



Revisión de metodologías para determinar zonas de riesgo por inundación partir de SIG

Catalina Bedoya Posada

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

Julio Eduardo Cañón Barriga, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Bedoya Posada, 2022)
Referencia	Bedoya Posada, C. (2022). <i>Análisis de metodologías para la determinación de zonas de riesgo por inundación en Latinoamérica a partir de SIG</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XVII.



Elija un elemento.

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Objetivo general	10
Marco teórico	11
Metodología	15
Resultados	17
Discusión.....	19
Conclusiones	20
Referencias	30

Lista de tablas

Tabla 1 Recolección y sintetización de las metodologías elegidas	20
---	----

Lista de figuras

Figura 1 Pasos para desarrollo de la metodología.....	15
Figura 2 Pasos para la recolección de información.....	16
Figura 3 Metodología propuesta para la determinación de riesgo por inundación.....	26

Siglas, acrónimos y abreviaturas

PhD	Doctorado
SIG	Sistemas de Información Geográfica
ACM	Análisis de correspondencia múltiple
AHP	Análisis jerárquico
FHM	Flood Hazard Maps; Mapa de peligro de inundación
TWI	Topographic Wetness Index; Índice de humedad topográfica
TPI	Topographic Position Index; Índice de Posición Topográfica
LULC	Land Use Land Cover; Mapa de uso del suelo cobertura del suelo
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index Índice Diferencial Normalizado de Vegetación
NDWI	Normaliced Difference Water Index; Índice Diferencial Normalizado de Agua

Resumen

Factores como la frecuencia, intensidad y severidad de las inundaciones pueden incrementarse por efecto del cambio climático y de la presión urbana sobre los usos del suelo. Debido a estos cambios es importante recurrir a herramientas que ayuden en la planeación del territorio, identificando las posibles zonas inundables y los mejores sitios para el desarrollo de las edificaciones. En este sentido, los métodos de percepción remota tienen como objetivo ayudar en la identificación de dichas zonas, permitiendo la modificación o disminución del riesgo a partir del análisis de las condiciones existentes. Esta monografía revisa algunas de las metodologías de determinación de zonas de riesgo por inundación y estimación de pérdidas por daños, haciendo énfasis en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El mapeo de peligros de inundación ha experimentado un desarrollo significativo en términos de enfoque y capacidad del resultado para cumplir con el objetivo del estudio de predicción e identificación de regiones propensas o afectadas por inundación. Las metodologías revisadas dan una idea de la manera como actualmente se abordan este tipo de problemáticas, teniendo en cuenta las limitaciones y las incertidumbres asociadas con los métodos. Además, se analizan los enfoques en el manejo de las incertidumbres relacionadas con cada método y su desarrollo. Cabe resaltar la importancia de establecer los mecanismos gubernamentales y sistemas de alerta temprana en cada territorio para la toma de decisiones precisas y oportunas ante problemas relacionados con inundaciones, empleando las mejores prácticas de gestión y la adaptación de la toma de decisiones climáticas para construir infraestructuras resilientes.

Palabras clave: Inundación, SIG, ACM, AHP, FHM, Pendiente, Escorrentía, Precipitación, Usos del suelo, Mitigación, Riesgos, Amenaza.

Abstract

The frequency, intensity and severity of floods may increase as a result of climate change and urban pressure on land use; due to these changes, it is important to resort to tools that help in land planning, identifying possible flood zones and the best sites for building development. The objective of remote sensing methods is to help in the identification of such zones, allowing the modification or reduction of risk based on the analysis of existing conditions. Flood hazard mapping (FHM) has undergone significant development in terms of approach and capacity of the output to meet the objective of the study of prediction and identification of flood-prone or flood-affected regions. The consolidation of review studies on the application of methodologies based on Geographic Information Systems (GIS) for the determination of flood risk zones and loss estimation, gives an idea of the way in which these types of problems are currently addressed, the limitations and uncertainties associated with the methods. In addition, the approaches in the management of uncertainties related to each method and its development are analyzed. It is important to highlight the importance of establishing governmental mechanisms and early warning systems in each territory for making accurate and timely decisions in the face of flood-related problems, using best management practices and adapting climate decision-making to build resilient infrastructures.

Key words: Flooding, GIS, ACM, AHP, FHM, Slope, Runoff, Precipitation, Land use, Mitigation, Risks, Hazard.

Introducción

Las crecientes dificultades de manejo ambiental asociadas al cambio climático obligan a explorar con urgencia medidas de mitigación y adaptación a los cambios esperados en los entornos sociales, de infraestructura y económicos. La confluencia entre los escenarios de cambio climático proyectados para la región y la experiencia de las ciudades latinoamericanas en materia de riesgos hidrometeorológicos implica grandes desafíos en materia de gestión urbana. Cada vez se hace más evidente que los sistemas meteorológicos están cambiando, los niveles del mar aumentan y los fenómenos meteorológicos son cada vez más extremos y severos. No obstante, es fundamental analizar la forma en que han sucedido los eventos a través del tiempo y qué desastres han ocasionado, pues estos datos permitirán definir las futuras ocurrencias de desastres naturales (Barton, J. R., & Irarrázaval, F, 2016).

Actualmente, se evidencian en mayor proporción los efectos de los cambios antropogénicos como consecuencia de las variaciones en el uso del suelo, asociados a su vez a los gases de efecto invernadero que generan condiciones favorables para la ocurrencia de eventos naturales más extremos (Sánchez, & Reyes., 2015). Un claro ejemplo de esto son los riesgos de inundación pluvial, fluvial y costera en un territorio, producto de fuertes lluvias, tormentas tropicales y/o huracanes (Vergara et al., 2011), que generan un exceso de agua, sobrepasando los límites de los ríos o la capacidad de los alcantarillados existentes. Las fuertes lluvias normalmente se ven acompañadas de una serie de impactos económicos, sociales y ambientales (Ribas Palom, Anna & Saurí, David., 2022). Los daños causados por las inundaciones en todo el mundo han aumentado considerablemente en los últimos años (Inundaciones y cambio climático, 2018). Por lo anterior, esta monografía analiza algunos artículos científicos que precisan rutas metodológicas de determinación de zonas de riesgo por inundación a partir de los SIG. Gracias a estas herramientas se pueden determinar las oportunidades que hay para mejorar la implementación de dichas metodologías. Pues los métodos asistidos por percepción remota parten de diferentes lineamientos, pero coinciden en que el peligro de inundación debe reconocerse a partir de parámetros físicos y geográficos. Ahora bien, identificar la amenaza ante un evento de inundación representa un insumo básico para el conocimiento de riesgo (Perles-Roselló et al., 2018).

Este tipo de estudios se hacen relevantes ya que a partir de los métodos de percepción remota se obtiene información del territorio y, tras un análisis de imágenes satelitales, se recopilan datos que al ser procesados permiten una estandarización de parámetros y posteriormente se logra llevar a cabo un seguimiento de una determinada zona ante un desastre natural. Es decir, la información en tiempo real que proveen algunos satélites se vuelve fundamental para la toma de decisiones ante cualquier emergencia (Vales et al., 2010). Pues es así como la aparición en escena de los SIG ha ofrecido una nueva variedad de métodos y herramientas que, en concordancia con los acelerados procesos de desarrollo urbano, han fortalecido la cultura de la planeación en la reducción de sus tiempos de análisis, la adquisición de datos y la toma de decisiones. (Jose, C. T., 2020).

El riesgo por inundación se ve reflejado y se asocia a las variables de los peligros socialmente inducidos por los procesos de urbanización (Merlinsky & Tobías, 2016; Narvañez Quiñonez et al., 2020). Las variables alfanuméricas contenidas en las tablas de atributos, las variables discontinuas de los archivos vectoriales y las variables continuas de los archivos ráster se encuentran dispuestas en formatos digitales, estas se pueden gestionar, editar, procesar y representar en múltiples programas que permiten procesar esta información (Liu et al., 2017; Rigaux et al., 2002). La localización, distribución y asociación de variables en diferentes capas a través de métodos de análisis espacial y herramientas automatizadas permiten calcular los niveles de riesgo y vulnerabilidad; es por esto por lo que el empleo de modelos de elevación digital y modelos hidrológicos son de gran importancia para el estudio, prevención y mitigación de inundaciones urbanas (Estrada & Pacheco, 2012). Parámetros estudiados a través de los SIG como lo son la intensidad de lluvias, gastos máximos, acumulación de flujo, usos de suelo, altitudes y pendientes, y distancias de asentamientos urbanos respecto a los cauces de ríos posibilitan la definición de zonas inundables (Dou et al., 2018).

Objetivo general

Analizar algunas metodologías actuales basadas en SIG para la determinación de zonas de riesgo por inundación y estimación de pérdidas en Latinoamérica.

Objetivos específicos

- Identificar investigaciones que han implementado los SIG para la determinación de zonas de riesgo.
- Evaluar cómo se han implementado los SIG para el análisis de riesgo.
- Describir las oportunidades para mejorar las metodologías de análisis de riesgos mediante los SIG.

Marco Teórico

El cambio climático es uno de los detonadores para que se presenten variaciones significativas en las amenazas de la naturaleza, entre ellas las inundaciones (Gabriela, P., & Bravo, S., 2020) En la actualidad, las inundaciones se modifican en todo el mundo, por lo que cada vez hay un mayor número de estudios que reflejan estos detalles, logrando enfatizar en el modelamiento del impacto del cambio climático en las inundaciones, centrándose generalmente en su magnitud y frecuencia (Booij, 2005 ; Gain et al., 2013; Raff et al., 2009).

Sin embargo, las proyecciones indican que el resultado de los detonantes en el mediano plazo se ve reflejado en las variaciones de factores meteorológicos, como lo son las fuertes precipitaciones, pues estas pueden cambiar los patrones y modificar las características de las inundaciones. Clasificar las inundaciones en diferentes tipos puede ubicarlas en un contexto climático más amplio y ayudar a explorar los cambios en futuros casos. Los tipos de inundaciones tendrán implicaciones tanto en los sistemas ambientales como en los económicos y sociales (Gain et al., 2013; Garner et al., 2015). Las inundaciones son función tanto de las condiciones meteorológicas de cantidad y distribución de las precipitaciones como de las características de las coberturas del suelo, y es ahí cuando la planificación espacial, apoyada en herramientas SIG, se considera un elemento relevante para hacer frente al riesgo de inundación.

El mapeo de inundaciones es un proceso que comprende la elaboración de mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de inundación. en el proceso de construcción de estos se deben tener en cuenta las variaciones a considerar de un país a otro, dependiendo de las pautas, legislación y especificidades del país (Ekeu-wei et al., 2018). El mapeo y seguimiento de inundaciones proporciona una línea base para un buen análisis de las tendencias históricas de las inundaciones y la identificación de ubicaciones que podrían ser vulnerables y susceptibles. Por lo tanto, estos mapas de amenazas y riesgos de inundación se consideran herramientas importantes para comunicar el riesgo y dar a conocer en qué condiciones se encuentra una zona de estudio, posteriormente entregándola a los organismos gubernamentales de interés (Spachinger et al., 2008).

El peligro por desastres naturales lleva implícita su amenaza y vulnerabilidad (SNGRD, 2017). Recientemente, se han venido utilizando métodos de aprendizaje automático descriptivos que se centran en las fases de respuesta y recuperación del ciclo de gestión de desastres, mientras que los métodos de aprendizaje automático predictivo se concentran en proporcionar evaluaciones de pronóstico de un desastre natural, mejorando los procesos de preparación y mitigación del ciclo de gestión de desastres (Yu et al., 2018). Así mismo, las evaluaciones de peligro de inundación que emplean metodologías descriptivas de aprendizaje automático se enfocan principalmente en la fase de respuesta para estimar la extensión y profundidad de la inundación actual (Antzoulatos et al., 2022).

Actualmente, los organismos de planificación encargados de la mitigación de riesgos naturales buscan la solución a las inundaciones mediante estudios de planificación de desarrollo. Sin embargo, aunque existan los conocimientos y los datos básicos en forma de mapas, la cantidad de información necesaria para el manejo de riesgos naturales, especialmente en el contexto de la planificación del desarrollo integrado, sobrepasa la capacidad de los métodos manuales y hace casi obligatorio el uso de técnicas computarizadas. Es allí donde los sistemas de información geográfica (SIG) toman relevancia, ya que se convierten en un aliado para la recolección, organización y procesamiento de datos geográficos, facilitando el análisis de los mismos de una manera más asertiva pues estos a su vez permiten identificar aspectos particulares del objeto de estudio, facilitando la construcción de mapas con información que revela las relaciones espaciales entre diferentes atributos como por ejemplo, desastres naturales, recursos naturales y fenómenos socioeconómicos, y consecuentemente puede ayudar a la planificación y evaluación del impacto de los eventos naturales sobre las actividades del ser humano (Ribas Palom, Anna & Saurí, David., 2022). Los SIG se han convertido en un aliado en la gestión del riesgo de inundaciones y, en general, pues a partir del análisis de los recursos se crean políticas y se estudia la exposición al peligro, el ritmo de la urbanización en particular está favoreciendo la ocupación de áreas de riesgo, y el riesgo a su vez continúa aumentando. Los SIG son un aliado en la gestión del riesgo de inundaciones, ya que a partir del análisis geoespacial de los recursos se crean políticas y se estudia la exposición al peligro, el ritmo de la urbanización y la incidencia de la ocupación de áreas de riesgo (López-Ortiz, Melgarejo, & Fernández-Aracil, 2020). Por otra parte, dependiendo de la magnitud del evento, algunas zonas se vuelven inaccesibles, y es allí donde las imágenes satelitales

y aéreas de una región se vuelven estratégicas para determinar la magnitud y los impactos de las inundaciones (Syifa et al, 2019).

Las imágenes obtenidas pasan por varias técnicas de procesamiento, que sirven para hacer predicciones sobre la posibilidad de que ocurra una próxima inundación en una región en particular. Inicialmente, la tecnología de detección remota extrae las características de la región inundada y proporciona información sobre los próximos posibles eventos (Machuca, F., & Moreno., 2020). Con la ayuda de las imágenes obtenidas y los datos de teledetección, se pueden construir mapas de riesgo de inundación (Ferrerías, R. M., 2019). Dentro de las imágenes obtenidas, hay imágenes de alta calidad que se derivan de mecanismos de detección remota, como la tecnología de radar de apertura sintética (SAR), que proporciona imágenes de alta resolución de la tierra y los depósitos de agua, incluso en condiciones climáticas adversas y de poca luz. Además, estas técnicas de análisis geoespacial se complementan con tecnologías de identificación de patrones como la inteligencia artificial (IA) para lograr el mapeo automático del riesgo de inundación (Syifa et al., 2019; Makker, Ramanathan & Dinesh, 2019).

Sin embargo, la obtención de ciertas imágenes se relaciona con la facilidad de extracción de este tipo de información costo–beneficio, que indica qué tanto poder adquisitivo tiene un ente gubernamental o una entidad dedicada a la investigación, ya que aquellas imágenes cuya resolución es mejor, tienen un precio asociado.

En esta revisión se encontraron diversas metodologías que se apoyaron en diferentes satélites. Esta información facilita la construcción de procedimientos que permiten determinar las áreas de riesgo por inundación. Las metodologías evaluadas en su mayoría se caracterizaron por la evaluación del peligro de inundación y el mapeo de las áreas de inundación. Estas metodologías ponen de manifiesto el entendimiento de factores como la acumulación de flujo, la capacidad de drenaje, la elevación del terreno, los usos del suelo, el coeficiente de escorrentía, la pendiente, entre otros, que permiten entender y analizar cómo se deberían desarrollar las planificaciones y asentamientos poblacionales (Dash & Sar, 2020), además de comprender los diferentes escenarios o causas que pueden originar una inundación.

Los análisis de riesgo de inundación aplicados, especialmente en áreas urbanas, muy a menudo plantean la pregunta de qué tan detallado debe ser el análisis para dar una cifra realista del riesgo esperado, pues los métodos utilizados en la investigación y las aplicaciones prácticas van desde enfoques muy básicos, con numerosos supuestos simplificadores (Moreno, C., Oscar, P., & Bermúdez Ordoñez, A., 2016), hasta aplicaciones muy sofisticadas que exigen datos y tiempo de cálculo tanto en la amenaza como en la vulnerabilidad del riesgo (Rafiei-Sardooi, et.al., 2021).

La revisión de literatura se enfocó en hallar una ruta metodológica para resolver de manera mediática el problema de las inundaciones, ya que se encuentra que el desarrollo de estas metodologías en conjunto es similar, ya que estudian parámetros que condicionan el riesgo por inundación.

Algunos de los estudios emplean el análisis multicriterio, basado en la selección de una serie de variables que determinan, a partir de los SIG, las zonas con mayor riesgo por inundación, entre ellos se tiene el estudio desarrollado por Fernández & Lutz (2010), en las ciudades de Yerba Buena y Tucumán en Argentina, donde a partir de las capas de pendientes, elevación, profundidad del nivel freático, tipo de cobertura y distancia a los canales de descarga, variables que direccionan las corrientes de agua de la zona urbana, y una combinación lineal ponderada, usan la aplicación de algoritmos que combinan factores en combinaciones lineales ponderadas para obtener zonas con mayor amenaza de inundación, las cuales efectivamente se encontraban asociadas a zonas bajas, extensas, de bajas pendientes, con presencia de drenajes y con un mantenimiento deficiente.

Proceso similar emplea Hagos et al. (2022), esta vez en la cuenca alta del río Awash, en Etiopía, donde a partir de información similar como la pendiente, elevación, densidad de drenajes, proximidad a los ríos, precipitación, textura del suelo y usos del suelo (coberturas), se evalúa y compara entre sí cada una de las variables a partir de criterios establecidos en la metodología empleada (implementación de la escala de Saaty). Tomando como base la revisión bibliográfica, las observaciones de campo y juicio de expertos, se determinaron los pesos de cada una de las variables, pues el análisis jerárquico permitió determinar las zonas con una mayor propensión a las inundaciones y, a partir del uso de los SIG, espacializar los resultados y generar el mapa de peligrosidad por inundación. En cuanto al proceso de validación y calibración del modelo, lo

hicieron mediante los puntos obtenidos del registro de eventos históricos, tanto por entrevistas a los habitantes como evidencias de campo.

En el desarrollo y búsqueda de metodologías, se encuentra cierta similitud en la aplicación de la metodología de análisis jerárquico (Saaty, 1980) para la obtención de los pesos de variables con mayor influencia en la zonificación de las áreas de riesgo por inundación, que es empleada en India por Dash y Sar (2020), a partir de criterios como: acumulación de flujo, capacidad de drenaje, elevación, profundidad del agua subterránea, uso del suelo, coeficiente de escorrentía, pendiente, geología, y la calificación asignada a cada uno los parámetros a partir del criterio de expertos para obtener unos pesos finales de las variables y obtener el mapa de riesgos por inundación con SIG. Este caso fue validado a través del comparativo realizado con las zonas de inundación obtenidas mediante el método Otsu (Antón Rodríguez, A., & Martínez Izquierdo, E., 2019), que considera un umbral definido del NDVI y NDWI para la determinación de dichas zonas en una fecha de evento específico empleando imágenes satelitales (i.e., Landsat-8, OLI) y una combinación de bandas (i.e., verde y SWIR1), con las cuales se define la correspondencia de las áreas en ambos modelos.

Otro elemento importante que complementa los métodos anteriormente descritos está relacionado con el uso más extendido de las herramientas de machine learning para abordar una variedad de temáticas, evidenciado por ejemplo en el estudio de Rafiei-Sardooi et al. (2021) para evaluar el riesgo por inundación de la ciudad de Jirfot en Irán, en el que usan métodos como support vector machine, random forest, yand boosted regression tree, en combinación con métodos de toma de decisiones con el método TOPSIS, a partir de variables como: pendiente, elevación, ángulo de la pendiente, lluvia, distancia a las calles, distancia a los ríos, uso del suelo/cobertura del suelo, distancia a los drenajes, densidad de drenaje urbano y número de curva, y factores socioeconómicos y características de la infraestructura como densidad de la población, densidad urbana, calidad de las construcciones, edad de las construcciones y condiciones socioeconómicas, definir un mapa de vulnerabilidad mediante el método de toma de decisiones y los factores descritos, y un mapa de peligro por inundación a partir del método machine learning y las variables anteriores, los cuales dieron origen al mapa de riesgo de inundación urbana del área de estudio.

Por su parte, en cuanto al desarrollo de la zonificación de las áreas con amenaza o peligro por inundación, algunos de los artículos abordan dicho proceso a partir de un análisis multicriterio y operación entre capas que representan las variables de influencia, las cuales son calificadas por el criterio de expertos y comparadas entre sí a partir del método Satty, que contempla los siguientes pasos (Mendoza, et al., 2019):

1. Una verificación de consistencia en los pesos asignados a los criterios definidos:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

Donde CR= Razón de consistencia, CI= Índice de consistencia, y RI= Índice aleatorio que varía de acuerdo con el número de criterios considerados.

2. El cálculo del índice de consistencia, usando la siguiente expresión:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Donde λ_{\max} = Es el valor propio de la matriz de comparación, y n= Número total de criterios.

Pues el proceso de jerarquía analítica o analytic hierarchy process (AHP) es un método de toma de decisiones que consiste en organizar criterios de opción múltiple en una jerarquía para evaluar sus valores relativos (comparando soluciones alternativas para cada criterio) y para decidir sobre una clasificación general de las alternativas según costo, beneficio y riesgo. La técnica de toma de decisiones multicriterio se ha utilizado ampliamente para resolver problemas complejos mediante el ajuste de pesos adecuados para diferentes criterios de entrada (Parsian et al., 2021).

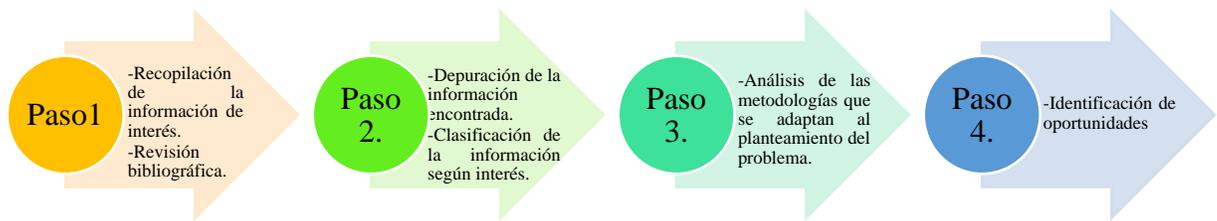
Por otro lado, las metodologías referentes al uso del *machine learning* para la determinación de las zonas susceptibles a las inundaciones, generalmente se basan en el uso de softwares como R, donde se desarrollan los algoritmos de los métodos, como el caso del *random forest*, que corresponde a un modelo predictivo, formado por árboles de decisiones individuales entrenado a partir de una muestra de datos, donde dicha predicción se genera agregando las predicciones de todos los árboles individuales del modelo.

En cuanto al modelo *boosted regression tree*, igualmente utilizado, combina el algoritmo de árbol de decisiones y el modelo *boosting*. El primero es un método de árbol de clasificación y regresión y el segundo una técnica de promedio de modelos, los cuales, en conjunto, permiten ajustar iterativamente muchos árboles de decisión a los datos de entrenamiento para mejorar el rendimiento del modelo. Finalmente, el algoritmo *support vector machine*, basado en el principio de minimización de errores estructurales que genera un hiperplano lineal óptimo para dividir los datos de entrenamiento en clases y distinguir dos grupos (inundación y no inundación) (Rafiei-Sardooia et al., 2021).

Metodología

Durante el desarrollo de este trabajo se construyó una propuesta para la identificación de metodologías que han involucrado el uso de sensores e imágenes satelitales para la determinación de zonas de riesgo por inundación. A continuación, se describen los pasos que se consideraron para lograr el objetivo general de la revisión.

Figura 1. Pasos para desarrollo de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la búsqueda bibliográfica de artículos con metodologías que incluyeran la implementación de los sensores remotos y SIG para el análisis de zonas de inundación por aumento en la precipitación en Latinoamérica. Dentro de los mayores motores de búsqueda para la información científica se destacan ScienceDirect, Google Scholar, y SpringerLink, en las cuales se encuentra artículos, libros, etc. Todo tipo de material bibliográfico que provee información especializada.

A partir del uso de las palabras clave como lo fueron: “Flood”, “risk”, “GIS”, Machine Learning”, luego se combinaron utilizando frases clave como “Determination of flood risk zones using GIS” & “ Flood hazard assessment and mapping using GIS” entre otras palabras que condicionaran la búsqueda, los artículos seleccionados fueron escritos en inglés, y se buscó información sobre metodologías que se emplean actualmente para el análisis y la determinación de zonas de riesgo por inundación a partir de sistemas de información geográfica.

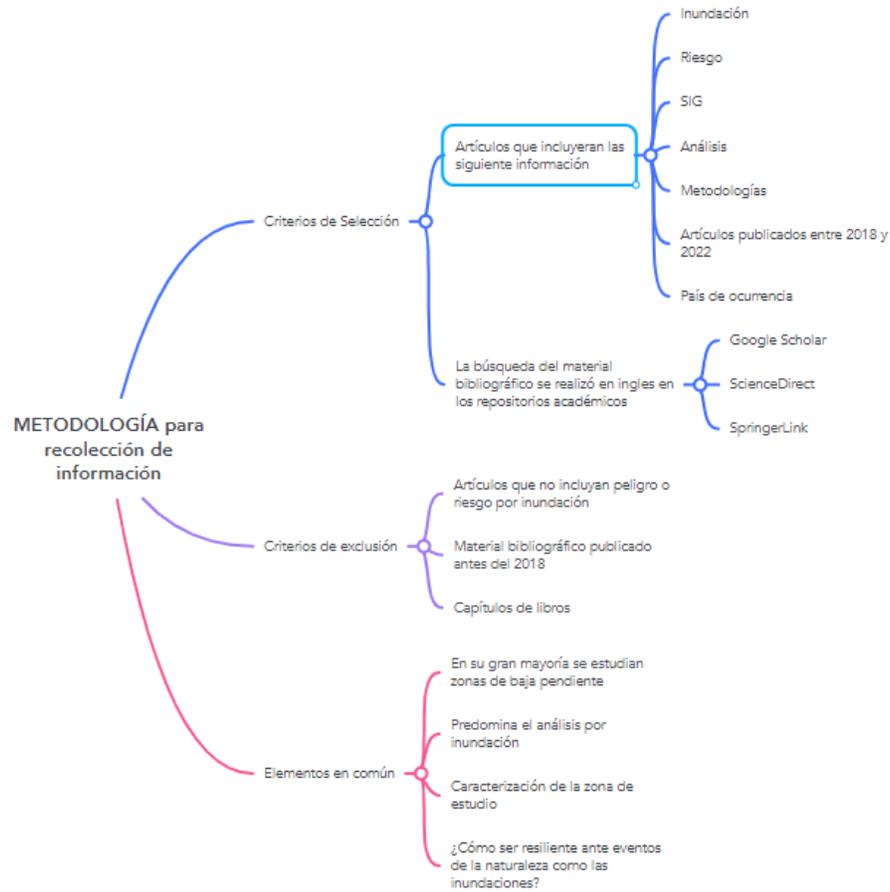
Luego de encontrar artículos que incluyeran estas palabras, se procedió a acotar aún más la búsqueda, pues se seleccionó el material cuyas metodologías empezaron a ser desarrolladas a partir del 2018, cabe aclararse que dentro del material recopilado se incluye una metodología que fue

realizada en el 2010, con el fin de visualizar cómo se ha ido actualizando este tipo de estudios a través del tiempo.

La información obtenida de las bases de datos bibliográficas se depuró para acotar las metodologías que incluyen estimación de pérdidas. Las referencias seleccionadas se analizaron en términos de su aporte a las metodologías para la estimación de pérdidas por inundación en Latinoamérica. Finalmente, se identificaron oportunidades para la implementación de dichas metodologías en el contexto latinoamericano.

En medio de la búsqueda de datos, se depuró la información con el fin de abarcar de manera general qué metodologías existen para mitigar el riesgo por inundación, entender si las emplean en los procesos de planificación de ciudad, o si actualmente solo se emplean para el entendimiento de las zonas que presentan dicha condición. Hoy en día se evidencia más la necesidad de planificar el territorio debido a la presión de los asentamientos humanos cerca de las zonas de amenaza, lo que pone en riesgo los recursos físicos, sociales y económicos (Robayo, 2014).

A continuación, se detalla brevemente el proceso realizado en la depuración de las metodologías encontradas:

Figura 2. Pasos para la recolección de información

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

La **Tabla 1.** muestra la consolidación de las metodologías depuradas en la revisión de literatura. Estas metodologías dan cuenta brevemente de cómo se analizan y determinan las zonas de riesgo por inundación en los diferentes estudios. Cabe resaltar que la mayoría de los estudios parten de una base común en cuanto a los factores y variables considerados en el mapeo de las zonas de inundación.

La revisión bibliográfica realizada es de suma importancia ya que da cuenta de lo que se está desarrollando, qué metodologías se están usando y en qué zonas del mundo es más fuerte este tipo de investigación.

Tabla 1. *Recolección y síntesis de las metodologías revisadas.*

ARTICULOS DE INVESTIGACIÓN	AUTOR	DATOS	MÉTODO	SATÉLITE / INSUMO GEOGRÁFICO	AÑO	RESULTADOS
Flood hazard assessment and mapping using GIS integrated with multi-criteria decision analysis in upper Awash River basin, Ethiopia	Hagos, Y.G., Andualem, T.G., Yibeltal, M. et al.	* Pendiente * Elevación * Densidad de drenaje	* Proceso de Jerarquía analítica (AHP) * Mapa de peligro de inundación	STRM	2022	* Predicción de inundaciones * Alertas tempranas * Prácticas de gestión que podrían implementarse de manera regular y sostenibles.
A GIS-based model for urban flood inundation	Chen, J., Hill, A. A., & Urbano, L. D.	* Escorrentía superficial * Elevación * Tormentas * Datos topográficos * Elevación (DEM)	* Modelo Green Ampt * GUFIM	LIDAR	2009	El modelo reconoce la importancia de la topografía detallada y su información de flujo asociada.
GIS-based multi-criteria modelling of flood risk susceptibility in Port Louis, Mauritius: Towards resilient flood management	Doorga, J. R. S., Magerl, L., Bunwaree, P., Zhao, J., Watkins, S., Staub, C. G., Rughooputh, S. D. D. V., Cunden, T. S. M., Lollchund, R., & Boojhawon, R.	* Ríos * Carreteras * Vías de agua bloqueadas * Proximidad a los ríos * Densidad de drenaje * Uso del suelo * Pendiente * Tipo de suelo * Curvatura * Índice de pobreza * Zonas económicas	Enfoques geospaciales 1. Métodos estadísticos 2. Modelado hidrológico 3. Análisis multicriterio (MCDA) - Proceso de Jerarquía analítica (AHP)	Google Earth	2022	Desarrollo y entendimiento de cuáles factores se relacionan con las amenazas; hallando ponderaciones que se utilizan para estimar los niveles de riesgo de inundaciones en términos de impactos físicos, vulnerabilidad social y pérdidas económicas.

Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index	Dash, P., & Sar, J.	<ul style="list-style-type: none"> * Acumulación de flujo * Capacidad de drenaje * Elevación * Profundidad del agua subterránea * Uso del suelo * Coeficiente de escorrentía * Pendiente * Geología * Elevación * Densidad de drenaje 	<ul style="list-style-type: none"> * Proceso de Jerarquía analítica (AHP) * Índice de riesgo de inundación (FHI) 	Landsat - 8 ASTER DEM	202 0	Mapeo de áreas con susceptibilidad a inundación en el área de captación de Mfoundi para una mejor gestión ambiental en base a diez parámetros del entorno natural.
Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau	Nsangou, D., Kpoumié, A., Mfonka, Z., Ngouh, A. N., Fossi, D. H., Jourdan, C., Mbele, H. Z., Moucherou, O. F., Vandervaere, J.-P., & Ndam Ngoupayou, J. R.	<ul style="list-style-type: none"> * Precipitaciones pluviales * Pendiente * Distancia al río * Húmedas topográficas * Conductividad hidráulica (permeabilidad del suelo) * Nivel freático * Presencia de zonas pantanosas * Geología * Cobertura del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> * Cálculo del Índice de Riesgo de Inundaciones (FHI) * Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) * Cálculo del área bajo la curva (AUC) 	Landsat - 8 OLI SRTM	202 2	Identificación de factores que influyen considerablemente en el fenómeno de las inundaciones; que para este caso son la cobertura del suelo, la elevación y la geología.
Flood risk and damage analysis in urban areas of Zimbabwe. A case of 2020/21 rain season floods in the city of Gweru	Matsa, M., & Mupepi, O.	<ul style="list-style-type: none"> * Cuestionarios * Entrevistas * Observaciones 	<ul style="list-style-type: none"> * Sondeos de datos cualitativos y cuantitativos 	ASTER	202 2	Identificación de áreas históricamente reservadas como sumideros de carbono y que ahora se han convertido en áreas residenciales debido a la pausa en las inundaciones en los últimos años. La mayoría de las áreas residenciales están ubicadas en áreas que son moderada o altamente susceptibles a inundaciones.
Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis	Fernández, D. S., & Lutz, M. A.	<ul style="list-style-type: none"> * Modelo digital del terreno * Pendiente * Distancia a los canales de descarga * Profundidad freática * Capas de uso del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> * Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) * Análisis multicriterio (MCDA) * Método de enfoque Monte Carlo (MC) 	ArcGIS	201 0	Análisis de variables que controlan el direccionamiento del agua cuando los caudales máximos superan la capacidad del sistema de drenaje.

Geotecnologías aplicadas para el mapeo de áreas de inundación y riesgo de inundación en áreas urbanizadas	Santos, C. C. P. dos, & Neto, M. L. da S.	* Relieve * Altimetría * Pendiente * Curvatura vertical y horizontal del terreno * Tipo de suelo	* Mapa hipsométrico * Índice de vulnerabilidad social (IVS) * Matriz de relación	QGIS TOPODATA	2021	* Se analiza la máxima concentración de flujos, y máxima dispersión * Se analiza la distribución espacial de vulnerabilidad ya que esto no solo está asociado con la fragilidad ambiental, sino con el riesgo de exposición de los habitantes al peligro de eventos de origen natural, debido a las circunstancias de exposición.
Mapeo de peligros y riesgos de inundación mediante la aplicación de un marco de aprendizaje automático explicable utilizando imágenes satelitales y datos GIS	Antzoulatos, G., Kouloglou, I.-O., Bakratsas, M., Moutzidou, A., Gialampoukidis, I., Karakostas, A., Lombardo, F., Fiorin, R., Norbiato, D., Ferri, M., Symeonidis, A., Vrochidis, S., & Kompatsiaris, I.	* Topografía * Pendiente * Aspecto (Direcciones de flujo) * Velocidad del agua * Índice de humedad topográfica (TWI) * Índice de posición topográfica (TPI) * Land Use Land Cover (LULC)	* Support Vector Machine (SVM) * Naive Bayes (NB) * Red neuronal (NN)	Sentinel-1 GRD-IW	2022	Se puede concluir que bajo diferentes patrones Land Use Land Cover (LULC), las condiciones de escorrentía pueden variar. Se logra estimar la susceptibilidad a las inundaciones y el desarrollo de mapas. La baja frecuencia temporal de adquisición de imágenes satelitales, que dificulta el monitoreo en tiempo real de una inundación en evolución
Evaluating urban flood risk using hybrid method of TOPSIS and machine learning	Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Choubin, B., Mosavi, A. H., & Clague, J. J.	* Elevación (DEM) * Elevación * Ángulo de la pendiente * Lluvia * Distancia a las calles * Distancia a los ríos * Uso del suelo / cobertura del suelo * Distancia a los drenajes urbanos	* Machine learning * Métodos de toma de decisiones (TOPSIS) * Mapa de riesgo	ArcGIS	2021	Los drenajes urbanos hacen parte de los factores determinantes para el cálculo de riesgo por inundación, el método de aprendizaje automático que mejor se acomodó al modelo fue el RF, este es un algoritmo creado a partir de un árbol que depende de vectores aleatorios. Este tiene una alta precisión predictiva y se puede usar en grandes bases de datos.

Flood Hazard Mapping Using Fuzzy Logic, Analytical Hierarchy Process, and Multi-Source Geospatial Datasets	Parsian, S., Amani, M., Moghimi, A., Ghorbanian, A., & Mahdavi, S.	*DEM *Pendiente *Lluvia *Distancia al río principal *TWI (Índice de humedad topográfica) *Mapa LULC(Usos del suelo y cobertura del suelo) *Tipo de suelo *NDVI *Tasa de erosión	*Fusificación de los datos de entrada * Proceso de Jerarquía analítica (AHP) *Análisis de superposición difusa	Sentinel-1	2021	La generación de un mapa confiable de riesgo de inundación utilizando conjuntos de datos y algoritmos de detección remota y GIS. Adicionalmente, generar un mapa confiable de riesgo de inundación utilizando conjuntos de datos y algoritmos de detección remota y GIS.
--	--	---	--	------------	------	--

Fuente: Elaboración propia.

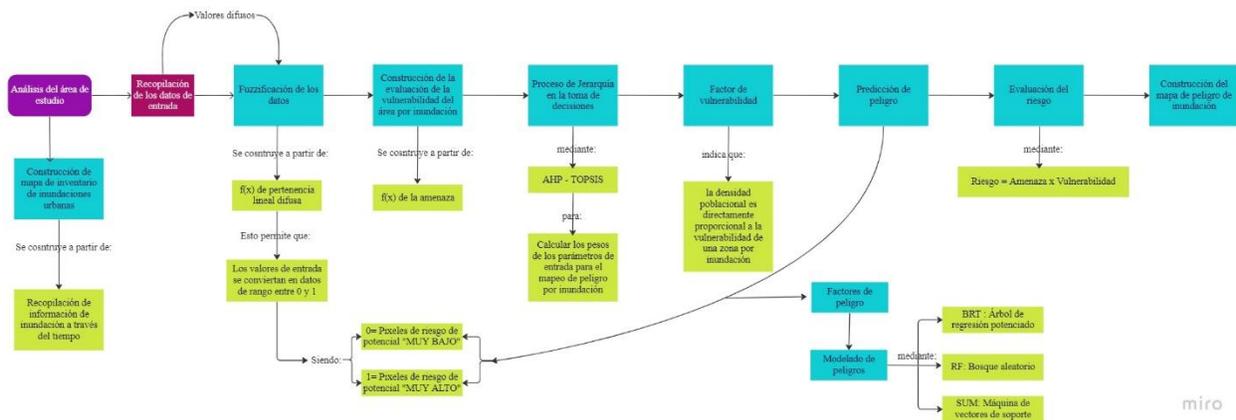
Las metodologías descritas en la **Tabla 1.** se clasificaron para identificar los satélites e insumos geográficos más usados y entender los métodos que se utilizan para el procesamiento de datos de entrada y mapear qué nuevas propuestas metodológicas adoptan un lenguaje de aprendizaje automático o inteligencia artificial, pues la solución para obtener una ruta metodológica se deriva de la construcción de un marco conceptual que comprenda técnicas de procesamiento de imágenes y *machine learning* para mapear las inundaciones de manera más eficiente.

Dentro de la información analizada, se propone una ruta metodológica general que reúne muchas de las características aquí descritas. Según las metodologías analizadas para llevar a cabo un estudio de riesgo por inundación se deben considerar los siguientes pasos:

1. Evaluar el tipo de inundación: fluvial, pluvial, urbana, etc.
2. Identificar el área de afectación o área de estudio.
3. Contar con datos de entrada como: pendiente, elevación del terreno, uso del suelo, densidad de drenaje, tipo de suelo y régimen de lluvias.
4. Ampliar la información contenida en los datos de entrada.
 - Tener definida una metodología.
 - Construir el mapa de riesgo.
 - Realizar validaciones del mapa generado.

Para el último punto, se requiere definir una metodología que sintetice algunos de los pasos anteriormente mencionados. Para la construcción de esta monografía, como caso particular se propone una fusión de las metodologías desarrolladas por Rafiei-Sardooi et al. (2021) y Parsian et al. (2021) (ver figura 3), quienes tienen como interés desarrollar un mapa de riesgo de inundación utilizando conjuntos de datos y algoritmos de detección remota y GIS, a partir de métodos de toma de decisiones.

Figura 3. Metodología propuesta para la determinación de riesgo por inundación



Fuente: Elaboración propia con base en las metodologías propuestas por Rafiei-Sardooi et al. (2021) y Parsian et al. (2021).

A partir de esta ruta se pretende generar un procedimiento eficiente que abarque la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo de inundaciones, permitiendo generar un mapa confiable que al estudiar las áreas propensas a inundación permita accionar mecanismos que ayuden en la gestión ante una posible inundación.

Conclusiones

En la información analizada, se identificó que una manera de mitigar los daños por inundación es adoptar medidas que ayuden con la delimitación de áreas susceptibles a inundaciones, ya sea por factores propios del sitio o por la contribución antropogénica a estas zonas. Esta es una buena opción que permite prevenir daños futuros, dando claridad de cuáles son los factores que favorecen las inundaciones en estas zonas.

De acuerdo con los métodos empleados en la bibliografía consultada, se consideran las inundaciones a partir de la influencia de diferentes variables, como: pendiente, elevación, nivel freático, densidad de drenaje, coberturas, tipos de suelos, distancia a drenajes, coeficiente de escorrentía, precipitación, entre otras. Estas variables deben estar debidamente espacializadas, variando con las particularidades de cada estudio desarrollado tanto como de la disponibilidad de la información.

De esta revisión se concluye que, aunque hay patrones relevantes que influyen en la probabilidad de que ocurra una inundación, cada caso es independiente. Entender la captura de los datos preliminares es importante porque estos condicionan este riesgo, pero se vuelve un caso de estudio particular porque cada zona es diferente, en algunos casos puede influir más la pendiente, y en otros, el tipo de suelo.

Se vuelve relevante el uso de herramientas de análisis multicriterio (MCDA) y el uso de Análisis Jerárquico (AHP) que corresponde a una excelente alternativa para su implementación rápida y asequible para las diferentes entidades territoriales en sus diferentes niveles, generando un insumo de gran utilidad en la definición e identificación de las zonas de amenaza por inundación. Es importante tener en cuenta que se debe contar con la evaluación de la información a partir del criterio de un experto, con el fin de definir la mayor influencia de las variables sobre el caso de estudio, además de la implementación de recursos como los sistemas de información geográfica (SIG), que en conjunto se vuelven herramientas para obtener resultados cercanos a la realidad y permiten desarrollar mapas de susceptibilidad a inundaciones.

No obstante, si bien se plantea el análisis multicriterio como la alternativa más usada por su fácil implementación, se deja abierta la posibilidad de emplear las herramientas de *machine*

learning, que dependen en gran medida del conocimiento y capacidad instalada de las entidades, resaltando los buenos resultados observados en los casos estudiados.

Cabe resaltar, que la erosión del suelo juega un papel importante en las inundaciones y la mayoría de las metodologías no han utilizado este parámetro directamente, pues la tasa de erosión sirve como parámetro en la generación de mapas de riesgo de inundación porque el tipo de suelo y el NDVI se pueden utilizar para considerar los impactos de la erosión del suelo en las inundaciones.

Los estudios revisados no solo consideran el riesgo, sino que, en su gran mayoría, tienen en cuenta las variables socioeconómicas y el impacto ambiental tras la ocurrencia de un evento por inundación: Se logra identificar que existe un gran interés en el mundo por entender y analizar cómo gestionar las inundaciones urbanas, pues actualmente este creciente interés se puede ver enmarcado por la adaptación al cambio climático.

Finalmente, se deja planteado un proceso metodológico que permite la identificación y delimitación de las zonas de riesgo por inundación a partir de SIG, donde se consideran varias alternativas de acuerdo con las necesidades del caso, particularidades y recursos existentes, pero que permite contar al final del proceso con un insumo importante para los tomadores de decisiones y asimismo para la correcta gestión del territorio.

Referencias

- Abbas, S.H. & Srivastava, R.K. & Tiwari, R. & Ramudu, P. (2009). GIS-based disaster management: A case study for Allahabad Sadar sub-district (India). *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 20, 33-51. 10.1108/14777830910922433. (https://www.researchgate.net/publication/242345218_GIS-based_disaster_management_A_case_study_for_Allahabad_Sadar_sub-district_India)
- Abid, Sheikh Kamran & Sulaiman, Noralfishah & Putri, Nur & Nazir, Umber. (2020). A review on the application of remote sensing and geographic information system in flood crisis management. 7. 2020. 10.31838/jcr.07.16.58. (https://www.researchgate.net/publication/342802115_A_review_on_the_application_of_remote_sensing_and_geographic_information_system_in_flood_crisis_management)
- Adams, P. R., & Adams, G. R. (1984). Mount Saint Helens's ashfall: Evidence for a disaster stress reaction. *American Psychologist*, 39(3), 252–260. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.39.3.252>
- Ahmad, D., & Afzal, M. (2019). Household vulnerability and resilience in flood hazards from disaster-prone areas of Punjab, Pakistan. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03743-9>. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-019-03743-9>)
- Antón Rodríguez, A., & Martínez Izquierdo, E. (2019). Análisis evaluativo de índices espectrales en imágenes de satélite. *Oa.upm.es*. <https://oa.upm.es/54220/>
- Antzoulatos, G., Kouloglou, I.-O., Bakratsas, M., Moutzidou, A., Gialampoukidis, I., Karakostas, A., Lombardo, F., Fiorin, R., Norbiato, D., Ferri, M., Symeonidis, A., Vrochidis, S., & Kompatsiaris, I. (2022). Flood hazard and risk mapping by applying an explainable machine learning framework using satellite imagery and GIS data. *Sustainability*, 14(6), 3251. <https://doi.org/10.3390/su14063251>
- Barton, J. R., & Irrázaval, F. (2016). Adaptación al cambio climático y gestión de riesgos naturales: buscando síntesis en la planificación urbana. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 87–110. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000100006>
- Booij, M. J. (2005). Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology*, 303(1–4), 176–198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.013>
- Chan, S. W., Abid, S. K., Sulaiman, N., Nazir, U., & Azam, K. (2022). A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system. *Heliyon*, 8(3), e09075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>

- Chen, J., Hill, A. A., & Urbano, L. D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*, 373(1–2), 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.021>
- Dash, P., & Sar, J. (2020). Identification and validation of potential flood hazard area using GIS - based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12620>
- Doorga, J. R. S., Magerl, L., Bunwaree, P., Zhao, J., Watkins, S., Staub, C. G., Rughooputh, S. D. D. V., Cunden, T. S. M., Lollchund, R., & Boojhawon, R. (2022). GIS-based multi-criteria modelling of flood risk susceptibility in Port Louis, Mauritius: Towards resilient flood management. *International Journal of Disaster Risk Reduction: IJDRR*, 67(102683), 102683. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102683>
- Dou, X., Song, J., Wang, L., Tang, B., Xu, S., Kong, F. y Jiang, X. (2018). Flood risk assessment and mapping based on a modified multi-parameter flood hazard index model in the Guanzhong Urban Area, China, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(4), 1131–1146. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1429-5>
- Ekeu-wei, I. T., & Blackburn, G. A. (2018). Applications of Open-Access Remotely Sensed Data for Flood Modelling and Mapping in Developing Regions. *Hydrology*, 5(3), 39. <https://doi.org/10.3390/hydrology5030039>
- Estrada, V. y Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con hec-hms en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 94-105.
- Ferreras, R. M. (2019). Evaluación de inundaciones mediante teledetección. *Geoinnova*. <https://geoinnova.org/blog-territorio/evaluacion-de-inundaciones-mediante-teledeteccion/>
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1–4), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Gabriela, P., & Bravo, S. (2020). Amenazas de cambio climático, métricas de mitigación y adaptación en ciudades de América Latina y el Caribe documentos de proyectos. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46575/4/S2000867_es.pdf
- Gain, A. K., Apel, H., Renaud, F. G., & Giupponi, C. (2013). Thresholds of hydrologic flow regime of a river and investigation of climate change impact—the case of the Lower Brahmaputra river Basin. *Climatic Change*, 120(1–2), 463–475. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0800-x>
- Garner, Grace & Van Loon, Anne & Prudhomme, Christel & Hannah, David. (2015). Hydroclimatology of extreme river flows. *Freshwater Biology*. 10.1111/fwb.12667. (https://www.researchgate.net/publication/281404116_Hydroclimatology_of_extreme_river_flows)

- Hagos, Y.G., Andualem, T.G., Yibeltal, M. et al. Flood hazard assessment and mapping using GIS integrated with multi-criteria decision analysis in upper Awash River basin, Ethiopia. *Appl Water Sci* 12, 148 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01674-8>
- Hawchar, L., Naughton, O., Nolan, P., Stewart, M. G., & Ryan, P. C. (2020). A GIS-based Framework for High-Level Climate Change Risk Assessment of Critical Infrastructure. *Climate Risk Management*, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100235>
- Inundaciones y cambio climático (2018). Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid. 105 pp https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/libro-cambio-climatico-inundaciones-web-06092019_tcm30-499367.pdf
- Johnsson, I., & Balstrøm, T. (2021). A GIS-based screening method to identify climate change-related threats on road networks: A case study from Sweden. *Climate Risk Management*, 33, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100344>
- Jose, C. T. (2020). Determinación de zonas inundables mediante SIG y elaboración de propuestas de mitigación en la cabecera Cantonal Daule. - 181.198.35.98
- Liu, J., Wang, X., Zhang, B., Li, J., Zhang, J. y Liu, X. (2017). Storm flood risk zoning in the typical regions of Asia using GIS technology, *Natural Hazards*, 87(3), 1691-1707. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2843-1>
- López-Ortiz, M. I., Melgarejo, J., & Fernández-Aracil, P. (2020). Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes.
- Machuca, F., & Moreno. (2020). Detección temprana de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del Río Ariari, caso de estudio: municipio de Fuente de oro - Meta. *Handle.net*. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/11349/25292>
- Makker, M., Ramanathan, R., & Dinesh, S. B. (2019). Post Disaster Management Using Satellite Imagery and Social Media Data. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/CSITSS47250.2019.9031042>
- Matsa, M., & Mupepi, O. (2022). Flood risk and damage analysis in urban areas of Zimbabwe. A case of 2020/21 rain season floods in the city of Gweru. *International Journal of Disaster Risk Reduction: IJDRR*, 67(102638), 102638. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102638>
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., & Garcia, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348–360. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052019000300348>
- Merlinsky, M. G. y Tobías, M. A. (2016). Inundaciones y construcción social del riesgo en Buenos Aires, Cuaderno del cendes, 33, 45-63. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-25082016000100004&lng=es&nrm=iso

- Morán, M. (2015). Cambio climático. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Moreno, C., Oscar, P., & Bermúdez Ordoñez, A. (2016). Análisis del riesgo por inundación utilizando herramientas sig para la cuenca del río quito. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2896/moreno_cristian_trabajodegrado_2016.pdf.pdf?sequence=1
- Munawar, H. S., Hammad, A. W. A., & Waller, S. T. (2022). Remote Sensing Methods for Flood Prediction: A Review. *Sensors*, 22(3), 960. <https://doi.org/10.3390/s22030960> (<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/960>)
- Nsangou, D., Kpoumié, A., Mfonka, Z., Ngouh, A. N., Fossi, D. H., Jourdan, C., Mbele, H. Z., Mouncherou, O. F., Vandervaere, J.-P., & Ndam Ngoupayou, J. R. (2022). Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau. *Scientific African*, 15(e01043), e01043. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01043>
- Parsian, S., Amani, M., Moghimi, A., Ghorbanian, A., & Mahdavi, S. (2021). Flood hazard mapping using fuzzy logic, Analytical Hierarchy Process, and multi-source geospatial datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4761. <https://doi.org/10.3390/rs13234761>
- Perles-Roselló, M. J., Gallejos-Reina, A., & Cantero-Prados, F. (2006): “Análisis del ajuste del área inundable obtenida mediante evaluación integrada de peligrosidad de inundación y peligros asociados”, *Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 28, pp. 527-545.
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Choubin, B., Mosavi, A. H., & Clague, J. J. (2021). Evaluating urban flood risk using hybrid method of TOPSIS and machine learning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 102614. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102614>
- Raff, D. A., Pruitt, T., & Brekke, L. D. (2009). A framework for assessing flood frequency based on climate projection information. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11), 2119–2136. <https://doi.org/10.5194/hess-13-2119-2009>
- Rehman, S., Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., & Ahmed, B. B. (2019). A systematic review on approaches and methods used for flood vulnerability assessment: framework for future research. *Natural Hazards*, 96(2), 975–998. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-03567-z>
- Ribas Palom, Anna & Saurí, David. (2022). Las soluciones basadas en la naturaleza como estrategias en la gestión del riesgo de inundación. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*. 819. 10.7203/CGUV.108-9.23829.
- Robayo Mejía, L. A. (2014). Análisis de amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a través de sistemas de información geográfica. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.

- Said, N., Ahmad, K., Regular, M., Pogorelov, K., Hasan, L., Ahmad, N., & Conci, N. (2019). Natural disasters detection in social media and satellite imagery: a survey. Undefined. <https://www.semanticscholar.org/paper/Natural-disasters-detection-in-social-media-and-a-Said-Ahmad/57bd27694fa2bb6e8edad96af9272d06db908f34>
- Samanta, S., Pal, D. K., & Palsamanta, B. (2018). Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science*, 8(2). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0710-1>
- Sánchez, L., & Reyes, O. (2015). CEPAL. Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39781/S1501265_es.pdf
- Santos, C. C. P. dos, & Neto, M. L. da S. (2021). Geotecnologías aplicadas para el mapeo de áreas de inundación y riesgo de inundación en áreas urbanizadas. *Revista Latino-Americana de Ambiente Construido & Sustentabilidade*, 2(6). <https://doi.org/10.17271/rlas.v2i6.2982>
- SNGRD. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf>
- Steinschneider, S., & Brown, C. (2013). A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments. *Water Resources Research*, 49(11), 7205–7220. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20528>
- Syifa, M.; Parque, SJ; Achmad, AR; Lee, C.-W.; Eom, J.,(2019). Mapeo de inundaciones usando imágenes de teledetección y técnicas de inteligencia artificial: un estudio de caso en Brumadinho, Brasil. *Costa J. Res.* 2019, 90, 197–204.
- United Nations. (s.f.). De Estocolmo a Kyoto: Breve historia del cambio climático | Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/chronicle/article/de-estocolmo-kyotobreve-historia-del-cambio-climatico>
- Vales, J.J., Carpintero, I.R., Granado, L., Méndez, E., Montoya, G., Pino, I., Prieto, R., Giménez de Azcarate, F., Cáceres, F. y Moreira, J.M. (2010): Estudios de áreas afectadas de inundación en las cuencas del Guadalquivir y Guadalete a partir de imágenes rádar del satélite Terrasar-X. REDIAM. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 587-596. ISBN: 978-84-472-1294-1
- Vergara Tenorio, M. del C., Ellis, E. A., Cruz Aguilar, J. A., Alarcón Sánchez, L. del C., & Galván del Moral, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política y cultura*, 36, 45–69. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422011000200003

Wagenaar, Dennis & Curran, Alex & Balbi, Mariano & Bhardwaj, Alok & Soden, Robert & Hartato, Emir & Mestav Sarica, Gizem & Ruangpan, Laddaporn & Molinario, Giuseppe & Lallemand, David. (2020). Invited perspectives: How machine learning will change flood risk and impact assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 20. 1149-1161. 10.5194/nhess-20-1149-2020.

(https://www.researchgate.net/publication/341027567_Invited_perspectives_How_machine_learning_will_change_flood_risk_and_impact_assessment)

Yu, M., Yang, C., & Li, Y. (2018). Big Data in Natural Disaster Management: A Review. *Geosciences*, 8(5), 165. <https://doi.org/10.3390/geosciences8050165>