

Caracterización hidrológica y modelamiento de extremos de precipitación en la subcuenca del Río Sedeño, Veracruz, mediante la normal climatológica (1990-2020)

Hydrological characterization and extreme precipitation modeling in the Sedeño River sub-basin, Veracruz, using the climatological normal (1990–2020)

Isaac Rivera Ballesteros ^a | Katia Fernández González ^b
Ingrid Coral Cruz Martínez ^c | Sarhay Vazquez Melendez ^d
Stheysing Virginia Reyes Muñoz ^e | Víctor Soto ^{f*}
Mariana Patricia Jácome Paz ^g

Recibido: 24 de enero de 2025.

Aceptado: 19 de octubre de 2025.

^a Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: isaacballesteros03@gmail.com | ORCID: 0009-0006-7296-9138

^b Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: zs24019469@estudiantes.uv.mx | ORCID: 0009-0004-2619-3143

^c Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: ingriddmzt@hotmail.com | ORCID: 0009-0004-9499-1147

^d Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: gassarca1971@gmail.com | ORCID: 0009-0004-2975-0494

^e Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: virginiageo5260@gmail.com | ORCID: 0009-0000-9038-4463

^f Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: visoto@uv.mx | ORCID: 0000-0003-1633-0752 *Autor para correspondencia.

^g Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. Contacto: jacomepaz@igeofisica.unam.mx | ORCID: 0000-0003-1194-6793

Cómo citar:

Rivera-Ballesteros, I., Fernández-González, K., Cruz-Martínez, I. C., Vázquez-Meléndez, S., Reyes-Muñoz, S., Soto, V. y Jácome Paz, M. (2025). Caracterización hidrológica y modelamiento de extremos de precipitación en la subcuenca del Río Sedeño, Veracruz, mediante la normal climatológica (1990-2020). *UVserva*, (20), 151-172. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi19.3084>

Resumen: La subcuenca Río Sedeño (RH28Bj) ubicada en la región centro de Veracruz, tiene gran importancia hidrológica, nace uno de los ríos más importantes para el estado: el Río Actopan. Sus particularidades orográficas se deben a la confluencia de las laderas del Cofre de Perote, las lavas basálticas jóvenes del Volcancillo y otros volcanes, originando importantes corrientes como la del Descabezadero; así como un acusado altitudinal que va desde los 300 hasta 3100 msnm, sin embargo, existe poca información de dicha subregión hidrográfica. En este trabajo se presenta una propuesta que contiene un análisis morfométrico aplicando Sistemas de Información Geográfica y un modelo hidrológico para eventos extremos de precipitación a partir de una normal climatológica (1991-2020), los datos obtenidos permiten visualizar el comportamiento y dinámica de dicha geoforma, asociado con cartografía temática. Como principales resultados, se obtiene que la subcuenca es madura y que se encuentra en equilibrio, es de quinto orden y cuenta con 1060.6 km lineales de longitud de cauces. La implementación del modelo HEC-HMS (Sistema de Modelización Hidrológica por sus siglas en inglés) mostró el comportamiento y grado de infiltración de ocho tormentas analizadas; las tormentas 1 y 5 fueron eventos extremos con mayor cantidad de precipitación acumulada. Finalmente, se resalta la importancia de integrar herramientas clásicas y análisis multidisciplinario con el objetivo de contribuir al entendimiento de la subcuenca, así como un primer acercamiento para entender el impacto de eventos extremos y desastres naturales, los cuales, ante las anomalías vigentes del clima, son potencialmente posibles.

Palabras clave: Caracterización morfométrica; cartografía digital; modelamiento hidrológico; eventos extremos del clima; problemas socioambientales.

Abstract: The Sedeño River sub-basin (RH28Bj), located in the central region of Veracruz, has significant hydrological importance, as it is the source of one of the state's most important rivers: the Actopan River. Its orographic features result from the confluence of the slopes of Cofre de Perote, the young basaltic lavas of "Volcancillo", and other volcanoes, giving rise to important watercourses such as the "Descabezadero". Additionally, it exhibits a pronounced altitudinal gradient ranging from 300 to 3,100 meters above sea level. However, there is limited information available about this hydrographic subregion. This study presents a proposal that includes a morphometric analysis using Geographic Information Systems and a hydrological model for extreme precipitation events based on a climatological normal (1991–2020). The data obtained allow the visualization of the behavior and dynamics of this landform, associated with thematic cartography. The main results indicate that the sub-basin is mature and in equilibrium status. It is classified as a fifth-order basin and has a total stream length of 1,060.6 km. The implementation of the HEC-HMS model (Hydrologic Modeling System) demonstrated the infiltration behavior and response of eight analyzed storms; the storms 1 and 5 being extreme events with the highest accumulated precipitation. Finally, this study highlights the importance of integrating classical tools and multidisciplinary analysis to enhance the understanding of the sub-basin. It also serves as an initial approach to assessing the impact of extreme events and natural disasters, which, given current climate anomalies, are increasingly probable.

Keywords: *Morphometric Characterization; Digital Cartography; Hydrological Modeling; Extreme Weather Events; Socio-Environmental Issues.*

Introducción

Los recursos hídricos son esenciales para la vida humana, el desarrollo económico, la producción de alimentos y la preservación de los ecosistemas. No obstante, el manejo inadecuado de estos recursos junto a la variabilidad climática puede llevar a la generación de fenómenos extremos como sequías, tormentas e inundaciones, todos eventos relacionados con el agua. Según un análisis exhaustivo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) estos fenómenos dominan la lista de catástrofes de los últimos 50 años, tanto en términos de pérdidas humanas como económicas (ONU-Hábitat, s.f.).

Aunado a eso, el aumento de las temperaturas del agua afecta negativamente su calidad favoreciendo la proliferación de contaminantes y organismos patógenos, mientras que las inundaciones junto con una mayor concentración de contaminantes durante las sequías incrementan significativamente el riesgo de contaminación del agua, tanto por sustancias tóxicas como por agentes infecciosos. (UNESCO, 2020).

En este contexto, la prevención y gestión adecuada de las fuentes hídricas en el estado de Veracruz, las cuales desempeñan un papel fundamental en su ecosistema y desarrollo socioeconómico son esenciales para garantizar la sostenibilidad, mejorar la calidad de vida de sus habitantes y mitigar los impactos propiciados.

Su hidrografía que pertenece a la vertiente oriental de México es sumamente relevante ya que desembocan numerosos ríos en el Golfo de México. Entre los más importantes se encuentran el Papaloapan, Coatzacoalcos y Pánuco, que, junto con otros cauces significativos como los ríos Cazones, Tecolutla, Nautla, Misantla, Actopan, La Antigua y Jamapa, conforman una red hidrográfica vital para el estado.

En conjunto, la vertiente del Golfo de México concentra aproximadamente el 65% del volumen total de agua en Veracruz, destacándose como una de las más relevantes del país (Instituto del Agua, s.f.).

Entender estos aspectos es esencial, especialmente en contextos donde los eventos extremos tienen impacto directo en la disponibilidad y calidad de agua. En esta línea, la subcuenca del Río Sedeño ubicada en la zona central de Veracruz enfrenta diversos problemas de sobreexplotación y contaminación debido a la deforestación y el desarrollo urbano.

Además, como consecuencia del rápido crecimiento urbano de Xalapa, durante los últimos 40 años ha agotado las fuentes tradicionales de agua y alterado el ciclo hidrológico, influyendo también el ambiente y el clima regional (Balderas *et al.*, 2021).

Del mismo modo, la subcuenca ha sufrido cambios en el uso del suelo y acumulación de desechos sólidos en localidades cercanas, lo cual ha degradado su biodiversidad y calidad ambiental (Moreno-Herrera, 2022).

Este panorama subraya la urgencia de implementar estrategias integrales de adaptación y mitigación que combinen sostenibilidad ambiental, gobernanza efectiva y

equidad social, para reducir los impactos climáticos. Considerando esto, un estudio integral de una subcuenca hidrográfica, como la del Río Sedeño, requiere un análisis que permita entender cómo responde el territorio ante los fenómenos naturales. Con la implementación de un modelo hidrológico se puede representar los procesos relacionados con la distribución de la precipitación y escorrentía (Jorquera *et al.*, 2012).

Estos modelos, al ser una representación simplificada de un sistema real complejo, ya sea bajo forma física o matemática, permiten prever el comportamiento del agua en la región y son fundamentales para tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos (Chica-Toro y Garzón-González, 2018).

El Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de América desarrolló Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), el cual es un software de libre acceso y disponibilidad cuyos resultados simulan los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas (Hydrologic Engineering Center [HEC], 2024).

El programa es un sistema de modelamiento generalizado capaz de representar regiones hidrográficas, subregiones y microcuencas (HYG Engineering, s.f.). La implementación del modelo HEC-HMS (puede añadir información sobre la dinámica de la subcuenca del Río Sedeño ante eventos extremos de precipitación. Debido a que, este software incluye un entorno de trabajo completamente integrado al cálculo de procedimientos tradicionales de análisis hidrológico como la infiltración de los eventos (HEC, 2024).

El estudio de la subcuenca del Río Sedeño utiliza este modelo para comprender la dinámica del flujo de agua en la región, permitiendo analizar la capacidad de respuesta ante eventos de lluvia extrema ocurridos en el periodo 1991-2020. Además de incentivar a la conservación y una mejor gestión del recurso hídrico, se espera que los resultados de este trabajo beneficien a la sociedad civil, a los gestores de recursos naturales y a la economía local, ayudando a tomar decisiones con buenas bases de información sobre el comportamiento hidrológico específico de esta subregión hidrográfica.

1. Metodología

1.1. Hidrología

El área de estudio está delimitada con ayuda de imágenes de satélite y modelos digitales de elevación (MDE) utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con datos vectoriales obtenidos de las plataformas de uso libre del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024) y del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas v4 (SIATL). Los MDE se generaron a través de la última versión topográfica a escala 1:50,000 disponible para el área de estudio, las imágenes de satélite se obtuvieron a través de *Google Earth Pro* en su versión para escritorio.

Usando los MDE se pudo delimitar la subcuenca y resaltar su visualización, también fue útil para realizar el análisis de la red de drenaje y obtener los parámetros de geometría, para este caso resultaron mapas temáticos de escala relativa a 1:30,000.

Los métodos clásicos usados (ver **Tabla 3**) para realizar una caracterización hidrológica fueron específicamente: St-clasificación de Strahler (Strahler, 1952), Or-orden (Horton, 1945), Si-sinuosidad (Miller, 1953), Long-longitud, A-área, P-perímetro y An-ancho (Schumm, 1956), Kc-coeficiente de compacidad utilizando la ecuación $Kc=0.282P\sqrt{A}$ (Gravelius, 1914), Rci-coeficiente de circularidad utilizando $Rci=4\pi(A/P^2)$ (Strahler, 1964; Miller, 1953), Re-coeficiente de elongación utilizando $Re=D/Lc$ (Schumm, 1956), y Curva hipsométrica (Keller y Pinter, 1996).

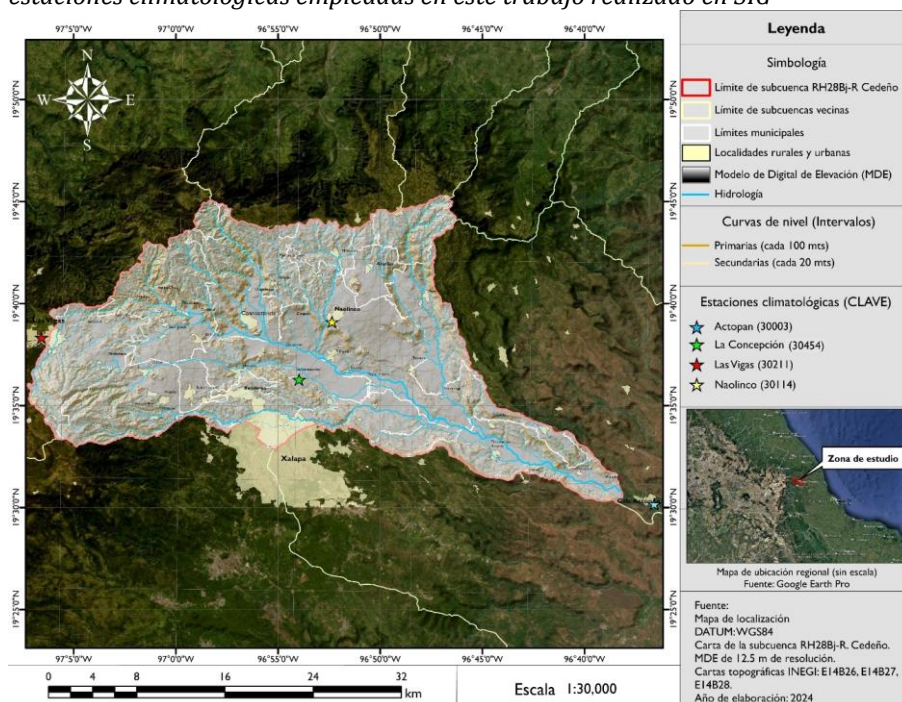
Además, se realizó cartografía temática (geolocalización, hidrología, edafología y uso de suelo y vegetación) como complemento de visualización e interpretación espacial.

1.2. Climatología

Se seleccionó y utilizó la versión 4.13 del software para la generación de los hietogramas que simulan los eventos extremos de precipitación. Dichos eventos se caracterizan por su intensidad y duración de minutos, horas o días, en función de la disponibilidad de información.

Figura 1

Mapa de localización de la subcuenca del Río Sedeño y distribución espacial de las estaciones climatológicas empleadas en este trabajo realizado en SIG



Fuente: Elaboración propia a partir de datos vectoriales de INEGI.

Para ello, se utilizó la información estadística climatológica disponible del sitio oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2024); en este portal se encuentran los registros pluviométricos y de temperatura de todas las estaciones climatológicas del país.

Los datos de precipitación son uno de los insumos con mayor impacto en el desempeño de cualquier modelo hidrológico (Martínez-Garzón, *et al.*, 2018), sin embargo, también representan una de las mayores fuentes de incertidumbre debido a la falta de información y errores de medición por las estaciones climatológicas.

Inicialmente, se seleccionaron estratégicamente las estaciones climatológicas auxiliares: Actopan (clave 30003), La Concepción (clave 30454), Las Vigas (clave 30211) y Naolinco (clave 30114), las estaciones están distribuidas en la parte alta, media y baja de la subcuenca (**Figura 1**).

Las mediciones de precipitación en superficie son un factor importante para conocer la forma, intensidad, duración, frecuencia, distribución espacial y temporal de una tormenta.

A continuación, se examinó la información disponible de las 4 estaciones auxiliares, dando como resultado que el periodo de datos pluviométricos distinto en cada punto de medición. Específicamente la estación La Concepción con clave 30454 contiene el menor registro de mediciones de precipitación (desde 1995); por el contrario, Las Vigas con clave 30211 mantuvo la mayor cantidad de información registrada (desde 1922).

Ante ello, a partir de la última normal climatológica 1991-2020, es decir a partir del valor promedio mensual de la temporada húmeda (mayo a octubre), se identificaron las tormentas presentadas en cada una de las estaciones. Mediante el análisis de sus registros diarios históricos se seleccionaron los días que la precipitación medida sobrepasó el valor normal mensual de la precipitación para cada estación. Aunque se encontraron lagunas de información dentro los registros, se identificaron 9 tormentas en total (**Tabla 1**).

En este estudio no se realizaron interpolaciones, si no que se utilizaron los datos puntuales de cada estación climatológica y el objetivo no fue representar los datos espaciotemporales.

Finalmente, se estableció la duración total (días) de cada evento. En promedio se tomaron los datos partiendo de 2 días antes de la medición máxima (inicio) y 2 días después de ello (fin); ya que con esta configuración es posible observar el desarrollo de la tormenta con los días anteriores y posteriores a cada uno de los eventos.

Tabla 1

Eventos seleccionados en cada estación auxiliar para la implementación del modelo HEC-HMS. Elaboración propia a partir de datos del portal de SMN

| Tormentas registradas en el periodo 1991-2020 | | | |
|--|-------------------------|------|-------------------------------|
| Naolinco (30114) | | | |
| Altitud: 1318 msnm Latitud: 19.65° Longitud: -96.87° | | | |
| Tormenta | Duración de la tormenta | Año | Precipitación máxima (mm/día) |
| 1 | 18-23 junio | 2013 | 285 |

| Actopan (30003) | | | |
|-----------------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| | Altitud: 250 msnm | Latitud: 19.50° | Longitud: -96.61° |
| 2 | 02-08 octubre | 2005 | 95.6 |
| 3 | 25-30 septiembre | 2007 | 142.9 |
| 4 | 15-19 septiembre | 2010 | 150.4 |
| 5 | 17-23 junio | 2013 | 296.5 |
| Las Vigas (30211) | | | |
| | Altitud: 2426 msnm | Latitud: 19.63° | Longitud: -97.10° |
| 6 | 18-23 agosto | 2007 | 193 |
| 7 | 07-12 octubre | 2007 | 180 |
| 8 | 05-10 octubre | 2019 | 126 |
| La Concepción (30454) | | | |
| | Altitud: 982 msnm | Latitud: 19.60° | Longitud: -96.88° |
| 9 | 06-14 octubre | 1997 | 147 |

Fuente: Elaboración propia.

1. 3. Modelo HEC-HMS

Se utilizaron los parámetros morfométricos para la esquematización final de HEC-HMS en la subcuenca del Río Sedeño. Fue necesario realizar cálculos y aproximaciones de la simulación de su red de drenaje, tal como la longitud del cauce principal, identificar los datos altitudinales más alto y bajo, así como el área de la subcuenca drenada.

Por otro lado, describir el proceso de infiltración (pérdidas por abstracción y saturación del suelo ante tormentas) resulta muy complejo debido a la variabilidad de las condiciones iniciales del suelo; el modelo HEC-HMS (Universidad de Salamanca, s.f.) permite calcular las abstracciones por diferentes métodos como el initial/constant, Curva Número del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), Curva Número Gridded SCS, Green and Ampt, Smith Parlange y Soil Moisture Accounting.

En este estudio se optó por utilizar el método SCS-CN, este método señala la altura de lluvia efectiva en función del volumen de precipitación total y de un parámetro de pérdidas denominado CN (López *et al.*, 2012).

El CN, conocido comúnmente como número de curva, varía en el rango de 0 a 100, donde CN =100 corresponde a una cuenca completamente impermeable en la que toda la precipitación sobre la misma se transforma en escorrentía. Cabe recalcar, que este parámetro depende de factores que influyen en la generación de escorrentía como: uso y manejo del terreno, condición superficial del suelo y condición de humedad antecedente (López *et al.*, 2012).

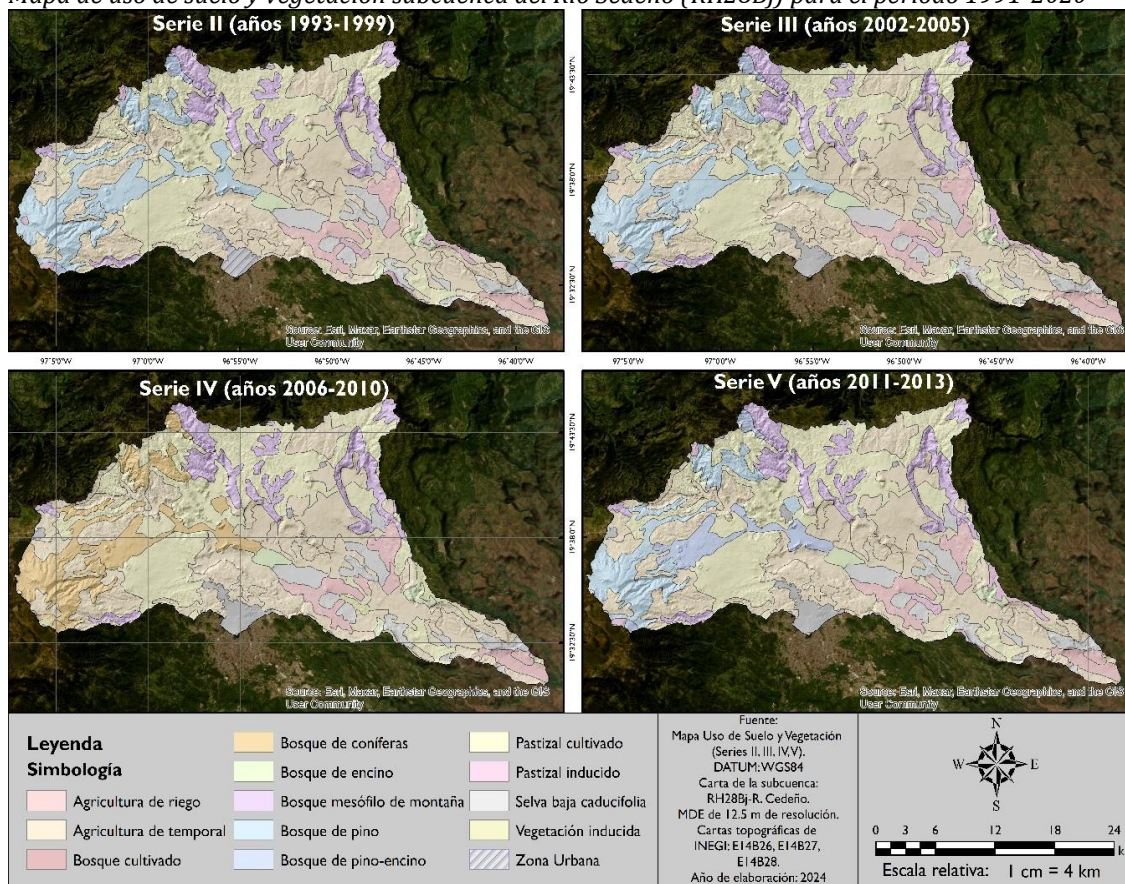
De esta manera, el uso del CN permite transformar información cualitativa (edafología y uso de suelo y vegetación) en datos cuantitativos relevantes en el ciclo hidrológico del área de interés. Este parámetro se clasificó y calculó por el método de Aparicio-Mijares (1992) a través del procesamiento geoespacial en SIG.

Por último, se identificaron las series de tiempo de la información geográfica de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024) correspondientes a las tormentas expuestas en la **Tabla 1**. Estas incluyeron la Serie II elaborada entre 1993-1999, Serie III del 2002-2005, Serie IV entre 2006-2010 y la Serie V entre 2011 y 2013 (**Figura 2**).

La Tormenta 8 que tuvo lugar del 5 al 10 de octubre del 2019 no fue incluida en las simulaciones del modelo, ya que, el último conjunto es la Serie VI, elaborada entre 2014 y 2016 pero esta no cuenta con información geográfica del área de estudio.

Figura 2

Mapa de uso de suelo y vegetación subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj) para el periodo 1991-2020



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI.

2. Resultados de la subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj)

2.1. Análisis de la red de drenaje de la subcuenca del Río Sedeño

Clasificación de Strahler (St)

Esta clasificación es un proceso principal para el análisis de una cuenca. Para este trabajo se realizó el análisis de Strahler (1952), teniendo una subcuenca de cinco órdenes (**Figura 4**).

Orden (Or)

Este método (Horton, 1945), permite hacer una clasificación e identificación de los números de afluentes presentes en una cuenca. A partir de estos datos, se calculó la longitud y el número de cauces (**Tabla 2**).

| Tabla 2 <i>Clasificación según Horton-Strahler para la subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj)</i> | | |
|--|---------------------|----------------------|
| Orden | Longitud (m) | No. de cauces |
| Primero | 585,545 | 466 |
| Segundo | 206,219 | 221 |
| Tercero | 129,672 | 120 |
| Cuarto | 98,707 | 90 |
| Quinto | 40,470 | 36 |
| Total | 1,060,613 | 933 |
| Fuente: Elaboración propia, a través de SIG. | | |

Se observa que la frecuencia máxima de cauces es de primer orden y representan el 49.94% del total de flujos del área de la cuenca, también el número de cauces disminuye a medida que el orden aumenta.

El número máximo de cauces de primer orden designa la intensidad de las características de permeabilidad en infiltración sumado a la morfología del área de estudio la cual es significativa para la configuración de orden de drenaje.

Longitud de cauces (Lc)

Hay un total de 1060.61 km de longitud de cauces de los cuales 585.54 km (49.94%) son de primer orden, 206.21 km (23.68%) son de segundo orden, 129.67 km (12.86%) corresponden al tercer orden, 98.7 km (9.64%) al cuarto orden y 40.46 km (3.85%) a los de quinto orden.

Índice de canal y de valle (Ic e Iv)

Las longitudes del canal y del valle se utilizan para calcular el índice de ambos, para la subcuenca son 76.32 y 62.28 respectivamente.

Sinuosidad (Si)

Es la relación entre la longitud del canal y la distancia valle abajo. En general, la medida varía de 1 a 4 o más. Si la sinuosidad de cualquier río es 1.5, se le identifica como sinuoso, y por encima de 1.5 se le conoce como serpenteante (Miller, 1953). El valor de sinuosidad es de 1.22 para la subcuenca del Río Sedeño, lo cual representa que es sinuoso.

Curva Hipsométrica

De acuerdo con Keller y Pinter (1996), es un parámetro de relieve que permite identificar la edad relativa que podría tener una cuenca, de acuerdo con su variación permite definir características fisiográficas como:

- Cuenca joven: gran potencial erosivo.
- Cuenca madura: en estado de equilibrio.
- Cuenca vieja: sedimentarias.

De acuerdo con la forma de la curva (Keller y Pinter, 1996), la subcuenca se clasifica como cuenca madura, es decir, la subcuenca del Río Sedeño se encuentra en un estado de equilibrio, en la siguiente **Figura (3)** se muestra la forma de la curva para la subcuenca del Río Sedeño:

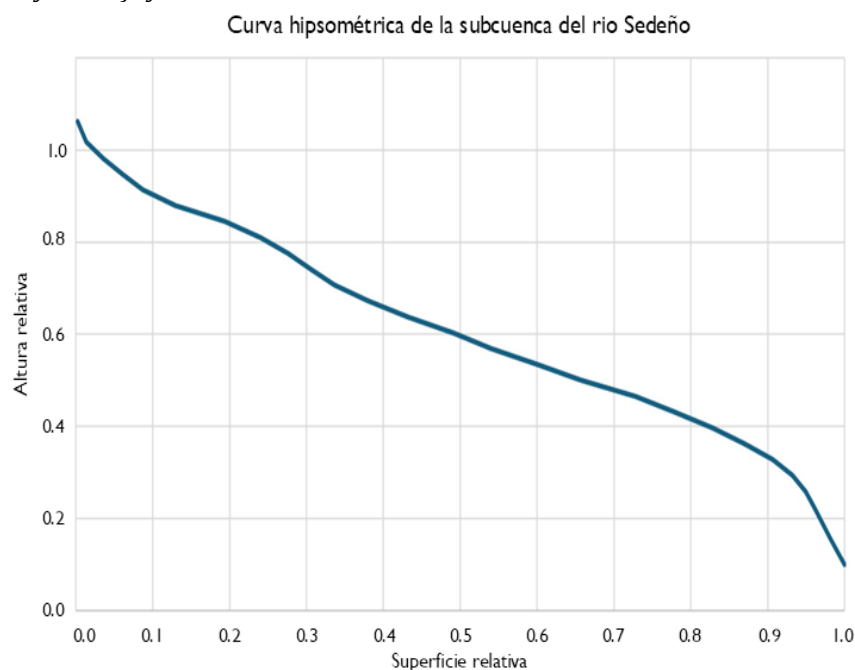
2.2. Geometría de la subcuenca

Longitud (Long)

La longitud de una cuenca está dada por la medida más larga paralela a la línea de drenaje (Schumm, 1956), esta medición se realizó con ayuda de SIG, siguiendo la tendencia del cauce principal en línea recta (ver **Figura 3**). Para esta subcuenca corresponde un valor de 50.68 km.

Figura 3

Curva hipsométrica de la subcuenca del Río Sedeño, en el eje x se muestra la superficie relativa y en el eje y el área relativa



Fuente: Elaboración propia obtenida en SIG.

Área, perímetro y ancho (A, P, An)

Considerando el método propuesto en Schumm (1956) la subcuenca del Río Sedeño tiene los valores 701.12 km², 163.81 km y 28.96 km, para área (A), perímetro (P) y ancho (An) respectivamente. La subcuenca por su área es considerada de intermedia a grande.

Tipo de cuenca

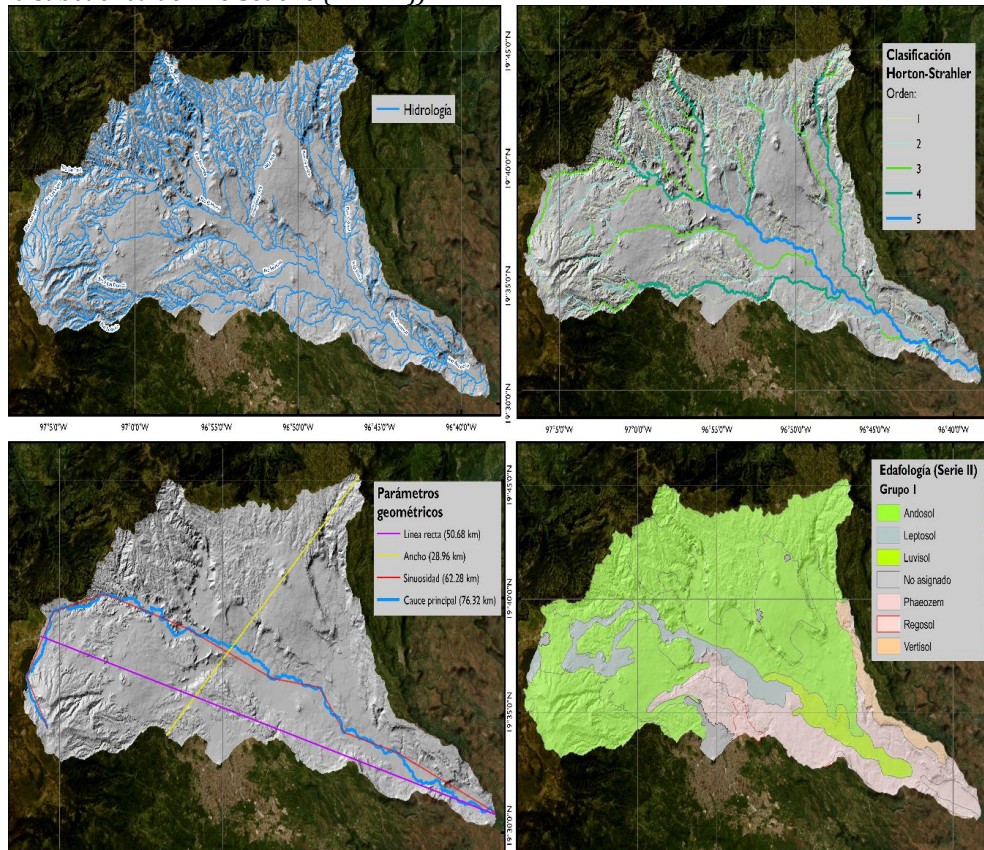
Esta subcuenca se define como una cuenca exorreica ya que sus aguas dan inicio al Río Actopan metros arriba de la localidad del Zetal y sus aguas son vertidas al Golfo de México en la Barra de Chachalacas.

Coefficiente de Compacidad (Kc)

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del área circular (Gravelius, 1914). El valor para esta subcuenca es de 1.738 y con respecto a este valor geométricamente tiende a un cuadrado (cerca de un rectángulo).

Figura 4

Mapa hidrológico, clasificación Horton-Strahler, parámetros geométricos y edafología de la subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj)



Elaboración propia, datos en SIG.

Coeficiente de Circularidad (R_{ci})

Se define como la relación entre el área de la cuenca (A) y el área de un círculo que tiene el mismo perímetro (P) que la cuenca (Strahler 1964; Miller 1953). Esta subcuenca tiene un valor de 0.33051 y tiende a ser alargada.

Coeficiente de Elongación (R_e)

Se demarca como la relación entre el diámetro de un círculo de la misma área que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca (Schumm, 1956). La subcuenca del Río Sedeño tiene un valor de 0.64964 y se define como una cuenca con relieve pronunciado

La **Tabla 3** resume los valores anteriormente calculados.

Tabla 3

Resumen del análisis hidrológico de la subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj)

| Abrev. | Parámetro | Valor | Ecuación | Referencia |
|----------|-----------------------------|---|--|--------------------------------|
| St | Clasificación Strahler | 5to orden | --- | Strahler (1952) |
| Or | Orden | 5to | --- | Horton (1945) |
| Lc | Longitud de Cauces | 1060.612 km (total) | --- | Obtenido en SIG |
| Ic e Iv | Índice de canal y de valle | Ic: 76.32 Iv: 62.28 | --- | Obtenido en SIG |
| Si | Sinuosidad | 1.22 (sinuoso) | --- | Miller (1953) |
| Long | Longitud | 50.68 km | --- | Schumm (1956) |
| A, P, An | Área, perímetro y ancho | A: 701.12 km ² P: 163.81 km An: 28.96 km | --- | Schumm (1956) |
| Kc | Coeficiente de Compacidad | 1.738 | $Kc = 0.282P\sqrt{A}$ | Gravelius (1914) |
| Rci | Coeficiente de Circularidad | 0.33051 | $Rci = 4\pi\left(\frac{A}{P^2}\right)$ | Strahler (1964); Miller (1953) |
| Re | Coeficiente de Elongación | 0.64964 | $Re = \left(\frac{D}{Lc}\right)$ | Schumm, 1956 |

Elaboración propia

2.3. Aplicación del modelo HEC-HMS

Para determinar el número de curva (CN) obtuvimos los siguientes datos (**Tabla 4**), de izquierda a derecha se puede observar el número de las tormentas (TS), el año en el que se registró, la ubicación de la estación de registro, la clave asignada para dicha estación meteorológica, la zona altitudinal de la subcuenca, el tipo de suelo asociado, la serie y

tipo de uso de suelo y vegetación y el número de curva resultante con los datos previamente mencionados. El CN es el parámetro principal de entrada para el modelo HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS simuló exitosamente el grado de saturación y la capacidad de infiltración según el tipo de suelo presente en el área de estudio. A continuación, se presentan los hietogramas obtenidos de las tormentas (**Figura 5**) junto con los valores observados y modelados, exceptuando la tormenta 8.

El color rojo indica la precipitación infiltrada durante el día analizado. Por otra parte, el color azul nos representa la precipitación observada. Las simulaciones obtenidas se consideran solamente una aproximación de los valores reales para la subcuenca (**Tabla 4**).

Tabla 4

Datos de entrada para la obtención del número de curva (NC). Los datos se obtuvieron con la recopilación de la información previamente mostrada

| TS | Año de registro | Estación de registro | Clave | Zona de la subcuenca | Edafología | Uso de suelo y vegetación | | CN |
|----|-----------------|----------------------|-------|----------------------|------------|---------------------------|-------------------------|----|
| | | | | | | Serie | Tipo | |
| 1 | 2013 | Naolinco | 30114 | Media | Andosol | V | Agricultura de temporal | 72 |
| 2 | 2005 | Actopan | 30003 | Baja | Phaeozem | III | Zona urbana | 74 |
| 3 | 2007 | Actopan | 30003 | Baja | Phaeozem | IV | Zona urbana | 74 |
| 4 | 2010 | Actopan | 30003 | Baja | Phaeozem | IV | Zona urbana | 74 |
| 5 | 2013 | Actopan | 30003 | Baja | Phaeozem | V | Zona urbana | 74 |
| 6 | 2007 | Las Vigas | 30211 | Alta | Andosol | IV | Zona urbana | 74 |
| 7 | 2007 | Las Vigas | 30211 | Alta | Andosol | IV | Zona urbana | 74 |
| 9 | 1997 | Concepción | 30454 | Media | Phaeozem | II | Agricultura de temporal | 72 |

Elaboración propia.

Con la **Figura 5** se destaca que, todas las tormentas pertenecen a la temporada de lluvias en Veracruz, que se extiende de junio a noviembre.

De manera general, el comportamiento y condiciones iniciales demostraron el grado de infiltración (hietogramas rojos) desde los primeros días hasta el descenso de la lluvia. En el caso de estos eventos extremos, la precipitación (hietogramas azules) continua e intensa provocó que el suelo se sature más rápido, en otras palabras, el área que sobresale entre el hietograma azul con respecto al rojo demuestra la capacidad de infiltración. Esta condición fue más evidente en las tormentas 1, 3, 5 y 7, donde los primeros días existió una absorción importante del suelo, pero un escurrimiento durante el resto del evento.

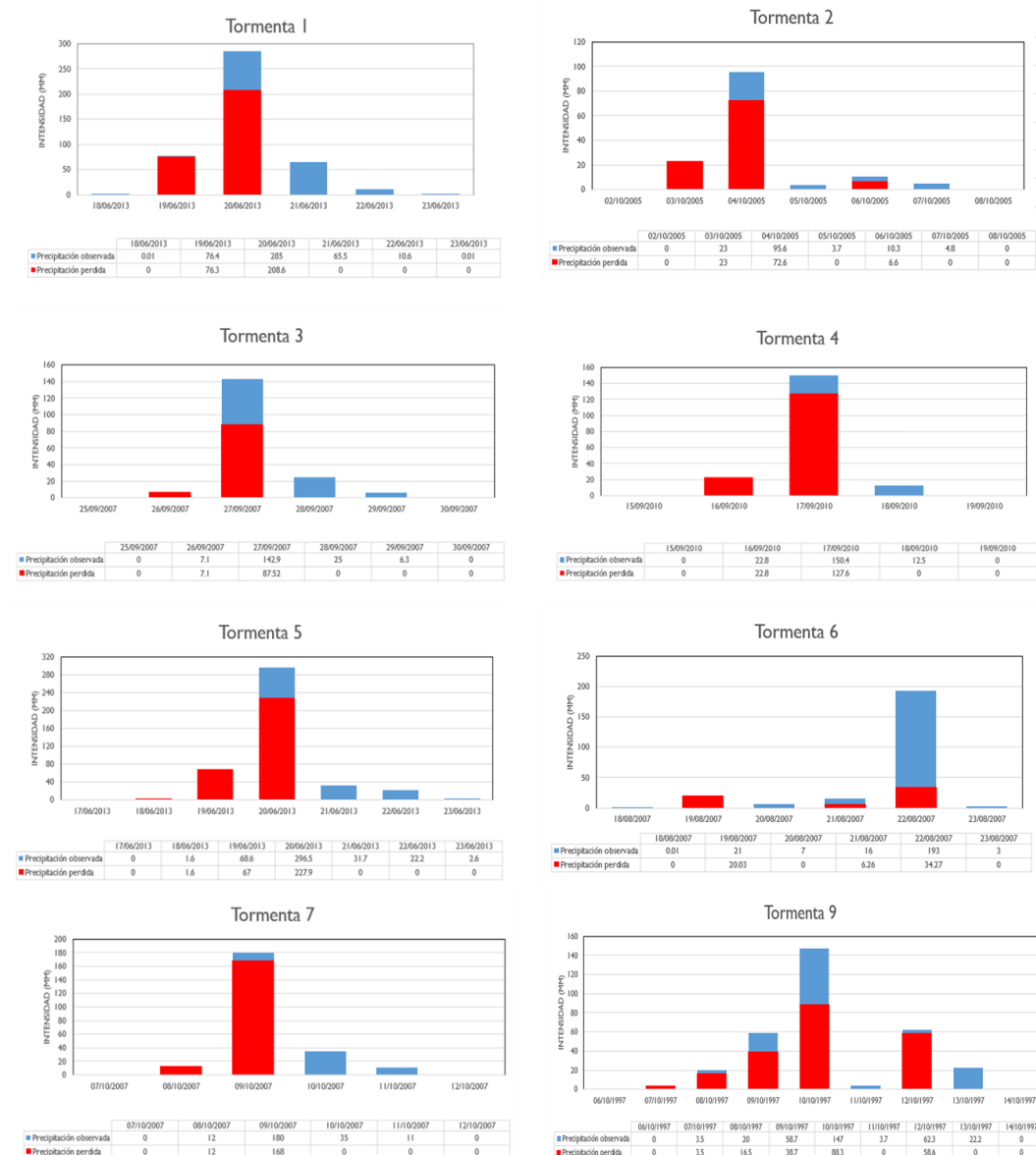
De la tormenta 2 es importante señalar que, al ser uno de los eventos con mayor continuidad, se muestra que la mayoría de la precipitación observada fue infiltrada, posterior a los primeros días del evento, aunque corresponde a una zona urbana.

El comportamiento de las tormentas 3 y 4 fue muy similar debido a que, al inicio de la tormenta, según el modelo, se puede observar la ausencia de precipitación, posteriormente el grado alto de infiltración en el segundo y tercer día. Sin embargo, los

días siguientes el suelo permaneció saturado provocando escorrentía de una cantidad considerable de agua.

Figura 5

Hietogramas para los eventos extremos de precipitación de los años (1991-2020) de la subcuenca del Río Sedeño



Nota: El color rojo en cada gráfico indica la precipitación infiltrada durante el día en cuestión, el color azul indica la precipitación observada durante el día en cuestión. Fuente: Elaboración propia, obtenidos con el modelo HEC-HMS.

En la tormenta 9 se muestra una saturación eficaz del suelo, considerando un periodo continuo de 7 días de precipitación.

Por otra parte, es importante destacar que durante las condiciones iniciales de las tormentas 1 y 6 se muestran una notable saturación del suelo antes del inicio del

evento, lo que se adjudica a la presencia previa de un posible evento hidrometeorológico.

Cada una de las tormentas está ampliamente relacionada con la formación de sistemas convectivos de meso-escala. En la **Tabla 5** se muestran los fenómenos hidrometeorológicos que coincidieron temporalmente con los eventos extremos evaluados.

Tabla 5
Fenómenos hidrometeorológicos asociados a las 8 tormentas analizadas

| Tormenta | Fenómeno hidrometeorológico asociado |
|----------|--------------------------------------|
| 1 y 5 | Huracán Barry |
| 2 | Huracán Stan |
| 3 | Tormenta tropical Lorenzo |
| 4 | Huracán Karl |
| 6 | Tormenta tropical Kiko |
| 7 | Tormenta tropical Narda |
| 9 | Huracán Pauline |

Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA (2005, 2007, 2013).

Cabe destacar que, los ciclones tropicales Barry y Karl impactaron directamente en la zona de la subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj) debido a la trayectoria que tuvieron. Las tormentas 1 y 5, provocadas por el ciclón tropical Barry, fueron los eventos con la mayor cantidad de precipitación acumulada.

Este fenómeno meteorológico se desarrolló como depresión tropical el 16 de junio de 2013 a las 00Z, al sur del mar caribe con una velocidad de 20 KT y una presión de 1009.0 milibares (mb). Según The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) mantuvo una dirección hacia el noroeste y atravesó la península de Yucatán, sin embargo, con su cercanía a la tierra, el sistema no pudo intensificarse antes de cruzar el sur de la península. Para el día 19 a las 12Z, el sistema se intensificó en una tormenta tropical alcanzando vientos máximos de 40KT y una presión de 1003.0 mb.

Según reportes de la prensa, las torrenciales lluvias provocadas por Barry provocaron que los ríos Actopan y Bobos se desbordaran provocando que las cabeceras municipales de Úrsulo Galván y San Rafael se inundaran. Además, Martínez de la Torre, Tlapacoyan, Jalapa, Nautla, Rafael Lucio, Banderilla y Coatepec, tuvieron anegamientos por el desbordamiento de los ríos Cazones, Tecolutla, Nautla y La Antigua.

La tormenta 4 es asociada a Karl, uno de los huracanes más destructivos registrados en el estado de Veracruz. Según CONAGUA (2010), este huracán se originó en el noroeste del Mar Caribe el 14 de septiembre, atravesó la Península de Yucatán y se intensificó rápidamente en la Bahía de Campeche.

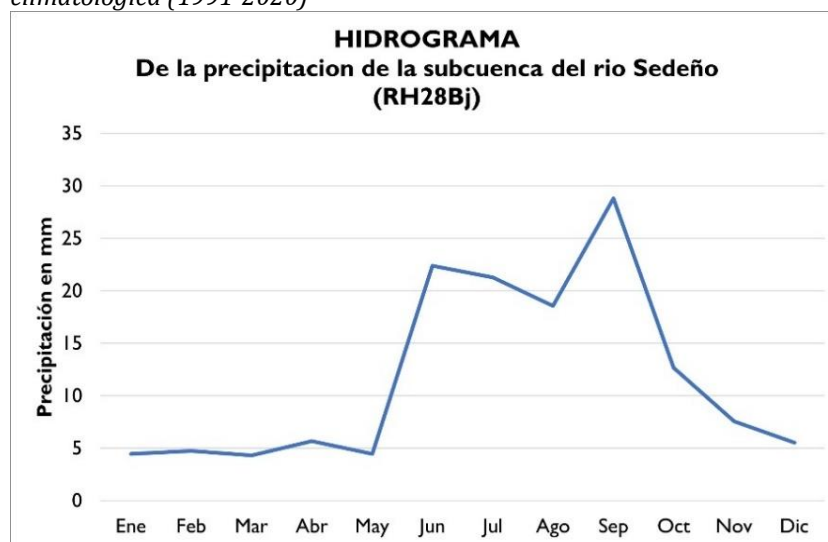
Aunque los demás sistemas convectivos no afectaron directamente el área de la subcuenca del Río Sedeño (RH28Bj) es notable que tuvieron una influencia en las precipitaciones acumuladas de cada tormenta.

3. Discusión

Se evaluó el hidrograma (**Figura 6**) para esta subcuenca, donde se observa que la temporada de precipitaciones inicia en el mes de mayo, extendiéndose hasta el mes de octubre, lo cual coincide con las tormentas evaluadas en esta trabajo, sin embargo, algunos trabajos han reportado inundaciones importantes en la zona baja de la subcuenca para el mes de febrero (Rivera-Ballesteros, 2024) que pudieran estar relacionados a la saturación de agua en los suelos y/o acuífero presente en la zona debido a su alto grado de infiltración (Pérez-Quezadas *et al.*, 2016)

Figura 6

Gráfico del hidrograma de la subcuenca del Río Sedeño. Se obtuvo a partir del promedio mensual las precipitaciones evaluadas en la normal climatológica (1991-2020)



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del modelo HEC-HMS evidencian que la capacidad de infiltración de los suelos en la subcuenca varía significativamente dependiendo de las condiciones geológicas y del suelo presentes en el área de estudio. Tormentas como la número 1 y 6 mostraron una saturación previa del suelo, subrayando la influencia de eventos hidrometeorológicos consecutivos. Estas observaciones confirman que las condiciones de saturación inicial son un factor crítico para predecir el comportamiento hidrológico durante eventos extremos.

Una limitación importante fue la exclusión de la tormenta 8 debido a la falta de datos de uso de suelo y vegetación de la serie VI, ya que para esta área no existe dicha información. Esto resalta la importancia de tener datos históricos disponibles que ayudarían a generar un conocimiento espaciotemporal. En donde, se puedan utilizar estos datos en futuros estudios con el objetivo de mejorar las bases climáticas y así conocer la respuesta hidrológica ante los cambios en la ausencia o presencia de eventos extremos de precipitación en la subcuenca del río Sedeño.

Aunque, no se mostró un cambio significativo del CN, se puede observar una mayor capacidad de infiltración ante el modelamiento las tormentas 1 y 9 con agricultura de temporal presente. Por otro lado, los demás eventos presentaron abstracciones menores que, en teoría, generaría una escorrentía superficial mayor durante estos eventos extremos de precipitación que provocaría un incremento en el nivel del caudal. Este tipo de resultados refuerza la idea de instalar los instrumentos necesarios para monitorear la respuesta del espesor del flujo de agua, por lo menos, ante periodos constantes de lluvia.

Del análisis comparativo entre las tormentas estudiadas destaca la diversidad de impactos que los sistemas meteorológicos pueden tener en Veracruz, principalmente en la subcuenca del Río Sedeño. Por ejemplo, la intensidad de Karl muestra la importancia de sistemas de alerta temprana y medidas de mitigación para eventos extremos.

En contraste, Barry subraya la necesidad de monitorear también tormentas de menor categoría, que pueden tener impactos considerables en cuencas locales y comunidades. Los eventos asociados al resto de las tormentas también destacan cómo una combinación de factores meteorológicos puede producir efectos acumulativos significativos.

De esta manera, es necesario completar este estudio utilizando métodos que se centran en HEC-HMS como initial/constant, Green and Ampt, Smith Parlange y Soil Moisture Accounting; la función del primero de estos métodos es estimar una infiltración inicial fija, seguida por una tasa constante de infiltración, el segundo se basa en la humedad en el suelo, conductividad hidráulica y es utilizado en eventos cortos de lluvia con suelos bien caracterizados, el tercero se ajusta a mejorar la precisión del proceso de infiltración y el último es utilizado para estudios detallados de cuencas con comportamiento hidrológico variable.

Estos métodos mejorarían la interpretación dinámica de esta subcuenca ante la presencia de lluvias intensas que pueden provocar otros riesgos ambientales (López *et al.*, 2012; Ramírez-González, 2013).

La asociación de estos eventos con las tormentas estudiadas proporciona un marco para futuras investigaciones, destacando la importancia de analizar no solo los efectos inmediatos, sino también los cambios a largo plazo en los sistemas fluviales y el paisaje afectados por estos ciclones. Todo lo anterior debido a que existe una necesidad persistente de predecir el efecto directo o indirecto que ocasionan los fenómenos meteorológicos en diversos sectores, especialmente en el socioeconómico (Ramírez González, 2013).

Instituciones nacionales como el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Dirección General para la Gestión de Riesgos (DGGR), la Dirección General de Protección Civil (DGPC) y la Subdirección de Estudios Económicos y Sociales, realizan evaluaciones sobre las pérdidas socioeconómicas (de los sectores público, privado y social) por inundación en México. Lo anterior obedece a que los daños y las pérdidas, es decir, las afectaciones en la producción de bienes y servicios son valorados para incrementar las medidas de mitigación ante los factores detonantes (CENAPRED *et al.*, 2018).

En este trabajo se realizó una aproximación para comprender la estrecha relación entre fenómenos hidrometeorológicos y la respuesta de una cuenca, mediante

los hietogramas contruidos con los datos de precipitación observados y simulados, a diferencia de otros estudios, como los realizados por López *et al.* (2012), Ulloa-Gutiérrez (2013), Timbe-Castro *et al.* (2019) y Girón (2022) donde se obtuvieron hidrogramas realizados de las tormentas analizadas dentro de cierto periodo de años con los datos hidrométricos. Independientemente de lo anterior, en todos los trabajos destaca la capacidad de alimentación del modelo HEC-HMS con datos hidrológicos específicos, con la intención de conocer el proceso lluvia-escorrentía de manera puntual y directa.

La ausencia de estaciones hidrométricas dentro de la subcuenca de estudio representa una de las principales limitaciones de este trabajo, ya que no se cuentan con registros de la altura del caudal base, los niveles de escorrentía, gasto inicial y posterior a la tormenta.

En adición, la falta de datos históricos detallados dificulta el análisis de tendencias a largo plazo en la dinámica hidrológica, principal problemática encontrada en esta subcuenca. No obstante, se obtuvieron datos importantes que podrían servir de base para futuros trabajos utilizando otras herramientas, como HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System), que permita simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua y determinar las posibles zonas inundables (López-Díaz, 2019).

Por último, este trabajo tiene la capacidad de ser replicado en otras cuencas o subcuencas nacionales con la finalidad de incrementar el conocimiento sobre la respuesta hidrológica ante eventos extremos de precipitación dentro de un periodo específico. Asimismo, con dicha implementación se puede utilizar más eficientemente el modelo HEC-HMS dependiendo de los datos disponibles (pluviales, geológicos, entre otros) de parámetros de entrada del lugar en cuestión.

4. Conclusiones

La subcuenca del río Sedeño es un sistema hidrográfico maduro y exorreico que abarca una superficie de 701,1 km², con más de 1000 km de cauces intermitentes y perennes. Su red de drenaje combina patrones paralelos y enrejados, alcanzando un orden 5 en la clasificación de Horton-Strahler, donde casi la mitad de los cauces son de primer orden y menos del 4% corresponden al quinto orden.

Además de su estructura de drenaje, la subcuenca se caracteriza por su forma alargada y su relieve marcado, con altitudes que van desde menos de 300 metros sobre el nivel del mar en sus zonas más bajas hasta más de 3100 metros sobre el nivel del mar en sus áreas más elevadas. Estas características no solo influyen en la dinámica hidrológica de la región, sino que también condicionan los procesos geomorfológicos y ecológicos que la definen. Comprender esta complejidad es fundamental para gestionar de manera sostenible el territorio y sus recursos hídricos.

Este estudio resalta que los métodos utilizados (Horton, 1932, 1945; Keller y Pinter, 1996; Miller, 1953; Strahler, 1957, 1958, 1964) para esta caracterización hidrológica son funcionales y aplicables a trabajos multidisciplinarios.

Con respecto a la obtención de los resultados, la implementación del CN como cuantificador de la relación entre la precipitación perdida ante las características del suelo presente, generó nuevo conocimiento del comportamiento hidrológico empírico en las tres zonas de la subcuenca (zonal alta, media y baja). Ya que, es importante mencionar que el cambio de la cobertura del suelo dentro de esta región afecta la abstracción inicial de la precipitación. Como muestra, se encontraron suelos más impermeables en las zonas urbanas que mantuvieron el CN más elevado. Esto es un claro indicador de que la urbanización afectan de manera significativa la variabilidad del ciclo hidrológico dentro de un área pequeña.

Este trabajo funge como un primer acercamiento en la aplicación del modelo HEC-HMS para eventos extremos de precipitación para esta subcuenca, evaluando un total de 8 tormentas en el periodo de 1991-2020 la cual es equivalente a una normal climatológica. Todas las tormentas coinciden con la temporada de lluvias establecida para el Estado de Veracruz que va desde el mes de junio hasta el mes de octubre. Es importante mencionar que, la ausencia de una estación hidrométrica dentro de la subcuenca limitó el análisis del modelo HEC-HMS, debido a que, el monitoreo constante es la principal fuente de mediciones hidrométricas, no obstante, la metodología realizada y modelamiento son replicables para el estudio base de cuencas y subcuencas.

Como consecuencia de las limitaciones en los datos de entrada en el modelo hidrológico, proponemos un mayor monitoreo en las estaciones adyacentes a cauces relevantes, en la parte alta sobre el río San Juan y Las Vigas, sobre la zona media sobre el río El Moral, Naolinco y Acatlán, sobre la zona baja en la vertiente de salida sobre el río Actopan.

4.1. Recomendaciones y/o consideraciones

El monitoreo, mantenimiento y la instalación de nuevas estaciones hidrométricas en puntos estratégicos de la subcuenca es crucial para mejorar la precisión de los modelos hidrológicos y mitigar el impacto de inundaciones teniendo un monitoreo completo y eficiente, por ejemplo, en las localidades de la colonia 6 de enero que se encuentra cerca de Río Sedeño, en la zona baja de la subcuenca donde se ha reportado importantes inundaciones principalmente en el Zetal y la Poza Azul cerca del Descabezadero, donde también convergen distintos afluentes que le dan inicio al Río Actopan.

Asimismo, la combinación del modelo HEC-HMS con herramientas más avanzadas, como los SIG que cuentan con funciones integradas que permiten migrar la información en diferentes formatos de visualización que complementan los del HEC-HMS. Incluir un estudio mayor en campo midiendo la altura de caudal y velocidad de flujo en temporadas de estiaje y lluvias enriquecería los resultados para conocer las variabilidades espaciotemporales durante nuevos periodos de tiempo.

La factibilidad del modelo HEC-HMS depende en parte de los datos de entrada disponibles y la calibración que se realice en base a ellos. Para este trabajo no se realizó dicha calibración lo que provocó un resultado aproximado; sin embargo, los resultados muestran que en general el HEC-HMS tiene un buen desempeño para modelar la precipitación infiltrada en eventos extremos ocurridos en esta subcuenca.

Por lo anteriormente señalado, y en paralelo al uso de HEC-HMS como herramienta para el análisis de la relación hidrometeoro-suelo, se recomienda fortalecer las políticas de ordenamiento territorial en la región de estudio a través de estrategias de conciencia ambiental, reconocimiento del medio en el que se desarrollan, así como la difusión del conocimiento científico adquirido a través de pláticas, talleres, etc.

Todo esto teniendo una participación colectiva social, lo cual podría traducirse en acciones de mitigación de los efectos adversos observados, y al mismo tiempo, garantizar la disponibilidad de recursos hídricos para las generaciones futuras.

Referencias

- Aparicio-Mijares, F. J.** (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa, S.A. de C.V., Grupo Noriega Editores.
- Balderas-Torres, A., Angón-Rodríguez, S., Sudmant, A., y Gouldson, A.** (2021). Adapting to climate change in mountain cities: Lessons from Xalapa, Mexico. Coalition for Urban Transitions. <https://urbantransitions.global/publications>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED].** (2018, 17 de octubre). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el año 2016*. Recuperado de <https://tinyurl.com/2kz3xkvv>
- CONAGUA.** (2005). *Reseña del Huracán Stan del Océano Atlántico*. <https://tinyurl.com/m5hh7c9>
- CONAGUA.** (2007). *Reseña del Huracán "Lorenzo" del Océano Atlántico*. <https://tinyurl.com/bu67vrch>
- CONAGUA.** (2010). *Reseña del Huracán Karl del Océano Atlántico*. <https://tinyurl.com/4vujw696>
- CONAGUA.** (2013). *Reseña de tormenta tropical Barry del Océano Atlántico*. <https://tinyurl.com/yc7wh8dk>
- Chica-Toro, F. J., y Garzón-González, J. M.** (2018). Curvas de absorción-extracción mineral bajo un sistema aerónico para crisantemo blanco (*Dendranthema grandiflorum* (Ramat.) Kitam. cv. Atlantis White). *Acta Agronómica*, 67(1), 86-94 <https://tinyurl.com/tbea9bmf>
- Girón, M. P.** (2022). Modelación hidrológica en la cuenca del río Coahuayana, Jalisco, México. [Tesis de posgrado, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://tinyurl.com/yat5fp6e>
- Gravelius, H.** (1914). *Morphometry of Drainage Bassins*. Quaternary International, v. Goschen Ve.
- Horton, R. E.** (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361.
- Horton, R. E.** (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.

- Hydrologic Engineering Center [HEC].** (2024). *HEC-HMS*.
<https://tinyurl.com/bdcs4hyw>
- HYG Engineering.** (s.f.). *HEC-HMS*. <https://hygengineering.wixsite.com/>
- Instituto del Agua.** (s.f.). *Hidrología del estado de Veracruz*. Instituto del Agua.
<https://tinyurl.com/4ftmcfbk>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** (2024). *Información estadística sobre la población en México*. INEGI. <https://tinyurl.com/r7v92hpe>
- Jorquera, E., Weber, J. F., y Reyna, S. M.** (2012). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. En Primer Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos.
<https://tinyurl.com/3vau7m66>
- Keller, E. y Pinter, N.** (1996). *Active tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall.
- López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. V., y Gimena, F. N.** (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, (12), 15-30.
<https://doi.org/10.4067/s0718-28132012000200002>
- López Díaz, Y.** (2019). *Estimación de vulnerabilidad por inundación en zonas urbanas: Caso de estudio de subcuencas del Valle de México* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105129>
- Martínez- Garzón, C. M., López-González, E. J., y Chamorro- Mafla, F. R.** (2018). Estado del arte de modelos hidrológicos. *Boletín Informativo CEI*, 5(2), 116-119.
<https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/1667/1693>
- Miller, V. C.** (1953). *Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee* (Technical Report No. 3). Columbia University, Department of Geology.
- Moreno-Herrera, A. D.** (2022). *Experiencia de saneamiento del río Sedeño y alternativas sostenibles para el buen vivir*. Universidad Veracruzana.
<https://tinyurl.com/yfcz3k28>
- Organización de las Naciones Unidas-Hábitat [ONU-Hábitat].** (s. f). *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*.
<https://tinyurl.com/55wfd9s2>
- Pérez-Quezadas, J., Heilweil, V. M., Cortés-Silva, A., Araguás-Araguás, L. y Salas-Ortega, M. D. R.** (2016). A multi-tracer approach to delineate groundwater dynamics in the Rio Actopan Basin, Veracruz State, Mexico. *Hydrogeology journal*, 24(8), 1953.
- Ramírez-González, V. E.** (2013). *Estimación del escurrimiento de la cuenca del río Ídolos, Ver., aplicando el modelo HEC-HMS: Estado actual y ante escenarios de cambio climático* [Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana].
- Rivera-Ballesteros, I.** (2024). *Estado del arte del drenaje a través de tubos de lava del río Actopan en Veracruz, México* [Tesis de licenciatura inédita]. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional.

- Schumm**, S. A. (1956). Evolución de los sistemas de drenaje y taludes en las tierras baldías de Perth Amboy, Nueva Jersey. *Boletín de la Sociedad Geológica de América*, 67(5), 597-646.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)**. (2024). *Información Estadística Climatológica*. <https://tinyurl.com/4xk5jay4>
- Strahler**, A. N. (1952). Dynamic basis of geomorphology. *Geological society of america bulletin*, 63(9), 923-938. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)
- Strahler**, A. N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks*. Handbook of applied hydrology.
- Timbe-Castro**, L. M., Crespo-Sánchez, P. J. y Cabrera-Balarezo, J. J. (2019). Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin. *DYNA*, 86(210), 338-344. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>
- Ulloa-Gutiérrez**, V. Á. (2013). *Evaluación de hidrogramas en la parte alta de la cuenca del río La Antigua, Ver., aplicando el modelo HEC-HMS* [Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana].
- UNESCO**. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y cambio climático. Resumen ejecutivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/C005102.pdf>
- Universidad de Salamanca**. (s.f.). *HEC-HMS 4: Manual de usuario*. <https://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf>