ramos et al., 2022).

### 2.6.1. Método de Número de Curva

El método de Número de Curva propone que la lámina de agua neta acumulada siempre es igual o menor que la lámina total de lluvia, y de manera análoga, una vez que comienza la escorrentía superficial, la lámina adicional del agua retenida en la cuenca es igual o menor a la capacidad máxima de retención del suelo (USDA, 1971). Este método define a la capacidad máxima de retención del suelo ( $S$ ) como se muestra en la Ecuación (4):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

donde CN es el valor de Número de Curva. Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva (CN), tal que para superficies impermeables CN equivale a cien y para superficies naturales el valor de número de curva es menor a cien.

En la Ecuación (5) se muestra la abstracción inicial ( $I_a$ ), la cual se define como un porcentaje de la capacidad máxima de retención, esta es una cierta cantidad de precipitación para la cual no ocurrirá escorrentía.

$$I_a = \lambda S \quad (5)$$

En la implementación clásica del método del número de curva, el SCS desarrolló una relación empírica para obtener la abstracción inicial basada en numerosas pruebas de campo y señalaron un valor medio del 20% de la capacidad máxima de retención ( $I_a = 0.2S$ ). Sin embargo, diversos estudios han encontrado que en muchos casos las pérdidas iniciales son inferiores a dicho valor (Valle Junior

et al., 2019), por lo que en la implementación en Iber se introduce el valor de  $\lambda$  como un parámetro que el usuario puede definir para el cálculo.

A partir de los parámetros anteriores, la precipitación neta en cada instante se calcula como se muestra en la ecuación (6):

$$P_n = \frac{(P-\lambda S)^2}{P+(1-\lambda)S} \quad (6)$$

donde  $P$  es la lámina de precipitación bruta y  $P_n$  es la lámina de precipitación neta; esta última es la lámina que se acumula en la superficie del suelo que podría escurrir superficialmente si hay las condiciones topográficas.

La infiltración acumulada se calcula en cada paso de tiempo como la diferencias entre la precipitación neta y la bruta como se muestra en la ecuación (7).

$$F = P - P_n \quad (7)$$

A partir de la infiltración acumulada en dos pasos de tiempo consecutivos, la tasa de infiltración se calcula con la Ecuación (8):

$$f = \frac{F_{(t+\Delta t)} - F_{(t)}}{\Delta t} \quad (8)$$

Una diferencia con el uso tradicional del método del número de curva en la implementación de las pérdidas iniciales en Iber, es que pueden satisfacerse con la precipitación inicial o con la escorrentía superficial que haya sobre el terreno antes de que comience la precipitación. Una vez que se han satisfecho las pérdidas iniciales, las perdidas por infiltración se satisfacen únicamente con la precipitación (Sanz-Ramos et al., 2022).

## 2.7. Evaluación del desempeño de los modelos

Los criterios de desempeño de los modelos se utilizan a menudo durante la calibración y evaluación de modelos hidrológicos, para expresar en un solo número la similitud entre la descarga observada y la simulada (Gupta et al., 2009)

### 2.7.1. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) puede interpretarse como la proporción de la varianza de la variable dependiente que es predecible a partir de las variables independientes. Puede tomar valores en el rango  $(-\infty, 1]$  de acuerdo con la relación mutua entre la verdad fundamental y el modelo de predicción (Chicco et al., 2021). Dicho coeficiente se expresa como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - Y_i)^2} \quad (14)$$

donde  $X_i$  es el  $i$ -ésimo valor estimado,  $Y_i$  es el  $i$ -ésimo valor observado y  $n$  es el número de datos.

### 2.7.2. Error Cuadrático Medio

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) ha sido adoptado como una métrica estadística convencional para evaluar la precisión de los modelos en investigaciones relacionadas con el clima, de calidad del aire y de meteorología (Chai & Draxler, 2014). Es una métrica estándar utilizada en la evaluación de modelos (Hodson, 2022) entre los valores medidos y los valores estimados como se muestra en la Ecuación (15):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (15)$$

donde  $y_i$  es el  $i$ -ésimo valor observado;  $\hat{y}_i$  es el  $i$ -ésimo valor estimado y  $n$  es el número de datos.

### 2.7.3. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe

La eficiencia de Nash-Sutcliffe es una métrica estadística de uso frecuente en los modelos hidrológicos ya que dicho criterio mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, además, porque normaliza el desempeño del modelo en una escala interpretable (Knoben et al., 2019), dicha métrica se obtiene con la Ecuación (16):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_1^n (Q_{i\ sim} - Q_{i\ obs})^2}{\sum_1^n (Q_{i\ obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (16)$$

donde n es el número total de pasos de tiempo;  $Q_{i\ sim}$  es la descarga simulada en el  $i$ -ésimo tiempo;  $Q_{i\ obs}$  es la descarga observada en el  $i$ -ésimo tiempo y  $\overline{Q_{obs}}$  es la descarga media observada.

Knoben et al. (2019) sugieren que si NSE es igual a uno indica perfecta correspondencia entre los valores observados y simulados, caso contrario, si NSE es igual a cero indica que los valores simulados tienen la misma correspondencia que la media de las observaciones y si NSE es menor a cero indica que los valores obtenidos mediante la simulación no tienen correspondencia con los valores observados.

El criterio de Molnar (2011) se utiliza para evaluar el desempeño de los modelos matemáticos en función de los valores de NSE (Cuadro 1), y es frecuentemente empleado en la modelación de la escorrentía superficial en cuencas hidrográficas (Fernández et al., 2021; Flores et al., 2023; Morales et al., 2021; Roque Quiroz, 2023).

Cuadro 1 Criterios de desempeño del modelo propuestos por Molnar (2011) en función del NSE.

Rango de preferencia	NSE
Excelente	>0.8
Muy bueno	0.6-0.8
Bueno	0.4-0.6
Satisfactorio	0.2-0.4
Insuficiente	<0.2

## 2.8. Literatura citada

- Aparicio, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. LIMUSA.
- Areu-Rangel, O., Cea, L., Bonasia, R., & Espinosa-Echavarría, V. (2019). Impact of Urban Growth and Changes in Land Use on River Flood Hazard in Villahermosa, Tabasco (Mexico). *Water*, 11, 304. <https://doi.org/10.3390/w11020304>
- BANDAS. (2006). Red hidrométrica nacional CONAGUA. <https://www.imta.gob.mx/media/iframes/bandas.html>
- Bermúdez, M., Neal, J. C., Bates, P. D., Coxon, G., Freer, J. E., Cea, L., & Puertas, J. (2017). Quantifying local rainfall dynamics and uncertain boundary conditions into a nested regional-local flood modeling system. *Water Resources Research*, 53(4), 2770–2785. <https://doi.org/10.1002/2016WR019903>
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del Agua*, 18(1), Article 1. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bodoque, J. M., Américo, M., Díez-Herrero, A., García, J. A., Cortés, B., Ballesteros-Cánovas, J. A., & Olcina, J. (2016). Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, 541, 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.005>
- Caro, C. A., Lesmes, C., & Blade, E. (2016). Drying and Transport Processes in Distributed Hydrological Modelling based on Finite Volume Schemes (IBER Model). 4th Annual International Conference on Ecology, Ecosystems and Climate Change, Greece.
- Cea, L., & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Cea, L., & Fraga, I. (2018). Incorporating Antecedent Moisture Conditions and Intraevent Variability of Rainfall on Flood Frequency Analysis in Poorly Gauged Basins. *Water Resources Research*, 54(11), 8774–8791. <https://doi.org/10.1029/2018WR023194>
- Cea, L., & French, J. R. (2012). Bathymetric error estimation for the calibration and validation of estuarine hydrodynamic models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 100, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.01.004>

- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?– Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1993). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- CONAGUA. (2019). Sistema de Información Hidrológica. <https://sih.conagua.gob.mx/>
- Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F., Flores, M. A., Abalo, P. O., Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F., Flores, M. A., & Abalo, P. O. (2021). Validación de simulaciones de tormentas en el Sector Superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 30(1), 43–76. <https://doi.org/10.52292/j.rug.2021.30.1.0016>
- Fernández-Pato, J., Sánchez, A., & García-Navarro, P. (2019). Simulación de avenidas mediante un modelo hidráulico/hidrológico distribuido en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro). *Ribagua*, 6(1), 49–62. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1622473>
- Flores, M., Alama, A., Carmona Arteaga, A., & Miranda, E. (2023). Generation of daily flows using the GR4j model and the ERA5 gridded climatic product in the Crisnejas basin up to the Puente Crisnejas hydrometric station. 21 st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development, Buenos Aires, Argentina. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.181>
- Fraga, I., Cea, L., Agudo, J., Enjo, M., Coquerez, S., Bermúdez, M., Salsón, S., & Petazzi, M. (2015). Influencia de la densidad espacial de estaciones pluviométricas y de la disponibilidad de datos radar en los hidrogramas de tormenta calculados con un modelo hidrológico distribuido: Aplicación a una cuenca de 24 Km<sup>2</sup> en el Noroeste de España. IV Jornadas de Ingeniería del Agua.
- Fraga, I., Cea, L., & Puertas, J. (2019). Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall–runoff models. *Hydrological Processes*, 33(1), 160–173. <https://doi.org/10.1002/hyp.13319>
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Mosqueira, G., Quinteiro, B., Botana, S., Fernández, L., Salsón, S., Fernández-García, G., & Taboada, J. (2021). MERLIN: Una nueva herramienta para la predicción del riesgo de inundaciones en la demarcación hidrográfica Galicia-Costa. *Ingeniería del agua*, 25(3), 215. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15565>

- Fu, S., Sonnenborg, T. O., Jensen, K. H., & He, X. (2011). Impact of Precipitation Spatial Resolution on the Hydrological Response of an Integrated Distributed Water Resources Model. *Vadose Zone Journal*, 10(1), 25–36. <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0186>
- García Feal, O., Gonzalez-Cao, J., Cea, L., Formella, A., & Domínguez, J. (2017). Iber as a tool to analyse flooding scenarios. 4841. <https://doi.org/10.3390/CHyCle-2017-04841>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J. M., & Formella, A. (2018). An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- Garrote, J., Alvarenga, F. M., & Díez-Herrero, A. (2016). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541, 611–625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.006>
- Granados, D., Hernández, M. Á., & López, G. F. (2013). *La cuenca Hidrológica: Unidad ecológica de manejo (Primera Edición)*. Universidad Autónoma Chapingo.
- 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), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Haberlandt, U., & Gattke, C. (2004). Spatial interpolation vs. Simulation of precipitation for rainfall-runoff modelling – a case study in the Lippe river basin. *Hydrology: Science and practice for the 21st century, Proceedings of the British Hydrological Society International Conference, London*.
- Hernández, F. M., Gómez, A. C. M., Ortíz, R. S. M., Quiroga, L. A., & Cobián, V. H. G. (2021). Estimación de caudales en cuencas no aforadas por el modelo hidrológico CEQUEAU. *Agrociencia*, 55(2), 99–115. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2389>
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
- Jorquera, E., Weber, J., & Reyna, S. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos*.
- 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*, 23(10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Lacasta, A., Morales-Hernández, M., Murillo, J., & García-Navarro, P. (2014). An optimized GPU implementation of a 2D free surface simulation model on

- unstructured meshes. *Advances in Engineering Software*, 78, 1–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.08.007>
- Leal-Nares, O. A., Mendoza, M. E., & Carranza González, E. (2010). Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México. *Investigaciones geográficas*, 72, 49–67.
- Linsley, R. K., Kholer, M. A., & Paulus, J. L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros (Segunda Edición)*. McGRAW-HILLLATINOAMERICANA, S.A.
- Loaiza Quintero, J. C. (2016). Implementación del modelo hidrológico “abcd” realizando una calibración regional para la evaluación del impacto del caudal en la cuenca alta del río Bogotá basado en los resultados del downscaling previamente implementados en los modelos de escenarios de cambio climático con series temporales de precipitación y temperatura a nivel mensual [Universidad Nacional de Colombia].  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57602>
- Massari, C., Brocca, L., Tarpanelli, A., & Moramarco, T. (2015). Data Assimilation of Satellite Soil Moisture into Rainfall-Runoff Modelling: A Complex Recipe? *Remote Sensing*, 7(9), Article 9.  
<https://doi.org/10.3390/rs70911403>
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling*. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.
- Montiel Gonzaga, R., Prado Hernández, J. V., Vázquez Peña, M. A., Ibañez Castillo, L. A., & Pascual Ramírez, F. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 291–301.  
<https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>
- Morales, Y., Querales, M., Rosas, H., Allende-Cid, H., & Salas, R. (2021). A self-identification Neuro-Fuzzy inference framework for modeling rainfall-runoff in a Chilean watershed. *Journal of Hydrology*, 594, 125910.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125910>
- Muñoz, C. K., & Serrano, J. L. (2014). Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el Análisis de Rotura en Presas de Materiales Suelos; y Aplicación a la Presa Palo Redondo [Universidad Privada Antenor Orrego].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12759/634>
- Olivares, G. J., Sanz-Ramos, M., Gómez, M., & Bladé, E. (2019). Modelización hidrológica agregada (Hec-HMS) y distribuida (Iber). Análisis conceptual de la respuesta hidrológica de la cuenca de La Muga. VI Jornadas de Ingeniería del Agua, Toledo. <https://www.iberaula.es/vnews/0/2669/jia-2019>
- Portal, M. H. C., Barriga, J. E. C., & Gómez, L. C. (2021). Uso de Iber como herramienta de aprendizaje y análisis de flujos bidimensionales en

- canales. *Revista Educación en Ingeniería*, 16(31), Article 31. <https://doi.org/10.26507/rei.v16n31.1126>
- Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., & Trivisonno, F. (2013). Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(1), 83–105.
- Roque Quiroz, R. A. (2023). Validación de la data de precipitación (1981-2016) del producto PISCO v2.1: Estación meteorológica, elevación, estacionalidad del año y región climática en la cuenca Tumbes, Perú. *Manglar*, 20(1), 41–50. <https://doi.org/10.57188/manglar.2023.005>
- Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., García Romero, G. E., Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., & García Romero, G. E. (2018). Sistema de información agroclimático para México-Centroamérica. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.843>
- Sanz-Ramos, M., Amengual, A., Bladé Castellet, E., Romero, R., & Roux, H. (2018). Flood forecasting using a coupled hydrological and hydraulic model (based on FVM) and highresolution meteorological model. *E3S Web of Conferences: River Flow 2018-Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics*, 40, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006028>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Niñerola, D., & Palau-Ibars, A. (2018). Evaluación numérico-experimental del comportamiento histórico del coeficiente de rugosidad de los macrófitos. *Ingeniería del agua*, 22(3), 109–124. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8880>
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón-Hernández, J. L. (2022). Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>
- Shen, Z., Chen, L., Liao, Q., Liu, R., & Hong, Q. (2012). Impact of spatial rainfall variability on hydrology and nonpoint source pollution modeling. *Journal of Hydrology*, 472–473, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.019>
- Sopelana, J., Cea, L., & Ruano, S. (2018). A continuous simulation approach for the estimation of extreme flood inundation in coastal river reaches affected by meso- and macrotides. *Natural Hazards*, 93(3), 1337–1358. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3360-6>
- Torres, G. H., & Granados, G. R. S. (2019). Predicción hidrológica en cuencas no instrumentadas: Estado del arte. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/ponencia.273>
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en

- ellos para la agricultura. *Rev. Iberoamericana de bioeconomía y cambio climático*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- USDA. (1971). *Hidrology, National Engineering*. <https://directives.sc.egov.usda.gov/RollupViewer.aspx?hid=17092>
- Valle Junior, L. C., Rodrigues, D., & Oliveira, P. T. (2019). Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources*, 24, 1–9. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199>
- Vásquez-Ramírez, L., & Vásquez-Paredes, L. F. (2023). Predicción de caudales mensuales en ríos de cuencas altoandinas con enfoque de redes neuronales artificiales. Caso: Río Crisnejas, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 14(1), 124–199. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-01-04>
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1209–1222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>
- Zubieta, R., Laqui, W., Lavado, W., Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del río llave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 85–105. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04>

### 3. EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE NUMERO DE CURVA MEDIANTE EL MODELO IBER EN LA CUENCA RIO CHAPINGO

#### 3.1. Resumen

Es fundamental caracterizar la respuesta espacio-temporal de la escorrentía superficial a la presencia de precipitaciones a nivel cuenca para mejorar la gestión del recurso hídrico y del suelo. La relación precipitación-escorrentía superficial en una cuenca es muy compleja porque en ella ocurren varios fenómenos hidrológicos e hidráulicos; para lo cual la modelación matemática se plantea como una opción para su representación y entendimiento. Existen diversas propuestas de modelos matemáticos para simular la escorrentía superficial las cuales son integradas y resueltas por programas computacionales; sin embargo, recientemente el programa Iber destaca por la flexibilidad en su uso y por su acceso gratuito. Por lo anterior, se realizó la calibración y validación de un modelo hidrológico-hidráulico distribuido en la cuenca Río Chapingo, de 1547 ha, con el programa Iber; empleando el método de Número de Curva en el modelo hidrológico para calcular la escorrentía superficial. El programa se alimentó con precipitación medida en cuatro sitios estratégicos a lo largo de la cuenca, con equipos automatizados de alta precisión y resolución. La calibración del modelo propuesto consistió en ajustar los valores del Número de Curva y el coeficiente de rugosidad de Manning para minimizar los errores entre los hidrogramas observados y simulados en la salida de la cuenca. El modelo se calibró y validó con dos grupos de eventos de intensidades de lluvia diferentes; en ambos grupos se obtuvo un desempeño bueno a muy bueno en la calibración y validación, según el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y los criterios de desempeño Molnar. Se observó un comportamiento dinámico del Número de Curva y del coeficiente de rugosidad como respuesta a las características de la lluvia. El modelo Iber representó adecuadamente el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca de estudio y ello lo sugiere como una herramienta útil en cuencas no aforadas pequeñas.

**Palabras Clave:** modelación en cuencas, escorrentía superficial, Iber, Número de Curva, coeficiente de rugosidad, hidrograma

---

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Erick Giovanni Martínez Esquivel

Director: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

## Hydrological and hydraulic modeling of the Río Chapingo basin

### 3.2. Abstract

It is essential to characterize the spatio-temporal response of surface runoff to the presence of precipitation at the basin level to improve water and soil resource management. The precipitation-surface runoff relationship in a basin is very complex because several hydrological and hydraulic phenomena occur in it; for which mathematical modeling is proposed as an option for its representation and understanding. There are various proposals for mathematical models to simulate surface runoff integrated and solved by computer programs; however, the Iber program recently stands out for its flexibility and free access. Therefore, the calibration and validation of a hydrological-hydraulic model distributed in the Río Chapingo basin, of 1547 ha, was developed with the Iber program; using the Curve Number method in the hydrological model to calculate surface runoff. The program was fed with precipitation data measured at four strategic sites throughout the basin, with high-precision, high-resolution automated equipment. The calibration of the proposed model consisted of adjusting the Curve Number and the Manning roughness coefficient values to minimize the errors between the observed and simulated hydrographs at the outlet of the basin. The model was calibrated and validated with two groups of events of different rainfall intensities; in both groups, good to very good performance of the model was obtained in calibration and validation, according to the Nash-Sutcliffe efficiency index and Molnar performance criteria. A dynamic behavior of the Curve Number and the roughness coefficient was observed in response to the characteristics of the rain. The Iber model adequately represented the study basin's hydrological and hydraulic behavior, suggesting it as a useful tool in small ungauged basins.

**Keywords:** basin modeling, surface runoff, Iber, Curve Number, roughness coefficient, hydrograph.

---

Master's Degree Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Erick Giovanni Martínez Esquivel

Advisor: Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

### **3.3. Introducción**

Actualmente existe una preocupación alrededor del mundo por el deterioro del medio ambiente, particularmente con el recurso agua. Fenómenos como el calentamiento global, causados en gran medida por el desarrollo industrial y por el crecimiento poblacional no sostenible, subraya la necesidad de disponer de herramientas que faciliten la comprensión de estos fenómenos, con la finalidad de tomar decisiones precisas, ajustadas a la realidad y de forma eficaz (Torres-Bejarano et al., 2013).

Ante esta problemática, una de las alternativas es la aplicación de modelos hidráulicos basados en ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas. Existe la posibilidad de integrar dentro de la modelización hidráulica otro tipo de procesos de carácter hidrológico como es la entrada del agua a partir de datos de precipitación, pérdidas por infiltración, pérdidas por evaporación, entre otros. Esta metodología se está convirtiendo cada vez más común en las simulaciones de lluvia-escorrentía a escala de cuenca por su alta eficiencia de estimación, permitiendo la planificación de obras hidráulicas para controlar la escorrentía superficial.

En las últimas décadas, la modelación numérica de escorrentía superficial ha experimentado un rápido desarrollo relacionado en gran medida a los avances tecnológicos hasta el momento, mediante la utilización de varios modelos para la simulación (Hafnaoui & Debabeche, 2021). Existen algunos modelos que destacan por su accesibilidad y funcionamiento bajo el esquema de libre acceso como HEC RAS, HEC HMS e Iber. Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial (Bladé, Cea, Corestein, et al., 2014) que resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas de Saint-Venant utilizando el método de volumen finito. Iber de igual forma aprovecha diferentes estrategias tanto en CPU como en GPU para acelerar los cálculos, manteniendo la misma precisión que el modelo original (García Feal et al., 2017).

Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación es simular, calibrar y validar la escorrentía superficial en la cuenca Rio Chapingo mediante el método de numero de curva utilizando el modelo numérico Iber.

### 3.4. Materiales y métodos

#### 3.4.1. Área de estudio

La cuenca del Río Chapingo se localiza dentro de la región hidrológica 26 Pánuco, en la subregión Hidrológica del Valle de México, cuya zona se le conoce como la Cuenca Oriental del Valle de México, la cual está conformada por 13 cuencas (SEMARNAT, 2018). La cuenca de estudio tiene un área de 15.47 km<sup>2</sup>, una pendiente promedio de 33.1% y sus altitudes van de 2250 a 3580 msnm (Montiel, 2019). Se ubica en el extremo oriente del municipio de Texcoco, Estado de México cuyas coordenadas en el extremo alto de la cuenca son 19° 25' 15" N, 98° 45' 40" W y en la parte baja 19° 29' 22" N, 98° 53' 9" W. Los suelos predominantes son los Cambisol (39.5%), Feozem (27.8%) y Litosol (26.8%), y en menor proporción los Andosol (5.8%) y Vertisol (0.01%) (Montiel Gonzaga et al., 2019). De acuerdo con Piza (2017), los usos de suelo predominantes son la reforestación, bosque de pino, agricultura de temporal, zona urbana y bosque de pino Cuadro (2).

Cuadro 2 Porcentaje de los usos de suelo y vegetación de la cuenca del Rio Chapingo (Piza, 2017).

Uso de suelo y vegetación	%
Reforestación	15.13
Agricultura de Temporal	13.01
Vegetación secundaria con pastizal inducido	5.29
Zona Urbana	12.21
Pastizal Inducido	3.39
Bosque de pino	13.33
Bosque de encino-abies	4.17

Uso de suelo	%
Bosque de encino	9.37
Pastizal alpino-abies	2.74
Bosque de abies	7.24
Zacatonal con relictos de encino	0.75
Pastizal inducido con vegetación secundaria	2.97
Pastizal inducido con relictos de encino	5.03
Cuerpos de agua	0.26
Minas de Arena	1.94

### **3.4.2. Estrategia de modelación**

Para la ejecución de la modelación hidrológica-hidráulica del fenómeno lluvia-escorrentía en la cuenca de estudio, se realizaron varias actividades de forma secuencial, las cuales se pueden agrupar en seis bloques principales: planteamiento conceptual del fenómeno a representar, planteamiento de la arquitectura del modelo cuenca dentro del modelo computacional a emplear, acopio y alimentación de información hidrológica e hidráulica (precipitación, topográfica, tipo y uso de suelo, rugosidad de la superficie del suelo), simulación, calibración y validación Figura (2).

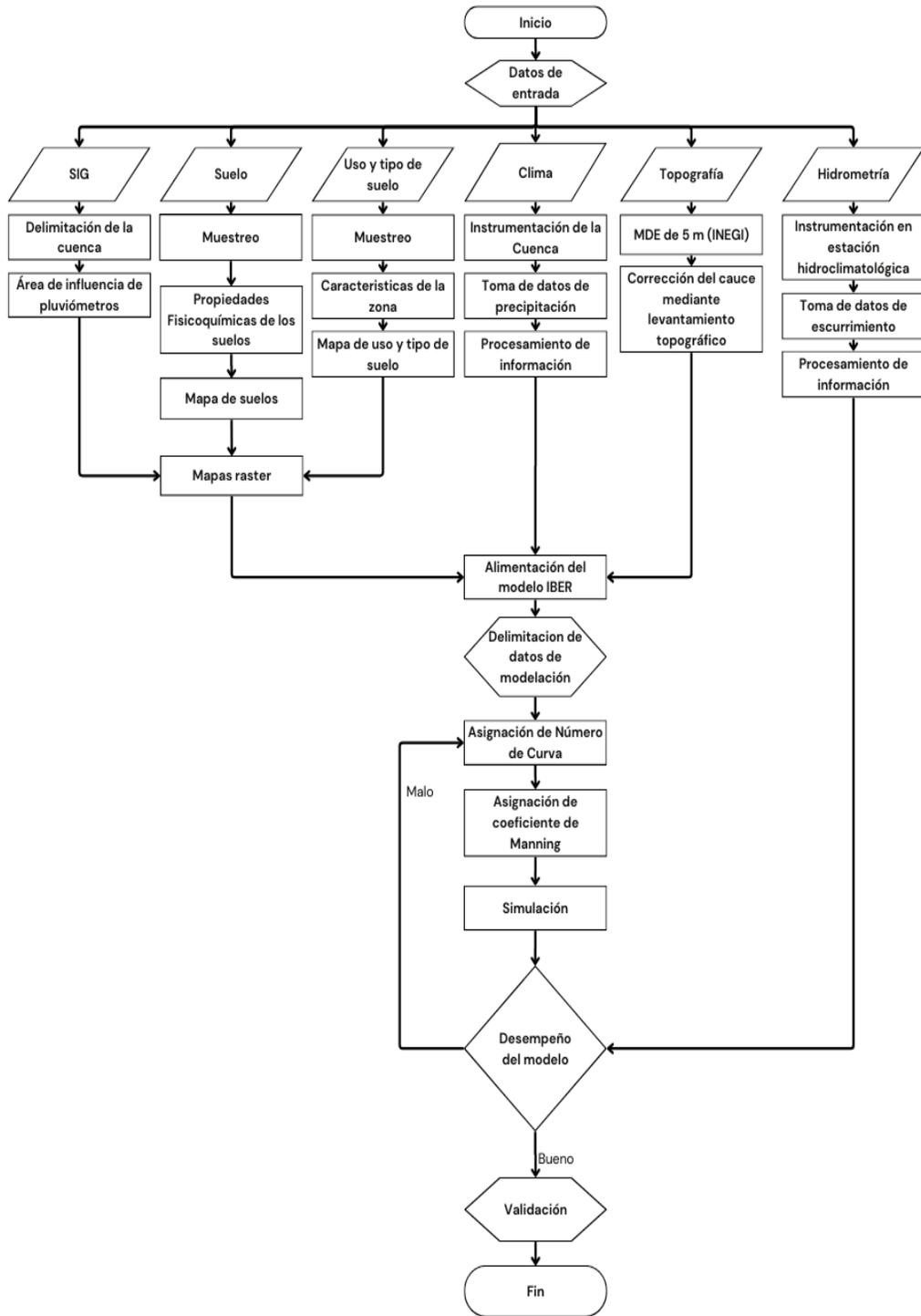


Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de modelación hidrológica e hidráulica.

### **3.4.3. Modelo Matemático**

La modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca Rio Chapingo se realizó con el programa computacional de simulación bidimensional de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial, denominado Iber versión 3.1. Este programa resuelve las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant, también conocidas como ecuaciones de aguas poco profundas, compuestas por la ecuación de conservación de la masa (Ecuación 1) y por la ecuación de conservación de momento en dos direcciones (Ecuaciones 2 y 3). El modelo matemático de Iber incorpora los efectos de entrada de agua por precipitación y pérdidas por infiltración en la Ecuación (1) (Bladé, Cea, Corestein, et al., 2014). En los trabajos de Cea & Bladé (2015) y Sanz-Ramos et al. (2018), se pueden ver con mayor detalle validaciones del modelo de lluvia-escorrentía con el modelo Iber para distintas condiciones de flujo y condiciones espaciales.

Para la solución numérica de las ecuaciones antes mencionadas se realizó una caracterización detallada de la topografía, de los usos y tipos de suelo, de las características geométricas y físicas del canal principal, de las características físicas de la superficie del suelo, de la precipitación en el espacio-tiempo y de las condiciones iniciales y de frontera (contorno).

### **3.4.4. Altimetría y discretización espacial de la cuenca**

La altimetría se obtuvo de un modelo digital de elevación con una resolución de 5 metros obtenido en 2016 y proporcionado por INEGI (2016) . Se hizo una corrección topográfica y geométrica del cauce principal, desde la parte media de la cuenca hasta su salida, por medio de un levantamiento topográfico realizado con un dron modelo Matrice 300, con RTK sensor lidar modelo Zenmuse L1 con una precisión vertical de 5 cm, ambos dispositivos de la marca DJI ®. Para garantizar precisión en el levantamiento, se utilizó una estación base con un GPS RTK Hi-Target V90 Plus ®.

El espacio se discretizó en 1,116,287 elementos triangulares, con tamaños que varían entre 5 metros para la parte alta del cauce principal, 2 metros para la parte media y baja del cauce principal y 10 metros para el resto del área de la cuenca (Figura 3). Los tamaños de los elementos se definieron buscando un equilibrio entre la precisión de los resultados y costo del cálculo computacional.

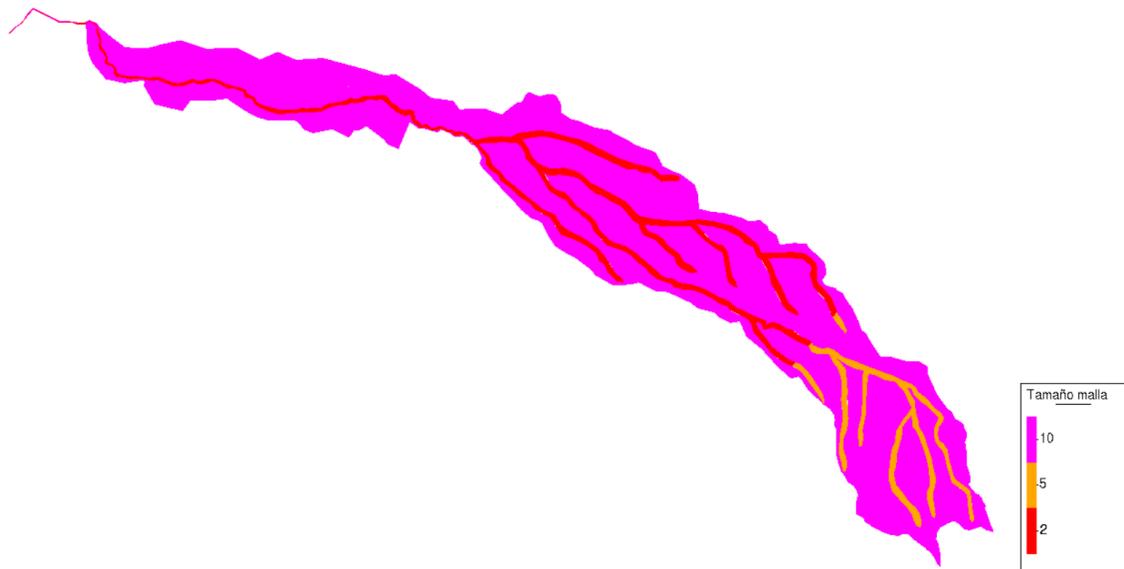


Figura 3 Tamaños definidos de los elementos triangulares en la cuenca.

#### **3.4.5. Escorrentía superficial medida**

Para la calibración y validación del modelo Iber se usaron hidrogramas de escorrentía superficial obtenidos con una estación de aforo a la salida de la cuenca. El aforo se realizó en la estación hidrológico-climática de la CONAGUA, la cual está ubicada en la parte baja de la cuenca y tiene coordenadas  $19^{\circ} 29' 09''$  N y  $98^{\circ} 53' 07''$  W. El caudal se obtuvo mediante una función caudal-tirante previamente calibrada por Rios (2014). Para obtener la evolución temporal del caudal, los tirantes se obtuvieron de forma automatizada con un equipo integrado por una placa de desarrollo ESP32 y un sensor transductor de presión, previamente calibrado en el laboratorio de hidráulica del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo con una precisión aproximada de 5 mm. Este equipo fue creado e instalado por los autores de esta tesis para cubrir los objetivos de la investigación; con él se midieron los tirantes y su

información se subía a la plataforma IOT (Internet de las cosas por sus siglas en inglés) ThinkSpeak de Matlab, con la finalidad de registrar y monitorear la información a cada minuto en el periodo del 20 de agosto al 17 de octubre del del año 2022, así como monitorear continuamente el funcionamiento del equipo.

### 3.4.6. Precipitación

Los datos de precipitación se obtuvieron de cuatro pluviómetros que se instalaron de manera distribuida dentro de la cuenca Rio Chapingo, uno en la parte alta de la cuenca, dos en la parte media y un cuarto ubicado en la parte baja. El periodo de registro de información de precipitación se realizó del 20 de agosto al 17 de octubre del del año 2022 con un intervalo de tiempo de registro a cada minuto, tomando para este estudio los eventos de del 21 de agosto, 25 de agosto, 30 de agosto, 13 de septiembre y 18 de septiembre.

La información registrada en la parte baja de la cuenca se tomó con un pluviómetro de bajo voltaje y una placa de desarrollo marca Arduino, dicho dispositivo mandaba la información a la nube para poderla monitorear de manera remota. En la parte alta de la cuenca (Canoas) se instaló una estación marca Davis ® y en la parte media (Tequexquináhuac y San Dieguito) dos estaciones marca Hobo ® (Cuadro 3).

Cuadro 3 Características de los dispositivos de medición de precipitación instalados en la cuenca.

Tipo de estación	Modelo	Precisión (%)	Resolución (mm)	Lugar en la cuenca	Nombre del sitio	Coordenadas del sitio
DAVIS®	S-RGF-M002	±4.0	0.20	Alta	Canoas	19° 25' 04" N, 98° 45' 07" W
HOBO®	RG3-M	±1.0	0.20	Media	Tequexquináhuac	19° 29' 09" N, 98° 53' 07" W
HOBO®	RG3-M	±1.0	0.20	Media	San Dieguito	19° 28' 28" N, 98° 49' 28" W
Arduino	MS-WH-SP-RG	±5.0	0.25	Baja	Chapingo	19° 29' 22" N, 98° 52' 58" W

### 3.4.7. Área de influencia de los pluviómetros

El área de influencia de la lluvia registrada por cada uno de los pluviómetros dentro de la cuenca Río Chapingo se generó por medio de polígonos de Thiessen, debido a que este método es uno de los más usados en el análisis de la precipitación como variable hidrológica (Aparicio, 1992; Aragón Hernández et al., 2019). Dicho método se realizó con ayuda del programa ArcMap 10.8. En la Figura 4 se muestran cuatro polígonos, cada uno corresponde al área de influencia de cada uno de los cuatro pluviómetros instalados y en el Cuadro (4) se reportan sus áreas respectivas.

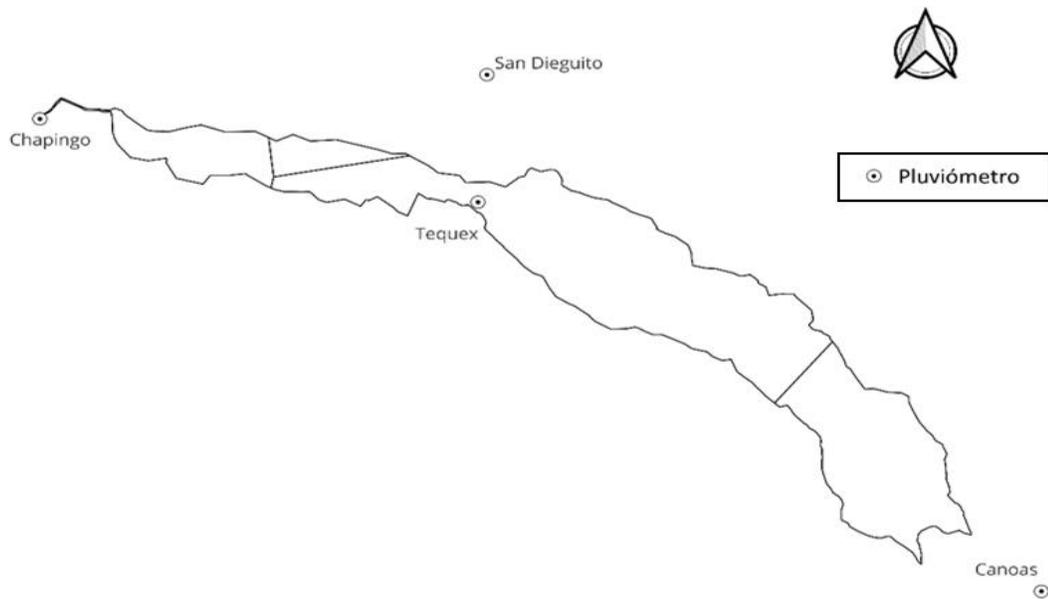


Figura 4 Distribución de pluviómetros instalados dentro de la cuenca Río Chapingo.

Cuadro 4 Área de influencia de los pluviómetros instalados.

Pluviómetro	Área (ha)
Canoas	890.24
Tequexquináhuac	69.75
San Dieguito	433.25
Chapingo	153.89

### 3.4.8. Caracterización del coeficiente de rugosidad y Número de curva

Para el presente trabajo las pérdidas por infiltración se estimaron con el método de Número de curva del extinto Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, en el cual interviene un parámetro adimensional llamado Número de Curva cuyos valores varían entre 0 y 100 (McCuen, 2004).

La asignación del coeficiente de rugosidad y el Número de Curva se hizo en función del uso y tipo de suelo y vegetación de la cuenca, información obtenida de datos vectoriales como se muestra en la Figura 5. Dicha información se obtuvo por medio de análisis de suelos en puntos distribuidos dentro de la cuenca obtenidos por Montiel Gonzaga et al. (2019) y Piza (2017). Posteriormente se procesó la información con el programa ArcMap 10.8, asignando los valores del coeficiente de rugosidad de Manning y Número de curva sugeridos por Chow (1994) y McCuen (2004), respectivamente.

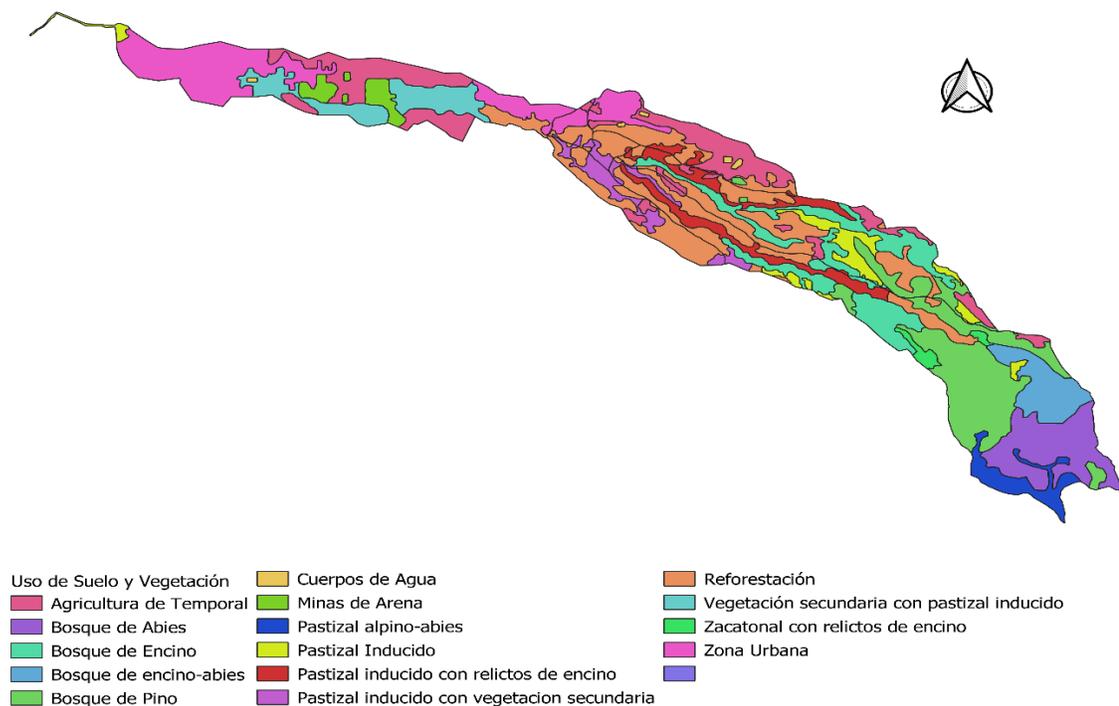


Figura 5 Caracterización de usos del suelo y vegetación de la cuenca Río Chapingo para la asignación del coeficiente de rugosidad de Manning y del Número de Curva.

Finalmente, los valores del coeficiente de rugosidad y Número de Curva se asignaron de forma automática en el modelo Iber mediante ficheros en formato ráster, logrando una asignación espacial de los parámetros de manera rápida y precisa.

#### **3.4.9. Condiciones iniciales y de frontera del modelo**

En salida de la cuenca, aguas abajo de la estación de aforo se consideró una condición de frontera de flujo supercrítico, debido a que en ese sitio hay un cambio de pendiente del fondo del cauce, pasando de una pendiente subcrítica a super crítica. Las condiciones de frontera aguas arriba fueron los hidrogramas generados en cada elemento del mallado, producto de la escorrentía superficial, generada por las condiciones de la precipitación e infiltración.

Se realizaron visitas de campo en diversos puntos del cauce principal de la cuenca Rio Chapingo en donde se identificaron que la zona baja de Tequexquináhuac y la zona de Chapingo, el cauce contenía flujo base por lo que se consideró un caudal de  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  como condición inicial en la parte baja del cauce y un caudal base nulo en la parte media y alta del cauce. Sin embargo, se asignó un valor de  $0.0001 \text{ m}$  como límite de seco-mojado para garantizar una simulación adecuada y eficiente en el cual el tirante no es nulo pero muy cercano a cero.

Iber utiliza por defecto un esquema numérico de primer orden; sin embargo, para este trabajo se implementó el esquema numérico de Discretización Hidrológica Desacoplada de una cuenca (DHD basin, por sus siglas en ingles), esto con el objetivo de obtener mejores resultados en la simulación hidrológica-hidráulica, con un Número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) igual a 0.45 y un paso de tiempo predeterminado de 1 segundo Esta configuración permitió realizar las simulaciones de los eventos de lluvia con una duración de 3 a 6 horas, en un tiempo computacional aproximado de 1.5 a 2 horas por evento.

#### **3.4.10. Calibración del modelo**

La calibración del modelo Iber se hizo con los hidrogramas medidos en la estación de aforo a la salida de la cuenca, correspondientes a la escorrentía generada por los eventos de precipitación del 21 y 25 de agosto de 2022, cuyas intensidades de precipitación fueron diferentes e identificadas en este estudio como intensidad media y alta, respectivamente.

La calibración consistió en ajustar los valores de los números de curva y coeficientes de rugosidad de Mannig, que minimizaran los errores entre los hidrogramas observados y simulados, tomando en consideración los valores máximos y mínimos reportados por Chow (1994) y McCuen (2004), respectivamente.

#### **3.4.11. Validación**

La validación consistió en validar la representatividad de los valores de Número de Curva y coeficiente de rugosidad, obtenidos en la calibración del modelo del día 21 de agosto de 2022, en eventos de lluvia-escorrentía distintos a los empleados en la calibración. Los eventos de precipitación utilizados para la validación correspondieron al 30 de agosto, 13 de septiembre y 18 de septiembre de 2022, los cuales tuvieron una intensidad de precipitación media, pero diferentes cantidades de precipitación total; identificadas en este estudio como media-baja (menor a 10 mm), media (entre 10 – 20 mm) y alta (mayor a 20 mm).

La ausencia de eventos con una precipitación de intensidad alta impidió la validación del evento del día 25 de agosto de 2022. Sin embargo, con la finalidad de verificar si los valores calibrados de Número de Curva y coeficiente de rugosidad, correspondientes a un evento de precipitación de intensidad media son representativos de un evento de precipitación de intensidad alta, se emplearon los parámetros calibrados del evento del 21 de agosto para validar la escorrentía superficial del evento del 25 de agosto.

### **3.4.12. Evaluación del desempeño del modelo**

La evaluación de desempeño de la simulación hidrológica-hidráulica de Iber, se realizó con medidas de asociación y dispersión del error entre los hidrogramas observados y los hidrogramas simulados a la salida de la cuenca. Se obtuvieron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) e índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE); estos parámetros están expresados por las Ecuaciones (14), (15) y (16), respectivamente. Se utilizó el criterio de Molnar (2011) para calificar el desempeño de la modelación, con base al valor del coeficiente NSE (Cuadro 1).

## **3.5. Resultados y discusión**

### **3.5.1. Calibración**

En la presente investigación se realizó la calibración de los parámetros de Número de Curva y coeficiente de rugosidad de Manning en el modelo Iber del 21 y 25 de agosto de 2022. El evento de precipitación del día 21 de agosto presentó una precipitación total igual a 12.44 mm, con una intensidad de 5.72 mm/h y, por otro lado, el día 25 de agosto se presentó una precipitación total de 32.25 mm, con una intensidad de 25.57 mm/h. Para la calibración del día 21 de agosto se obtuvo una variabilidad espacial dentro de la cuenca de 77 a 100 del valor de Número de curva como se puede observar en la Figura (6), mientras que para el evento del día 25 de agosto se obtuvo una variabilidad espacial dentro de la cuenca del orden de 70 a 100 del valor de Número de Curva como se muestra en la figura (7).

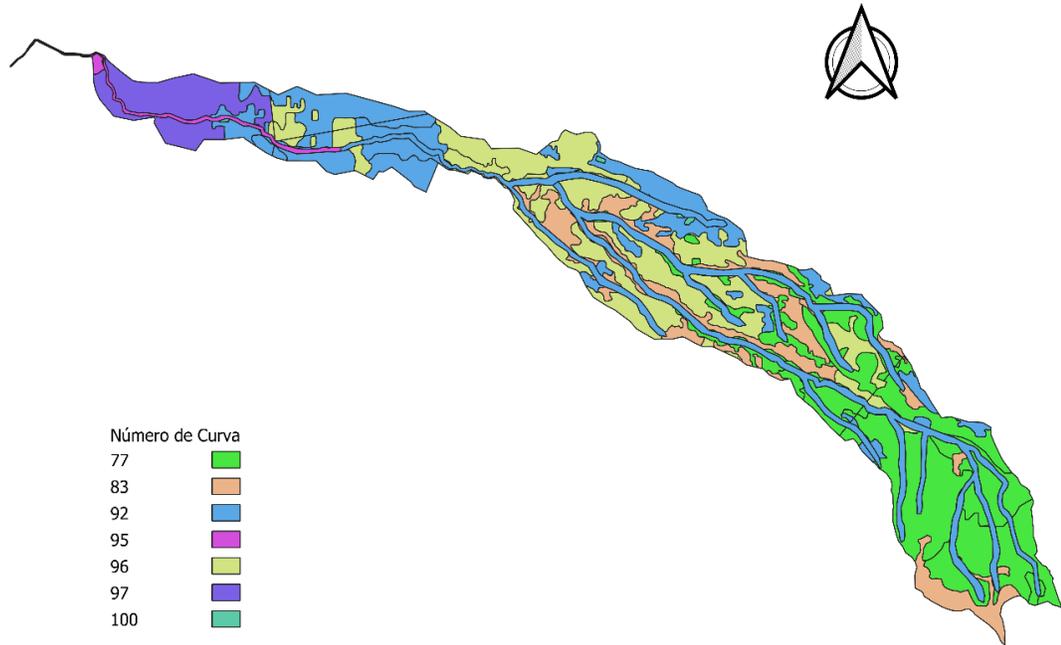


Figura 6 Valores calibrados de Número de Curva del día 21 de agosto de 2022.

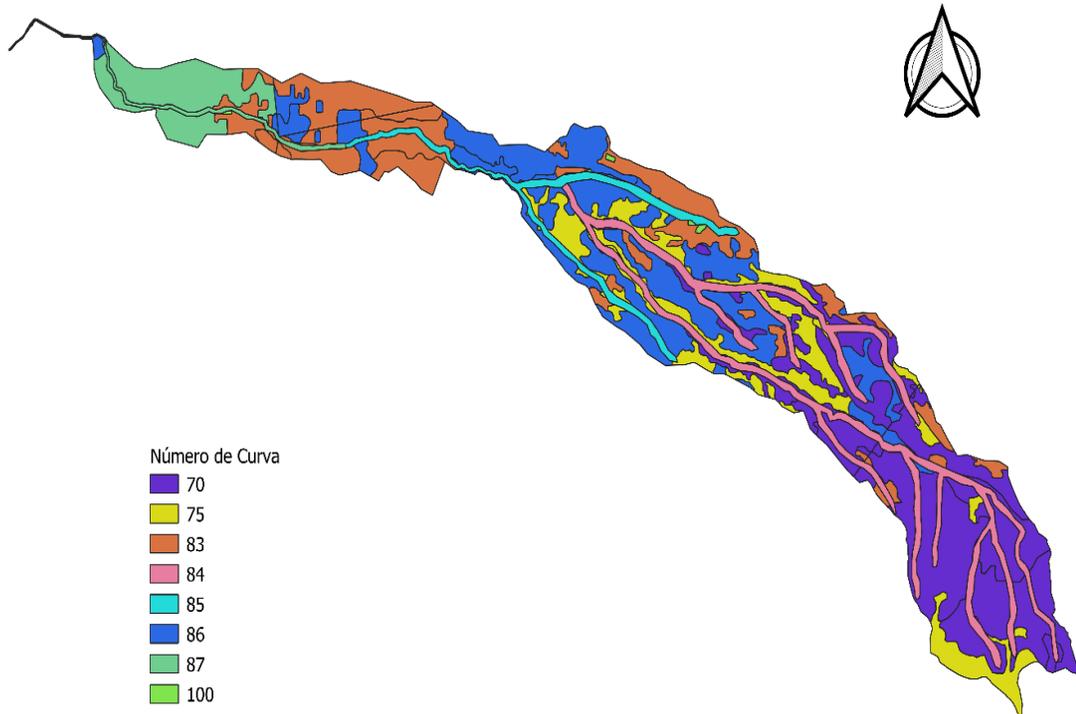


Figura 7 Valores calibrados de Número de Curva del día 25 de agosto de 2022.

En el Cuadro (5) se muestran los valores calibrados de coeficiente de rugosidad (n) de los eventos del 21 y 25 de agosto del 2022, se puede observar que se tiene una variación mínima de los valores de ambos eventos, los cuales oscilan entre 0.018 - 0.180 para el evento del 21 de agosto y 0.018 – 0.184 para el evento del 25 de agosto, quedando ambos casos dentro de los límites reportados para los distintos usos de suelo.

Cuadro 5 Valores calibrados del coeficiente de rugosidad (n).

Uso de suelo y vegetación	Coeficiente de rugosidad (n)	
	21 de agosto	25 de agosto
Agricultura de Temporal	0.045	0.046
Bosque	0.120	0.122
Cuerpos de Agua	0.025	0.026
Minas de arena	0.023	0.023
Pastizal Inducido	0.018	0.018
Reforestación	0.025	0.026
Vegetación y zacatonal	0.180	0.184
Zona urbana	0.100	0.102
Rio Bajo	0.038	0.038
Rio Medio	0.030	0.035
Rio Alto	0.040	0.039

En las Figuras (8) y (9) se aprecia una alta similitud entre los hidrogramas medidos y los hidrogramas calibrados en los eventos del 21 de agosto y 25 de agosto, respectivamente, siendo más acentuada en la segunda fecha. En efecto, los valores de RMSE, NSE y  $R^2$  así lo indican (Cuadro 6), pues el índice NSE y  $R^2$  tiende a la unidad y el RMSE a cero, con valores más próximos a la unidad el 25 de agosto. Según el criterio de Molnar (2011), el desempeño de la modelación fue “Muy bueno” en ambas fechas.

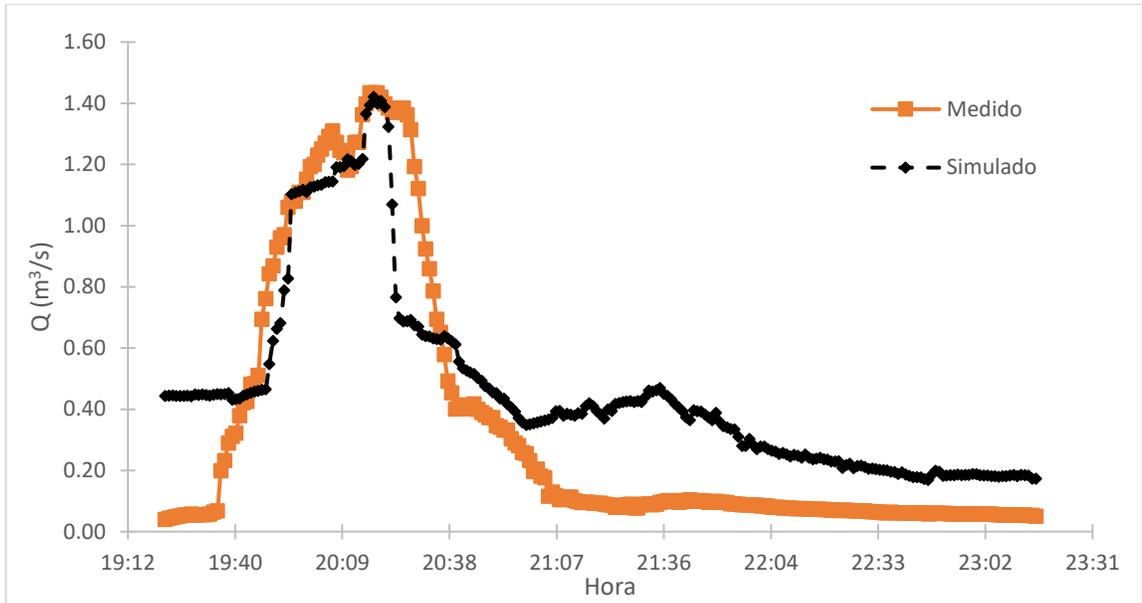


Figura 8 Hidrograma medido e hidrograma calibrado del día 21 de agosto de 2022.

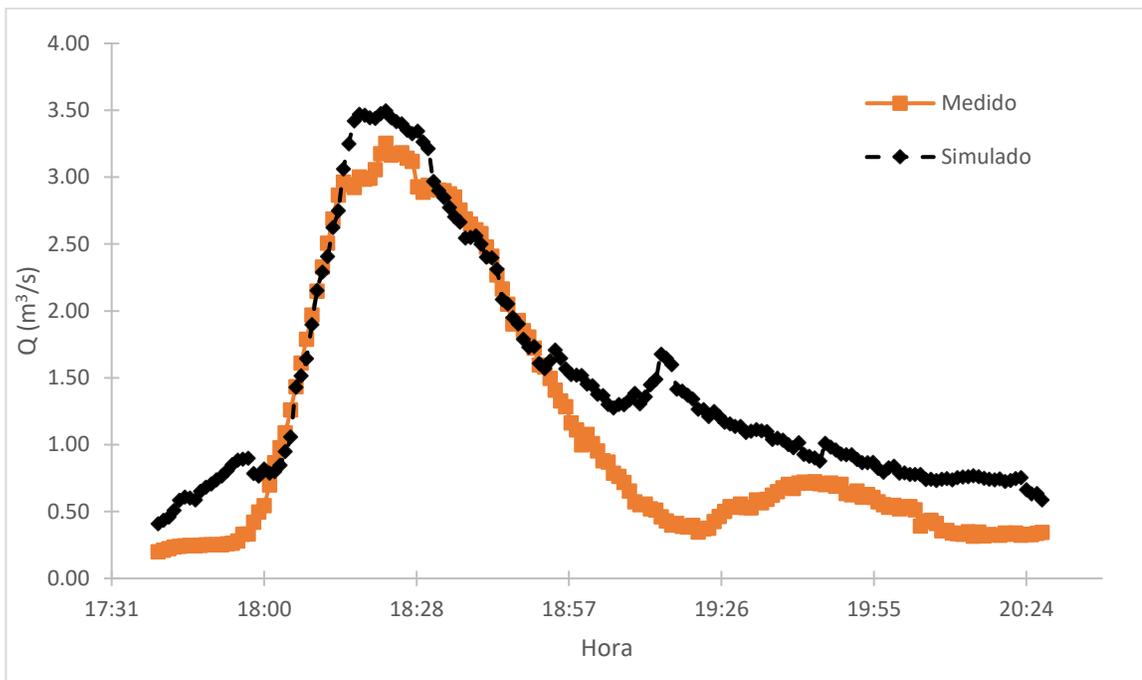


Figura 9 Hidrograma medido e hidrograma calibrado del día 25 de agosto de 2022.

Cuadro 6 Evaluación del desempeño estadístico de los modelos calibrados.

Parámetro estadístico	Valor de parámetro	
	21 de agosto	25 de agosto
RMSE	0.236	0.445
NSE	0.717	0.794
R <sup>2</sup>	0.713	0.792

### 3.5.2. Validación

En diversas investigaciones se han realizado calibraciones de los modelos existentes sin embargo en muchos casos por falta de información se recurre a la estimación de los datos (González et al., 2017; Gutiérrez García et al., 2022; Sánchez-Galindo et al., 2017; Tsegaw et al., 2019), además, en algunos otros casos únicamente llevan a cabo la calibración de los parámetros hidrológicos e hidráulicos, sin realizar la validación de los mismos, encareciendo de esta manera la veracidad de la modelación (Fernández-Pato et al., 2019; Salazar-Briones et al., 2018; Stehli et al., 2018). Dentro del presente trabajo se realizó la validación de los parámetros de calibración del evento del 21 de agosto de 2022, los eventos validados presentaron diferentes valores de precipitación total e intensidad de precipitación como se muestra en el Cuadro (7).

Cuadro 7 Precipitación total e intensidad de precipitación de eventos validados.

Evento	Precipitación total (mm)	Intensidad de precipitación (mm/h)
30 de agosto	7.82	3.24
13 de septiembre	15.93	6.77
18 de septiembre	37.16	10.23

En las Figuras (10), (11) y (12), se muestra la comparación de los hidrogramas simulados con los hidrogramas medidos, correspondientes a los días 30 de agosto, 13 de septiembre y 18 de septiembre del 2022, utilizando los parámetros de calibración del evento de precipitación del día 21 de agosto de 2022, mostrando gran similitud en ambos hidrogramas para los tres eventos.

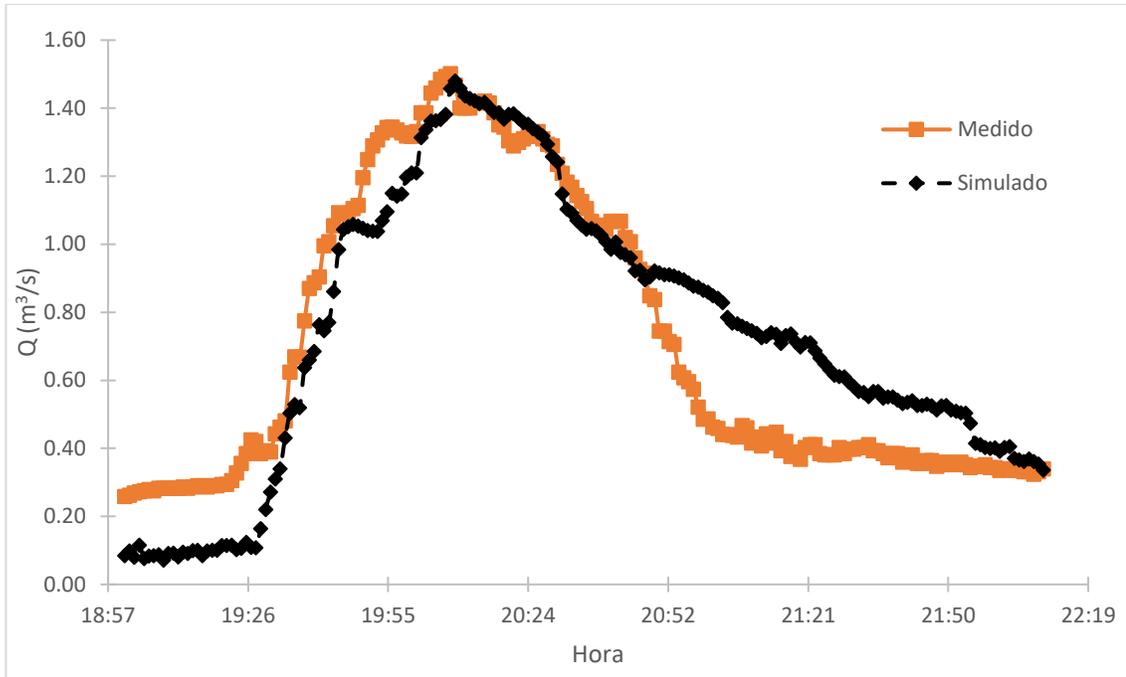


Figura 10 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 30 de agosto de 2022 con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022.

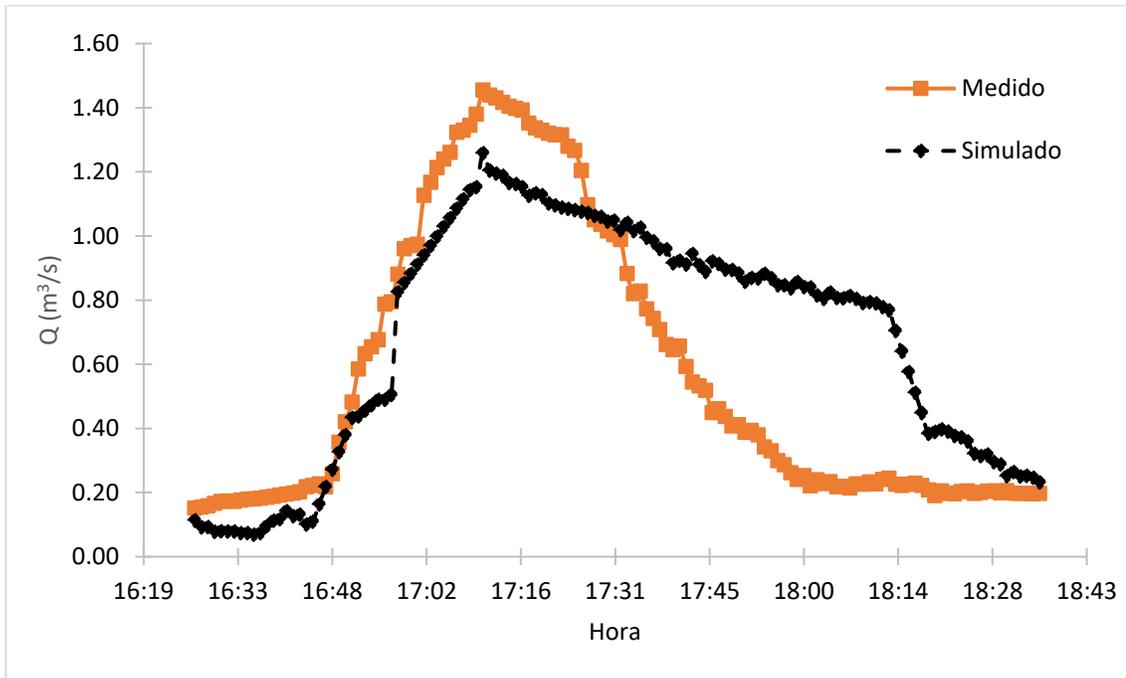


Figura 11 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 13 de septiembre de 2022 con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022.

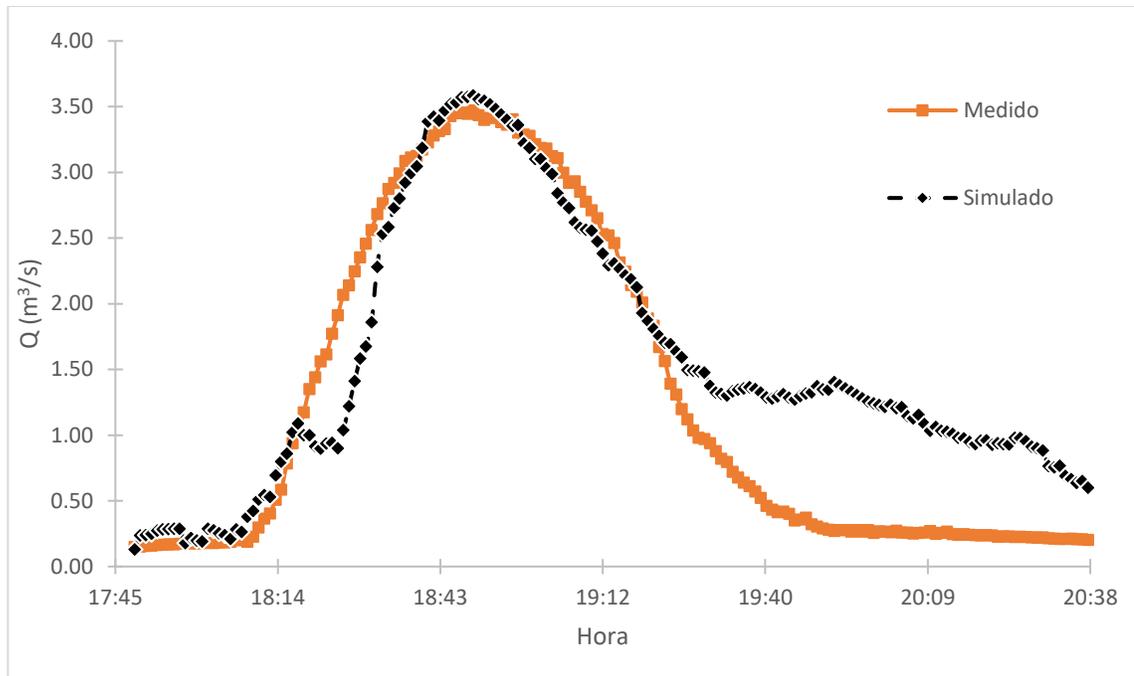


Figura 12 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 18 de septiembre de 2022 con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022.

Es importante destacar que los parámetros de calibración representativos de un evento de precipitación de ciertas características no lo son para otros tipos de eventos, ya que como mencionan Fernández-Soto & Peña-Cortés (2016) y Toledo-Cubillos & Galvis-Castaño (2022), estos pueden variar de distintas maneras como son la zona e intensidad de precipitación, la erosión del suelo en el tiempo, disponibilidad y calidad de la información, características de la cuenca, entre otros factores. En efecto, lo dicho anteriormente se aprecia en la Figura (13); pues, aunque los eventos de lluvia del 21 y 25 de agosto presentaron una precipitación total similar, la intensidad de la lluvia fue diferente.

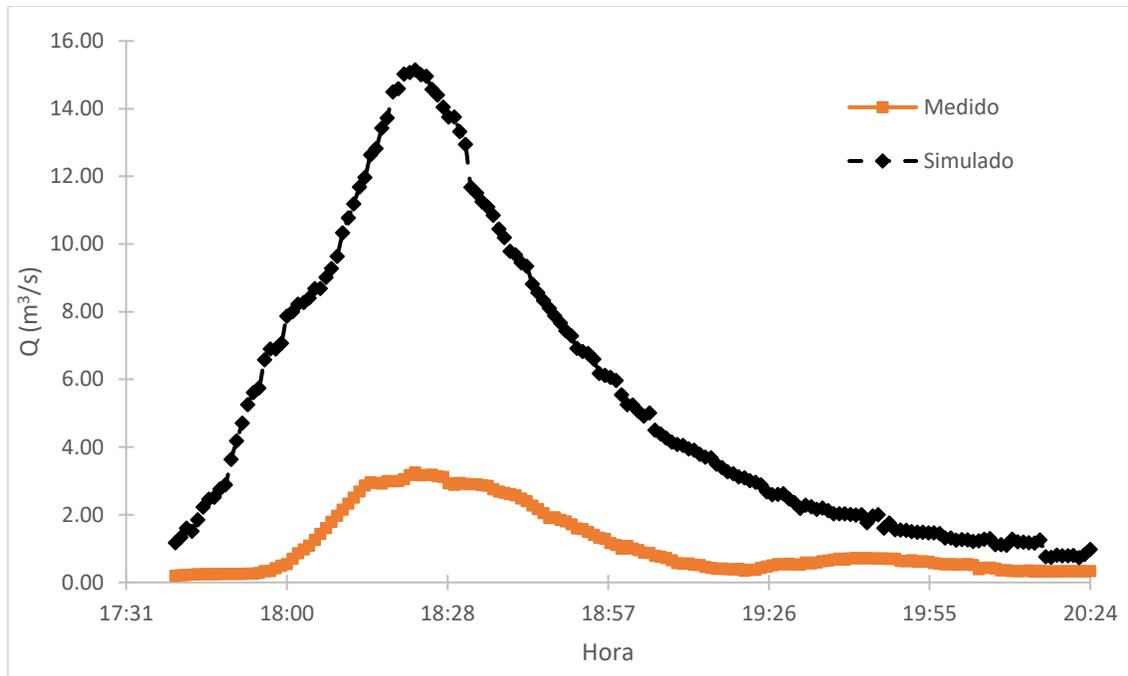


Figura 13 Hidrograma medido e hidrograma simulado del 25 de agosto con parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 de agosto de 2022.

En estudios similares como es el caso de Riccardi et al. (2013), se han encontrado un error aproximado del 20%, generado resultados aceptables en la reproducción de los niveles de agua. Para la presente investigación, el desempeño estadístico de los resultados obtenidos en el presente trabajo se muestran en el Cuadro (8), en el cual se puede observar que los hidrogramas simulados con intensidad de precipitación similar correspondientes de los días 30 de agosto, 13 de septiembre y 18 de septiembre obtenidos en la etapa de validación, resultaron con valores de NSE y  $R^2$  mayores a 0.5, obteniendo un ajuste “Excelente” y “Muy bueno” de acuerdo al criterio de Molnar (2011) en los eventos de intensidad de precipitación similar y con precipitación total media-baja y alta respectivamente. Por otro lado, valores de NSE y  $R^2$  obtenidos de hidrograma del día 25 de agosto, con el uso de los parámetros de número de curva y coeficiente de fricción calibrados del día 21 de agosto, con respecto al hidrograma medido resultaron negativos, por lo que el hidrograma simulado no tiene representatividad con el medido.

Cuadro 8 Evaluación del desempeño estadístico de los modelos validados con los parámetros de calibración del evento de lluvia del 21 agosto de 2022.

Parámetro estadístico	Eventos			
	30 de agosto	13 de septiembre	18 de septiembre	25 de agosto
RMSE	0.187	0.303	0.564	5.465
NSE	0.804	0.530	0.785	-30.090
R2	0.804	0.526	0.787	-22.917

### 3.6. Conclusiones

De acuerdo con el análisis del desempeño estadístico se demostró que el modelo Iber representa adecuadamente la respuesta hidrológica e hidráulica de la cuenca Rio Chapingo mediante un modelo completamente distribuido y con un tiempo computacional razonable utilizando tarjetas gráficas para disminuir el tiempo de procesamiento.

Se obtuvieron un conjunto de parámetros calibrados óptimos de Número de Curva y coeficiente de rugosidad con una intensidad de precipitación menor a 11 mm/h y una precipitación total entre 7 y 37 mm, obteniendo con un desempeño de índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe por encima de 0.5 entre la escorrentía simulada y la medida, permitiendo una buena caracterización de la cuenca Rio Chapingo. Por otra parte, para un evento con intensidad de precipitación mayor a 11 mm/h, se obtuvieron valores negativos de NSE y R2, demostrando que los parámetros calibrados de Número de Curva y coeficiente de rugosidad no son los únicos óptimos para todos los eventos de precipitación que se puedan presentar dentro de la cuenca Rio Chapingo.

Los resultados obtenidos dependieron principalmente de dos factores. El primero fue la forma en que se generó y procesó la información de precipitación y escorrentía; el segundo tuvo que, con la calidad de la información de altimetría, demostrando la importancia de la instrumentación y análisis de características físicas dentro de una cuenca para la obtención de los parámetros hidrológicos e hidráulicos distribuidos dentro de la misma.

### 3.7. Literatura citada

- Aparicio, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. LIMUSA.
- Aragón Hernández, J. L., Aguilar Martínez, G. A., Velázquez Ríos, U., Jiménez Magaña, M. R., & Maya Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1–15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Cea, L., & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill.
- Fernández-Pato, J., Sánchez, A., & García-Navarro, P. (2019). Simulación de avenidas mediante un modelo hidráulico/hidrológico distribuido en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro). *Ribagua*, 6(1), 49–62. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1622473>
- Fernández-Soto, E., & Peña-Cortés, F. (2016). Aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido en dos cuencas costeras de la Región de La Araucanía (Chile). *Estudios Geográficos*, 77(280), Article 280. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201602>
- García Feal, O., Gonzalez-Cao, J., Cea, L., Formella, A., & Domínguez, J. (2017). Iber as a tool to analyse flooding scenarios. 4841. <https://doi.org/10.3390/CHyCle-2017-04841>
- González, E. B. M., Alonso, S. E. A., & Ramírez, C. C. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica del manejo de las aguas pluviales urbanas en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios, Guadalajara, Jalisco. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 2, Article 2. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i2.22>
- Gutiérrez García, J. V., Rubiños Panta, J. E., Fernández Reynoso, D. S., Ramírez Ayala, C., Roblero Hidalgo, R., Gutiérrez García, F. G., & Romero Sánchez, M. E. (2022). Modelación hidráulica en Iber para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(71), 159–181. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1238>
- Hafnaoui, M. A., & Debabeche, M. (2021). Numerical modeling of the hydraulic jump location using 2D Iber software. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(3), 1939–1946. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00942-3>

- INEGI, I. N. de E. y G. (2016). Relieve continental. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>
- McCuen, R. H. (2004). Hydrologic Analysis and Design (3rd Edition). Pearson Education.
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.
- Montiel, G. R. (2019). Análisis de proceso lluvia-escorrentamiento en la cuenca río Chapingo. Universidad Autónoma Chapingo.
- Montiel Gonzaga, R., Prado Hernández, J. V., Vázquez Peña, M. A., Ibañez Castillo, L. A., & Pascual Ramírez, F. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 291–301. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>
- Piza, E. G. (2017). Evaluación del escurrimiento calculado con los métodos de Green-Ampt y curva numérica en la cuenca del río Chapingo. Universidad Autónoma Chapingo.
- Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., & Trivisonno, F. (2013). Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(1), 83–105.
- Rios, J. J. (2014). Calibración y validación de un sensor ultrasónico para el aforo de cauces naturales. Universidad Autónoma Chapingo.
- Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M. A., Lopez-Lambraño, A., Salcedo-Peredia, A., Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M. A., Lopez-Lambraño, A., & Salcedo-Peredia, A. (2018). Modelación hidrológica e hidráulica de un río intraurbano en una cuenca transfronteriza con el apoyo del análisis regional de frecuencias. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(4), 48–74. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-03>
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E., Ríos-Berber, J. D., Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 141–156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Niñerola, D., & Palau-Ibars, A. (2018). Evaluación numérico-experimental del comportamiento histórico del coeficiente de rugosidad de los macrófitos. *Ingeniería del agua*, 22(3), 109–124. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8880>

- SEMARNAT. (2018). ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales. Gobierno de México. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/337522/2018\\_02\\_07\\_VE\\_Semarnat\\_\\_E.T.\\_P\\_NUCO.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/337522/2018_02_07_VE_Semarnat__E.T._P_NUCO.pdf)
- Stehli, P., Weber, J., & Vestena, L. (2018). Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en sector urbano.
- Toledo-Cubillos, E. A., & Galvis-Castaño, A. (2022). Metodología para calibración/validación de modelos determinísticos en cuencas hidrográficas. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-04-03>
- Torres-Bejarano, F., Ramirez-Leon, H., Denzer, R., Frysinger, S., Hell, T., & Schlobinski, S. (2013). Linking Numerical Water Quality Models in an Environmental Information System for Integrated Environmental Assessments. *Journal of Environmental Protection*, 04, 126–137. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.47A015>
- Tsegaw, A. T., Alfredsen, K., Skaugen, T., & Muthanna, T. M. (2019). Predicting hourly flows at ungauged small rural catchments using a parsimonious hydrological model. *Journal of Hydrology*, 573, 855–871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.090>