

ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN EN EL MUNICIPIO DE TRUJILLO, VALLE DEL CAUCA

Alexander Pretel Díaz

Vanessa García Cardona

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en
sistemas de información geográfica

Análisis y Modelamiento Espacial

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en sistemas de información geográfica

Manizales, 2023

Resumen

Las inundaciones son un problema que aqueja a gran parte de la población en Colombia, debido a factores como la poca o nula planificación del territorio, las características geográficas y fisiográficas de nuestro territorio, entre otros, este es el caso del municipio de Trujillo, el cual se encuentra expuesto a riesgo por inundación dada la inminente amenaza que representa el río Culebras que atraviesa el municipio y se encuentra poblado en ambas márgenes.

Este proyecto, parte del fundamento de que el conocimiento de la amenaza es la base para determinar el nivel de riesgo al que se encuentra expuesta la población, por tanto, el objetivo planteado, es elaborar la zonificación de amenaza por inundación para el casco urbano de esta población haciendo uso de herramientas de sistemas de información geográfica, a lo largo del proyecto se plantea una opción para el cálculo de la zonificación de amenaza por inundación a partir de métodos predictivos basados en modelos matemático, para ello se emplearon dos métodos; el primero, teniendo en cuenta los rangos de intensidad y el segundo, clasificando la amenaza de acuerdo con los valores de periodo de retorno obtenidos para una intensidad de flujo de $5\text{m}^3/\text{s}^2$, finalmente se realizó una agregación de estos dos métodos tomando siempre el escenario más pesimista.

Los resultados obtenidos permitieron observar cómo ambos métodos se complementan al realizar su agregación y se puede ver un resultado final de zonificación de amenaza balanceado, donde se toman las fortalezas de cada uno de los métodos aplicados.

Palabras clave: Inundación, Amenaza, Sistemas de Información geográfica.

Abstract

Floods are a problem that afflicts a large part of the population in Colombia, due to factors such as little or no territorial planning, the geographic and physiographic characteristics of our territory among others. This is the case of the Trujillo municipality, which is exposed to flood risk due to the imminent threat represented by the Culebras River that crosses the municipality and is populated on both banks.

This project is based on the premise that knowledge of the threat is the basis for determining the level of risk to which the population is exposed, therefore, the objective is to develop the flood hazard zoning for the urban area of this population using geographic information systems tools, throughout the project an option for calculating the flood hazard zoning is proposed from predictive methods based on mathematical models, for this two methods were used; The first, taking into account the intensity ranges and the second classifying the threat according to the return period values obtained for a flow intensity of $5\text{m}^3/\text{s}^2$, finally an aggregation of these two methods was performed, always taking the most pessimistic scenario.

The results obtained allowed observing how both methods complement each other in their aggregation and a final result balanced of hazard zoning can be seen, where the strengths of each of the applied methods are taken into account.

Contenido

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	10
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	10
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
2.3 JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. ANTECEDENTES	15
5. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	22
5.1 LEY 1523 DE 2012.....	22
5.2 ARTÍCULO 189 DEL DECRETO-LEY 019 DE 2012	22
5.3 DECRETO 1807 DE 2014	22
6. REFERENTE TEÓRICO.....	24
6.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	24
6.2 HIDROLOGÍA	26
6.3 HIDRÁULICA.....	27
6.4 MODELOS HIDRÁULICOS.....	27
6.5 AMENAZA	28
6.6 INUNDACIÓN	28
6.7 GESTIÓN DEL RIESGO.....	29
7. METODOLOGÍA.....	30
7.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	30
7.2 PROCEDIMIENTO.....	30
7.2.1 Fase I.....	32
7.2.2 Fase II.....	34
7.2.3 Fase III	38
7.2.3.1 Clasificación de Amenaza por el método 1.....	38
7.2.3.2 Clasificación de amenaza por el método 2.....	39
7.2.3.3 Agregación de resultados.	41

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
9. CONCLUSIONES	53
10. RECOMENDACIONES	55
11. REFERENCIAS	56

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.....	21
Figura 2.....	31
Figura 3.....	32
Figura 4.....	33
Figura 5.....	34
Figura 6.....	35
Figura 7.....	39
Figura 8.....	43
Figura 9.....	44
Figura 10.....	44
Figura 11.....	45
Figura 12.....	46
Figura 13.....	47
Figura 14.....	48
Figura 15.....	49
Figura 16.....	50
Figura 17.....	51
Figura 18.....	52

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.	18
Tabla 2.	23
Tabla 3.	40
Tabla 4.	41

1. Introducción

La frecuencia de desastres en el mundo ha aumentado en los últimos años, en el 2021 la cifra de catástrofes naturales fue considerablemente mayor a la media anual entre 2001 y 2020, estos causaron pérdidas económicas por valor de 252.100 millones de dólares (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2022). Las inundaciones son el desastre más común en la región de Latinoamérica y el caribe, en los últimos años han significado grandes pérdidas económicas y millones de personas afectadas directamente. En Colombia las inundaciones son el principal tipo de desastre que afecta al país. Entre 2000 y 2018, Colombia sufrió inundaciones que representa cerca del 57% de los desastres registrados (Centre for research on the epidemiology of disaster - CRED, UCLouvain, 2020).

La Amenaza es definida como un peligro latente de ocurrencia de un evento de origen natural que puede tener un impacto físico, social, económico y ambiental en una zona determinada (Congreso de la República de Colombia, 2012). Los mapas de zonificación de amenaza por inundación pretenden mostrar espacialmente, el comportamiento de estos eventos en una región o área de estudio, agrupando y delimitando el territorio en categorías que representan la intensidad del impacto potencial generado por la amenaza. Es aquí donde los sistemas de información geográfica juegan un papel relevante, ya que permiten visualizar, sistematizar, analizar y consultar los efectos de estas dinámicas en el territorio, convirtiéndose en una herramienta fundamental para los gestores de riesgo y los tomadores de decisiones.

El presente proyecto plantea la elaboración de la zonificación de amenaza por inundación para el casco urbano del municipio de Trujillo, Valle del Cauca haciendo uso de sistemas de información geográfica, a lo largo del proyecto se plantea el cálculo de la zonificación de amenaza por inundación a partir de métodos predictivos basados en modelos matemáticos.

2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

Los acelerados cambios observados en los diferentes campos de la humanidad, producto de la globalización y el crecimiento acelerado de la población, están obligando a que tanto las personas, las organizaciones e instituciones gubernamentales, estén al mismo ritmo (Coral Chacón & Chamorro Benavies, 2016), con el fin de atender e identificar las amenazas a las que está expuesta la población por diferentes factores tanto naturales como antropogénicos, por ello se plantea el uso de las tecnologías que brinda la geomática como herramienta para satisfacer esta necesidad, ya que la geomática como herramienta de trabajo hace posible que el manejo y almacenamiento de la información sea de forma integral, dado que permite hacer un análisis inter y transdisciplinario en el estudio de las amenazas, características y efectos en el medio físico y construido (Zapata Balanqué, 2007) facilitando la toma de decisiones y planificación por parte de los gestores de riesgo.

2.1 Descripción del área problemática

En 2016, las pérdidas económicas a nivel mundial como consecuencia de las inundaciones ascendieron a 56.000 millones de dólares (todos los valores son de 2017). En Colombia las inundaciones y movimientos en masa, constituyen los riesgos naturales más severos en el país, lo cual se debe principalmente a las diversas y variadas características geográficas y fisiográficas del país, siendo detonados por factores tanto naturales como

antrópicos (Coronado, 2006) Según datos del Departamento Nacional de Planeación, a nivel regional, en el departamento del Valle del Cauca el 33,6% de la población se encuentra expuesta a amenazas naturales (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

De acuerdo con la secretaria de planeación de la Gobernación del Valle del Cauca, las condiciones geológicas, topográficas, hidrográficas del Valle del Cauca propician la ocurrencia de fenómenos naturales de diferentes orígenes, como los movimientos masales, avenidas torrenciales, sismos e inundaciones, entre otros. A la par de los eventos naturales potencialmente peligrosos, en los municipios vallecaucanos existe una precaria planificación del territorio, que incorpore la prevención y la reducción del riesgo en los procesos de ordenamiento territorial, lo cual hace que hoy exista, un alto número de viviendas y habitantes en zonas de riesgo (Secretaría de Planeación Departamental Gobernación del Valle del Cauca, 2011)

El Municipio de Trujillo, en su zona urbana, es atravesado en sentido Noreste-Suroeste por el río tutelar llamado “río Culebras”, dividiendo el municipio en dos zonas, la zona orientas y la zona occidental, que además está poblado hacia sus dos márgenes, lo que genera un riesgo inminente de inundación en temporada de lluvias y crecimientos súbitos de dicho afluente. Los antecedentes históricos del municipio han mostrado que desde 1941 el río principal forma crecientes súbitas en un periodo aproximado de cada ocho años en los cuales genera desbordamiento y afecta gran parte de la zona centro del municipio y toda la población que se ha asentado en ambas márgenes. (Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres, 2013)

2.2 Formulación del problema

Este proyecto pretende realizar una zonificación de amenaza por inundación para el área urbana del municipio de Trujillo, con ello se busca identificar las zonas que presentan amenaza de ocurrencia de eventos de inundación que signifiquen algún grado de riesgo para la población, la infraestructura y los recursos naturales, con el fin de generar el conocimiento de las potenciales amenazas que afectan el municipio de Trujillo y así aportar a una ocupación sostenible del territorio. Dicho esto, se plantea la incógnita de ¿Es posible realizar la zonificación de amenaza de inundación en el municipio de Trujillo, Valle del Cauca a partir del uso de sistemas de información geográfica con el que se pueda generar un insumo inicial para mitigar el riesgo por inundación?

2.3 Justificación

En la época comprendida entre los años 2010 y 2012 Colombia sufrió una serie de inundaciones por cuenta del hoy llamado fenómeno de La Niña, fenómeno que se caracteriza por altas cantidades de lluvias. Esta situación ocasionó una respuesta en el gobierno nacional con el fin de conocer el estado de amenaza y vulnerabilidad en la que se encuentra el territorio de ser azotado por fenómenos de origen natural como el anteriormente mencionado que, según se sabe, tiene una oscilación temporal de entre 2 y 7 años.

La expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres, donde se establece que los municipios del país deben hacer estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas de planificación del desarrollo seguro y gestión ambiental territorial (Congreso de la República de Colombia, 2012), se presentó al finalizar esta época de lluvias como una apuesta del Gobierno Nacional para estimular a las entidades gubernamentales y de gestión del riesgo a desarrollar proyectos de investigación que permitieran modelar estos desastres naturales con el fin de mitigar el impacto que estos pueden generar en el ambiente, la población y la infraestructura pública y privada del país. Es por esto por lo que este proyecto tiene una importancia estratégica al permitir que con el uso de Sistemas de Información Geográfica se modelen los diferentes elementos expuestos y su potencial afectación ante estos fenómenos naturales a partir de la aplicación de metodologías propuestas por diferentes autores.

Es posible entonces argumentar que este proyecto surge a raíz de la necesidad de las diferentes entidades gubernamentales que tienen responsabilidades en la gestión y mitigación del riesgo, de tener un geo-proceso que permita realizar la zonificación de amenaza por inundación en los diferentes municipios que comprenden la geografía colombiana. Este proyecto parte del principio de que el conocimiento de la amenaza es la base para determinar el nivel de riesgo, permitiendo que el desarrollo se enfoque hacia la prevención, para anticipar potenciales desastres. Por tanto, el producto resultado pretende ser un insumo para el ordenamiento del territorio, brindando un instrumento base que permita a futuro impulsar, orientar, diseñar, evaluar y ajustar proyectos y políticas públicas enfocadas a estrategias de prevención.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Elaborar la zonificación de amenaza por fenómenos de inundación en el casco urbano del municipio de Trujillo Valle del Cauca, a partir de sistemas de información geográfica, con el fin de identificar las zonas que presentan una amenaza potencial para la población.

3.2 Objetivos específicos

- Acopiar y clasificar los insumos base proporcionados por diferentes entidades, que permitan realizar la zonificación de amenaza por inundación.
- Analizar las metodologías para el cálculo de la amenaza por inundación, seleccionar la más adecuada para el caso de Trujillo y realizar espacialmente la evaluación y modelamiento de la susceptibilidad por inundación.
- Construir un sistema de información geográfica para la implementación de la metodología que permita identificar, clasificar y espacializar los grados de amenazas presentes en el municipio por el fenómeno de inundación.
- Generar la zonificación de amenaza por inundación en el municipio de Trujillo, considerando los factores detonantes, mediante un sistema de información geográfica.

4. Antecedentes

La zonificación de amenaza por inundación es vital en temas de gestión del riesgo, planificación territorial, políticas públicas, entre otros, siendo parte fundamental cuando se requiere un concepto técnico que brinde información acerca del peligro que tiene nuestro medio físico de ser afectado por alguna fuente hídrica. Su implementación a través del uso de sistemas de información geográfica ha sido estudiada por múltiples autores y entidades que, de acuerdo con sus condiciones particulares, establecen amplios procesos metodológicos que permiten obtener resultados efectivos.

Es el caso del estudio realizado por (Ramos Cañón et al., 2021) que pretendían orientar a las entidades e investigadores que quieran realizar estudios de zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en Colombia. La metodología que usaron para modelar estos fenómenos de inundación se centró en el uso de modelos digitales de terreno (MDT) como base de información que permite modelar la forma del relieve que se encuentra en la zona sujeta a estudio y, con ayuda de software que permite modelar la hidráulica de flujos de agua, específicamente HEC-RAS, calcular las velocidades y profundidades máximas que puede llegar a tener cada uno de los píxeles del modelo digital de terreno (o del área seleccionada sobre él) en los periodos de retorno 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años, con esto, realizaron una correlación entre los periodos de retorno a través de una regresión exponencial que busca encontrar una ecuación de la forma $I = \alpha TR$ (donde I es la intensidad del flujo, α es el parámetro calculado por la regresión y TR , es el periodo de retorno), al tener una ecuación para cada píxel,

calcularon la intensidad con un periodo de retorno de 400 años para posteriormente reclasificar estos valores de intensidad con el que lograron zonificar la amenaza por el primer método. También, realizaron el cálculo de la amenaza teniendo en cuenta un grado de intensidad de $5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, que es el umbral entre el daño estructural leve y el daño estructural considerable que puede sufrir una estructura sometándose a estos niveles de intensidad, y usándola esta vez como variable independiente lo que significa que el periodo de retorno sería la variable dependiente. Los resultados que obtuvieron son dos zonificaciones de amenaza por lo que hicieron una agregación de ambos resultados considerando el escenario más pesimista y así, encontraron una zonificación de amenaza final.

Por otra parte, (Kumar et al., 2020) realizaron el modelamiento de inundación en Prayagraj, India usando el software HEC-RAS y los datos de Global Flood Monitoring System (GFMS), los insumos son modelos digitales de terreno de alta precisión y levantamientos topobatimétricos del río Yamuna en secciones transversales. Los resultados que obtuvieron tuvieron alta relación con los eventos históricos que tienen las instituciones de riesgo de la India para los años 1978, 2013 y 2014, teniendo en cuenta las descargas máximas de lluvia en esos años y se concluyó que es posible realizar estudios de inundación con los datos GFMS a pesar de que tienen una resolución espacial ligeramente alta y que intuitivamente puede afectar los estudios sectoriales de inundación.

De la misma manera (Golshan et al., 2016) y (Gholami et al., 2016), usaron la extensión de HEC-RAS para Arcmap de Arcgis para realizar la zonificación de amenaza

por inundación en la cuenca Safarood en Kermán y Rasht respectivamente, ambas en Irán, para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, calculando el coeficiente de rugosidad de manning (n) utilizando como parámetros los elementos como el radio hidráulico promedio (R), la pendiente promedio del río (S) y la velocidad de flujo (V) relacionadas en la siguiente ecuación.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

De los resultados que (Golshan et al., 2016) evidenciaron, la fuerte relación entre el aumento del periodo de retorno del evento y el aumento de áreas inundadas en la zona de estudio, que al ser un área árida tiene poca capacidad de retención y absorción de agua, lo que permite al modelo tener menor cantidad de variables naturales y ajustarse más a la realidad. Así mismo (Gholami et al., 2016) además de concluir que es factible el uso de los SIG para realizar la zonificación de amenaza por inundación, hablan de la necesidad de datos actualizados para realizar estos estudios, pues depende de la existencia de información como modelos digitales de terreno, datos históricos y actuales sobre la cantidad de lluvia máxima y mínima en la zona de estudio, datos históricos de inundaciones que permiten validar los modelos, etc., la carencia de esta información hace necesario plantear alternativas pues estos estudios son vitales en términos de preservar los seres vivos, el gasto público y privado en la recuperación de áreas afectadas.

(Vojtek & Vojteková, 2016) evalúan un caso de estudio a escala local, empleando sistemas de información geográfica, teledetección y modelación hidráulica unidimensional es decir con base en la profundidad del agua y la velocidad del flujo, el

procedimiento planteado inicia con el cálculo de los caudales máximos por métodos indirectos, para los periodos de retorno de 1000, 100 y 50 años, posterior a ello realizaron la modelación hidráulica usando el software 1D HEC-RAS, el preprocesamiento de los datos fue realizado haciendo uso de la extensión HEC-GeoRAS que es compatible con el software ArcGIS. Para la generación del MDE se tomó como base, ortofotos del año 2011 y un DEM, líneas centrales y laterales de los arroyos, trayectorias y las secciones transversales, además se identificaron las diferentes construcciones como puentes alcantarillas, entre otros, para el uso de suelo los autores usaron los coeficientes de rugosidad de Manning como se referencia en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Coefficientes de rugosidad de Manning para diferentes usos de suelo

Uso de suelo	Coefficiente de rugosidad de Manning
Carreteras (asfalto)	0.016
Vegetación paisajística y residencial	0.060
Bosque	0.150
Prados	0.040
Tierra cultivable	0.035
Masas de agua	0.035
Arroyo (cauce natural)	0.035
Corriente (canal modificado)	0.027
Superficie construida	0.020

Fuente: (Te Chow, 1982)

Partiendo de toda esta información, se generó una TIN para el DEM de la zona de estudio, además se creó un modelo TIN de los niveles de agua, la intersección de ambos modelos generó la profundidad del agua, asimismo se generó el ráster de velocidad de flujo a partir de las velocidades transversales en perfiles. Posteriormente los autores calcularon la intensidad de flujo FI teniendo como datos de entrada la profundidad del agua d y la velocidad de flujo v para cada uno de los periodos de retorno, utilizando la

$$\text{ecuación } FI = \begin{cases} 0 \rightarrow d = 0 \text{ m} \\ d \rightarrow d = 0 \text{ m}, v \leq 1 \text{ m/s} \\ d.v \rightarrow v > 1 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2).$$

$$FI = \begin{cases} 0 \rightarrow d = 0 \text{ m} \\ d \rightarrow d = 0 \text{ m}, v \leq 1 \text{ m/s} \\ d.v \rightarrow v > 1 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

Con el fin de determinar la amenaza de inundación para cada zona del modelo se basaron en la intensidad de la inundación suponiendo que donde la intensidad es mayor, el riesgo de inundación también es mayor y con base en este supuesto se categorizó la amenaza en alto, medio y bajo. Donde alto equivale a un $FI > 1$, medio, $0.3 < FI \leq 1$, bajo $FI \leq 0.3$, estas categorías se definieron en función de la velocidad y la profundidad, fueron ajustadas después de realizar una búsqueda bibliográfica donde se tomaron como referente diferentes autores.

(Vojtek & Vojteková, 2016) concluyen que la precisión de los datos de entrada desempeña un papel fundamental, el modelo de flujo constante generado a partir de HEC-RAS funcionó bien, pero en la fase final se debió ajustar porque producía inundaciones

ilógicas que fueron detectadas por los expertos y se eliminaron manualmente.

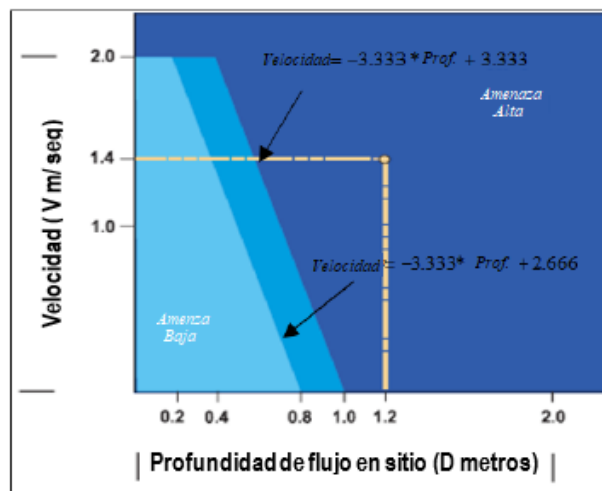
En su trabajo, (Al Min et al., 2020) realizan una modelación hidráulica unidimensional y bidimensional usando el software HEC-RAS 5.0 integrado con sistemas de información geográfica, los autores analizan 5 indicadores en la amenaza por inundación, ya que se basan en el supuesto de que la amenaza de inundación está estrechamente relacionada con los parámetros hidráulicos, los indicadores estudiados por los autores son, profundidad, velocidad del flujo, carga energética, fuerza del flujo, que es equivalente a multiplicar la profundidad por el cuadrado de la velocidad, e intensidad, que es la multiplicación entre la profundidad y la velocidad, de este trabajo los autores concluyen que el indicador que mayor influencia tiene en cuanto al nivel de amenaza es la profundidad de la inundación .

(Alaghmand et al., 2010) realizaron modelos hidrológicos e hidráulicos en los software HEC-HSM y HEC-RAS, el proceso que definen los autores consiste en 4 pasos, la extracción de datos geospaciales para el uso en ambos modelos, el modelo de precipitación hidrológica que define la precipitación de escorrentía a partir de una precipitación de diseño o histórica, el modelo hidráulico que dirige la escorrentía por los canales para determinar los perfiles de la superficie del agua incluyendo la velocidad y la profundidad, en lugares específicos a lo largo de la red de drenajes y por ultimo una herramienta de visualización de llanuras de inundación, todo esto combinado en un sistema de información geográfica, los autores resaltan los beneficio del SIG en este tipo de estudios resaltando que el SIG permite la simulación de diferentes escenarios y la representación gráfica de diferentes alternativas. Para este caso los autores evalúan los

periodos de retorno 20, 50 y 100 años, en esta investigación los parámetros de profundidad del agua y velocidad del caudal se consideran los parámetros principales asociados a la amenaza por inundación fluvial, con base en ello se definieron 4 categorías de amenaza por inundación, bajo, medio, alto y grave. Para clasificar las categorías, utilizaron las fórmulas que se observan en la Figura 1.

Figura 1.

Formula de las líneas entre amenaza baja, medio y alta



Fuente: (Alaghmand et al., 2010)

(Alaghmand et al., 2010) coincide en su conclusión con (Al Min et al., 2020) en que para el cálculo de la amenaza por eventos de inundación y su respectiva clasificación, la profundidad del agua es un factor más importante y que tiene mayor influencia que la velocidad del caudal, en cuanto al patrón de distribución de la amenaza.

5. Referente normativo y legal

5.1 Ley 1523 de 2012

Esta ley vigente actualmente en Colombia es por la cual se adopta el marco normativo que define la política nacional a seguir ante la gestión de riesgo. En ella se definen los principios generales, la terminología, se crea el nuevo sistema nacional de gestión de riesgo de desastres, los objetivos que lo guiarán a adoptar esta política en el país, su estructura, instrumentos, herramientas, sistemas de información, mecanismos de financiación y se dictan directrices para la declaración de desastres y calamidades. En esta Ley se hace un énfasis importante en el conocimiento y reducción del riesgo, como procesos para reducir situaciones de riesgo.

5.2 Artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012

Este determinó que el gobierno nacional debería reglamentar las condiciones para la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y con condición de riesgo y las diferentes medidas o acciones de mitigación para incorporación en los planes de ordenamiento territorial.

5.3 Decreto 1807 de 2014

Este acto administrativo de carácter nacional es por el cual se dictan las directrices para incorporar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial, en él se establecen las

condiciones, escalas de detalle y condiciones para la incorporación de los estudios técnicos en los planes de ordenamiento municipal y distrital. El artículo 3, define los estudios básicos a realizar y las definiciones que enmarcan estos estudios. El artículo 9 de este decreto, establece las disposiciones para la elaboración de estudios básicos de amenaza de inundación, área de estudio y su respectiva escala, insumos, alcance y productos.

Para los estudios básicos de amenaza por inundación, el decreto 1807 de 2014 establece como insumos mínimos solicitados, para la incorporación de estudios técnicos: Geomorfología, modelo de elevación de terreno, hidrología y la identificación de las zonas inundables, lo que hace referencia al registro histórico de eventos. Como producto, se debe entregar la zonificación de amenaza por inundación. En cuanto a la escala, las mínimas requeridas según la clasificación del suelo y el tipo de estudio (**Tabla 2**).

Tabla 2

Escala de trabajo para incorporación de estudios en el plan de ordenamiento territorial

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
Estudio Básico	Urbano	1:5.000
	Expansión Urbana	1:5.000
Estudio detallado	Rural	1:25.000
	Urbano	1:2.000
	Expansión Urbana	1:2.000

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014)

6. Referente teórico

6.1 Sistemas de información geográfica

Un sistema de información geográfica es la integración de componentes electrónicos como hardware, con software de visualización y/o procesamiento y elementos espaciales con los que se puede realizar procesos de captura, procesamiento, almacenamiento y disposición de información geoespacial, con la intención de proporcionar soluciones en áreas de ingeniería, ciencias políticas y sociales (Keith, 1986). Si bien es un concepto que viene de los años 70, es una técnica científica que sigue firme hoy en día y es tal su magnitud que en todos los países del mundo se usa como base para la planificación del territorio, gestión de riesgo, acciones militares y hasta para procesos agrícolas.

Los componentes de los sistemas de información geográfica son principalmente los mismos que cualquier sistema de información: Recursos humanos, software, hardware, procesos y datos. Es en este último en donde se verá reflejado la principal diferencia entre los sistemas de información y los sistemas de información geográfica, pues los datos utilizados en los sistemas de información geográfica vienen referidos a un espacio geográfico. A continuación, se hablará de cada uno de los componentes principales de un SIG (Tomlinson, 2007):

- **Hardware:** Este componente representa el soporte físico de la operación de un SIG. Está conformado por dispositivos electrónicos que cumplen funciones específicas, como almacenar la información en el caso de los servidores, recolectar o digitalizar la información como

scanner, colectores GNSS, etc., y hasta periféricos de salida como pantallas visualizadoras, plotters, etc.

- **Software:** En este componente, se encuentra el soporte lógico del SIG. Su composición es muy variada y va desde sistemas operativos hasta programas, aplicaciones y sistemas de gestión de bases de datos. Uno de los elementos más importantes de este componente, son los lenguajes de programación, siendo la base principal de cualquier sistema computacional. El software junto con el hardware, definen el con qué del sistema.

- **Recursos humanos:** El personal que maneje, administre y ponga a disposición los SIG, son parte fundamental como cualquier otro componente. Su calificación y cualificación responden a la necesidad de un uso apropiado a este. Dentro del personal para uso de SIG se pueden encontrar 2 perfiles: El primero hace referencia a la persona o conjunto de personas que se encarga de realizar los análisis geográficos y obtener un conjunto de resultados de acuerdo con la investigación que se esté llevando a cabo. El segundo, hace referencia a la persona o conjunto de personas que desarrollan programáticamente la estructura y funciones de un SIG, a este generalmente se le llama programador. El recurso humano, define el quienes del sistema.

- **Datos:** Es la parte más importante de cualquier sistema de información, pues es entorno a este, en el que gira el propósito de todos los sistemas de información. Para el caso específico de los SIG, los datos suelen llevar un atributo especial, que permite al sistema determinar la ubicación geográfica del elemento. Estos datos, pueden ser levantados o adquiridos ya sea por el mismo creador del sistema, o por un tercero. Es con estos, con los que se puede

representar a partir de modelos, las características, formas e incluso, tendencias, el procesamiento de estos datos, permite la toma de decisiones y el planteo de soluciones espaciales a múltiples problemáticas de la vida humana. Los datos definen el qué del sistema.

- **Procesos:** Un SIG, opera de acuerdo con un plan diseñado para cumplir unos objetivos trazados en su creación, que además contienen unas reglas del “negocio” claras. Los procesos van encaminados a no solo tratar la información, sino también a la mezcla, reutilización, optimización y depuración de los datos con el fin de obtener unas salidas que suelen ser gráficas. Este componente, define el cómo del sistema.

6.2 Hidrología

La hidrología es una técnica científica multidisciplinar que se ocupa del estudio de la ocurrencia, circulación, almacenamiento y distribución de las aguas subterráneas y superficiales de la Tierra, su dominio comprende los aspectos físicos, químicos y biológicos, así como las reacciones que tiene el agua en ambientes naturales y artificiales debido a la complejidad que tiene el ciclo del hidrológico del agua (Philip y otros, 2013).

El ciclo hidrológico del agua es simplemente el proceso en el que el agua se transforma de líquido (almacenada o dispuesta en ríos, océanos, lagos y en general cualquier cuerpo de agua en movimiento o estático) a gaseoso a través de un proceso de evaporación, para luego moverse en masas de aire húmedo que posteriormente se convierte en precipitaciones de agua líquida y reiniciando el ciclo (Philip et al., 2013)

6.3 Hidráulica

La hidráulica en su forma general es el estudio científico de la forma en la que se comportan los fluidos de acuerdo con sus propiedades físicas, en pocas palabras, observa y analiza la mecánica de los fluidos teniendo en cuenta las fuerzas a las que son sometidos, presión, fuerza gravitacional, etc. Por otra parte, la hidráulica ambiental, es el estudio científico del flujo de agua, como ríos, lagos y lagunas, relacionándolos con los procesos de transporte y transformación que estos poseen, es en un sentido amplio, el estudio, a diferentes escalas espaciales tanto detalladas como generales, y escalas temporales desde segundos hasta varios años, de los movimientos del agua, destino y transporte de sedimentos, suspendidos y disueltos, arrastrados por el flujo (Zeng et al., 2021).

6.4 Modelos hidráulicos

Un modelo hidráulico en términos de la hidráulica ambiental es una construcción matemática virtual de una red de distribución de agua (y viento) que se utiliza para modelar el comportamiento de la misma, con el objetivo de realizar simulaciones que permiten definir la capacidad de transporte de sedimentos, capacidad destructiva y plantear soluciones y mejoramientos a los problemas y necesidades que esto conlleva. Generalmente los resultados obtenidos a partir de la aplicación de modelos hidráulicos son la profundidad y velocidad medias de una o varias secciones transversales de una geometría de flujo y más específicamente los modelos hidráulicos 1D, predicen la profundidad y velocidad vertical media de puntos específicos tanto en el cauce como en las afueras del cauce, por otro lado, los modelos hidráulicos 2D, predicen

la profundidad, la magnitud y la dirección de la velocidad vertical, mientras que un modelo hidráulico 3D intenta predecir la profundidad y la magnitud, dirección y distribución vertical de la velocidad del flujo (Jowett & Duncan, 2012). Para realizar modelamientos hidráulicos se suelen utilizar diferente software, entre los más destacados se encuentra HEC-RAS del cuerpo de ingenieros del ejército estadounidense que es de uso y distribución libre y, por otro lado, se encuentra RIVERGIS, SOBEK Suite, MIKE 11, entre otros, que tienen licencia comercial.

6.5 Amenaza

Turner define la amenaza como la posible alteración a un sistema, estas alteraciones se pueden dar por eventos de alto estrés como inundaciones, deslizamientos, huracanes, entre otros. Los picos de estrés pueden generarse por efectos a largo plazo o por eventos intempestivos, así como los factores pueden ser externos o internos del sistema (Turner II et al., 2003).

El congreso de Colombia define la amenaza como un peligro latente causado por eventos naturales o acción del hombre que pueda impactar con una severidad que pueda generar pérdidas humanas, materiales, económicas y ambientales (El congreso de Colombia, 2012).

6.6 Inundación

Las inundaciones se manifiestan como eventos, donde se presenta la ocupación inusual por agua de terrenos que comúnmente están secos, generalmente producido por exceder el nivel de ríos, drenajes o incluso el mar (Milanes Batista et al., 2017).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, define las inundaciones como “fenómenos hidrológicos potencialmente destructivos que hacen parte de la evolución de la dinámica de evolución de una corriente”. Estas se producen por lluvias que aumentan el nivel de las aguas conllevando a desbordamientos sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas que generalmente no están cubiertos por agua.

6.7 Gestión del riesgo

Es un proceso social que consiente en generar herramientas para la formulación, proyección, planeación, ejecución, seguimiento, evaluación de políticas y acciones con el fin de conocer el riesgo, fomento de una mayor conciencia del mismo, propende por medio de regulaciones, políticas públicas, reducirlo o moderarlo cuando ya existe. Este proceso va encaminado a contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (El congreso de Colombia, 2012).

La gestión del riesgo de desastres como lo define la CEPAL, es una estrategia cuyo enfoque es la reducción del impacto y los efectos socioeconómicos de los desastres encaminada a la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades y la resiliencia de las mismas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2020).

7. Metodología

7.1 Enfoque metodológico

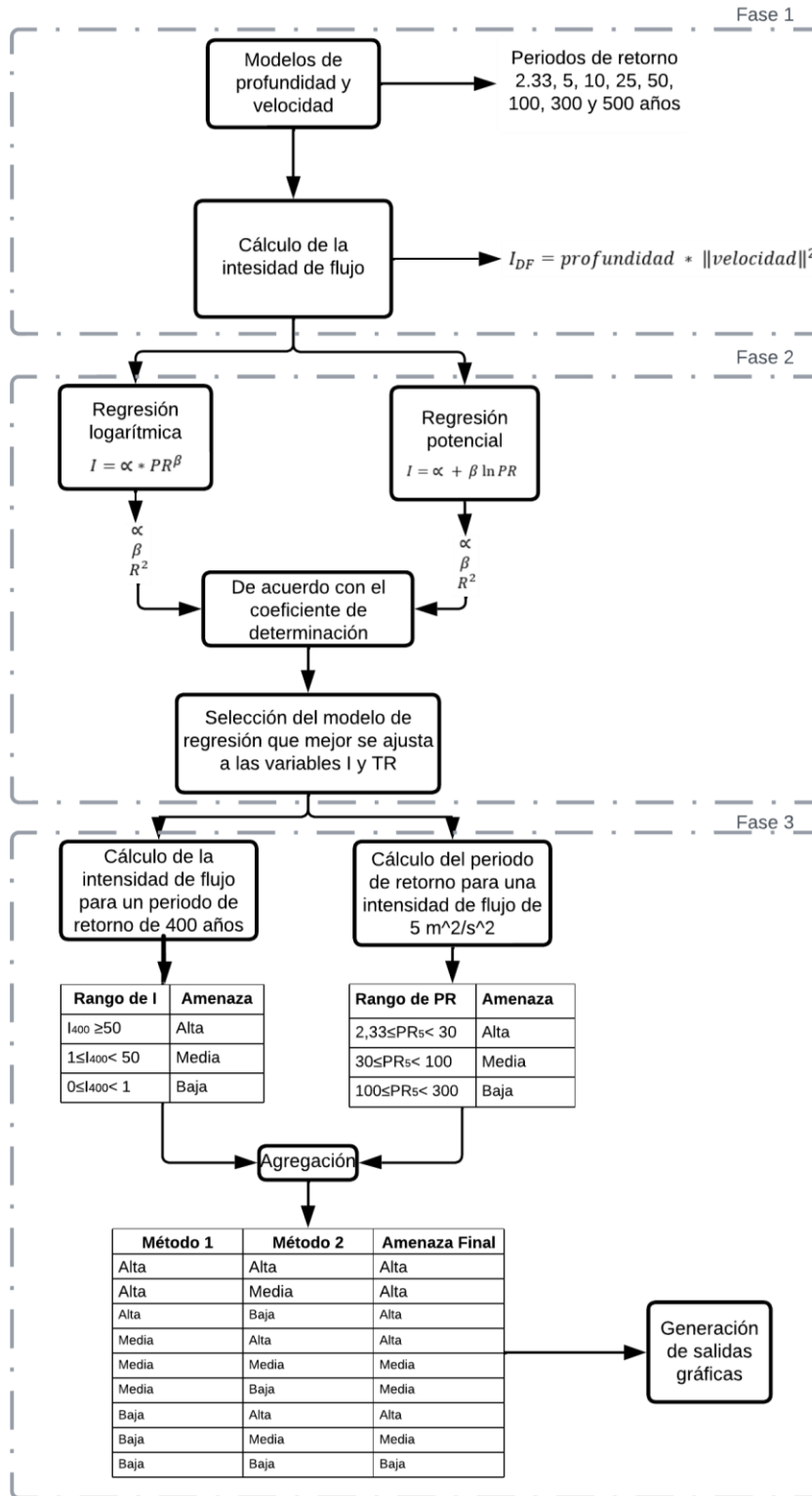
Este trabajo se ha clasificado como un proyecto de investigación aplicada y tecnológica, ya que se basa en la aplicación directa de conocimientos básicos sobre el tema de inundaciones, en él se analizaron como parte de la fase inicial, diferentes metodologías aplicadas en otros casos de estudio (especialmente en los planteados por el Servicio Geológico Colombiano) para realizar la zonificación de amenaza ante inundación, esto para abordar un problema potencial que puede afectar a la sociedad, en este caso particular la población de Trujillo, Valle del Cauca. Además, se basa en un enfoque cuantitativo ya que tiene su fundamento en las matemáticas y estadísticas para establecer patrones a partir de las variables analizadas y así tratar de predecir el comportamiento de la amenaza en ciertos sectores del territorio.

7.2 Procedimiento

El procedimiento metodológico seguido para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este proyecto consta esencialmente de 3 fases (como se muestra en la Figura 2.) que comprenden desde la recolección y cálculo de los insumos necesarios, como los modelos de velocidad, profundidad e intensidad de flujo, pasando por los cálculos de las regresiones (exponencial y logarítmica) y terminando con el cálculo de la amenaza final, para ello se realiza la agregación de dos metodologías. A continuación, se presentará el desglose de cada una de las tres fases:

Figura 2.

Esquema del procedimiento metodológico dividido entre las tres fases



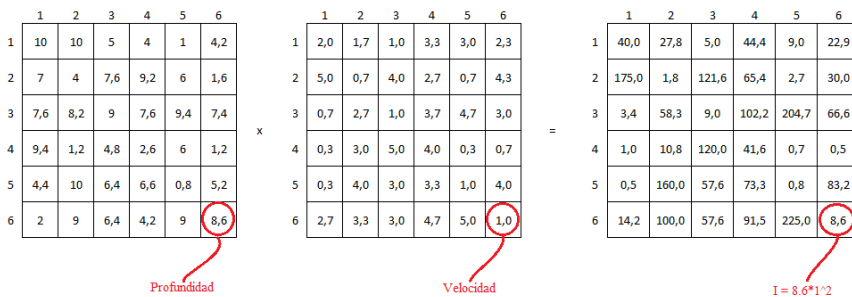
7.2.1 Fase I

La primera fase de este proyecto fue la recolección de los insumos mínimos que (Ramos et al., 2021) establecen en su guía metodológica para la zonificación de amenazas por avenidas torrenciales, en la que hablan de un mínimo de modelos de intensidad de flujo para realizar el cálculo de amenaza. En total se recolectaron 8 modelos de profundidad de flujo y 8 modelos de velocidad de flujo para los periodos de retorno 2.33, 5, 10, 20, 50, 100, 300 y 500 años (Figura 4 y Figura 5.), que fueron calculados por la decanatura de ingeniería de la Universidad del Valle (Univalle), en el marco de un convenio interadministrativo entre la universidad y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), modelos que permitieron el cálculo de la intensidad de flujo (I_{DF}) de acuerdo a como (Jakob y otros, 2012) lo establecen considerando que es producto de la profundidad del flujo (d) y la velocidad de flujo al cuadrado (v^2) como se muestra en la ecuación $I_{DF} = d * \|v\|^2$ (3 y la Figura 3.

$$I_{DF} = d * \|v\|^2 \tag{3}$$

Figura 3.

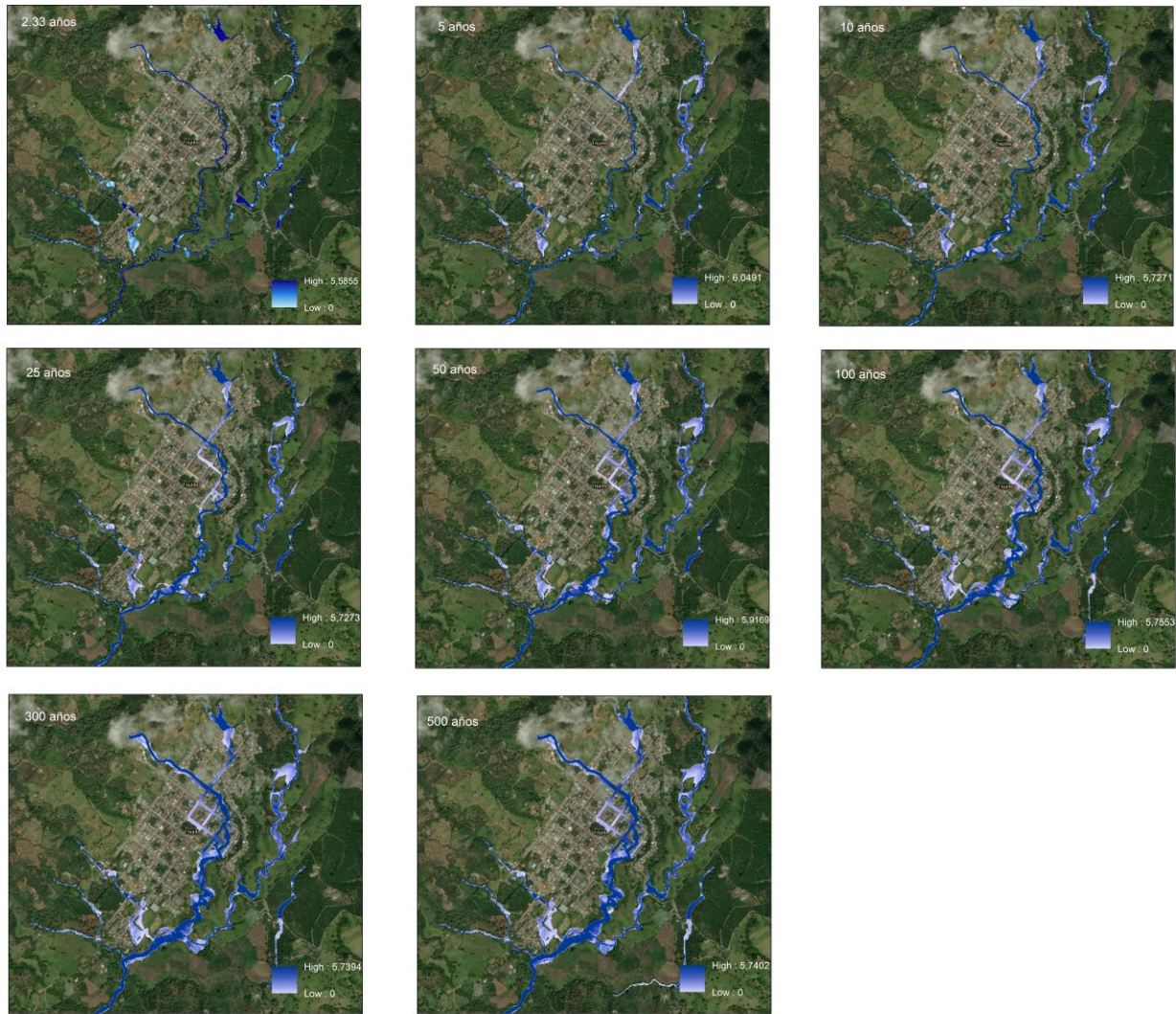
Cálculo de la intensidad de flujo a partir de la profundidad y velocidad de flujo.



Nota. El cálculo se realizó para cada uno de los pixeles que componen los modelos de profundidad y velocidad en cada uno de los periodos de retorno estudiados.

Figura 4

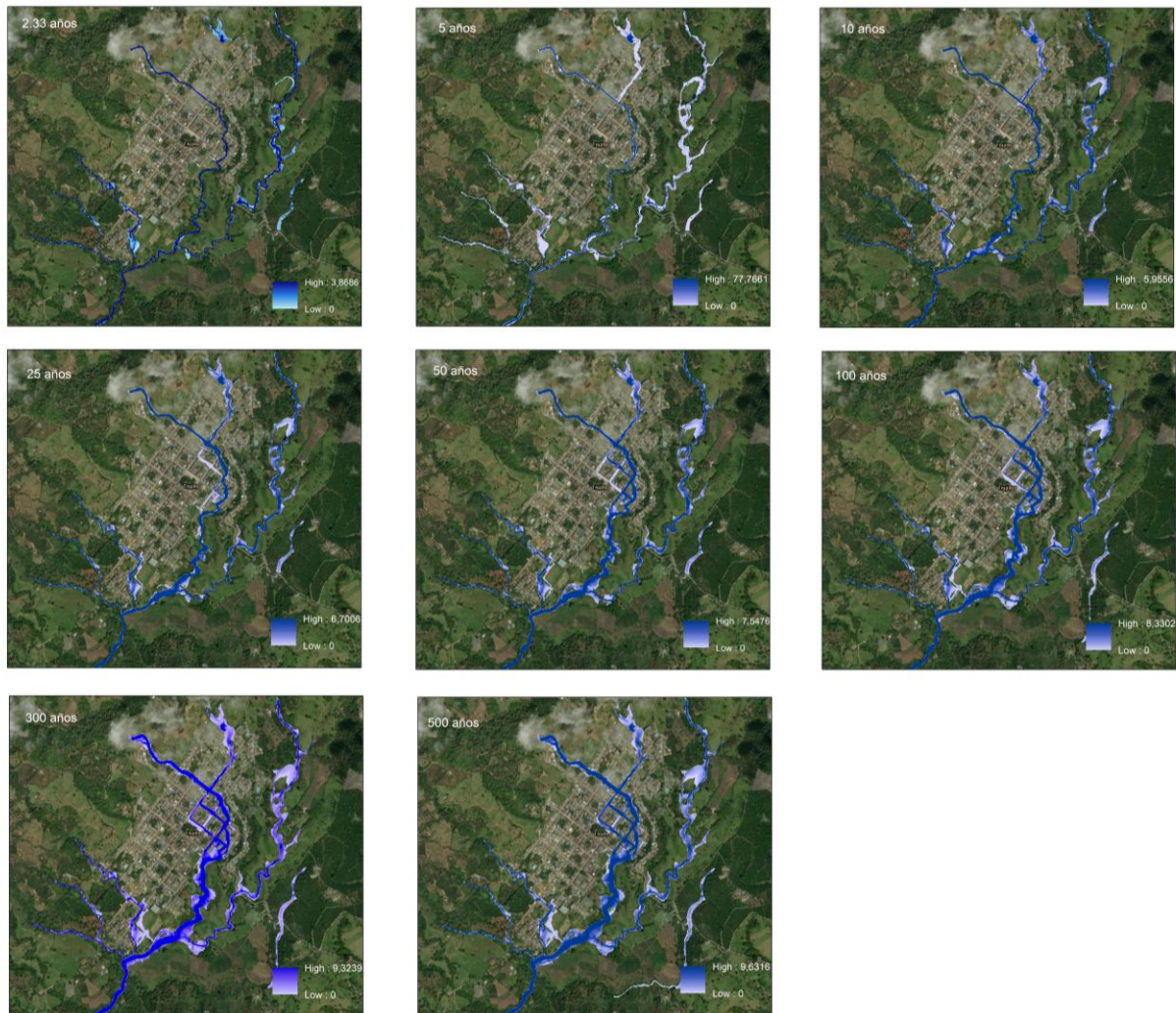
Modelos de velocidad para el municipio de Trujillo, Valle del Cauca.



Fuente: Convenio interadministrativo CVC-Univalle.

Figura 5.

Modelos de profundidad para el municipio de Trujillo, Valle del Cauca.



Fuente: Convenio interadministrativo CVC-Univalle.

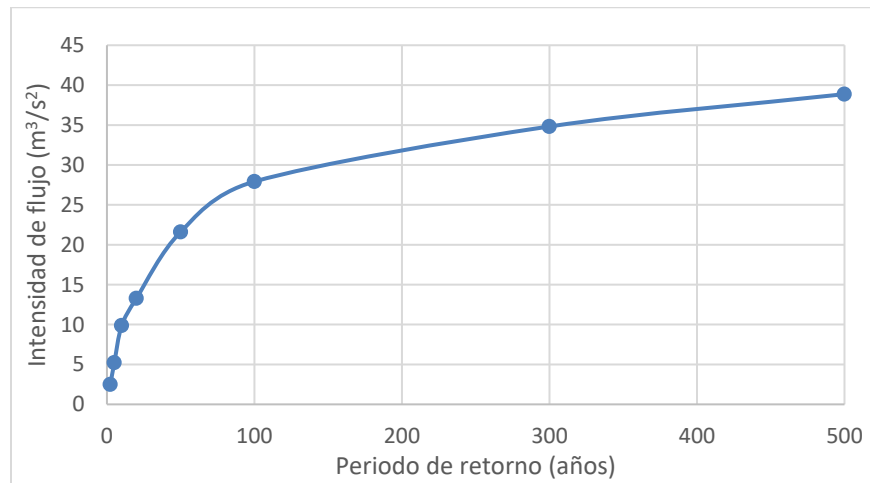
7.2.2 Fase II

La segunda fase consistió en la selección del modelo de regresión que mejor se ajustó a la curva de amenaza (la Figura 6. muestra una representación aproximada de esta curva), usando los modelos de regresión potencial, como lo propone (Ramos y otros, 2021) , y de regresión logarítmica, por ser los modelos que tienden a tener una asíntota en la variable dependiente

(intensidad de flujo) conforme aumenta la variable independiente (periodo de retorno), lo que sin duda se aproxima al comportamiento de la curva de amenaza que, conforme aumenta la extensión del periodo de retorno hacia valores muy altos, la pendiente de la recta tangente a la curva se acerca mucho más a cero, encontrando valores de intensidad de flujo muy cercanos, sin importar qué tanto aumente el periodo de retorno. Es importante decir que para cada píxel que integra la composición de bandas en el modelo digital de intensidades de flujo (en el que cada banda representa un periodo de retorno empezando por 2.33 años y terminando con 500 años, en total 8 bandas), se debe calcular ambas ecuaciones, obteniendo los parámetros α y β de la ecuación $I_{DF} = \alpha * PR^\beta$ (4 y ecuación $I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR)$ (7 para cada uno de los pixeles.

Figura 6.

Curva de amenaza típica para un evento de inundación, representada por la intensidad de flujo versus el periodo de retorno al que corresponde.



$$I_{DF} = \alpha * PR^\beta \quad (4)$$

En el caso de la ecuación potencial (ecuación $I_{DF} = \alpha * PR^\beta$ (4) el cálculo de los parámetros se realiza linealizando la ecuación, ejecutando el logaritmo natural o neperiano (\ln) a ambos lados de la ecuación, obteniendo la ecuación 6, considerando que, por regla matemática de los logaritmos la multiplicación de elementos en el argumento del logaritmo equivale a la suma de los algoritmos de estos argumentos así:

$$\ln(a * b) = \ln(a) + \ln(b) \quad (5)$$

$$\ln(I_{DF}) = \ln(\alpha) + \beta \ln(PR) \quad (6)$$

Considerando $\ln(I_{DF}) = y$, $\ln(\alpha) = a$, $\beta = b$ y $\ln(PR) = x$, se puede encontrar la ecuación $y = a + bx$ (8, que es ya una ecuación lineal con una variable independiente (y), un intercepto sobre el eje y (a), una pendiente (b) y una variable independiente (x).

Para la ecuación logarítmica el procedimiento de linealización fue más sencillo teniendo en cuenta que solo es necesario evaluar el $\ln(PR) = x$, $\alpha = a$ y $\beta = b$ en la ecuación $I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR)$ (7.

$$I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR) \quad (7)$$

$$y = a + bx \quad (8)$$

Con las ecuaciones linealizadas se procedió a calcular, con ayuda de la función “polyfit” de la librería Numpy de Python¹, los parámetros a y b descritos en la ecuación $y = a + bx$ (8 para cada uno de los pixeles. El paso siguiente fue evaluar en las consideraciones que

¹<https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.polyfit.html>

se hicieron para la linealización de las ecuaciones potencial y logarítmica los valores de a y b,

para así obtener las ecuaciones $I_{DF} = \alpha * PR\beta$ (4 y $I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR)$

(7 con valores reales.

Para terminar esta fase, se realizó la selección del modelo teniendo en cuenta el coeficiente de determinación R^2 , que establece una relación entre la covarianza de dos variables (σ_{xy}) dividido por el producto de sus varianzas ($\sigma_x\sigma_y$) como se muestra en la ecuación $R^2 = \rho =$

$\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}$ (9 descrita por (Freedman y otros, 2007), lo que permite intuir qué

tan acertado es un modelo al momento de predecir valores, de esta manera se consideran los modelos con valores de R^2 más cercanos a 1 como modelos que predicen altamente la muestra usada para la regresión y se esperaría que al intentar calcular un valor intermedio no incluido dentro de la muestra, este tenga este mismo grado de precisión y exactitud, sin embargo es una incertidumbre que se debe asumir.

$$R^2 = \rho = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2\sigma_y^2} \quad (9)$$

Es importante mencionar que (Ramos y otros, 2021) establecen que deben existir al menos 6 periodos de retorno que afecten a cada una de las celdas para poder efectuar individualmente el cálculo de la regresión, puesto que de esta manera, se garantiza que existan suficientes datos que contribuyan a la generación de una ecuación matemática que modele con un alto grado de confiabilidad la curva de amenaza, de esta manera se le dio un trato diferente a las celdas que no satisfagan esta condición y será mencionado en la siguiente fase.

7.2.3 Fase III

La última fase de este proyecto se basó en el cálculo de la amenaza empleando dos métodos; el primero, teniendo en cuenta los rangos de intensidad de flujo que (Jakob y otros, 2012) establecieron para un periodo de retorno de 400 años y, el segundo, clasificando la amenaza de acuerdo con los valores de periodo de retorno obtenidos para una intensidad de flujo de $5\text{m}^3/\text{s}^2$. Como se mencionó en la fase I, los insumos obtenidos fueron modelos de profundidad y velocidad para periodos de retorno entre 2.33 y 500 años, sin contar con el periodo de retorno de 400 años, lo que explica el porqué es necesario generar un modelo de regresión que permita crear una ecuación para evaluar el nivel de intensidad de flujo que se tendría para un periodo de retorno intermedio, como es este caso, permitiendo predecir de manera más global cual sería el comportamiento de la curva de amenaza en cada uno de esos periodos de retorno.

7.2.3.1 Clasificación de Amenaza por el método 1. Para la clasificación de amenaza por el método 1, se evalúa en la ecuación $I_{DF} = \alpha * PR^\beta$ (4 y $I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR)$ (7 el periodo de retorno de 400 años, obteniendo para cada pixel un valor diferente (como se muestra en la Figura 7.) de intensidad de flujo, que posteriormente fue clasificada de acuerdo a los siguientes rangos:

- Se considera zona de amenaza baja los pixeles cuya intensidad de flujo no alcance a superar los $1\text{ m}^3/\text{s}^2$, lo que implica una baja probabilidad de daño estructural.

- Se definen como zona de amenaza media los pixeles en los que la intensidad de flujo se encuentre entre 1 m³/s² y 50 m³/s², ya que con estos valores hay una alta probabilidad de colapso leve y una probabilidad baja de daño estructural.
- Para las zonas en la que la intensidad de flujo sea mayor a 50 m³/s², se prevé una probabilidad alta de colapso, por lo que se deben considerar de amenaza alta.

Figura 7.

Cálculo píxel a píxel de la intensidad de flujo para un periodo de retorno de 400 años con la ecuación logarítmica (ecuación $I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR)$ (7).

Pixel	1	2	3
1	$\alpha = 9,25$ $\beta = 5,58$	$\alpha = 9,55$ $\beta = 5,86$	$\alpha = 1,44$ $\beta = 2,66$
2	$\alpha = 8,67$ $\beta = 7,24$	$\alpha = 9,8$ $\beta = 5,83$	$\alpha = 1,87$ $\beta = 3,17$
3	$\alpha = 9,22$ $\beta = 6,42$	$\alpha = 9,09$ $\beta = 7,09$	$\alpha = 1,2$ $\beta = 0,5$

$\rightarrow I_{DF} = \alpha + \beta \ln(400) \rightarrow$

Pixel	1	2	3
1	42,68	44,66	17,38
2	52,05	44,73	20,86
3	47,69	51,57	4,20

7.2.3.2 Clasificación de amenaza por el método 2.

Por otra parte, para calcular la amenaza por el método 2, se debe despejar la variable que representa el periodo de retorno (PR) en las ecuaciones

$$I_{DF} = \alpha * PR\beta \quad (4 \text{ y } I_{DF} = \alpha + \beta \ln(PR)) \quad (7,$$

para encontrar a qué periodo de retorno equivale una intensidad de flujo de 5 m³/s², que según (Ramos y otros, 2021), es el límite entre lo que se puede interpretar como un daño estructural leve y un daño estructural

considerable. Según estos valores de periodo de retorno, se clasificó cada una de las celdas de acuerdo los siguientes rangos:

- Las celdas en las que el tiempo medio entre dos sucesos que generen una intensidad de flujo de $5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ sea menor a 30 años, se deben considerar de amenaza alta.
- Las celdas en las que el periodo de retorno resultante se encuentre entre los 30 y los 100 años, se deben considerar de amenaza media.
- Por último, las celdas con periodo de retorno mayor a los 100 años se consideran de amenaza baja.

Un resumen de ambos métodos se puede observar en la Tabla 3, sobre esta se debe tener claridad en que cada método es independiente entre sí, por lo que sólo el cálculo y categorización de amenaza es en sí una zonificación válida.

Tabla 3

Rangos del índice de intensidad de flujo y periodo de retorno por categoría de amenaza.

Rango de IDF método 1	Rango de PR método 2	Categoría
$I_{DF} \geq 50$	$2,33 \text{ años} \leq PR < 30 \text{ años}$	Alta

$1 \leq I_{DF} < 50$	$30 \text{ años} \leq PR < 100 \text{ años}$	Media
$I_{DF} < 1$	$PR \geq 100 \text{ años}$	Baja

Fuente: Adaptada de (Ramos y otros, 2021)

7.2.3.3 Agregación de resultados. La zonificación de amenaza final se realizó con la agregación de los métodos 1 y 2, considerando siempre el escenario más pesimista de acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Lo que se espera es obtener un resultado más consistente, teniendo en cuenta que ambos métodos se complementan entre sí y suelen arrojar resultados muy similares, por un lado, el método 1 teniendo unas tendencias a categorizar las zonas de cauce activo como amenaza media y por otro, el método 2, con tendencias a invisibilizar las zonas de transición entre amenaza media y alta.

Tabla 4.

Agregación de resultados del método 1 y método 2 para generar la amenaza final.

Categoría método 1	Categoría método 2	Amenaza final
Alta	Alta	Alta
Alta	Media	Alta
Alta	Baja	Alta
Media	Alta	Alta
Media	Media	Media

Media	Baja	Media
Baja	Alta	Alta
Baja	Media	Media
Baja	Baja	Baja

Fuente: Adaptada de (Ramos y otros, 2021)

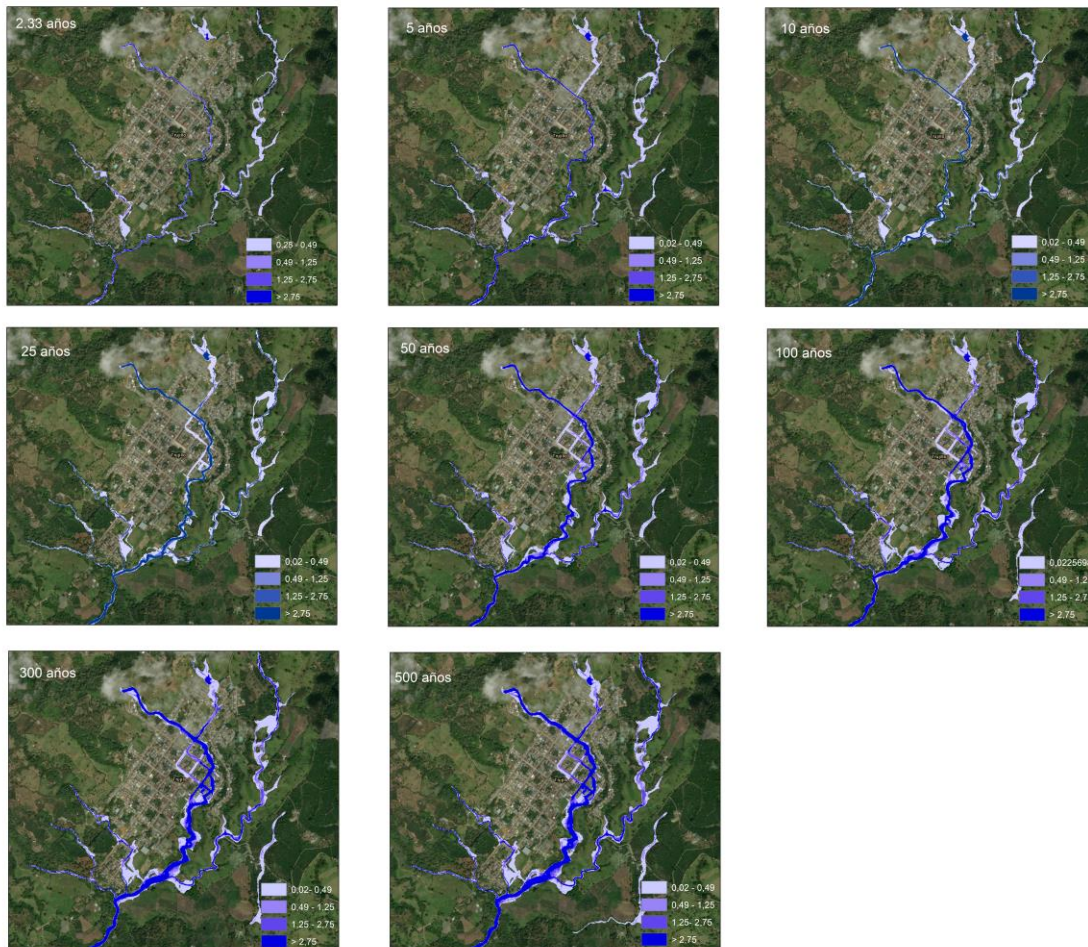
Por último, las zonas que no tienen valores de profundidad y velocidad en al menos 6 periodos de retorno (por ejemplo, una zona que se ve afectada solo por un evento en un periodo de retorno de 50 años o superior), se deben clasificar inequívocamente como zonas de amenaza baja, debido a que la probabilidad de que ocurra un evento que conlleve a una falla estructural es baja. Aunque, si a los ojos del profesional se consideran que existen áreas de interés, que deban ser modeladas y estudiadas de acuerdo con los modelos de regresión, (Ramos y otros, 2021) recomiendan generar modelos de profundidad y velocidad para periodos de retorno intermedios, que permitan cumplir con este requisito y poder así, calcular la amenaza con los dos métodos planteados anteriormente.

8. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en la ejecución de este proyecto vienen de la mano con la implementación de cada una de las tres fases que se expusieron en la metodología. En primer lugar, se encuentran los modelos de intensidad de flujo para cada periodo de retorno, calculados teniendo en cuenta la ecuación $I_{DF} = d * ||v||^2$ (3, los resultados se pueden observar en la siguiente figura.

Figura 8.

Modelos de Intensidad de flujo I_{DF} para los periodos comprendidos entre 2.33 y 500 años.



Sobre la anterior imagen se puede observar que la intensidad de flujo y el área de afectación aumentan conforme se incrementa el periodo de retorno, principalmente en cercanías a las áreas por donde se desplaza el cauce principal, por otra parte, los valores máximos producto del cálculo de intensidad pasan de $70 \text{ m}^3/\text{s}^2$ en el periodo de retorno de 2.33 años a $260 \text{ m}^3/\text{s}^2$ en el periodo de retorno de 500 años, claramente estos son valores que se dan en las áreas del cauce principal.

Figura 9.

Histograma de frecuencias del R^2 resultante de la ecuación Potencial

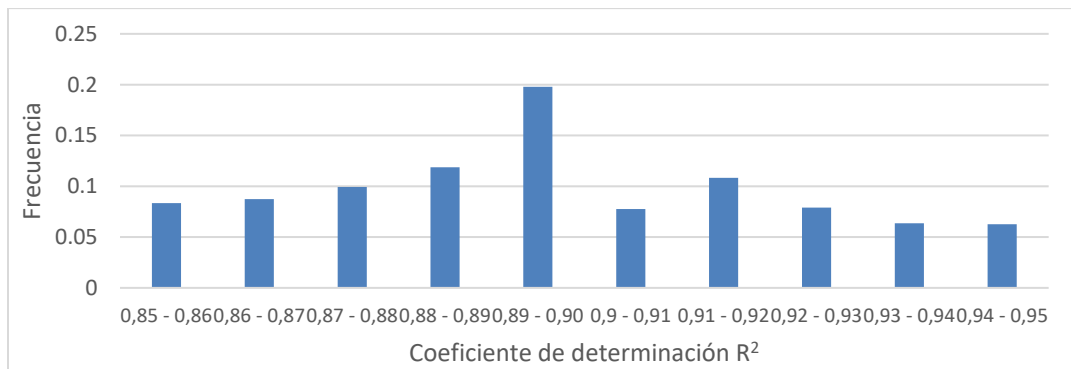
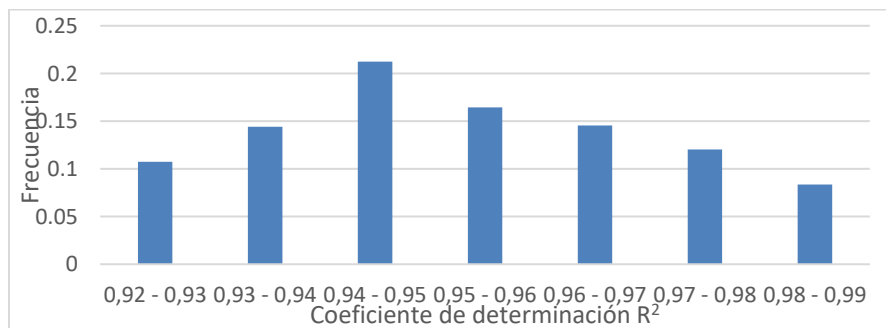


Figura 10.

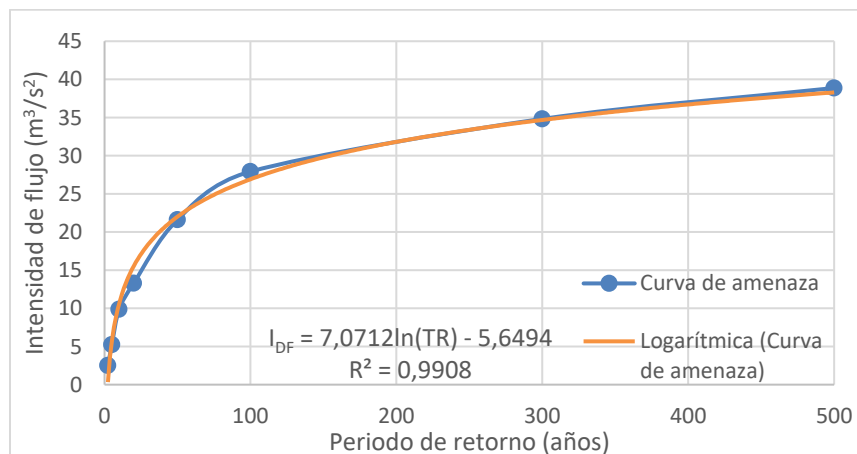
Histograma de frecuencias del R^2 resultante de la ecuación Logarítmica



El resultado de la siguiente fase se puede deducir al comparar la Figura 9. con la Figura 10., donde se muestran los valores del coeficiente de determinación y sus frecuencias obtenidas al momento de calcular la confiabilidad de los modelos de regresión potencial y logarítmica calculados. Sobre este en particular, se puede decir que se calcularon estas regresiones para un total de 4577 celdas, casi un 40% del total de celdas posibles a estudiar (teniendo en cuenta que los modelos de profundidad y velocidad para el periodo de retorno de 500 años tienen 11476 celdas), de las cuales para el modelo de regresión logarítmica los valores de R^2 se encuentran entre 0.92 y 0.98, siendo el rango entre 0.94 y 0.95 el que más se repitió con cerca de 21.2% de la muestra, mientras que para el modelo de regresión potencial los valores de R^2 se encuentran entre 0.85 y 0.95 y el rango entre 0.89 y 0.90 es, en este caso, el que más se repite con aproximadamente 19.7% de la muestra. Teniendo en cuenta estos resultados, se seleccionó el modelo de regresión Logarítmica como el que más se ajusta a la curva de amenaza en el municipio de Trujillo, esto se puede observar mejor en la Figura 11., en la que se muestra la curva de amenaza y la curva que representa la ecuación logarítmica que mejor se ajusta a ella.

Figura 11.

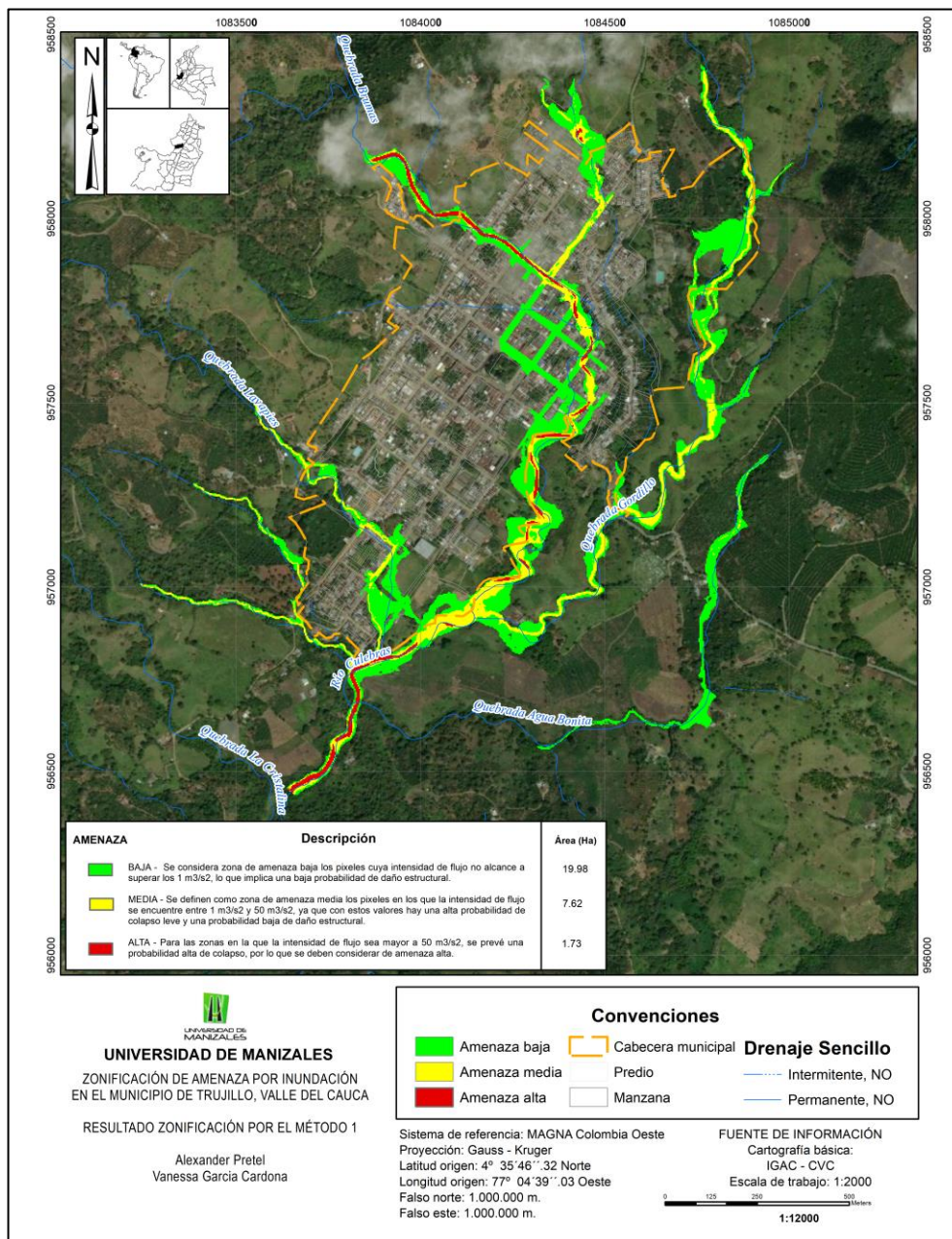
Ecuación logarítmica que mejor se ajusta a la curva de amenaza.



Seleccionado ya el modelo de regresión que mejor se ajustó a la curva de amenaza en el municipio de Trujillo, se realizó la clasificación de la amenaza de acuerdo con cómo se expuso en el literal 7.2.3, usando los rangos establecidos para los dos métodos planteados.

Figura 12.

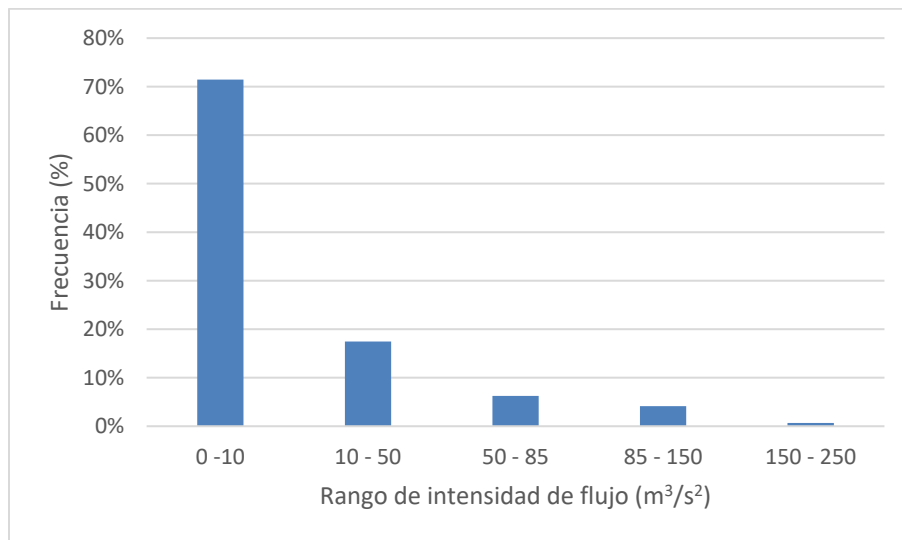
Zonificación amenaza por inundación por el método 1 para el periodo de retorno de 400 años



En primer lugar, para el método 1, se obtuvo una zonificación de amenaza que afecta en total a 29.33 Ha (Figura 12.), siendo la amenaza baja la que más área afectada tiene con casi 20 Ha, seguida por la amenaza media con 7.6 Ha y culminando con la amenaza alta con 1.7 Ha, con un rango de intensidad de flujo que va desde $0 \text{ m}^3/\text{s}^2$ hasta los $250 \text{ m}^3/\text{s}^2$ como se puede observar en la Figura 13..

Figura 13.

Distribución de la intensidad de flujo calculada con la ecuación Logarítmica agrupada en 5 rangos.



Sobre la Figura 13. se puede decir que la mayor parte de las celdas calculadas arrojaron valores de intensidad de flujo entre 0 y $10 \text{ m}^3/\text{s}^2$ y, que cerca del 90% de las celdas calculadas tienen una intensidad de flujo menor a $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$, es decir, se encuentra distribuido entre amenaza media y baja.

Por otro lado, para el método 2, se obtuvo una zonificación de amenaza que afecta a 29.06 Ha, y se distribuye en 24.1 Ha en amenaza baja, 0.91 Ha en amenaza media y 3.99 Ha en

amenaza alta, siendo igual que en el método anterior, la amenaza baja la que más área afecta en este municipio (ver Figura 14.), en este caso el rango de periodo de retorno va desde 0 a 500 años como se muestra en la Figura 15.

Figura 14.

Zonificación amenaza por inundación por el método 2 para el periodo de retorno de 400 años

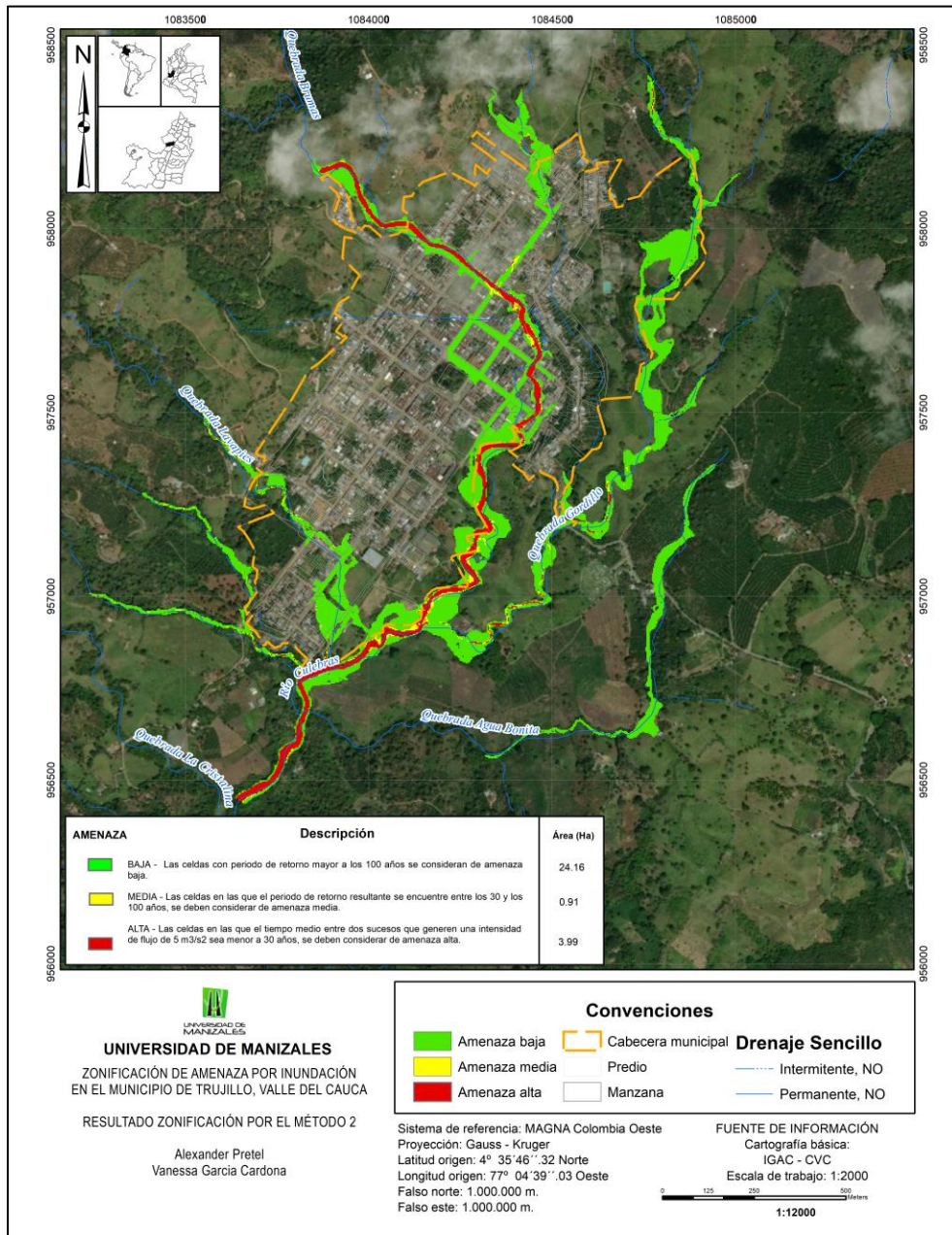
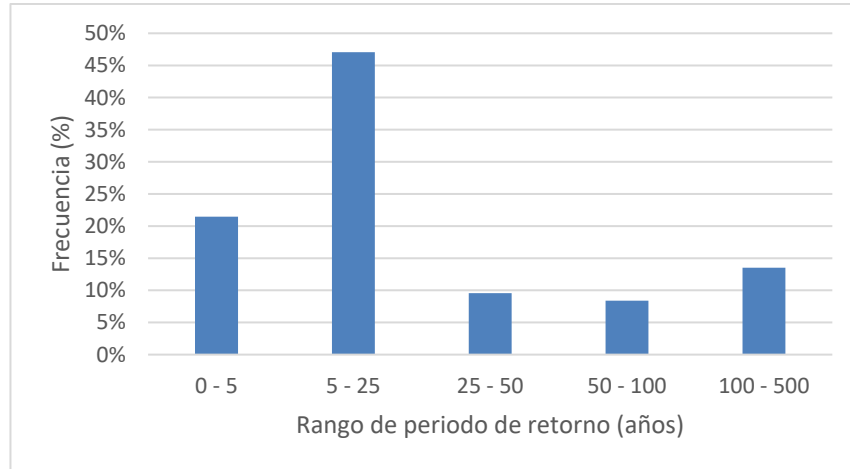


Figura 15.

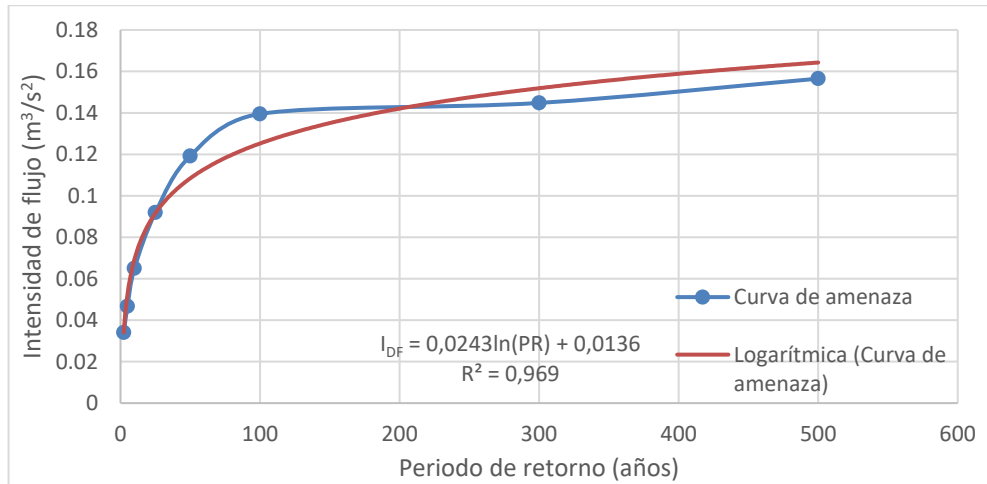
Distribución del periodo de retorno calculada al despejar la variable PR de la ecuación Logarítmica agrupada en 5 rangos.



Con el análisis de la Figura 15. se podría discutir que casi el 68% de las celdas tienen periodo de retorno entre 0 y 25 años al ser afectadas por una intensidad de flujo de $5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, lo que podría incitar a concluir que la mayor parte de las celdas se encuentran en amenaza alta, cosa que difiere con los datos mostrados en la Figura 14. Esto se puede explicar al considerar que hay celdas en las que la intensidad de flujo tiene como valor máximo un número menor a los $5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ como se muestra en la Figura 16, en donde se puede observar que, para un periodo de retorno de 100, 300 y 500 años los valores de intensidad de flujo son 0.1395 , 0.1448 y $0.1565 \text{ m}^3/\text{s}^2$ respectivamente. Si en este caso se calcula el periodo de retorno asociado a la intensidad de flujo deseada ($5 \text{ m}^3/\text{s}^2$) el resultado será un valor igual a 1.31×10^{81} años, valor muy lejano de lo razonable, por lo que estas celdas no se incluyeron dentro del cálculo y fueron clasificadas directamente como área de amenaza baja.

Figura 16.

Curva de amenaza para una celda con valores de intensidad de flujo menor a $5 \text{ m}^3/\text{s}^2$



Para terminar, el ultimo resultado obtenido es la zonificación de amenaza final calculada a partir de la agregación de los métodos 1 y 2 (ver Figura 17) que arroja un resultado de 19.94 Ha en amenaza baja, 5.12 Ha en amenaza media y 3.99 Ha en amenaza alta. Como se puede ver en la Figura 17, las zonas de amenaza alta y media se encuentran principalmente ubicadas sobre las áreas por donde se desplaza el cauce principal (en este caso el río Culebras)

Figura 17.

Zonificación amenaza por inundación agregación de los dos métodos

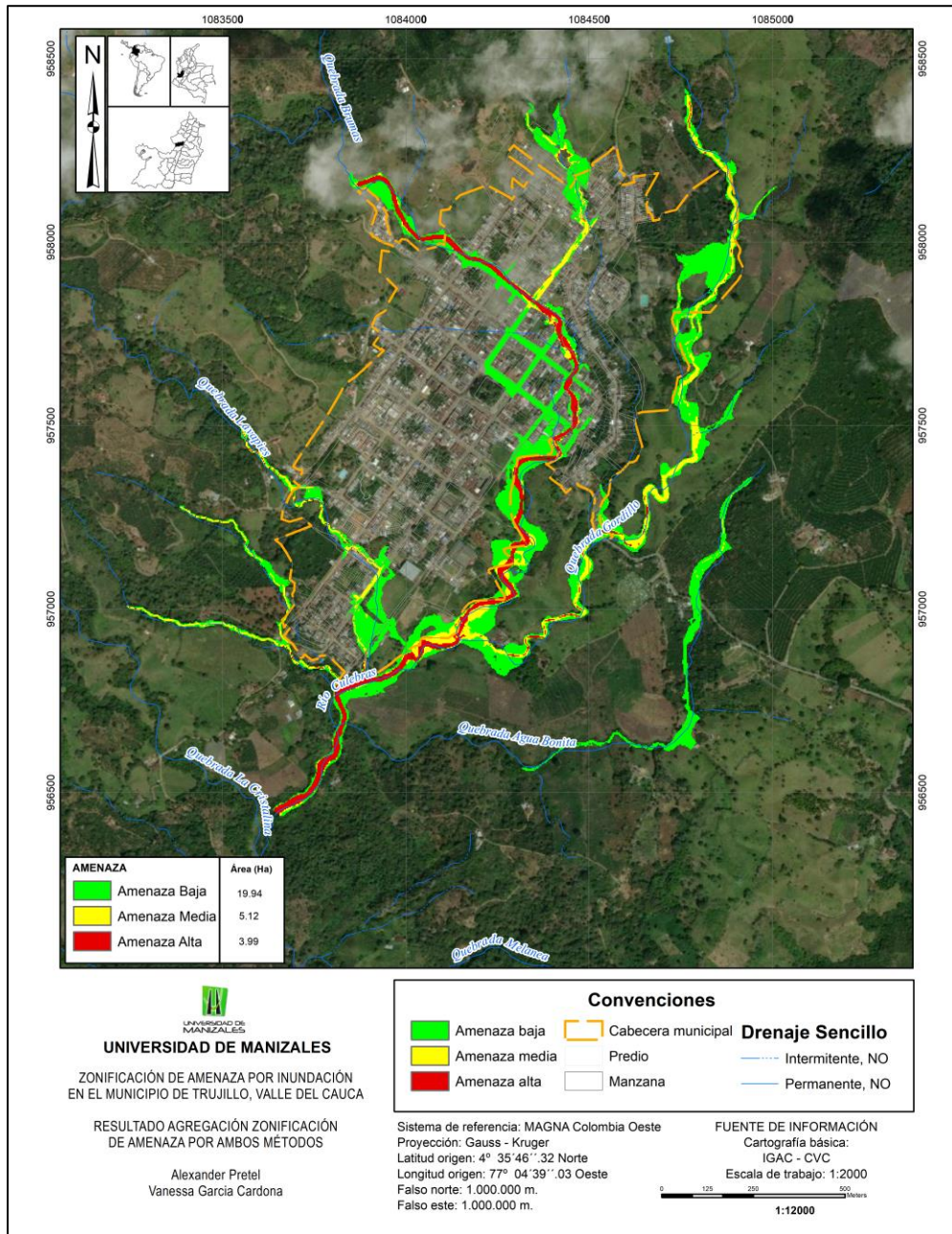
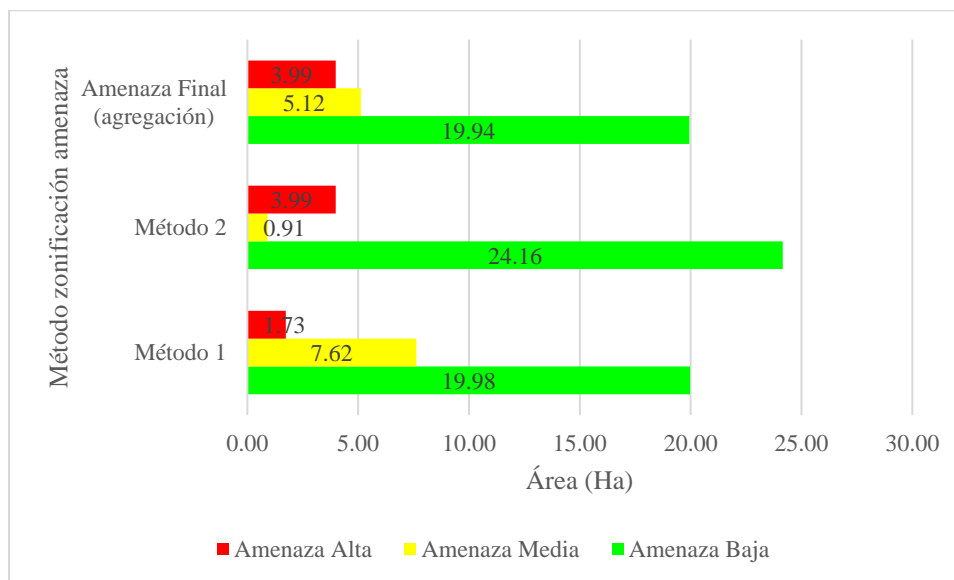


Figura 18.

Comportamiento del área por niveles de amenaza según cada método y su agregación



Como se puede observar en la figura 18 y en las figuras que contienen las salidas graficas de la zonificación de amenaza por inundación para ambos métodos y su agregación (Figura 12, Figura 14 y Figura 17), los resultados obtenidos muestran el balance que se logra al combinar los dos métodos, consiguiendo el énfasis que se requiere en las zonas por donde transcurre el caudal del afluente principal, obtenido a partir del método 2, pero destacando las zonas de amenaza media obtenidas por el método 1, logrando convertir pixeles con valores de amenaza baja a media al realizar la agregación, lo que consigue generar un modelo más ajustado a la realidad donde se aprecia la transición de los diferentes niveles de amenaza, sin recurrir a valores extremos al avanzar entre una zona y otra.

9. Conclusiones

Los sistemas de información geográfica son una herramienta fundamental que permiten observar el comportamiento de la zonificación de amenaza a nivel espacial gráficamente, estos se convierten en un instrumento clave para evaluar y ajustar los diferentes modelos generados, son un insumo importante para los expertos, al igual que para los tomadores de decisiones, e incluso para la socialización de esta información resultado a las comunidades donde se realicen este tipo de estudios.

Dados los insumos iniciales y resultados obtenidos, se puede concluir que el comportamiento de la profundidad del flujo, como lo mencionan en la teoría consultada diferentes autores, es uno de los parámetros hidráulicos que mayor influencia tienen en cuanto al cálculo del nivel de amenaza, esta relación se puede ver mucho más clara en los resultados obtenidos por el método de zonificación de amenaza 2 versus los modelos de profundidad obtenidos.

Este proyecto, plantea una opción para el cálculo de la zonificación de amenaza por inundación a partir de métodos predictivos basados en modelos matemáticos, los cuales dan resultados coherentes, ambos métodos se complementan al realizar su agregación y se puede ver un resultado final de amenaza balanceado, donde se toman las fortalezas de cada uno de los métodos aplicados.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que es importante estudiar la zona de estudio a detalle para estimar los valores usados como base para la clasificación de amenaza por ambos métodos (usando un periodo de retorno base para calcular la intensidad de flujo y usando una intensidad de flujo base para calcular el periodo de retorno asociado a esta) adaptando estos valores para que coincidan con las condiciones del entorno como topografía, rugosidad del suelo y el tipo, calidad, resistencia y cantidad de elementos expuestos, lo que sin duda generaría una zonificación de amenaza más ajustada a la realidad de la zona de estudio.

10. Recomendaciones

En este proyecto se habla de la zonificación de amenaza haciendo uso de un solo modelo de regresión elegido entre dos posibles (ecuación potencial y ecuación logarítmica), metodología que mostró buenos resultados en la generación de la zonificación. Sin embargo, sería un buen objeto de estudio, realizar la zonificación de amenaza seleccionando individualmente para cada píxel el modelo de regresión que mejor se ajuste a la curva de amenaza generada por los valores de intensidad en ese píxel y no de manera general, como se hizo en este proyecto, aumentando así el grado de confiabilidad en el procesamiento.

También, es necesario realizar, con ayuda de la comunidad, una actividad de cartografía social e histórica, que permita determinar las zonas a priorizar en la zonificación de amenaza de inundación, siendo estas zonas de vital importancia y que deben ser calculadas a partir del uso de los dos métodos planteados y no asumidos (como es el caso de las celdas que no fueron afectadas por 6 o más periodos de retorno) y, se debe tener en cuenta que, como lo plantean los creadores de la metodología, se deben realizar modelamientos hidrológicos para periodos de retorno intermedios si se llegase a necesitar completar la cantidad de periodos de retorno que afecten a una celda. Para los casos en los que no sea posible completar el número de periodos de retorno, sería una buena práctica usar la susceptibilidad geomorfológica, como insumo para darle validez a la zonificación de amenaza, realizando una agregación entre la zonificación creada y la susceptibilidad geomorfológica, considerando siempre el escenario más pesimista como el predominante.

11. Referencias

- Al Min, M., Imiaty, R., & Marlina, A. (2020). Flood Hazard Mapping in Residential Area Using Hydrodynamic Model HEC-RAS 5.0. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 7(1), 25-36. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.7.1.25-36>
- Alaghmand, S., Abdullah, R., Abustan, I., & Vosoogh, B. (2010). GIS-based river flood hazard mapping in urban area (a case study in Kayu Ara river basin, Malaysia). *International Journal of Engineering and Technology*, 2(6), 488-500. <http://www.enggjournals.com/ijet/docs/IJET10-02-06-23.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2020). *Planificación para la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas, Santiago.
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. Colombia.
- Coral Chacón, F., & Chamorro Benavies, J. (2016). *Zonificación de amenaza a incendios forestales en el departamento del Cauca. Manizales, Colombia*.
- Coronado, J. (2006). Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos por meio do uso de sistemas de informações geográficas: Aplicação em uma área do eixo cafeeiro Colombiano. *Trabajo de grado Master en Geotécnia*. Brasília D.F.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). Índice municipal de riesgo de desastres de Colombia. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- El congreso de Colombia. (24 de Abril de 2012). Ley 1523 de 2012. Colombia.
- Freedman, D., Pisani, R., & Purves, R. (2007). *Statistics* (Cuarta ed.). New York.
- Gholami, V., Asghari, A., & Taghvaye Salimi, E. (2016). Flood hazard zoning using geographic information system (GIS) and HEC-RAS model (Case study: Rasht City). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 14, 263-272. https://cjes.guilan.ac.ir/article_1862.html
- Golshan, M., Jahanshahi, A., & Afzali, A. (2016). Flood hazard zoning using HEC-RAS in GIS environment and impact of manning roughness coefficient changes on flood zones in Semi-arid climate. *Desert*, 21, 24-34.
- Jakob, M., Stein, D., & Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Springer Science*, 241-246. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2>

- Jowett, I. G., & Duncan, M. J. (2012). Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river. *Ecological Engineering*, 92-100.
- Keith, C. C. (1986). Advances in Geographic Information Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 175-184.
- Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Suryavanshi, S., Ahmad, A., & Lal, D. (2020). Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: a case study of Sangam area, Prayagraj, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00687-8>
- Malik, S., Pal, S., Arabameri, A., Chowdhuri, I., Saha, A., Chakraborty, R., . . . Das, B. (2021). GIS-based statistical model for the prediction of flood hazard susceptibility. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 16713–16743. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01377-1>
- Milanes Batista, C., Galbán Rodríguez, L., & Olaya Coronado, N. (2017). *Amenazas, riesgos y desastres: Visión teórico metodológica y experiencias reales*. Barranquilla: Corporación universidad de la costa. <http://hdl.handle.net/11323/1156>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). Decreto 1807 de 2014. *Diario oficial No. 49279 de 19 de septiembre de 2014*. Colombia.
- Philip, B. B., Wayne, H. C., & Baxter, V. E. (2013). *Hidrology and Floodplain Analysis*. Pearson.
- Ramos Cañón, A. M., Reyes Merchán , A. A., Munévar Peña, M. A., Ruiz Peña, G. L., Machuca Castellanos, S. V., Rangel Flórez, M. S., . . . Pérez Moreno, M. A. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>
- Ramos, A. M., Reyes Merchán , A. A., Munévar Peña, M. A., Ruiz Peña, G. L., Machuca Castellanos, S. V., Rangel Flórez, M. S., . . . Pérez Moreno, M. A. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>
- Secretaria de Planeación Departamental Gobernación del Valle del Cauca. (2011). *La gestión del riesgo en el ordenamiento territorial*. Cali.
- Te Chow, V. (1982). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill International Book Company.
- Tomlinson, R. (2007). *Thinking About GIS* (Tercera ed.). ESRI-Ingram.

- Turner II, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., . . . Schiller, A. (5 de Junio de 2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, *100*(14).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres. (2013). Trujillo, Valle del Cauca, se prepara desde ya para enfrentar la primera temporada de lluvias de 2013.
http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/paginas/old_noticias/1639.aspx
- Vojtek, M., & Vojteková, J. (2016). Flood hazard and flood risk assessment at the local spatial scale: a case study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *7*, 1973-1992.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1166874>
- Zapata Balanqué, J. (2007). Empleo de herramientas de la geomática en la microzonificación sísmica de ciudades. Ejemplos de caso: Santiago de Cuba y Guantánamo como propuesta ed gestión del desarrollo. *Biblioteca virtual en salud Honduras*. <http://www.bvs.hn/cu-2007/ponencias/GEO/GEO-014.pdf>
- Zeng, X., Gualtieri, C., Liu, H., & Shao, D. (2021). Environmental Hydraulics in the New Millennium: Historical Evolution and Recent Research Trends. *Water*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13081021>