

II. Propuesta de algoritmo para determinar la susceptibilidad de inundaciones: Un enfoque teórico-metodológico

YERED GYBRAM CANCHOLA PANTOJA*

LUIS MIGUEL ESPINOSA RODRÍGUEZ**

FRANCISCO ZEPEDA MONDRAGÓN***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.218.02>

Resumen

La presente propuesta metodológica está diseñada para determinar el pronóstico de susceptibilidad de inundaciones, formulada en cuatro etapas fundamentales con base en la generación de un modelo dinámico territorial que nos permite tener un acercamiento a las condiciones reales de un sistema susceptible a inundaciones. El algoritmo está constituido por cuatro derivadas matemáticas integradas para comprender el proceso del umbral de las inundaciones. La primera derivada está conformada por el cálculo de índices de las propiedades físicas del relieve a partir del enfoque de nano-cuencas; la segunda, realiza el análisis de las condiciones y la funcionalidad hídrica; la tercera, el estudio y procesamiento de imágenes satelitales y el uso de aplicaciones geotecnológicas; y la cuarta, la correlación de las derivadas geoespaciales. El principal propósito de su aplicación es descifrar las

* Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Profesor-investigador de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8153-1203>

** Doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Profesor de carrera de tiempo completo de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9545-400X>; Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221983231>

*** Doctor en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Secretario de Extensión y Vinculación y profesor-investigador de tiempo completo de la de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3297-7580>

máximas y mínimas de los posibles umbrales de inundación desde un punto de vista holístico que pueda ser tomado en cuenta en estudios como la regulación de usos del suelo, el dimensionamiento de riesgos, así como visualizar la tendencia de dónde pueden ocurrir las inundaciones, contribuir a la investigación aplicada y poder desarrollar diversos proyectos. Por ejemplo, mapas de escenarios prospectivos, aplicaciones móviles con miras hacia la generación de medidas correctivas y estrategias para crear una sociedad más resiliente y participativa en sus contextos territoriales.

Palabras clave: *Ecuaciones, estructura, funcionalidad, geoespacio, modelación.*

Introducción

En la actualidad, el manejo del recurso hídrico en nuestras sociedades tiene un valor intangible, tanto para la subsistencia del ser humano, como para gestión de desastres, donde el entendimiento integral geoespacial y diacrónico de este elemento natural permite comprender los procesos geosistémicos complejos en cuanto a su captación, distribución, balances hídricos y zonas donde se pueden suscitar condiciones de peligro. Estas situaciones de vulnerabilidad en las localidades propician escenarios de riesgos que pueden ocasionar problemas socioeconómicos que agudizan la marginación.

Debido a esto, se propone un algoritmo para estimar el umbral de inundaciones desde un punto de vista holístico basado en nociones teóricas-metodológicas de la geomorfología, paisaje, territorio, dinámica geoespacial, órdenes de causas, aplicaciones geotecnológicas y ocupación del suelo. El algoritmo formula ecuaciones matemáticas ordenadas para realizar cálculos y hallar estimaciones de cobertura de tierra que se desborda y satura en un nivel de base de cause. El entendimiento de un análisis morfodinámico, la zonificación de unidades territoriales, la dinámica de causas, fenómenos meteorológicos atípicos y/o extremos, el uso y cambios de la tierra genera un modelo de aproximación del comportamiento geosistémico integrado por variables físico-matemáticas y antrópicas. Esto permite comprender cómo la captación de agua cubre la superficie terrestre, resultando en inundaciones en las inmediaciones de los márgenes de los valles y los ríos, y

saturando de agua los interfluvios que generan grandes concentraciones de agua que cubren en su totalidad el relieve.

Por otro lado, con base en información obtenida de la Base de Datos Internacional de Desastres (EM-DAT, por sus siglas en inglés) desarrollada por el Centro de Investigación sobre Epidemiología de los Desastres (CRED, por sus siglas en inglés), en México han ocurrido 82 desastres asociados a inundaciones entre los años 1952 a 2021. El 49% de los casos se originaron por la acumulación temporal de agua debido a precipitaciones intensas (inundaciones fluviales); el 47% se debieron al desbordamiento de cauces de ríos y/o arroyos (inundaciones fluviales), mientras que el 7% restante ocurrió en zonas costeras y estuvo relacionado con eventos de marea de tormenta. Hasta su última actualización en el 2022, EM-DAT estima que dichos desastres causaron la muerte de 4 660 personas en México y, en términos del impacto económico, el valor calculado asciende a un total de \$5 278 597 que se incrementó a más de cinco mil quinientos millones de dólares.

Por su parte, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred, 2023) reportó que en 2022, los fenómenos hidrometeorológicos fueron los causantes de más perjuicios en el país al conformar el 81% del monto total de los daños y pérdidas, con más de 9 524 viviendas dañadas y poco más de 207 000 personas afectadas.

La información del impacto socioeconómico de los desastres cobra mayor relevancia al considerar que por sus características geográficas, el territorio nacional está expuesto a diversas amenazas de origen natural, donde las inundaciones son recurrentes cada temporada de lluvias. Asimismo, las cifras ponen sobre la mesa otro tema fundamental referente a los gastos de rehabilitación y recuperación post desastre, lo cual puede constituir un factor de freno en el contexto de crecimiento económico del país y el desarrollo social.

Las cifras sugieren que el tema de las inundaciones en México representa un reto, tanto por la génesis y dinámica del fenómeno per se, pero también porque pone de manifiesto la existencia de entornos altamente vulnerables y expuestos. Bajo esta tónica, la toma de decisiones a nivel federal ha optado por un enfoque preventivo, lo cual ha llevado al desarrollo de políticas y estrategias en materia de reducción del riesgo de desastre. De acuerdo con el Cenapred (2019), en 2018 se erogaron casi 350.9 millones de pesos, los

cuales fueron destinados a proyectos como la construcción de instalaciones y equipamiento para Protección Civil, así como el programa de Infraestructura para la Protección de Centros de Población y Áreas Productivas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el Programa de Prevención de Riesgos, el cual es operado por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu).

Si bien el agua es un recurso finito, al no dimensionar su fuerza, crecida y acumulación en los cauces, genera vulnerabilidad, por lo que debe analizarse desde un enfoque multidisciplinario para garantizar que se cubran todos los factores antroponaturales que intervienen en su cuidado, captación, distribución y desplazamiento sobre la superficie terrestre.

Partiendo de lo anterior, se requieren propuestas innovadoras para dimensionar desde una perspectiva integral haciendo uso de geotecnologías y modelos geohidrológicos. Esta propuesta consiste en un algoritmo geohidrológico que permita comprender el comportamiento de una unidad de territorial con características homogéneas para entender la dinámica del agua de manera detallada y específica. Esto permitirá tener elementos y herramientas de apoyo para definir estrategias y llevar a cabo acciones que mitiguen el riesgo en zonas vulnerables debido a condiciones físico-geográficas y sociales.

Asimismo, desde una perspectiva social y económica, este algoritmo pretende mostrar diferentes escenarios de los posibles umbrales de inundación, por lo que ofrece un modelo práctico de análisis territorial que contribuye dimensionar el impacto en las diferentes actividades de la población, la industria, la minería, el sector recreativo, agropecuario, piscícola y energético, mediante el entendimiento de la geodinámica espacial del agua ante súbitas precipitaciones por fenómenos hidrometeorológicos. Esto permite a la sociedad prepararse y/o aumentar su resiliencia o adaptación, retomando criterios expuestos por Canchola (*et al.* 2017), para esta primer propuesta donde se ha seleccionado una muestra de las funciones de cada derivada del algoritmo aplicado a dos territorios: la cuenca de Guadalupe de San Marcos, Texas (EE. UU.) y una porción de una cuenca de Valle de Bravo, Estado de México.

El propósito de este trabajo es generar un modelo innovador que permita comprender el funcionamiento geohidrológico a partir de la delimitación

de unidades geodinámicas inundables mediante un algoritmo integral que permita determinar las condiciones de distribución, escurrimiento, infiltración, y captación de agua para identificar zonas susceptibles de inundaciones y entender los riesgos en un contexto de resiliencia social.

El algoritmo está dispuesto de manera ordenada y sistemática en cuatro derivadas que integran ecuaciones matemáticas para hacer cálculos y hallar estimaciones complejas donde intervienen factores fisiográficos como el drenaje natural del agua, el relieve, fenómenos hidrometeorológicos, vegetación y uso de suelo. Con esto se genera y obtiene información acerca de la estructura, la dinámica y el funcionamiento de unidades geohidrológicas.

La primera derivada está conformada por variables de factores geográficos-morfodinámicos, geológicos y estructurales que inciden directamente en el relieve. El análisis geomorfológico forma parte esencial de estas primeras ecuaciones debido a que permite identificar las formas de la superficie terrestre. Además, están estrechamente relacionadas con la dinámica del agua, en particular con la captación, escurrimiento e infiltración.

La segunda parte de la ecuación está orientada a la zonificación de unidades o delimitación geohidrológica (mediante el enfoque de microcuenca y/o nanocuenca), además del análisis geohidrológico que representa la dinámica de dirección de flujo, la definición del cauce principal y la concentración o acumulación. Esto permite definir el escurrimiento, desbordamiento, captación, análisis históricos y tasas de retorno. La ecuación permite entender los procesos geohidrológicos relacionados con los fenómenos hidrometeorológicos, los cuales son variables y alimentan el modelo, lo que permitirá generar escenarios para simular el comportamiento de las unidades.

La tercera derivada utiliza variables a partir de pronósticos numéricos GFS (Global Forecast System por sus siglas en inglés) y WRF (Weather Research and Forecasting por sus siglas en inglés). Esta genera una predicción meteorológica y atmosférica con datos de precipitación y temperaturas, a una resolución espacial de 8 y 16 km, y temporal, cada 12 horas. También se cuenta con información obtenida del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) Unidad Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) como la tasa de precipitación a una hora, el tope de nubes y la temperatura superficial del suelo GOES-16. De igual forma, se complementa con el estudio de amenazas hidrometeo-

rológicas y la ocupación del uso del suelo y vegetación mediante el uso de imágenes Landsat, Sentinel y Planet.

La última parte del algoritmo consiste en la correlación que integra toda la información obtenida en los procesos anteriores. Esto tiene la finalidad de mostrar proyecciones de la susceptibilidad de inundación por fenómenos hidrometeorológicos perturbadores, contemplados en una escala cuantitativa de 1 al 4, en relación con criterios cualitativos que van de Muy Bajo (1), Medio (2), Alto (3) a Muy Alto y/o Extremo (4).

De esta forma, la información que proporciona este algoritmo contribuye a generar un modelo que contextualiza de manera específica el comportamiento de las unidades geohidrológicas, lo cual es necesario para la gestión del agua tanto para cuestiones de actividades humanas, agroproductivas, y de riesgo. Un enfoque ecosistémico y de resiliencia permite contar con puntos de vista más cercanos a la realidad respecto a la dinámica geoespacial y los cambios en las condiciones meteorológicas que se manifiestan en eventos particularmente extremos y a menudo poco agradables para la sociedad que resultan en desastres.

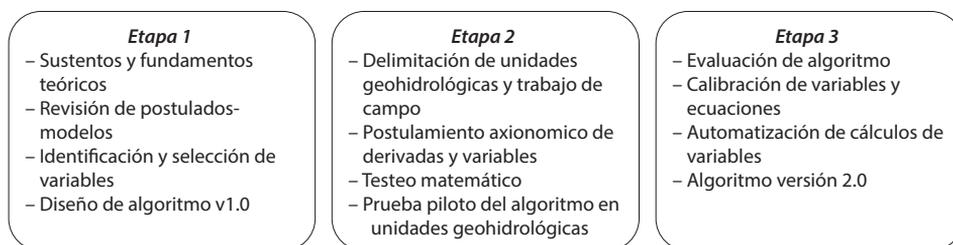
Este algoritmo innovador ha sido creado recientemente, por lo cual se encuentra en una etapa piloto, donde se estarán calibrando las variables utilizadas. Sin embargo, para fines de este capítulo, se exponen las bases teóricas-metodológicas que lo sustentan, así como un primer desarrollo axiomatico-matemático utilizando las variables más representativas de las ecuaciones. Esto se pone a prueba, tanto en el territorio de Valle de Bravo Estado de México, México, como en San Marcos, Texas, en los Estados Unidos de Norteamérica.

Método de investigación

La metodología aplicada se basó en un enfoque geosistémico-procedimental lógico, el cual nos permite un acercamiento a las condiciones reales de un geosistema, en este caso de “unidades geohidrológicas” con el fin de determinar su susceptibilidad a inundaciones y de utilizar un algoritmo que permite procesar información (datos o productos) de manera ordenada. Estas operaciones sistemáticas permiten obtener y generar cálculos de cada una de las

variables con el objetivo de determinar el pronóstico de susceptibilidad de inundaciones. Dicho algoritmo consta de tres etapas fundamentales. La etapa 1 consiste en el diseño y la creación del propio algoritmo sustentado en teoremas y el diseño de variables; la segunda etapa, es un postulamiento axonómico para el primer testeo matemático del algoritmo para probar variables en unidades geohidrológicas; y la tercera etapa, consiste en la evaluación, calibración y automatización del algoritmo (véase figura 1).

Figura 1. *Etapas para el desarrollo del algoritmo*
Etapas metodológicas-Algoritmo susceptibilidad-inundaciones



Fuente: Elaboración propia, 2023.

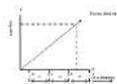
A continuación se presenta el algoritmo, el cual está constituido por cuatro derivadas matemáticas integradas en ecuaciones denominadas: (I) “ Dx) Análisis morfodinámico; (II) Dy (*Zonificación*: Unidades geohidrológicas / Dinámica-Cauces; (III) Dz^* Procesamiento de imágenes de satélite (GOES-16, LANDSAT 8-9-SENTINEL-PLANET; y (IV) $D\Delta$ Correlación: Determinación de zonas “inundables”:

Figura 2. Algoritmo susceptibilidad-inundaciones, versión 1.0

$$f_{(D \sum ps t)} \left[\begin{matrix} D_x \\ f_{(\sum D_x \psi)} \\ f_{(\sum D_x \psi)} \end{matrix} \right] \left[\begin{matrix} (f_{(D_x)})^m + (f_{(D_x)})^n + (f_{(D_x)})^o \\ \sum f_{(D_x)^p} \\ \sqrt{(Xl-1)^2 + (Xll-1)^2 + (Xlll-1)^2} \\ U_{(D_x)^q} \cdot f_{(D_x)^r} \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} D_y \\ f_{(D_y) \theta} = \oint A \cdot dr = \iint (\Delta x A) \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} D_z \\ f_{(D_z)} = f_a = \{r = \frac{d_{t-1} + d_{t-2} + \dots + d_{t-n}}{n}\} \\ f_b = \{r = \frac{d_{t-1} + d_{t-2} + \dots + d_{t-n}}{n}\} \\ f(a, b) = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot VIE \end{matrix} \right] / \left[\begin{matrix} D_A \\ D_A \sum - (D_A \psi) \cdot (D_x) \end{matrix} \right]$$

Dx) Análisis Morfológico

- V_{11} = Índice de Estructura Morfológica
 $f = (FET) = (Eg) + (Eg) / (Eg \cdot m) \Delta$
 FET = Índice de Estructura Morfológica
 Eg = Superficie de la estructura morfológica
 m = Superficie de la unidad geomorfológica
 E = Valor constante
- V_{12} = Índice de Ocupación de Procesos Geomorfodinámicos
 $f = (OFG) = (OFG) + (OFG) / (OFG \cdot m) \Delta$
 OFG = Índice de Ocupación de Procesos Geomorfodinámicos
 OFG = Superficie Ocupación de Procesos Geomorfodinámicos
 m = Superficie de la unidad geomorfológica
 E = Valor constante
- V_{13} = Índice de Ocupación de Procesos Fluviales
 $f = (OFR) = (OFR) + (OFR) / (OFR \cdot m) \Delta$
 OFR = Índice de Ocupación de Procesos Fluviales
 OFR = Superficie Ocupación de Procesos Fluviales
 m = Superficie de la unidad geomorfológica
 E = Valor constante



Dy) Zonificación: Unidades geohidrológica / Dinámica-Cauces

- V_{21} = Unidades geohidrológicas inundables
 - V_{22} = Caudal y amplitud de inundación
 - V_{23} = Susceptibilidad a inundación
- $V_{21} = \text{Coeficiente de retroceso Temperatura Humana } [(V_{21} + (V_{21} - E)) \cdot T]$
- $V_{22} = \text{Permeabilidad } E (D) = \text{Velocidad de flujo}$
- $V_{23} = \text{Análisis estadístico - Hidrología Hidráulica: Contingencias (1988 - 2021) Tasa de retorno (20, 100, 200, 300, 400, 500 y 1000 años)}$

Dz) Procesamiento imágenes de satélite (GOES-16, LANDSAT 8-SATINEL-PLANEET)

- V_{31} = Main-Route → 0-1000 m y 0-500 m
 - V_{32} = Precipitación de horas → 0-100 mm y 0-500 mm
 - V_{33} = Eventos Sísmicos (Estricción Turb)
- Parámetros:
 - Tormentas y depresiones frecuentes
 - Ondas tormentas
 - Otros eventos meteorológicos extremos (tormentas de agua, frentes fríos, nevadas, tormentas, huracanes meteorológicos y otros sucesos meteorológicos)
- V_{34} = Datos, imágenes y sus aplicaciones (usado [2004-2021])

Dj & Correlación: Determinación de zonas inundables

- V_{41} = Integración de Agentes (Ag) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F)
- V_{42} = Integración de Agentes (Ag) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F)
- V_{43} = Integración de Agentes (Ag) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F)
- V_{44} = Integración de Agentes (Ag) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F) + Frecuencia (F)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Descripción del algoritmo

Los fundamentos teóricos de este algoritmo se basan en una correlación entre las ciencias de la tierra, las geotecnologías y el análisis dialéctico entre la geografía, geomorfología, geología, hidrología, edafología, ecología, percepción remota, cartografía, matemáticas y ambiente. Los criterios teóricos metodológicos expuestos se sustentaron de acuerdo con lo siguiente:

- Por su parte, Kant (1750), Humboldt (1845), Moebius (1895) y Davis (1899) contribuyeron a entender las bases filosóficas y dialécticas del algoritmo.
- Los principios prácticos del entendimiento de las bases de la dinámica geoespacial iniciaron con Fernández (1915), Passarge (1919), Sochova (1963), Tricart (1965), Stobart (1967), Neef (1969) y Dunn (1973).
- Las consideraciones en la teoría de geosistema expuestas por Bertalanffy (1974); Bertrand (1978), Gómez *et al.* (1982), Chorley (1991), De Bolós (1992); Ibarra (1993); Walker y Grabau (1993), Mateo (1999-

2002), Gunderson y Holling (2002), Espinosa y Hernández (2015) y Canchola *et al.* (2017).

- Con lo que respecta a la parte geológico-geomorfológico De Pedraza (1996), Mendoza (2002), Lugo (2004), Mulligan (2004), Farina (2006), Alcántara *et al.* (2009), Galochet (2009), Canchola *et al.* (2017), Zepe-da *et al.* (2019) y Canchola (2021).
- En cuanto a la parte geotecnológica, Currit (2009), Slaymaker (2009), Acevedo (2013) y Ortiz (2014-2019).

A continuación se presenta el sustento teórico-conceptual de las cuatro derivadas del algoritmo:

(I) "Dx" Análisis Morfodinámico

A lo largo del tiempo, el ser humano ha tenido un gran interés por comprender la superficie terrestre y los elementos que lo estructuran, partiendo desde el origen del relieve, la dinámica, comportamiento y evolución del mismo, así como los procesos morfológicos que en él se suscitan (Lugo, 2004 citado por Canchola *et al.*, 2017).

En el ámbito de la geografía, la geomorfología juega un papel fundamental e importante ya que, en los últimos años, ha sido considerada como la columna vertebral de la geografía física (Gregory *et al.*, 2002, citados en Bocco y Palacio, 2012) y de las diferentes disciplinas y ramas auxiliares de la geografía. Asimismo, la geomorfología se apoya en otras disciplinas, tales como: la climatología, hidrología, geología, entre otras. Su finalidad es comprender el estudio sistemático de las formas del relieve (Canchola *et al.*, 2017) y el entendimiento dinámico del territorio.

La geomorfología es una ciencia que nace en Francia a finales del siglo XIX con Emanuel de Martonne y alcanza reconocimiento a mediados del siglo XX con la Escuela de Estrasburgo, dirigida por el Dr. Jean Tricart (Arroyo, 2012). Al igual que otras ciencias, la geomorfología ha pasado por diferentes etapas que, junto con la evolución del pensamiento geográfico y geológico, han tenido una evolución sustancial para el estudio de las diferentes formas de la superficie terrestre.

En este sentido, se han introducido paradigmas y enfoques teóricos, los cuales intentan explicar la estructura y evolución del relieve y han servido de base para el entendimiento del territorio. Por ejemplo, las primeras teorías geomorfológicas desarrolladas por Davis y Penk (Lugo, s/f; Canchola *et al.*, 2017) han ayudado a entender el funcionamiento, origen y evolución del relieve

De esta manera, autores como John (2007), Arroyo (2012) y Canchola *et al.* (2017) citan a William M. Davis (1850-1934) como uno de los principales exponentes en el desarrollo de la investigación geomorfológica orientada a paisajes de erosión con un enfoque y/o paradigma geológico. A través de su modelo, Davis intenta explicar la evolución del relieve terrestre, exponiendo cómo la red de drenaje (ríos) sobre el terreno funge como un agente exógeno que, en conjunto con otros factores físicos, contribuyen al modelado y la evolución del relieve. Dicha teoría, la cual denominó como “ciclo geográfico o ciclo de erosión”, describe los procesos de “penillanura” (fase de senilidad) (Davis, 1899 citado en Canchola *et al.*, 2017), definido como “activos en climas húmedos, con formación de valles en V (fase juvenil del paisaje) que posteriormente se ensanchan (fase de madurez) y terminan en una superficie arrasada.”

Sin embargo, el postulado de Davis fue cuestionado por otros exponentes, tal es el caso de la Escuela de la geografía alemana, donde exponentes como Siegfried Passarge y Alfred Hettner se convierten en dos grandes críticos de Davis (Arroyo, 2012).

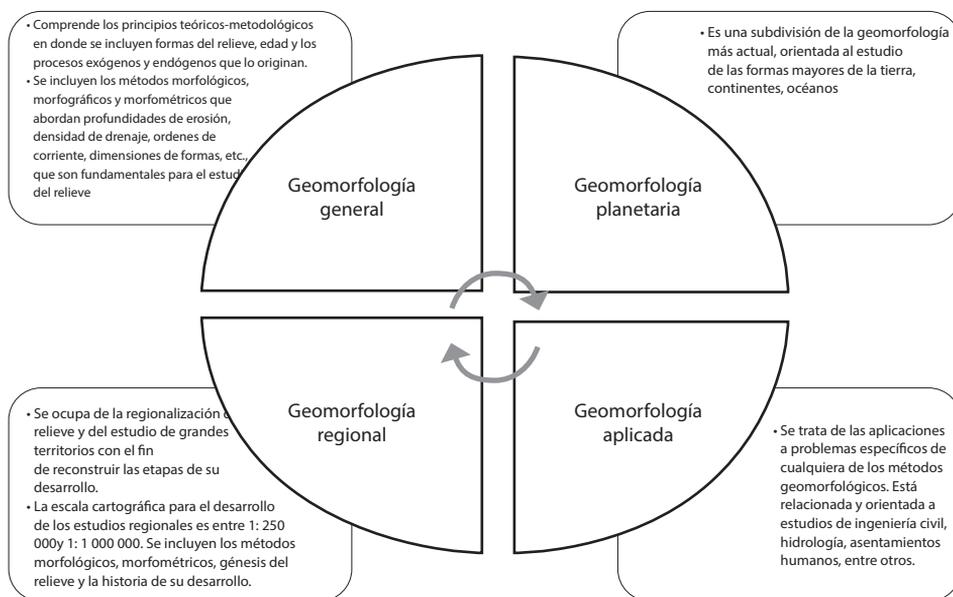
Cabe mencionar que autores como Lugo (s/f) consideran que la teoría de Davis ha sido de gran importancia en el ámbito de los estudios geomorfológicos, ya que ha sido uno de los aportes teóricos que intentó explicar la dinámica del relieve a partir de una secuencia evolutiva para entender el territorio actual.

No obstante, estos postulados y sus aportes teóricos-metodológicos han sido controvertido. Durante el siglo xx, precisamente a partir de los años cincuenta y sesenta, la geomorfología entró en una nueva etapa de gran desarrollo. Comenzaron a surgir trabajos novedosos y con otros enfoques como lo es la geomorfología climática y la geomorfología estructural, donde autores como Birot (1949), Cholley (1950), Tricart (1952), Tricart y Cailleux (1956) citados por (Lugo, s/f) comenzaron a desarrollar nuevos principios

y métodos para explicar las formas del relieve. Estos consideraban que las condiciones climáticas del pasado y del presente influyen en su modelado, junto con otros factores físicos.

En esta nueva fase de la geomorfología se introdujeron nuevos métodos y técnicas para sustentar los estudios geomorfológicos. Esto resultó en la división de la ciencia geomorfológica en varias ramas y sub-ramas, cada una de ellas con una base teórica propia que contribuye a un conocimiento más completo del relieve (Sala, s/f) (véase figura 3).

Figura 3. Divisiones de la geomorfología



Fuente: Elaboración propia con base en Lugo (1988) y Lugo (s/f).

Estas bases y fundamentos, relacionados en gran medida con el pensamiento geográfico, han servido de base para la evolución de la ciencia geomorfológica y sus diferentes divisiones para el estudio del relieve. Las principales escuelas que han sentado las bases para el entendimiento geosistémico del relieve son la escuela anglosajona, francesa, alemana y rusa son (Salas, 1984; Arroyo, 2012; Canchola *et al.*, 2017).

En este sentido, debido al desarrollo que ha tenido la geomorfología en los últimos años y a la incorporación de diferentes métodos y técnicas

para el estudio complejo y dinámico del relieve, la geomorfología ha tenido una gran aportación en el desarrollo de estudios con diferentes aplicaciones.

Dicho lo anterior, la geomorfología ha pasado por diferentes etapas fundamentales que la han llevado a consolidarse como ciencia y como unidad de análisis. La escuela alemana, francesa y soviética han sentado las bases para entender al paisaje y analizar cómo funciona. Cabe resaltar que estas bases tienen un sustento geomorfológico.

Estas nociones epistemológicas han creado un acercamiento teórico-conceptual del funcionamiento del paisaje a través del tiempo, donde el aporte de la geomorfología en el estudio del paisaje-territorio ha sido un factor fundamental al introducir y aportar diferentes métodos y técnicas para el análisis de la superficie del relieve.

Cabe mencionar que un elemento esencial en la línea de investigación de los estudios de paisaje para el entendimiento funcional complejo y dinámico del territorio fue la incorporación de la teoría de sistemas al ámbito de los estudios geográficos por Sochova (1963), ya que considera que los espacios o paisajes naturales —también denominados “complejos territoriales naturales” (Mateo *et al.*, 2012, p. 253)— pueden concebirse como geosistemas para entender la complejidad y la dinámica del territorio.

De esta manera, la aplicación de la Teoría General de Sistemas en la ciencia geográfica, geomorfológica y del paisaje, como mencionan García y Muños (2002), radica en las formas de representación o “modelos” que se adecuan a los caracteres estructurales y funcionales del territorio. Todas estas bases teóricas y metodológicas han sido retomadas para identificar los elementos que constituyen al paisaje y con ello, delimitar los procesos que conllevan a una dinámica y evolución tanto en el espacio como en el tiempo (Canchola *et al.*, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, en los últimos años estas aportaciones se han visto como un área de interés de ciencia aplicada ya que, por el nivel de integración de diferentes disciplinas para comprender la complejidad estructural y dinámica del territorio, ha profundizado en el desarrollo de estudios ambientales y territoriales.

El sustento del pensamiento geomorfológico, paisaje y territorio, permite entender desde una base conceptual teórica una metodología aplica-

tiva, el funcionamiento de los componentes del territorio, así como comprender su transformación, dinámica y modelación.

En otro orden de ideas, el análisis morfodinámico del territorio hace referencia al análisis de las condiciones físico-geográficas y geomorfológicas de una zona determinada, a la cual se aplican análisis de tipo cualitativo y cuantitativo para entender su estructura, comportamiento y dinámica.

El análisis cuantitativo son las características, propiedades o atributos puntuales, lineales y volumétricos del relieve que, en conjunto, son denominados parámetros morfométricos del relieve y son esenciales para el análisis e interpretación numérica aproximada (Méndez, 2015) de las condiciones topográficas del relieve.

De esta manera, al desarrollo del análisis cuantitativo se aplica el método morfométrico, el cual se ocupa del análisis del relieve mediante la expresión cuantitativa de determinados parámetros o elementos. Es decir, incluye los aspectos cuantitativos de un área, por ejemplo: el grado de inclinación del terreno (pendiente), la altitud, la altitud, la exposición y el grado de rigurosidad (Arroyo, 2012), pendiente del terreno, entre otros.

Por su parte, el análisis cualitativo está orientado a la descripción y análisis del relieve, considerando que existen diferentes formas que lo constituyen.

De esta manera, se parte del análisis morfológico del relieve que de acuerdo con Arroyo (2012), abarca los aspectos descriptivos de la geomorfología de un área, haciendo una diferenciación espacial de las diferentes formas que estructuran la superficie terrestre, las cuales se clasifican en: valles, planicies, colinas, montañas, mesetas, laderas, entre otras.

En esta fase se recopilan y se procesan características básicas en el software SIG como lo es el Modelo Digital de Elevación (MDT), y a partir de ello se obtienen elementos secundarios necesarios para el análisis morfodinámico del territorio.

El IEM es el área total de la superficie de cada una de las unidades morfológicas diferenciadas y delimitadas, lo cual está relacionado con el análisis cualitativo y cuantitativo del relieve.

$$v_XI = \text{Índice de Estructura Morfológica}$$

$$f = (IET) = (U_{gg} \times 100 / \text{sup.mc})$$

Donde:

- IET = Índice de Estructura Morfológica
- Ugg = Superficie de la estructura morfológica
- sup.mc = Superficie de la microcuena
- 100 = Valor constante

$$v_{XII} = \text{Índice de Ocupación de Procesos Gravitacionales}$$

$$f = (IOPG) = (SOPG \times 100 / \text{sup.mc})$$

Donde:

- IOPG = Índice de Ocupación de Procesos Gravitacionales
- SOPG = Superficie Ocupación de Procesos Gravitacionales
- sup.mc = Superficie de la microcuena
- 100 = Valor constante

$$v_{XIII} = \text{Índice de Ocupación de Procesos Fluviales}$$

$$f = (IOPF) = (SOPG \times 100 / \text{sup.mc})$$

Donde:

- IOPF = Índice de Ocupación de Procesos Fluviales
- SOPG = Superficie Ocupación de Procesos Fluviales
- sup.mc = Superficie de la microcuena
- 100 = Valor constante

Por otro lado, el análisis cuantitativo hace referencia al análisis de las características, propiedades o atributos puntuales, lineales y volumétricos del relieve, que en conjunto son denominados parámetros morfométricos del relieve y son esenciales para el análisis e interpretación numérica aproximada (Méndez, 2015) de las condiciones topográficas del relieve.

Para finalizar, se puede decir que la morfometría se ocupa del análisis del relieve mediante la expresión cuantitativa de determinados parámetros o elementos del relieve de un lugar determinado. Es decir, incluye los aspectos cuantitativos de un área, por ejemplo: el grado de inclinación del terreno (pendiente), la altitud, la altitud, la exposición y el grado de rigurosidad, entre otros (Arroyo, 2012).

(II) "Dy" Zonificación:

Unidades geohidrológica / Dinámica-Cauces

El análisis de la dinámica hidrológica en la superficie

El agua se encuentra en todos los elementos de la vida en la tierra. Es vital para las actividades de la población y el equilibrio ecológico del planeta (Unesco, 2016). Es constituyente de todos los seres vivos y es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre. Es un factor clave la civilización de nuestro planeta para la existencia humana (Te Chow, Maidment y Mays, 1994).

La hidrología abarca todas las fases del agua en la Tierra. Es una materia de gran importancia para el ser humano y su entorno. Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, desde sus propiedades físicas, químicas y su relación con el medio que lo rodea, incluyendo las actividades de los seres humanos. El principal objetivo de la hidrología aplicada es la determinación de eventos analógicos a las cargas de diseño de análisis estructural, esto permite fijar la capacidad y seguridad de estructuras hidráulicas (Aparicio Mijares, 2004).

En este sentido, la delimitación territorial para el estudio de la hidrología y la geodinámica fluvial en cuencas, subcuencas y microcuencas ha permitido un acercamiento al funcionamiento hidrológico de las escorrentías, la captación, acumulación y los sistemas de drenaje los cuales, ante la presión para cubrir las necesidades humanas de las actividades agroproductivas, urbanas, industriales, rurales y adquisición de bienes naturales, están generando procesos de degradación geocológica. Al desconocer las demás variables del sistema, que también depende de si son cerrados y/o abiertos tan complejos y en grandes extensiones territoriales, en muchas ocasiones tienen impacto ocasionado, pérdidas y desequilibrios, no solo en el balance hídrico sino los procesos de autorregulación natural.

El enfoque de nanocuencas permite saber con mayor detalle cómo funciona una superficie donde hay una mayor cohesión de los elementos por la homogeneidad en el paisaje y tienen una composición reducida de unidades menores para mayor compresión entre variables geosistémicas. Debido

a esto, la delimitación basada en nuevos enfoques contribuye a un entendimiento a detalle de los espacios geohidrológicos.

Asimismo, existe un postulado de Strahler (1989) que permite comprender la distribución y configuración especial de los elementos desde la geografía física y uno de ellos son los causes. La ordenación de causes o drenaje consiste en clasificar los causes de acuerdo con su tamaño, longitud y los procesos que desempeñan sobre el relieve. Es decir, su dimensión respecto a sus ríos tributarios para jerarquizarlos de acuerdo con las características de cada uno de ellos (Mesa, 2018), donde los niveles 1 y 2 son procesos erosivos y/o disección del terreno, nivel 3 son transitorios, entre erosivos estructurales, mientras que los causes superiores, correspondientes a los niveles 4 al 7, son ríos cuya estructura morfológica se basa en fallas, fracturas, alineaciones y tienden a extender su valle, los cuales captan con mayor fuerza los flujos provenientes de los órdenes 1, 2, y 3 en adelante. Estos normalmente se forman en zonas con poca pendiente y generan condiciones propicias para el desbordamiento del agua del nivel de base de los ríos, iniciando así los umbrales de las posibles inundaciones, lo que se vuelve fundamental para determinar las zonas de susceptibilidad.

También existe el modelo de Horton, el cual contribuye a entender el complejo proceso de infiltración que, de acuerdo con Ruiz y Martínez (2015), tiene que ver con el nivel máximo del agua que se puede absorber, dependiendo de las propiedades físicas del estado de saturación de humedad, tipo de suelo, basamento litológico y régimen pluviométrico. Asimismo, parte del planteamiento de Horton trata las entradas y salidas infinitas del agua, donde la estimación de la infiltración y escorrentía dependerá de las propiedades físicas del suelo, esto es, de las variaciones de humedad y saturación, las cuales muestran una tasa constante con base los siguientes valores:

$$f_t = f_c + (f - f_c) e^{-kt}$$

Donde:

- f_t = capacidad de infiltración en el instante t
- f_c = valor constante de la capacidad de infiltración en estado de saturación del suelo

- f_0 = valor máximo de la capacidad de infiltración al comienzo de la lluvia
- k = constante de decaimiento
- t = tiempo transcurrido desde el comienzo de la lluvia

Por otra parte, la permeabilidad de acuerdo con la FAO (2016), es aquella propiedad del suelo de transmitir agua y aire al subsuelo, es decir, entre más permeable sea, mayor será la infiltración, por lo cual la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$K = (D \div 2) \times \ln (h_1 \div h_2 / 2)$$

Donde:

- $(D \div 2)$ = radio del hoyo o la mitad de su diámetro en metros
- \ln = logaritmo natural
- h_1 y h_2 = dos profundidades consecutivas del agua en metros: h_1 al inicio y h_2 al final del intervalo de tiempo¹
- $(t_2 - t_1)$ = intervalo de tiempo entre dos mediciones consecutivas (segundos)

Como parte de las últimas variables de esta derivada, está el periodo y/o tasa de retorno, el cual puede ser cualquier evento o fenómeno extremo. Los ejemplos más comunes son las lluvias torrenciales, temperaturas extremas, huracanes, tornados, monzones, frentes fríos, granizadas, entre otros, donde el intervalo, duración o número de años, en promedio, se cree que será igual o mayor al último valor menor registrado. Es la frecuencia con la que se presenta un evento. Es preciso decir que el grado de magnitud de un fenómeno extremo está relacionado de forma inversa con su frecuencia de ocurrencia (periodicidad). Las precipitaciones muy intensas ocurren con una frecuencia menor que las moderadas o débiles (Gutiérrez *et al.*, 2011).

Asimismo, el periodo de retorno es uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra

¹ Los valores de h se pueden calcular como las diferencias entre la profundidad total del hoyo (H) y los valores de P sucesivos. Para obtener K en m/s, cuide de expresar todas las mediciones en metros y segundos.

hidráulica destinada a soportar avenidas. Este se define como el intervalo de recurrencia (T), que es el tiempo entre ocurrencias, es decir, el lapso promedio de años entre la ocurrencia de un evento igual o de mayor magnitud. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad del m -ésimo evento de n -registros.

En este sentido, un evento extremo ocurre si una variable aleatoria, es mayor o igual que un cierto valor. Es decir, el periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ($P_{\text{máx}}$ o $Q_{\text{máx}}$ en su caso) en una tabla de valores ordenados de mayor a menor, con base en lo siguiente:

$$Tr = (n + 1) / m; P = m / (n + 1); Tr = 1 / P$$

Por lo cual:

- Tr = periodo de retorno (años)
- n = número de años de registro, es el número de orden
- P = probabilidad de ocurrencia de un evento X .

Es importante señalar que el periodo de retorno no es un intervalo fijo de ocurrencia de un evento, sino el promedio de los intervalos de recurrencia. La ecuación anterior y varias de las expresiones básicas de probabilidad permiten hacer las deducciones siguientes:

La probabilidad de que un evento $X \geq x$ ocurra en algún año es:

$$P = 1 / Tr$$

(III) "Dz*" Procesamiento de imágenes de satélite (GOES-16, LANDSAT 8-9-SENTINEL-PLANET)

El procesamiento de las imágenes de satélite tiene que ver con la observación de la Tierra mediante la percepción remota o teledetección, que se define como aquella técnica para adquirir y procesar información obtenida mediante sensores remotos para identificar elementos del paisaje o superficie terrestres con el fin de generar datos en tiempo casi real de la cobertura geoespacial (Chuvieco, 1990).

En este sentido, una de las aplicaciones de la percepción remota es la meteorología la cual se basa en nociones teóricas-metodológicas y matemáticas en un sentido holístico y dialéctico de las ciencias del paisaje, ambientales, geográficas, climáticas, económicas y sociales basados en métodos cartográficos de análisis y sobreposición de capas. Esto se realiza mediante el uso de geotecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (GIS), la percepción remota mediante el análisis de teledetección en plataformas satelitales como LANSAT, GOES, SENTINEL MODIS y VIIRS, así como la corroboración en campo de puntos de control con estaciones RTK, sistema de navegación GNSS y vuelos con drones.

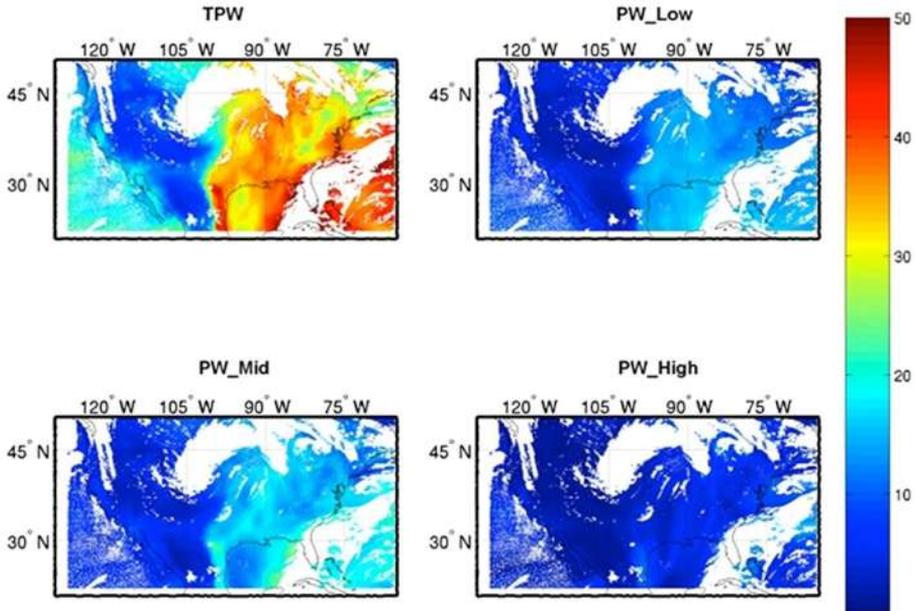
Hoy en día, las plataformas y sensores han incrementado sus productos tanto licenciados como de acceso libre. Tal es el caso de GOES-16, Lansat, Sentinel y Planet. El satélite GOES-16 es parte de una nueva generación de satélites meteorológicos geoestacionarios de la National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) de la NASA. Estos generan imágenes avanzadas con mayor resolución espacial y más rápida cobertura para lograr pronósticos más precisos, mapas de actividad de rayos al momento y tener una observación mejorada de la actividad solar y las condiciones del tiempo en el espacio (UNAM-LANOT, 2019).

Asimismo, uno de los productos del GOES-16 es el instrumento ABI (Advanced Baseline Imagen), denominado RainRate, el cual permite obtener un valor numérico para la tasa de precipitación en milímetros por hora en el momento en que se realiza la observación con una resolución de 2 km. Esto permitirá realizar pronósticos del flujo de la corriente, inundaciones repentinas y posibles deslizamientos en zonas montañosas o áreas cercanas a las costas (UNAM-LANOT, 2019).

Estos compuestos o productos satelitales contribuyen a generar modelos prospectivos de cómo se puede comportar la lluvia en las próximas horas, lo cual permite al algoritmo obtener datos en tiempo casi real y, sumando con el pronóstico de lluvias de 24 horas se puede tener un estimado de la cantidad de lluvia en “mm” por cada 2 km por píxel (véase figura 4).

De acuerdo con la Ley General de Protección Civil (2012) en su artículo 2 inciso XXIII se define a un fenómeno hidrometeorológico como un agente perturbador que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales,

Figura 4. Variables de control de calidad de salida utilizando un caso ABI simulado base "Rainrate"



Fuente: UNAM-LANOT (2019).

fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad, heladas, sequías, ondas cálidas y gélidas, y tornados (Cenapred, 2016). Estos tienen diferentes variaciones de incidencia, repetibilidad, magnitud, temporalidad y comportamiento, lo que los vuelve sumamente complejos de estudiar dependiendo de la ubicación geográfica que se este estudiando. Debido a esto, se requiere un catálogo detallado de fenómenos, lo cual facilitará el estudio y la obtención de datos de estas variables.

Por otro parte, como parte de las ultimas variables tenemos la del uso del suelo y vegetación que, de acuerdo con el INEGI (2014), es la cobertura de la tierra y su uso, los cuales son elementos integrantes de los recursos básicos, así como la distribución del uso del suelo agrícola, de la vegetación natural e inducida, además de otros usos como el pecuario, forestal, agrícola, urbano, industrial y rural. En su conjunto, representan una ocupación significativa del territorio, lo cual tiene implicaciones en el monitoreo ambiental, la producción de estadísticas como apoyo a la planeación, la evaluación del cambio climático y la evaluación de los procesos de desertificación, entre otros.

La comprensión temporal de los cambios del territorio, acorde o no al vocacionamiento y las aptitudes territoriales es una variable esencial de análisis. Al analizar estudios de 40 años de los diferentes usos, es posible encontrar zonas de fragilidad, ya sea en las áreas urbanas o rurales, que pueden estar en peligro ante un evento repentino o extremo ocasionado por fenómenos hidrometeorológico. Con el uso de plataformas como la de INEGI y satelitales, se puede generar información histórica y actual para medir los cambios de ocupación del territorio que lo ponen en situación de desventaja, exposición o vulnerabilidad.

(IV) “ Δ ” Correlación: Determinación de zonas inundables

Para poder hacer una correspondencia de los datos obtenidos es necesario conocer las relaciones entre los conjuntos de ecuaciones de cada derivada, por lo cual la teoría de conjunto contribuye a sintetizar la información en dominios y/o valores de los componentes de una ecuación y su proporcionalidad (Ocaña y Pérez, 2011).

Debido a esto, se optó por hacer una correlación entre las derivadas de los algoritmos mediante la parametrización de un universo de 1 a 4, el cual sienta sus bases en los atributos de agente, procesos y peso asignado. Para ello se presenta la tabla 1, adaptada de Canchola (2017).

Tabla 1. Valores y ponderaciones para la asignación de parámetros en el algoritmo

<i>Agente (Ag)-Variables-Naturales</i>		<i>Porcentaje ponderado para cada variable en representatividad territorial (unidad geohidrológica) (Ag)-Variables-Antropogenéticas</i>	
<i>Procesos (Pc's)</i>	<i>Peso Asignado (wh)</i>	<i>Proporcionalidad (%)</i>	<i>Peso Asignado (wh)</i>
Muy intensos, dinámicos y pronunciados	4	76-100	4
Intensos y dinámicos	3	51-75	3
Moderados débiles	2	26-50	2
Insipientes, difusos, irrepetibles	1	0-25	1

Fuente: Elaboración propia (2023).

Cabe mencionar que la obtención de los valores de proceso es la conjunción del análisis documental, cartográfico, trabajo de campo,² y procesamiento de la información en sistemas de información geográfica (SIG/GIS), así como el procesamiento de imágenes de satélite para la generación de compuestos. Todo ello se basa en modelos procedimentales axionómicos y correlacionales tanto cualitativos y cuantitativos (Canchola, 2017, 2021), donde se tiene lo siguiente:

$$D\Delta \sum = Dx) ; Dy(; Dz^* / \sum n^3$$

Resultado de la Correlación (R) =

1. Muy bajo a bajo
2. Medio
3. Alto
4. Muy alto a extremo

Donde:

- Dx) = Análisis Morfodinámico
- $Dy($ = Zonificación: Unidades geohidrológica
- Dz^* = Procesamiento de imágenes de satélite

Resultados

El objetivo planteado es determinar el pronóstico de susceptibilidad de inundaciones a partir de cuatro funciones fundamentales para llevar a cabo un análisis dinámico territorial que nos permita conocer las condiciones reales presentes de un sistema. A partir de las etapas metodológicas se pudo desarrollarel algoritmo en su “versión 1 (v1.0)” que procuró hacer una abstracción de un sistema real para simplificar las variables y/o componentes que se observaron, considerados representativos (Wainwright y Mulligan, 2004).

² Formatos disponibles en <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/66175>

Asimismo, se hizo una primer prueba matemática-geoespacial del algoritmo, en unidades geográficas territoriales o “microcuencas” de México y unidades hidrológicas de Estados Unidos con el fin de realizar y desarrollar análisis espacio-temporales en función de su naturaleza para realizar un análisis territorial.

Los principales productos cartográficos generados fueron el modelo digital de elevación que se generó a partir del procesamiento de imágenes BIL de alta resolución espacial (5 m), para el caso de México, y una resolución que va des de los 30-70 centímetros hasta los 5 metros en el caso de Estados Unidos. Con ello, se generó un *hildshade* o mapa de sombreado del relieve y un mapa de pendientes, los cuales sirvieron de base para analizar las condiciones morfológicas del terreno.

Asimismo, se infirieron los órdenes de drenaje a partir del MDT en software SIG. Estos primeros datos sirvieron de base de análisis para flujos, dirección y ordenes de drenaje. De igual forma, con el apoyo de los mapas de pendientes, geología, tipo de suelos y uso del suelo, se hizo una correlación de variables tocon base en el trabajo de campo realizado en ambos territorios.

De esta manera, se desarrollaron mapas compuesto de la energía del relieve y la densidad de disección los cuales ayudaron a comprender las diferencias altitudinales, así como la saturación de causes mediante una malla de análisis geoespacial de $1 \text{ km}^2 \times 1 \text{ km}^2$, la cual obtuvo datos sobresalientes de procesos. Esto sirvió de base para el cálculo de parámetros morfométricos y para desarrollar los índices que permiten determinar la estructura morfodinámica de las pruebas piloto del algoritmo:

Las funciones seleccionadas por parte de las variables del algoritmo fueron las siguientes:

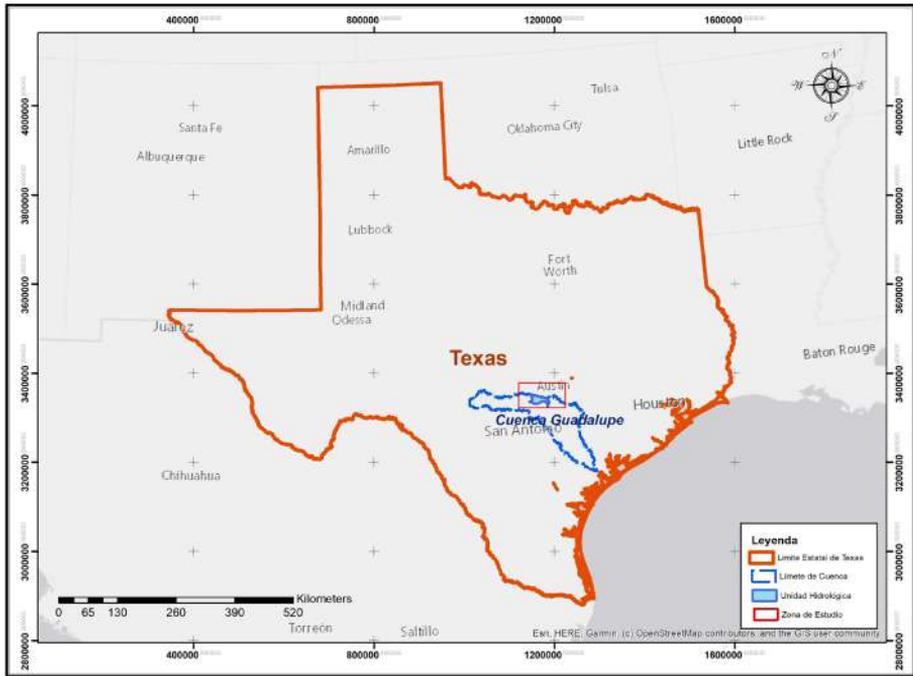
- I F_x = Morfodinámica del terreno
- II F_y = Cuencas y ríos
- III F_z = Uso del suelo y vegetación
- IV F_d = Correlaciones

Tabla 2. *Correspondencias interpretativas por tipo de mapa*

No.	Nombre del mapa	Descripción del mapa
1	Ubicación	Muestra el lugar georreferenciado de los estudios, delimitando las cuencas y microcuencas.
2	Uso del suelo y vegetación	Tipificación de los distintos usos en los territorios, que contribuyo a entender las actividades antro-po-naturales.
3	Modelo digital de elevación	Proporciona una perspectiva de la morfología del relieve mediante sombreados.
4	Pendientes	Representa la configuración del relieve en cuanto a la inclinación en grados de las geofomas para comprender los procesos gravitacionales en masa y fluviales.
5	Geología	Delimitación de las diferentes tipologías de rocas, contactos litológicos, fallas, fracturas, las cuales permitieron comprender los procesos endógenos para la conformación del relieve terrestre.
6	Tipo de suelo	Presenta las características físicas, químicas y biológicas de los diferentes tipos de suelo de acuerdo con su origen y la morfoedafogénesis.
7	Energía del relieve	El mapa de energía del relieve nos permite comprender la dinámica en relación con la diferencia altitudinal en un área territorial, lo cual ayudó a comprender el funcionamiento de las fuerzas endógenas y los procesos estructurales entre las cotas altimétricas con una media de pixel de $1,000 \times 1,000$.
8	Densidad de disección	El mapa de densidad de disección presenta la relación de una unidad de medida de $1,000 \times 1,000$ metros por pixel, y con ello permite conocer el número de saturación de ríos, la longitud de los mismos en cada espacio y conocer la mayor dinámica fluvial espacial por tipo de causas. Es un mapa fundamental para determinar el umbral de inundaciones.
9	Red de drenaje	Tipificación de los cauces mediante la diferenciación de tres niveles de procesos de los cauces: erosivos, acumulativos y estructurales, mediante el método de órdenes de drenaje Strahler.
10	Umbrales de inundación	El mapa de umbrales de inundación es el resultado de procesos físico-geográficos-complejos, donde se representa la correlación geosistémica de elementos naturales, como pendiente y flujos de dirección de causas que se ejercen en el territorio, los cuales se combinan con una serie de eventos, tanto naturales como extremos —como la inserción de un meteoro, ya sea en temporada de invierno o verano, como huracanes, frentes fríos, lluvias invernales, tormentas torrenciales, tornados, entre otros—, mediante el desarrollo de las ecuaciones físico-matemáticas dispuestas en el algoritmo.

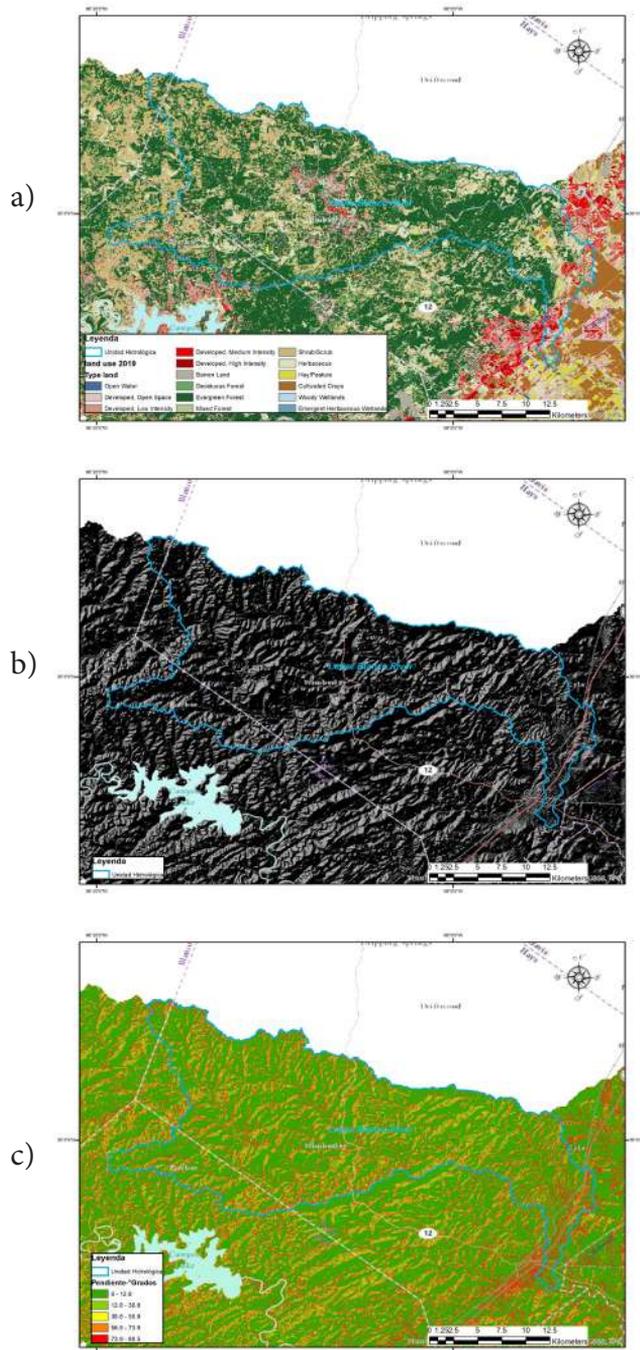
Fuente: Elaboración propia con base en fundamentos de Canchola *et al.* (2017).

Figura 5. Zonas de muestrales de aplicación del algoritmo v. 1.0: Comparativos Texas (EE. UU.) - Estado de México (México)



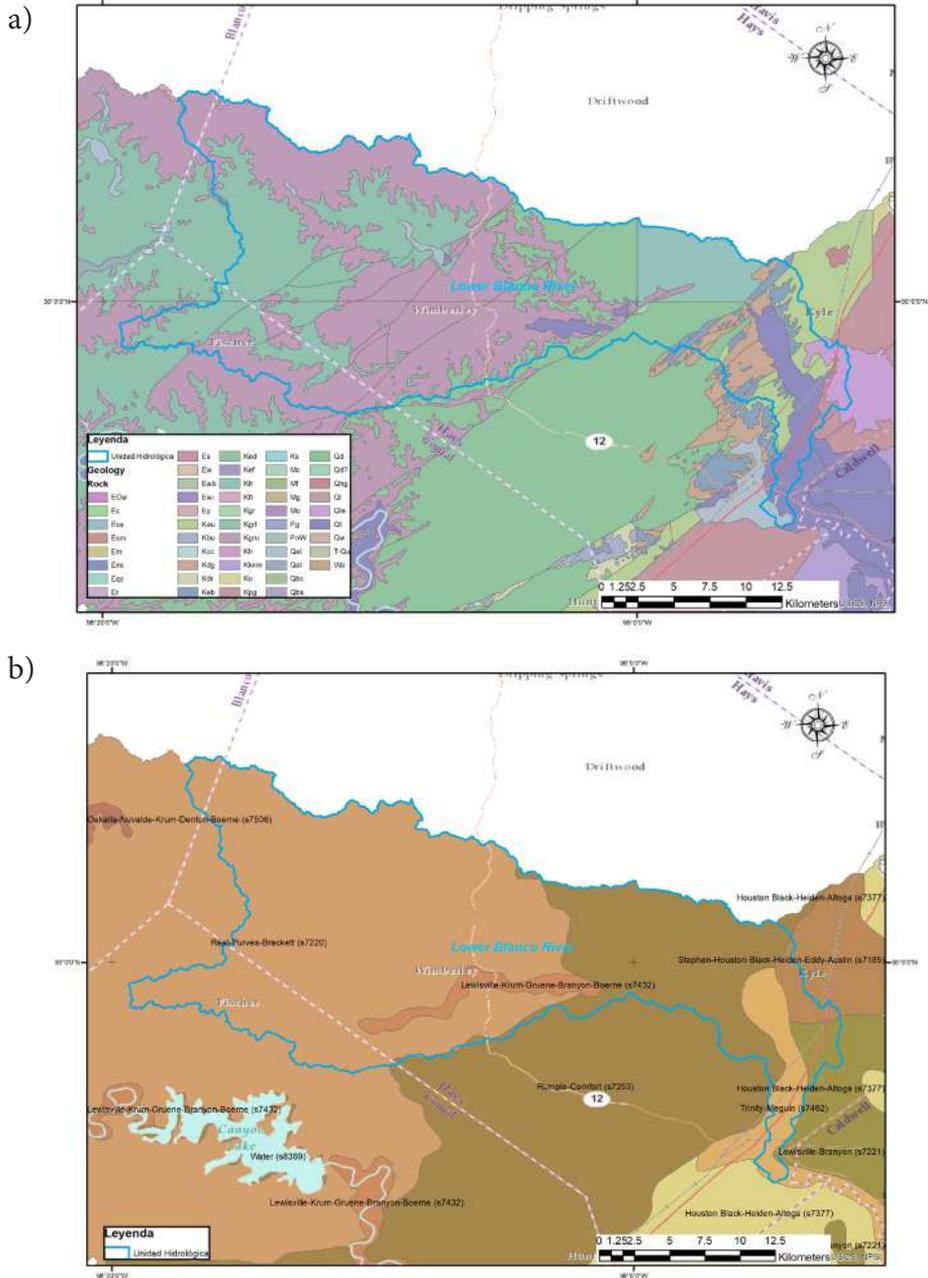
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 6. Mapas temáticos de la cuenca de Guadalupe - Región hidrológica de río Blanco: (a) Uso del suelo y vegetación; (b) Modelo digital de elevación, y (c) Pendientes



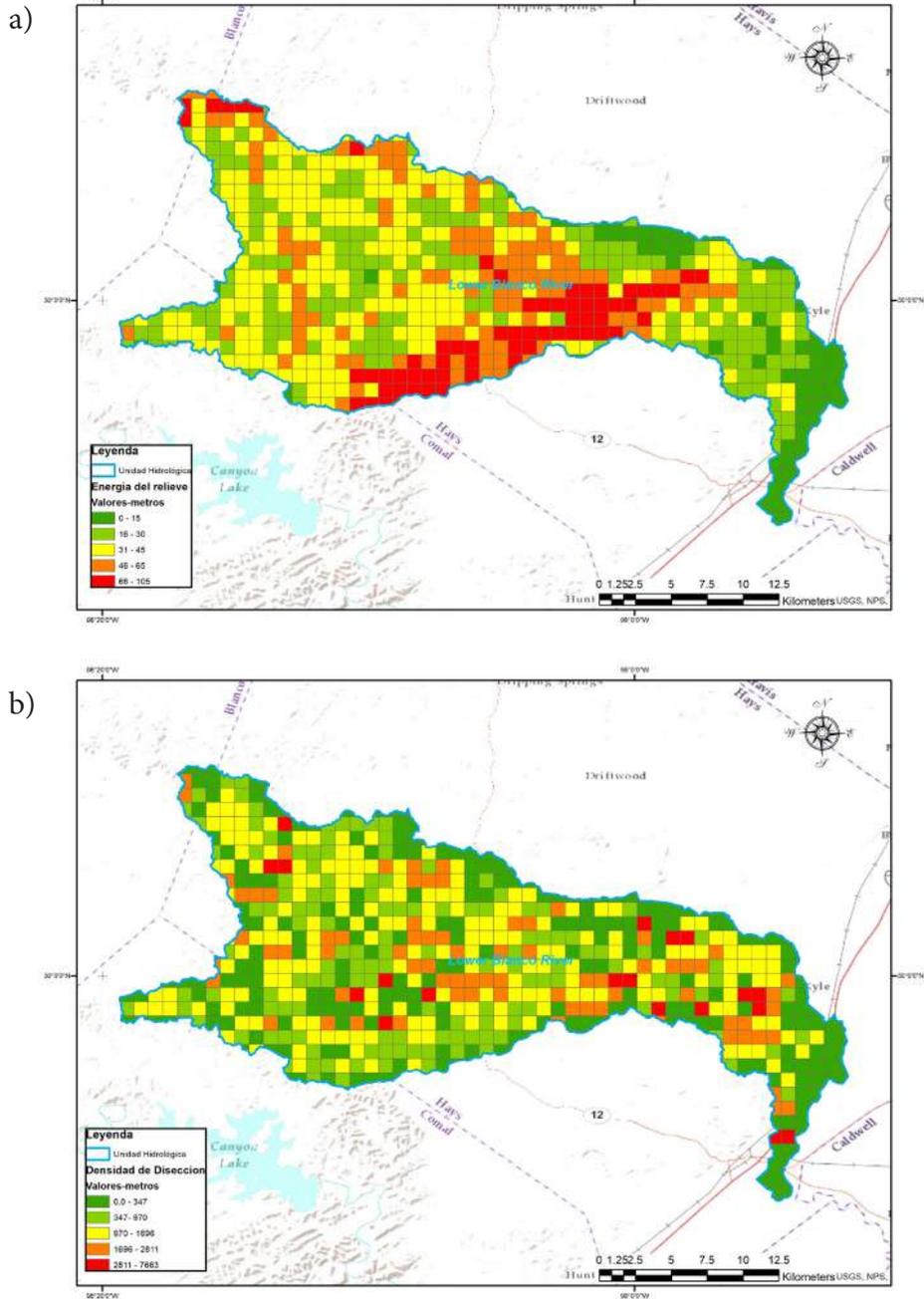
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 7. Mapas temáticos de la cuenca de Guadalupe - Región hidrológica de río Blanco:
 (a) Geología y (b) Tipo de Suelos



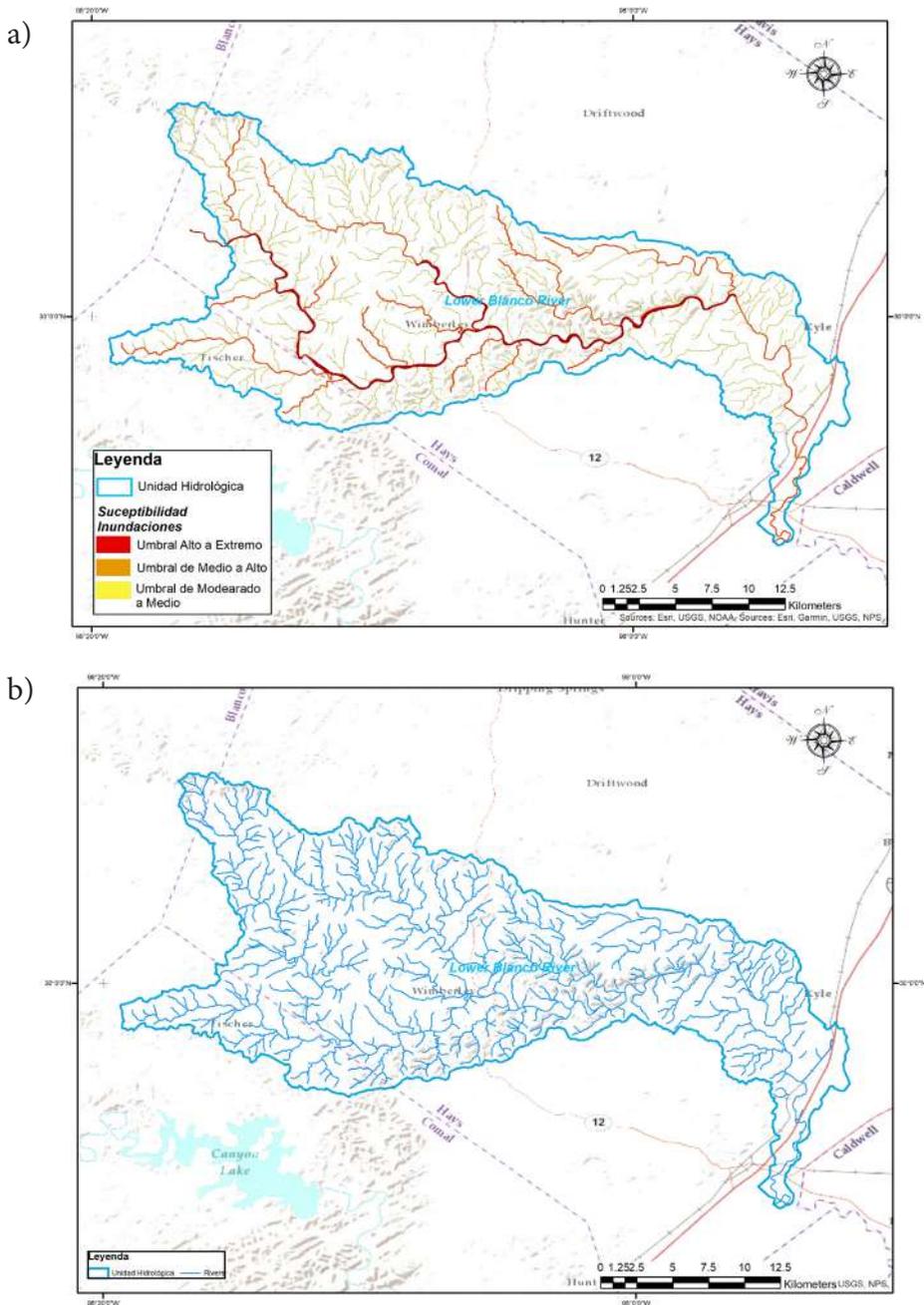
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 8. Mapas temáticos de la cuenca de Guadalupe - Región hidrológica de río Blanco: (a) Energía del relieve y (b) Densidad de disección



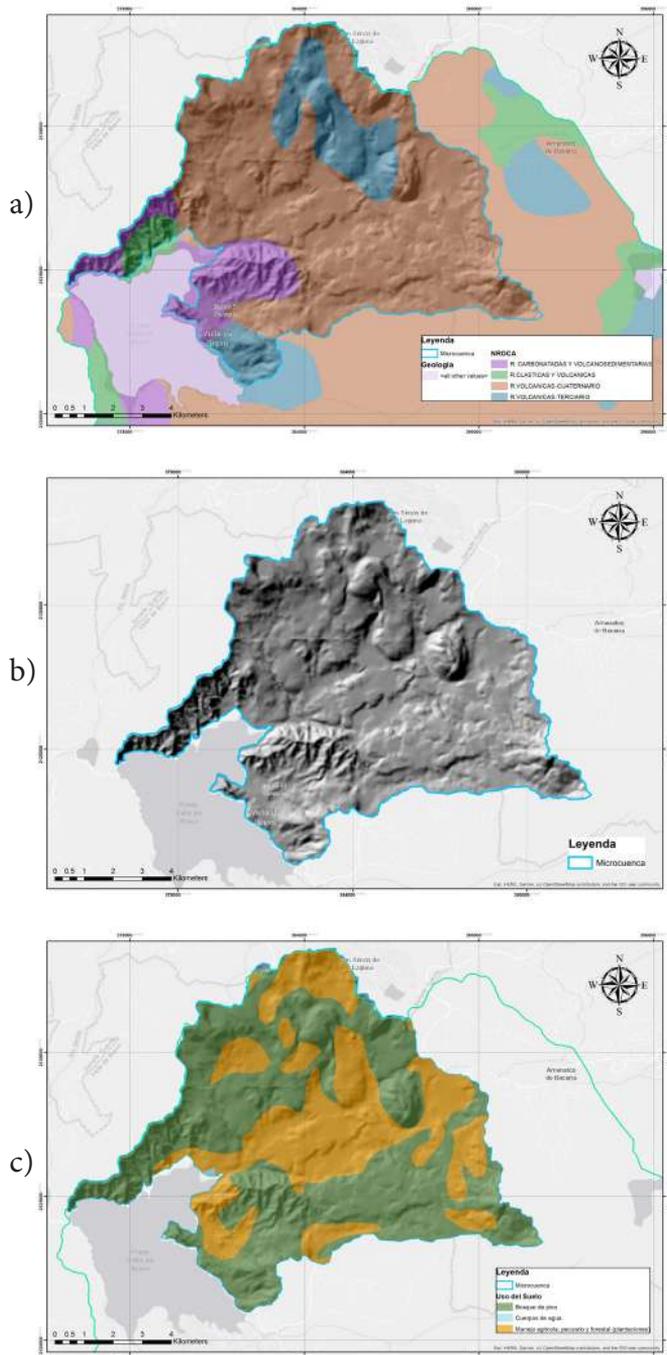
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 9. Mapas temáticos de la cuenca de Guadalupe - Región hidrológica de río Blanco:
 (a) Umbrales de inundación y (b) Red de drenaje



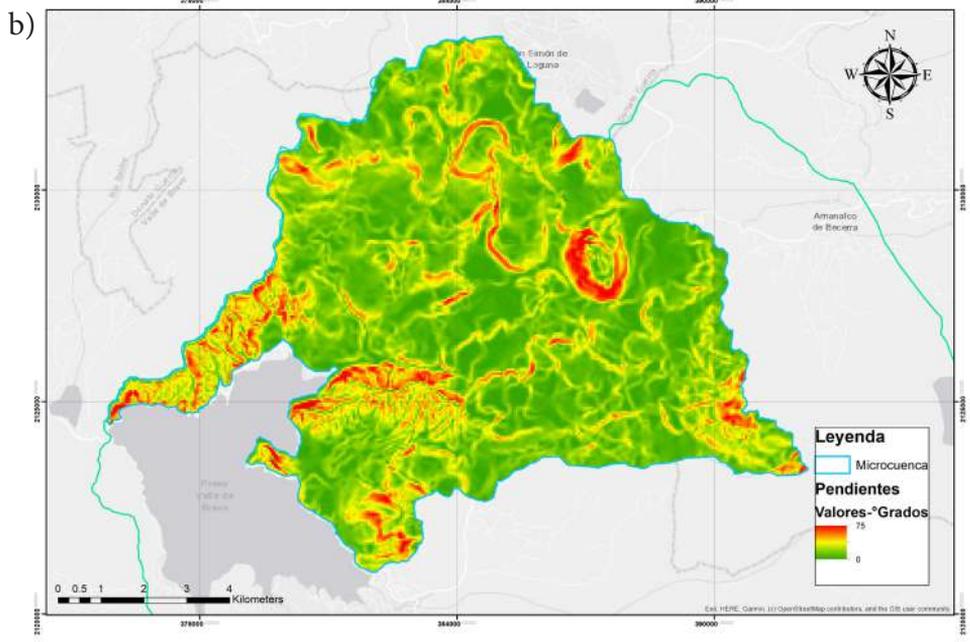
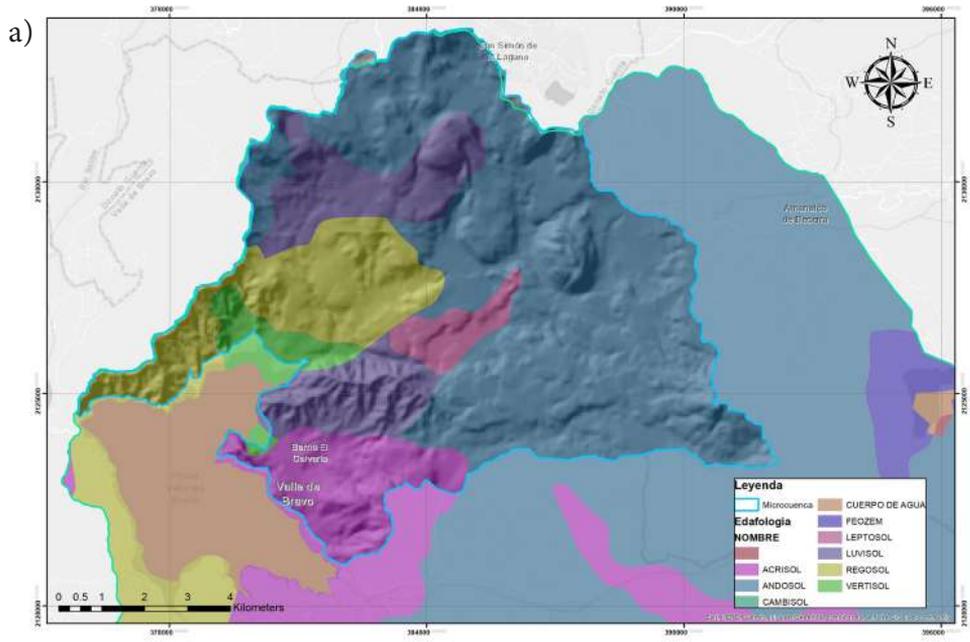
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 10. Mapas temáticos de la cuenca del río Cutzamala, subcuenca San Nicolás, Estado de México: (a) Geológico, (b) Modelo digital de elevación y (c) Uso del suelo y vegetación



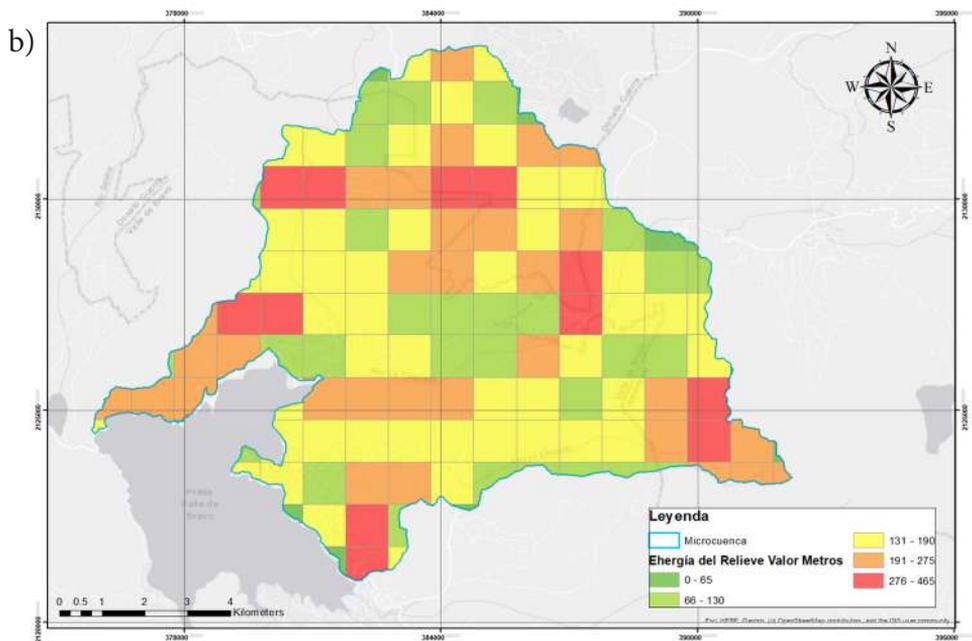
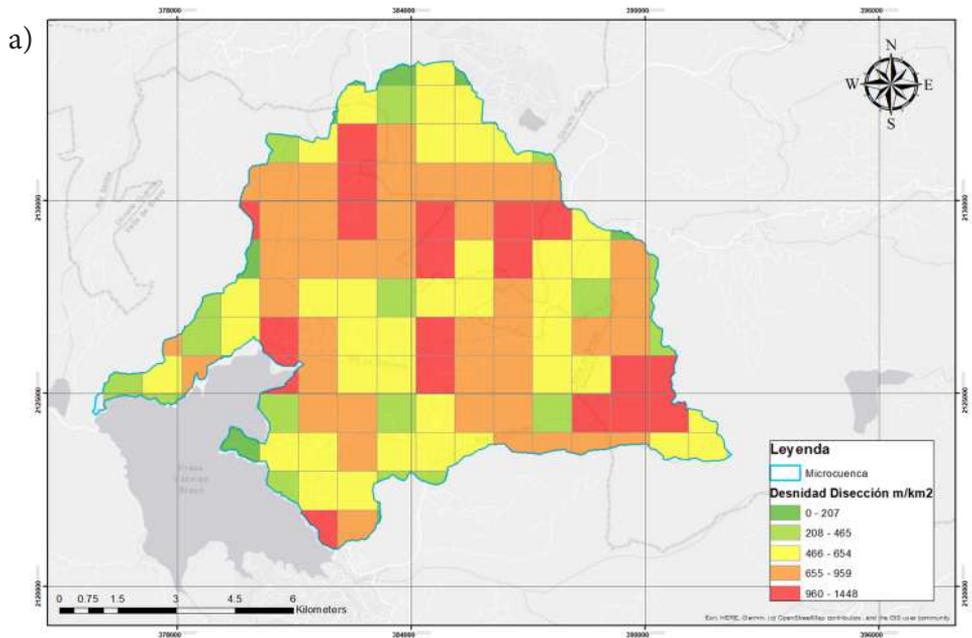
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 11. Mapas temáticos de la cuenca del río Cutzamala, subcuenca San Nicolás, Estado de México: (a) Tipo de suelos y (b) Pendientes



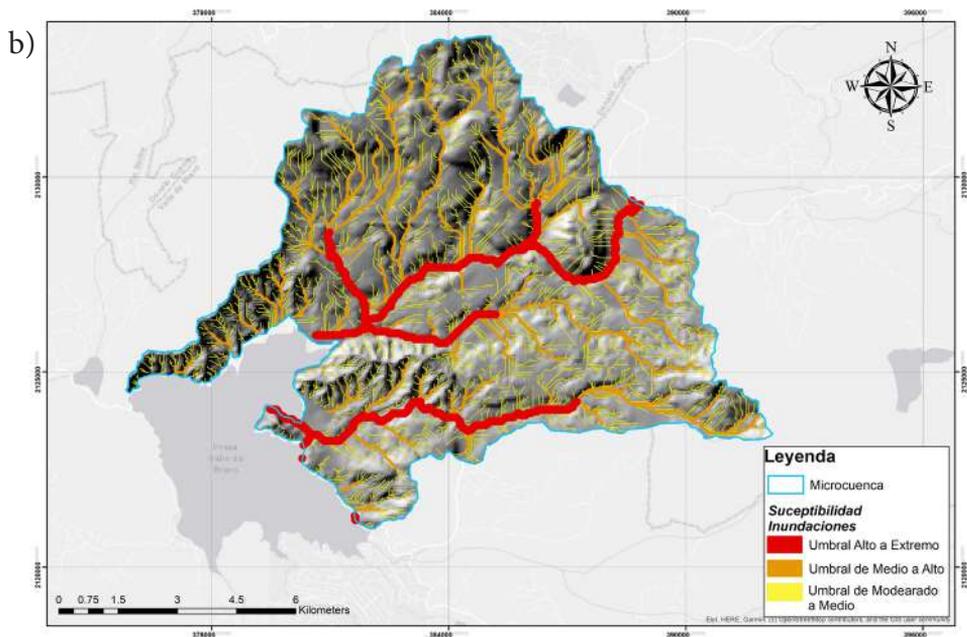
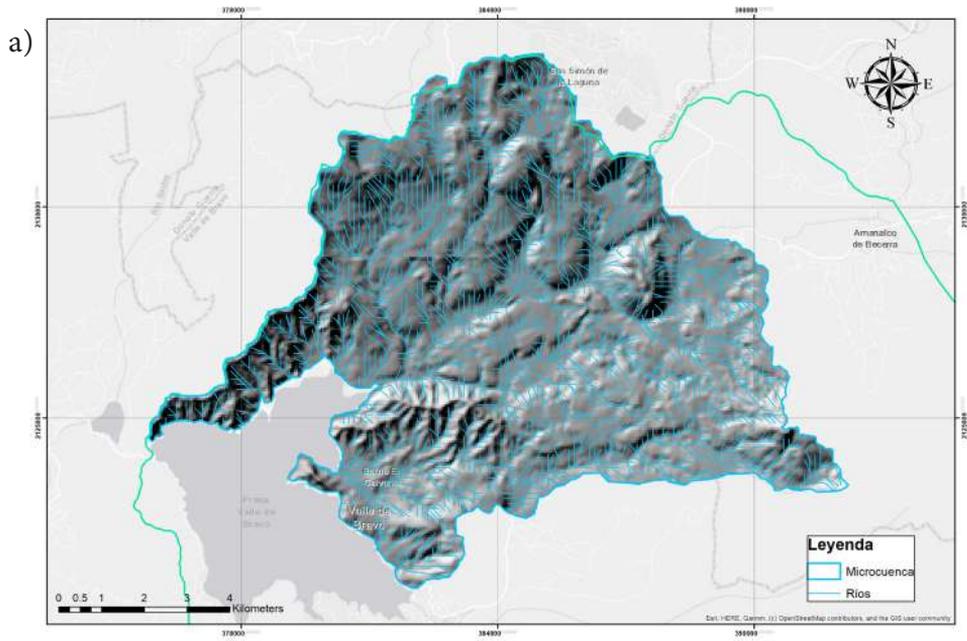
Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 12. Mapas temáticos de la cuenca del río Cutzamala, subcuenca San Nicolás, Estado de México: (a) Densidad de disección y (b) Energía del relieve



Fuente: Elaboración propia SIG/GIS (2023).

Figura 13. Mapas temáticos de la cuenca del río Cutzamala, subcuenca San Nicolás, Estado de México: (a) Red de drenaje y (b) Umbrales de inundación



Conclusiones

Para poder probar el algoritmo en más de un territorio y aplicarlo en su versión 2.0, se buscará la incorporación de proyectos estratégicos nacionales mediante el impulso de laboratorios nacionales de investigación y subvenciones. También es necesario continuar con el trabajo colegiado para poder desarrollar una red de monitoreo en tiempo casi real cuando se presente un evento extremo.

Se resalta la pertinencia de la inclusión de otras ciencias afines como la ingeniería, hidráulica, geofísica, realidad virtual, así como incluir otros enfoques y métodos para el estudio de inundaciones para tener escenarios más coherentes con la realidad. De igual manera, se necesitan estudios más detallados y multidiversos, como generar tasas de retorno a 1 000 años, así como un catálogo tipificado de amenazas por localidad.

Se reconoce que ante la incidencia de eventos inéditos, atípicos y extremos, la captación de agua puede ser superior a la media anual en 24, 48 y 72 horas. Mediante varios cálculos se puede obtener un espectro más amplio de los posibles umbrales de inundaciones.

Los planteamientos matemáticos y axiomáticos para el estudio de la geodinámica espacial, y en este caso fluvial, es un método procedimental sustentado con datos duros y ecuaciones matemáticas para desarrollar nuevas teorías, métodos y modelos del comportamiento del agua en el planeta. Una perspectiva holística y dialéctica científica son necesarias para la modelación de eventos hidrológicos que van de normales a extremos.

Por último, los postulados para el estudio de inundaciones buscan obtener resultados prácticos de una dinámica territorial fluvial, donde el objeto será siempre salvaguardar las vidas humanas y sus actividades cotidianas. Para esto se necesitan medidas estructurales y no estructurales que ayuden a una toma de decisiones más coherente con la realidad, y la implementación de políticas públicas que contribuyan a generar una cultura social más resiliente.

Reflexiones

La propuesta metodológica mediante la utilización del algoritmo se basa en nociones teóricas metodológicas que aportan, en primera instancia, a la conceptualización de las inundaciones en el espacio. Esto se aplica en el primer eslabón del estudio de los riesgos como la identificación y caracterización por tipo de amenaza. En este caso se busca aplicar a los fenómenos hidrometeorológicos.

Este algoritmo se encuentra en su fase de prueba y calibración para poder obtener de manera más puntual y automatizada los cálculos geoespaciales resultado de irregularidades pluviométricas y eventos extremos que generan la saturación de los causes que se desbordan y provocan inundaciones.

Para finalizar, este planteamiento algorítmico puede ser tomado en cuenta para el caso de México como una propuesta para la determinación de la peligrosidad por inundaciones en una guía o manual. En lo sucesivo se buscará desarrollar un código abierto para la geoespacialización automatizada que pueda generar mapas de salida con base en los atributos específicos por zonas de estudio específicos.

Agradecimientos

- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (Conahcyt).
- Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex).
- Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex).
- Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (Lanot), Unidad Facultad de Geografía, UAEMex.
- Cuerpo académico “Geotecnologías, ambiente y sociedades resilientes”, Facultad de Geografía, UAEMex.
- Texas State University (TXSU).
- Department of Geography and Environmental Studies, Texas State University.

- Texas Center Geographic Information Science, Texas State University.
- Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.
- Observatorio de Resiliencia ante el Riesgo por Inundaciones en Quintana Roo.

Bibliografía

- Argente, J. (2014). *Estudio del comportamiento hídrico de una cuenca hidrológica en Angola* [Trabajo de fin de grado, Ingeniería en Geomática y Topografía]. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Arroyo, L. (2012). Esbozo histórico de la geomorfología y su papel como ciencia aplicada en el contexto de los peligros naturales y los planes reguladores. *Revista Geográfica de América Central*, 1(48), 15-34.
- Aparicio-Mijares, F. J. (2004). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Bocco, G., y Palacio, J. L. (2012). La contribución de la investigación geomorfológica en la cuestión ambiental en México. *Boletín del Instituto de Geografía*, (83), 6-27.
- Canchola, Y. (2017). *Propuesta metodológica para el análisis y valoración geocológica del paisaje* [Tesis doctoral]. Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México.
- . (2021). *Antología comentada de un manual para trabajo de campo en Geografía Ambiental*. Universidad de Quintana Roo / Conacyt. https://dcit.uqroo.mx/DocGeografia/Libros/LIBRO%20CANCHOLA_%20junio%202021_ef.pdf
- Canchola, Y. et al. (2017). La geomorfología en el estudio del paisaje: Nociones teóricas-conceptuales de un binomio complementario e Indisoluble. *Revista Geográfica del Sur*, 7(10), 29-41.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos. (2016). *Descripción de los fenómenos hidrometeorológicos*. Cenapred. https://www.cenapred.unam.mx/es/documentosWeb/Enaproc/fenomenos_2016.pdf
- . Subdirección de Estudios Económicos y Sociales. (2019). *Impacto socioeconómico de los principales desastres* (Resumen ejecutivo). Cenapred. <http://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/>
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección* (2ª ed.). Rialps.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2018). *Estadísticas del agua en México*. Semarnat. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Conservation Biology Institute. (2024). *Data Basin*. <https://databasin.org/maps/new/#-datasets=0720eb83572e4c47a8004fefc74b33a5>
- Cortés, H. et al. (1998). Un recorrido a través del paisaje. *Cuadernos de Geografía*, 2(1-2).
- Council of Europe, Landscape Convention. (2024). <http://www.coe.int/t/dg4/culture-heritage/heritage/landscape/versionsconvention/spanish.pdf>

- Cuenca Amanalco-Valle de Bravo. (2023). <http://cuencaamanalcovalle.org/>
EM-DAT (The Emergency Events Database), Université Catholique de Louvain (UCL),
Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Guha, S. (s/f). www.emdat.be
- Espinosa, L. et al. (2011). *Modelos teóricos de la geomorfología aplicada* (Aula y Ambiente, 10).
- FAO. (2016). *Permeabilidad del suelo*. FAO. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm
- F. G., L. (2019, junio). El planeta desde la UAEM. *Universitaria*, 2(15), 32-33. <https://revistauniversitaria.uaemex.mx/article/view/12766>
- GOES Image Viewer. (2023). <https://www.star.nesdis.noaa.gov/goes/index.php>
- Guadalupe Regional Flood Control Group. (2024). *Resources*. <http://www.guadalupefpg.org/Resources.aspx>
- Huggett, J. (2007). *Fundamentals of geomorphology* (2a ed.).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación* (Escala 1:250 000: Serie V). México.
- ITC, Faculty Geo-Information Science and Earth Observation. (2023). <http://www.itc.nl>
- Mateo, J. et al. (2012). Paisaje y geosistema: Apuntes para una discusión teórica. *Geonorte*, (4), 249-260.
- Méndez, J. (2016). Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidrogeomorfológico. *Boletín del Instituto de Geografía*, 25-42.
- Mesa, O. (2018), Cuatro modelos de redes de drenaje. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(165). <https://doi.org/10.18257/raccefyn.641>
- Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT), Unidad Facultad de Geografía UAEMex. (2023). <http://facgeografia.uaemex.mx/LANOT.php>
- Landsat Science. (2023). <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>
- Lugo, J. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos*. UNAM-Instituto de Geografía.
- Lugo, J. H. (s/f). *La geomorfología moderna y su importancia en los estudios del relieve mexicano*. UNAM-Instituto de Geografía.
- Ocaña A., y Pérez M. (2011). *Matemáticas básicas*. Universidad de Bogotá / Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Romero, A., y Muñoz, J. (2002). *Concepción moderna del paisaje en el ámbito de la geografía*.
- Ruiz, E., y Martínez M. (2015). *Hidrología aplicada* (Tema 4: Infiltración y humedad del suelo). Universidad de País Vasco. <https://ocw.ehu.eus/mod/resource/view.php?id=36483>
- Te Chow, V., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Nomos.
- UNAM, Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). (2019). *Primer taller introductorio de imágenes de satélite GOES-16*.
- UNAM, Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). (2024). https://www.lanot.unam.mx/recursos_en.html

- Unesco. (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: Agua y empleo*. WWAP.
- U.S. Department of Agriculture (USDA). (2023). *Geospatial data gateway*. <https://gdg.sc.gov.usda.gov/>
- . Geographical Survey (USGS). (2024a). *All data*. <https://www.usgs.gov/products/data/all-data>
- . (2024b). *USGS 3D elevation program (3DEP) datasets from the national map*. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/4f70a58ce4b058caae3f8ddb>
- Sala, M. (1984). *Geomorfología actual: Guía conceptual, temática y bibliográfica*.
- Sentinel Online. (2023). <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>
- Texas Geographic Information Office. (2023, septiembre). *Texas Water Development Board (TWDB)*. <https://data.tnris.org/>
- Texas Parks and Wildlife Department (TPWD). (2023, septiembre). *Landescape Ecology Program*. <https://tpwd.texas.gov/landwater/land/programs/landscape-ecology/team/>
- Texas Water Development Board (TSDB). (2023). *Floodplain quilt input layer viewer*. <https://twdb.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=58cb-4d71256440e4ad2599d016636e69>
- Wainwright, J. y Mulligan, M. (Eds.). (2004). *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity* (pp. 5-68; 389-393). John Wiley & Sons.

