

**Caracterización, análisis y evaluación de la zonificación de susceptibilidad por inundación
en el municipio de Fortul (Arauca)**

Julián Vélez Correa

Andrea Carrillo Rodríguez

Facultad de Ciencias y Tecnologías, Universidad Santo Tomás

Especialización en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

PhD. Javier Augusto Vera Solano, Mercedes Castillo de Herrera

Mayo de 2022

Tabla de contenido

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	6
Justificación	8
Estado del arte	10
Problema	15
Pregunta de investigación	16
Hipótesis	16
Objetivos	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Marco teórico	18
Metodología	25
Compilación de la cartografía base y cartografía específica	25
Recopilación y análisis de información secundaria	26
Análisis SIG	26
Integración de información con ayuda de los sistemas de información geográfica y generación de mapas instrumento para el análisis de zonificación	27
Interpretación digital y zonificación de susceptibilidad por inundación aplicando el proceso analítico jerárquico	27
<i>Matriz de prioridades</i>	29
<i>Consistencia</i>	30
Proponer medidas prospectivas y/o correctivas de acuerdo con la zonificación de la susceptibilidad a inundación del municipio.	31
Resultados y discusión	33
Localización	33
Hidrografía	34
Clima	35
Pendiente	35
Geomorfología	38
Geología	42

Usos del suelo	46
Susceptibilidad de la geomorfología	49
Registro histórico de inundación	51
Susceptibilidad de pendiente	53
Susceptibilidad de la geología	55
Susceptibilidad de usos del suelo	57
Zonificación de susceptibilidad por inundación	59
Categoría muy alto	59
Categoría alto	59
Categoría medio	60
Categoría bajo	60
Categoría muy bajo	60
Proceso analítico jerárquico (AHP)	62
Overlay : Superposición de la información	63
Medidas prospectivas y correctivas	64
Conclusiones	69
Recomendaciones	72
Referencias	73

Resumen

El municipio de Fortul (Arauca) por su localización geográfica cambiante entre el flanco oriental de la Cordillera Oriental y piedemonte Araucano posee ciertas características sedimentológicas, hidrológicas, hidráulicas y pendientes que generan cauces trenzados y meándricos a lo largo del municipio que causan recurrentemente inundaciones durante las prominentes temporadas invernales. En este trabajo se presenta la caracterización, análisis y evaluación de la zonificación de susceptibilidad por inundación del municipio de Fortul mediante el análisis de variables como geología, geomorfología, pendiente y usos del suelo aplicando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty (1980). Se obtiene la zonificación de susceptibilidad por inundación determinando que el municipio de Fortul presenta susceptibilidad de inundación muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto con valores de 40,1%, 8%, 4,7%, 19,6% y 27,6%, respectivamente.

Palabras claves: geología, geomorfología, mitigación, pendiente, proceso analítico jerárquico, uso del suelo.

Abstract

The municipality of Fortul (Arauca), due to its changing geographic location between the eastern flank of the Eastern Cordillera and the Araucan foothills, has certain sedimentological, hydrological, hydraulic and slope characteristics that generate braided and meandering riverbeds throughout the municipality that cause recurrent flooding during the prominent winter seasons. This paper presents the characterization, analysis and evaluation for the zoning of susceptibility to flood hazards in the municipality of Fortul through the analysis of variables such as geology, geomorphology, slope and land use by applying the Analytical Hierarchical Process (AHP) of Saaty (1980). The zoning of susceptibility to flood hazards was obtained, determining that the municipality of Fortul has very low, low, medium, high and very high susceptibility to flooding with values of 40.1%, 8%, 4.7%, 19.6% and 27.6%, respectively.

Key words: geology, geomorphology, mitigation, slope, analytical hierarchy process, land use.

Introducción

Colombia, con un sistema andino subdividido en tres cordilleras, genera una alta dinámica en sus piedemontes con sistemas fluviales de características torrenciales. Debido al transporte súbito de material desde las cuencas altas se forman abanicos aluviales, que han sido lugares estratégicos para el asentamiento de poblaciones desde la época de la colonia. Como contrapartida de la disponibilidad de recursos naturales por la permanencia de agua y suelos fértiles (Trefethen, 1987), estas zonas son altamente susceptibles a inundaciones y crecientes que afectan las poblaciones ribereñas ((Aguilar, Bedoya & Hermelin, 2007; Flórez & Suavita-Bejarano, 1997) en (Varón-Gutiérrez, S. & Vargas-Cuervo, G., 2019)).

El municipio de Fortul (Arauca) localizado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental abarca topografías de montaña, zona de piedemonte y una vasta llanura de inundación con diferentes geomorfologías, varios tipos de drenajes, cambios de pendiente, heterogénea cobertura vegetal confabulada con temporadas mayores de lluvia desde mayo a octubre (frecuencias de 18 a 21 días) (IDEAM, 2021) teniendo en cuenta estas condiciones del municipio, se realizó la caracterización, análisis y evaluación para la zonificación de susceptibilidad por inundación a escala 1:25.000.

Así mismo, durante los últimos años en Fortul, se han experimentado unas condiciones de inundación asociadas a la ocurrencia del evento de la niña, que a su vez ha afectado a nivel nacional en algunas ocasiones; estas inundaciones han generado múltiples efectos adversos sobre el medio natural y la ciudadanía, situaciones de calamidad en donde muchas personas, familias, animales, cultivos, viviendas y diferentes infraestructuras han quedado sumergidas bajo el agua o han sido arrasados por esta.

Por todas estas catástrofes que generan las inundaciones, es necesario elaborar la zonificación de susceptibilidad por inundación para distinguir las áreas de amenaza y riesgo y con base en su análisis y evaluación proponer medidas prospectivas y correctivas, que permitan orientar y planificar acciones para prevenir las emergencias y futuros desastres, además de actuar en caso de llegarse a presentar.

Justificación

Colombia es un país expuesto en donde el impacto socioeconómico que han generado las amenazas naturales en la población no había sido evaluado de tal manera que a partir de estas experiencias se pudieran establecer lineamientos para así en un futuro, lograr tomar acciones con respecto a prevención y respuesta ante la eventual ocurrencia de estos eventos. Solo fue hasta el 13 de Noviembre de 1985 con el desastre ocurrido por el lahar provocado por la activación del Volcán nevado del Ruiz, el cual afectó a los departamentos de Tolima y Caldas, provocando 25.000 víctimas y pérdidas económicas alrededor de los 211.8 millones de dólares, de acuerdo con cifras suministradas por el PNUD, que se detectó como necesidad prioritaria para el país contar con un Sistema que coordinara todas las acciones encaminadas a la prevención y atención de desastres en todo el territorio nacional. En consecuencia, se crea el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres - SNPAD como red institucional para el cumplimiento de esta función (Ley 46 de 1988 – Decreto Ley 919 de 1989) (UNGRD, 2014), el cual más tarde trasciende a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, apoyada en el cambio de normatividad que prescribe la Ley 1523 de 2012 (González-Velandia, J., 2014), donde específicamente, los procesos de la Gestión del Riesgo definidos en el artículo 6 de la ley 1523 de 2012, establece que se debe desarrollar, mantener y garantizar como primer paso el proceso de conocimiento del riesgo mediante el cual se identifica, evalúa y analiza las condiciones de riesgo a través de sus principales factores (amenaza, elementos expuestos y vulnerabilidad), sus causas y factores causales, instrumento inicial que sirve para definir consecuentemente una reducción del riesgo y establecer un manejo de desastres (UNGRD, 2012).

El conocimiento existente en cuanto a gestión del riesgo al día de hoy en el municipio de Fortul (Arauca) se presenta de manera somera en el estudio realizado por la Universidad de los Llanos-Gobernación de Arauca (2019) donde realizan la evaluación, apoyo y recomendaciones a los planes de ordenamiento territorial municipales (municipio de Fortul) bajo el convenio interadministrativo N° 532 de 2016 donde se genera un informe de orden técnico, jurídico y de planificación territorial en el marco de la consolidación del archivo histórico municipal como apoyo a la formulación del Plan de Ordenamiento Departamental de Arauca.

Se pretende realizar la caracterización, análisis y evaluación para la zonificación de susceptibilidad por inundación en el municipio de Fortul (Arauca), el cual anualmente está sujeto a este fenómeno y que siempre afectan la calidad de vida de la población

De acuerdo con las problemáticas que traen las inundaciones, se hace necesario que el municipio de Fortul cuente con un estudio detallado sobre la caracterización, análisis y evaluación de la zonificación de la susceptibilidad por inundación, y a partir de esta información se propongan medidas prospectivas y/o correctivas para la toma de decisiones que faciliten la prevención y mitigación de desastres. Así mismo, se pretende brindar a las entidades gubernamentales un escenario de referencia que les permita formular políticas ambientales y de planificación territorial y del desarrollo, con enfoque a la reducción del riesgo.

Estado del arte

A nivel internacional, Moncada & Ojeda (2018) & Hernández-Uribe et al. (2017) estudian el fenómeno de inundación de la cuenca Boconó y Atemajac, respectivamente, logrando escenarios de susceptibilidad por inundación utilizando la metodología basada en modelación numérica técnicas de evaluación multicriterio mediante un sistema de información geográfica, considerando los factores de acumulación de flujo, pendiente, altitud, distancia a drenajes y la permeabilidad de los suelos. Mientras que, Quesada-Román, A. (2017) realiza un análisis morfométrico y morfogenético que da lugar a un mapa de peligros por inundación de la cuenca, validado por medio de la base de datos de desastres DesInventar convirtiéndolo en un insumo de base para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial de la cuenca alta del río General en Costa Rica. Así mismo, Sanchez & Mahecha (2020) analizaron el riesgo por inundación en el río Tunjuelito de la localidad de Bosa en Bogotá D.C. a partir de la geomorfología, pendientes, litología, precipitación y huella de inundación; para la generación del mapa de riesgo realizaron un intersect entre la capa de amenaza y la capa de vulnerabilidad.

Por otra parte, Vega-Serratos, B., Domínguez-Mora, R.; Posada-Vanegas, G. (2018) & Gallegos-Reina, A., & Perles-Roselló, M. J. (2020) presentan una metodología que permite evaluar el riesgo por inundación, proponen utilizar un modelo hidrodinámico bidimensional para obtener los parámetros del peligro natural, como son profundidad, duración y velocidad de la inundación, estimando la probabilidad de crecienta y calculando la esperanza de daño asociada con cada magnitud y orientándose de manera directa a la gestión y ordenación territorial para escalas locales y regionales.

Por su parte, Lopez, B. (2018) y Wright, E. (2016) a partir de un análisis espacial determinan cuales son las áreas afectadas por procesos de inundaciones y remoción en masa en áreas urbanas determinando las áreas factibles a ser urbanizadas a fin de contribuir a la planificación y ordenamiento territorial. Por otro lado, Fernandez, C. & Buss, S. (2016) detallan los principales factores que contribuyen al fenómeno de inundaciones para después pasar a identificar la relevancia de dichos factores vis-a-vis los desafíos del sistema de drenaje pluvial de la ciudad de La Paz, Bolivia, así como las soluciones identificadas como necesarias para afrontar estos factores.

De modo similar, Estrada Vásquez (2020) en el trabajo de investigación evaluación del riesgo de inundación fluvial en la cuenca baja del río Esmeraldas con enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), realizaron la teledetección de las áreas inundadas y no inundadas a partir de imágenes satelitales, además utilizaron la metodología diseñada por Wilches – Cahux en la cual la vulnerabilidad global se establece por la suma de diferentes vulnerabilidades, y los indicadores se construyeron a partir de análisis multicriterio de variables sociales, culturales y económicas.

En cambio, Rahmati, O., Zeinivand, H. & Besharat, M. (2016) ejecutan un proceso analítico jerárquico realizando predicciones precisas y fiables de la extensión de las inundaciones que permiten evaluar el potencial de peligro de inundaciones en regiones sin datos en una parte del río Yasooj en Irán. Así mismo, Salazar Andrade (2020) evaluó la susceptibilidad a eventos de inundación mediante características morfométricas y de relieve en las cuencas del río Guarapas y Las Ceibas en el Huila; obtuvo una jerarquización y evaluación multicriterio para clasificar los tipos de susceptibilidad, a partir de datos morfométricos, imágenes satelitales, cobertura y uso de suelo.

Así mismo, Berga, L. (2017) identifica el riesgo por inundación y resalta la importancia de las medidas de ordenación territorial y urbanismo, describiendo las limitaciones del uso del suelo reguladas recientemente y facilitando la gestión del riesgo.

A nivel nacional, Lopez et al. (2021) en su investigación evalúa el riesgo como estrategia de adaptación al cambio climático, caracterizando la amenaza mediante el cruce de múltiples indicadores socio territoriales, mostrando la cartografía del riesgo como herramienta de adaptación y para la toma de futuras decisiones. De la misma forma, Londoño-Giraldo (2021) evaluó el riesgo por inundación del sector urbano del municipio de Supía, el estudio se centra en la modelación y cuantificación del riesgo físico, caracterizando los elementos expuestos y su grado de vulnerabilidad.

Varón G. & Vargas C. (2019) presentan el análisis morfodinámico de la parte baja del río Guatiquía, un río de Piedemonte, como insumo para la evaluación de la susceptibilidad a inundación de la población ribereña de la cabecera municipal de Villavicencio. Determinando el comportamiento de los cauces trenzados dentro del lecho mayor del sistema fluvial y la susceptibilidad a las inundaciones en las categorías media alta y alta a escala 1:25.000.

Por otra parte, Vera Rodríguez & Albarracín Calderón (2017) bosqueja una metodología para el análisis de la vulnerabilidad de tres fenómenos amenazantes, en un marco teórico holístico y el uso de SIG en la cuenca del río Combeima del departamento de Tolima. El modelo conceptual planteado por los autores se basa en identificar los factores de vulnerabilidad (exposición, fragilidad y capacidad de adaptación y respuesta) los cuales a su vez presentan una serie de componentes, asignándoles escala de valoración y convenciones.

Por su parte, Calixto Ramon (2017) mediante el uso de SIG determinó zonas susceptibles de inundación en el área de influencia del río Cravo Sur de Yopal – Casanare, con la ponderación de variables realizaron la evaluación multicriterio, clasificando la susceptibilidad de 1 a 5. Mientras que, Salazar & Ruiz (2017) generaron el mapa de zonas de amenaza por inundación en el municipio de Mompós – Bolívar, aplicando herramientas SIG a partir del procesamiento de imágenes satelitales e información de zonificación hidrográfica, DEM, precipitación, geología y cobertura de la tierra.

A nivel local, la Universidad de los Llanos-Gobernación de Arauca (2019) realizan la evaluación, apoyo y recomendaciones a los planes de ordenamiento territorial municipales (municipio de Fortul) bajo el convenio interadministrativo N° 532 de 2016 donde se genera un informe de orden técnico, jurídico y de planificación territorial en el marco de la consolidación del archivo histórico municipal como apoyo a la formulación del Plan de Ordenamiento Departamental de Arauca. De igual manera, el Consorcio Caranal (2015) presenta el resumen ejecutivo de la fase diagnóstica correspondiente al plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica Caranal, según la guía técnica POMCAS con el fin de obtener orientaciones técnicas que servirán como referencia para identificar y definir los parámetros, variables, indicadores y fuentes de información útiles para establecer la caracterización de la cuenca, análisis situacional y síntesis ambiental.

De igual manera, en el Esquema de Ordenamiento Territorial de Fortul (2011) se aborda de forma somera el diagnóstico de las amenazas presentes en el municipio, en donde se encuentran amenazas por deslizamiento, inundación, avalancha y otros. La principal amenaza la constituyen las viviendas ubicadas en las riberas de los ríos y caños. Así mismo, se presenta el mapa de amenazas naturales, encontrándose dentro del municipio amenazas sísmicas de alta a

intermedia, amenaza alta por inundación en las riberas de los principales ríos y caños, amenaza alta por erosión y remoción en masa y alta por incendios forestales.

Problema

El municipio de Fortul (Arauca) anualmente está sujeto a fenómeno de inundación, donde la ola invernal ocurrida entre junio y julio del año 2021 generó graves emergencias en este municipio, se declaró la alerta roja por inundación y desbordamiento de ríos, resultando afectadas muchas personas de la zona rural y urbana. Los daños generaron pérdidas de viviendas, cultivos, ganado, vías y puentes; viéndose afectado el tránsito vehicular por el daño en varias secciones de la vía Nacional que comunica a Saravena- Fortul y Fortul-Tame. Así mismo, los ríos Cusay, Banadía y Caranal se desbordaron en el área rural, llevando consigo vías secundarias y dejando incomunicadas a las veredas Puerto Nidia y Matecaña. De igual manera, se presentaron inundaciones en el área urbana, ocasionando daños estructurales, como el colapso del sistema de alcantarillado, la inundación del primer piso de la urbanización Villas del Castillo, daños en el cerramiento perimetral del Colegio Alejandro Humboldt, entre otras afectaciones.

Los eventos locales presentados con recurrencia, especialmente en las temporadas de invierno y la nula existencia del instrumento de susceptibilidad por inundación no permite orientar estrategias a mediano o largo plazo acorde con la gestión del riesgo y su integración en el EOT, además, no es posible determinar áreas con condición de riesgo, restricciones de posibles urbanizaciones, limitaciones de uso de suelo, acciones de mitigación, etc.

Pregunta de investigación

¿A partir de que variables se puede elaborar la caracterización, análisis y evaluación de la zonificación de susceptibilidad por inundación del municipio de Fortul con validez de la metodología de jerarquización y multicriterio?

Hipótesis

Las características actuales del terreno donde se ubica el municipio de Fortul (Piedemonte Arauca) son definidas por variables como geología, geomorfología y pendiente, además, de los usos del suelo presente aplicado por los habitantes que alteran el comportamiento morfodinámico de las cuencas hídricas. Es por esto, que se tendrá en cuenta estas cuatro variables avaladas por el experto evaluador donde este asigna valores de importancia y es corroborado por el modelamiento matemático de proceso analítico jerárquico (AHP) propuesto por Saaty (1980) y permitirá obtener una evaluación de la zonificación de susceptibilidad por inundación en el municipio de Fortul (Arauca) con ayuda de la superposición de la información en software SIG.

Objetivos

Objetivo general

Realizar la caracterización, análisis y evaluación de la zonificación de susceptibilidad por inundación en el municipio de Fortul (Arauca) aplicando el proceso analítico jerárquico.

Objetivos específicos

Analizar e interpretar la información satelital y cartográfica mediante la utilización de Sistemas de Información geográfica.

Generar la zonificación de susceptibilidad por inundación del municipio de Fortul a escala 1: 25 000.

Proponer medidas prospectivas y correctivas para las áreas susceptibles a inundación.

Marco teórico

Uno de los problemas actuales que han generado grandes pérdidas económicas, sociales, culturales y humanas es la falta de integración del componente de gestión del riesgo y desastre en el ordenamiento y planificación del territorio. Los procesos de gestión del riesgo en el marco de la ley 1523 de 2012, se consolidan en conocimiento del riesgo, su reducción y el manejo de los desastres (Guerrero, 2021).

En el proceso del conocimiento del riesgo es importante diferenciar entre los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. De acuerdo con Guerrero (2021) la amenaza es el peligro latente de la ocurrencia de un fenómeno que puede impactar de manera severa y que puede ser de origen natural o socio-natural, mientras que, la vulnerabilidad o susceptibilidad es la fragilidad desde el orden físico, social, económico, ambiental e institucional de los elementos expuestos y que se da en relación con de los eventos amenazantes. En este sentido, el riesgo son las posibles pérdidas producidas por un evento natural o socio-natural y que está en función de la vulnerabilidad.

Ampliando la conceptualización en gestión del riesgo, la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales (2021), define la amenaza como el peligro latente de que un evento físico de origen natural o antrópico accidental se presente con tal severidad que se pierdan vidas humanas, lesiones u otros impactos en la salud, daños materiales perdidas de bienes, infraestructura, servicios públicos, recursos ambientales y medios de sustento. Así mismo, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad y representa los daños o pérdidas potenciales que se presentan debido a los

eventos peligrosos que puedan generarse, ya sean de orden natural, socio natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional (Ramos et al., 2021).

La susceptibilidad por inundación cobra relevancia al momento de decidir los usos del suelo y los procesos de planificación del territorio. De acuerdo con el glosario internacional de hidrología (WMO- No. 385, 2012) la inundación es el desbordamiento de una masa de agua fuera de sus confines normales o la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas no sumergidas. Se pueden presentar en forma lenta o gradual en llanuras y de forma violenta o súbita en regiones montañosas de alta pendiente (Vega & Castiblanco, 2016)

Existen dos tipos de inundaciones de acuerdo con la clasificación más sencilla: las inundaciones lentas, que ocurren en zonas planas de ríos y valles aluviales, en donde el aumento de nivel es solo en centímetros, sin embargo afectan grandes extensiones de territorio; por otra parte están las crecientes súbitas, tienen menor alcance en área, pero pueden ser más destructivas, puesto que responden a las fuertes precipitaciones en la parte alta de la cuenca, por lo que el aumento del nivel del agua es de metros en pocas horas y su permanencia es también de pocas horas o días (IDEAM, 2021).

La zonificación para susceptibilidad de inundación, en escenario internacional ha sido abordado por diversos autores (Moncada & Ojeda, 2018; Hernández-Urbe et al. 2017; Quesada-Román, A., 2017) basados en modelación numérica con técnicas de evaluación multicriterio mediante un sistema de información geográfica, considerando los factores de acumulación de flujo, pendiente, altitud, distancia a drenajes y la permeabilidad de los suelos; Aerts & Wouter-Botzen (2011); Rahmati, O., Zeinivand, H. & Besharat, M. (2016) plantean un proceso analítico jerárquico para realizar predicciones precisas y fiables de la extensión de las inundaciones para evaluar el potencial de peligro de inundaciones en regiones sin datos, mientras que, Vega-

Serratos, B., Dominguez-Mora, R. & Posada-Vanegas, G. (2018) & Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M. J. (2020) presentan metodologías que permiten evaluar el riesgo por inundación ,Vera Rodríguez & Albarracin Calderón (2017) van más allá, e incursiona en el análisis de la vulnerabilidad teniendo en cuenta factores como exposición, fragilidad y capacidad de adaptación y respuesta; estos trabajos, dejan entrever los cuantiosos autores que han sido aportantes de diferentes metodologías que buscan resolver casos específicos para este fenómeno según sus criterios.

Para el caso específico de Colombia, en los pasados años 2010 y 2012, ante la presencia del fenómeno de la Niña exhibió un régimen de lluvias y niveles de los ríos sin precedentes en los registros históricos que posee la institucionalidad del país, con lo que se vivió uno de los más grandes impactos en lo que refiere a eventos de inundación a nivel nacional. Esta coyuntura generó acciones importantes desde la Gobernabilidad de la Nación junto con la modificación de la antigua Dirección General del Riesgo en lo que hoy se conoce como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, apoyada en el cambio de normatividad que prescribe la Ley 1523 de 2012 (Gonzalez-Velandia, J., 2014), donde específicamente, los procesos de la Gestión del Riesgo definidos en el artículo 6 de la ley 1523 de 2012, establece que se debe desarrollar, mantener y garantizar como primer paso el proceso de conocimiento del riesgo mediante el cual se identifica, evalúa y analiza las condiciones de riesgo a través de sus principales factores (amenaza, elementos expuestos y vulnerabilidad), sus causas y factores causales, instrumento inicial que sirve para definir consecuentemente una reducción del riesgo y establecer un manejo de desastres (UNGRD, 2012).

En la tabla a continuación se compilan las principales normas que regulan la gestión del riesgo en Colombia, donde se resalta el Decreto 1077 de 2015 en cuya sección 3 se establecen las

condiciones y escala de detalle para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y su vez teniendo en cuenta el principio de gradualidad establecido en la ley 1523 de 2012 para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los POT existentes o nuevos, se deben elaborar estudio en suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa. Estos estudios deben contener la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza, la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza que requieren estudios detallados, la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo en las que se requieren estudios detallados y la determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas (Decreto 1077, 2015).

Es importante tener en cuenta al revisar los contenidos de mediano y largo plazo de los POT o en la expedición de uno nuevo, si se cuenta con un POMCA aprobado y este incluye los análisis de amenazas, estos servirán de insumo para la elaboración de los estudios básicos en suelo rural. Por otra parte, los estudios detallados buscan determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondiente, por lo tanto, de conformidad con las clases de suelo establecidas en la Ley 388 de 1997 la escala de los estudios básicos en suelo urbano y de expansión urbana es de 1:5.000 y en suelo rural 1:25.000; por otra parte, para los estudios detallados en el suelo urbano y de expansión urbana la escala es 1:2000 y en suelo rural 1:5.000 (Decreto 1077, 2015).

Tabla 1*Normatividad sobre gestión del riesgo a nivel nacional*

Norma	Alcance
Decreto 1077 de 2015 - sección 3	Condiciones y escala de detalle para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en planes de ordenamiento territorial nuevos o existentes.
Decreto 1807 de 2014	Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1076 de 2015	Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible.
Decreto 1640 de 2012	Reglamentación de los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos. Se incluye la gestión del riesgo desde el recurso hídrico y a nivel de cuenca hidrográfica haciendo énfasis en el riesgo por exceso e incendios forestales.
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
Decreto 4147 de 2011	Por el cual se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, se establece su objeto y estructura.
Ley 46 de 1988	Por la cual se crea y organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.
Decreto 1547 de 1984	Por el cual se crea el Fondo Nacional de Calamidades y se dictan normas para su organización y funcionamiento.

Nota. Fuente: Salazar, (2020) Adaptación propia.

Por otra parte, la Ley 1523 de 2012 cuya finalidad es la prevención de riesgos en el país, reglamenta las medidas preventivas y las acciones correctivas que se pueden tomar en caso de presentarse una calamidad pública. Para que la gestión del riesgo sea oportuna y veraz las diversas instituciones deben trabajar articuladamente para ejecutar acciones de conocimiento, reducción del riesgo y manejo de desastres. La mencionada ley establece las responsabilidades de las empresas ante la adopción de políticas y estructuras en ejercicio de gestión y control de la gestión del riesgo a las que están expuestas, por lo tanto, sus empleados deben estar capacitados y entrenados para actuar correctamente ante un evento. Sin lugar a duda esta ley es relevante en

el sentido que genera una gestión proactiva, iniciando con la identificación de los posibles riesgos y a partir de las probabilidades de ocurrencia, la intuición, lecciones aprendidas y datos históricos se toman decisiones y se formulan planes de acción para prevenir el riesgo (Ley 1523, 2012).

En el municipio de Fortul (Arauca), el conocimiento del riesgo es generado por la universidad de Los Llanos-Gobernación de Arauca (2019) quienes realizan la evaluación, apoyo y recomendaciones a los planes de ordenamiento territorial municipales bajo el convenio interadministrativo N° 532 de 2016 donde se genera un informe de orden técnico, jurídico y de planificación territorial en el marco de la consolidación del archivo histórico municipal como apoyo a la formulación del Plan de Ordenamiento Departamental de Arauca, en este se trata de manera muy somera a lo que susceptibilidad por inundación se refiere, siendo el único instrumento con el que se cuenta actualmente en el municipio.

Teniendo en cuenta que se pretende realizar la caracterización, análisis y evaluación para la zonificación de susceptibilidad por inundación en el municipio de Fortul (Arauca) partiendo de variables como geología, geomorfología, mapa de pendientes, uso del suelo, hidrografía e histórico de inundaciones según las fuentes secundarias existentes; mediante la aplicación del proceso analítico jerárquico, se describen brevemente los conceptos de estas variables a tener en cuenta.

La geología permite conocer las unidades litoestratigráficas, y en la zonificación de susceptibilidad a inundaciones, se tiene en cuenta la variable unidad geológica, enfocada hacia la permeabilidad de las rocas de las formaciones (Calixto, 2017). Los métodos geológicos y geomorfológicos utilizan las formas y depósitos del terreno generados de eventos de inundación, permitiendo delimitar áreas geomorfológicamente activas y susceptibles a inundaciones

recurrentes en la dinámica litosfera (Ritter, D., Kochel, R. & Miller, J., 2011). La pendiente está ligada a las dos variables anteriormente mencionadas, donde las zonas montañosas corresponden al macizo rocoso donde nace el agua y las planicies representan las llanuras de inundación donde se deposita el agua acompañada de sedimentos (Charlton, R., 2008). Igualmente, estas vastas llanuras representan tierras fértiles con potencial para el aprovechamiento antrópico diversificado por asentamiento, cultivo, ganadería, entre otras actividades (Anderson, R. & Anderson, S., 2011).

Metodología

Para el desarrollo de este estudio se contempla un enfoque sistémico, bajo el juicio de jerarquización y evaluación multicriterio donde se estiman las variables involucradas en el análisis, información cualitativa y cuantitativa, fuentes de información, revisión bibliográfica, técnicas y herramientas que se utilizan para el procesamiento de la información que permitan la caracterización y posterior zonificación de susceptibilidad por inundación.

Compilación de la cartografía base y cartografía específica

Se realiza la compilación de la cartografía base y la cartografía específica con énfasis en geología según lo hallado en el estado de la cartografía geológica por parte del Servicio Geológico Colombiano, la cartografía geomorfológica debido a su presentación en escala 1:100.000 se pretende digitalizar a partir de imágenes satelitales, DEM y LandSat Lidar 8 y Sentinel 2B acorde a la escala que se pretende llegar (1:25.000), tanto geología como geomorfología son complementados con imágenes satelitales LandSat 8 y Sentinel 2B con combinaciones RGB que permiten contrastes y colores naturales tales como (4,3,2) y (4,3,2), respectivamente. los mapas de pendientes son generados con ayuda del software SIG ArcGis en su subclase ArcMap a partir del modelo de elevación digital de 12.5m de resolución y con una categorización planteada por el IGAC (2011). Los usos del suelo se compilan acorde a los existentes y se complementa acorde con combinaciones RGB de las imágenes LandSat Lidar 8 (infrarrojo 5,4,3-agricultura 6,5,2) y Sentinel 2B (infrarrojo 8,4,-agricultura 11,8,2), así mismo, se recategorizan para simplificar la amplia distribución de usos del suelo.

Recopilación y análisis de información secundaria

Se realizó revisión bibliográfica de investigaciones, proyectos, trabajos de grado entre otros documentos que dan cuenta de que se ha hecho en el tema en los últimos años, avances tecnológicos, cambios de variables y alcances, y como ha sido su abordaje para obtener los mejores resultados, adicionalmente, se recopila información de la zona de estudio en aras de conocer el comportamiento de variables y afectaciones sufridas por el fenómeno en el municipio de Fortul (Arauca), entre estas se resaltan las siguientes:

- Estudios realizados en el área
- Información meteorológica
- Hidrografía
- Registros históricos de eventos de inundación

Análisis SIG

Se utiliza el software SAS Planet para obtener imágenes satelitales de alta resolución contemplando imágenes Google e imágenes Bing de tal manera que se pueda evitar la alta nubosidad, estas se superponen con el modelo de elevación digital de 12.5m de resolución adquirido con Global Mapper, se complementa con imágenes LandSat-Lidar 8 y Sentinel 2B alternando combinaciones RGB para obtener color natural, falso color, infrarrojo, agricultura, usos del suelo que nutran las variables geología, geomorfología y usos del suelo, principalmente. Adicionalmente, se añade la cartografía base, cartografía específica, Información secundaria como meteorológica, hidrología, registros históricos y zonas afectadas por el fenómeno.

Integración de información con ayuda de los sistemas de información geográfica y generación de mapas instrumento para el análisis de zonificación

Se integran los elementos citados en análisis SIG y trabajo de campo con ayuda de software como ArcGis, Global Mapper, SAS Planet, Google earth y Earth explorer, etc. A partir de estos, se generan mapas temáticos que sirvan como instrumento para el análisis y entendimiento de la zonificación.

Interpretación digital y zonificación de susceptibilidad por inundación aplicando el proceso analítico jerárquico

En esta fase final, se aborda el fenómeno de la inundación en el municipio de Fortul (Arauca) estableciendo jerarquización y evaluación multicriterio mediante el proceso analítico jerárquico donde las variables involucradas en el análisis como información cartográfica secundaria, digitalizada, información cualitativa, cuantitativa, revisión bibliográfica, técnicas y herramientas utilizadas para el procesamiento de la información permiten la caracterización y posterior zonificación de susceptibilidad por inundación en escala 1:25.000.

Adentrándonos en la programación multicriterio realizada mediante el uso del proceso de jerarquía analítica (Analytic Hierarchy Process, AHP) encontramos que es una técnica que fue desarrollada en la década de 1970 por Thomas L. Saaty y desde entonces ha sido ampliamente estudiado, y actualmente se utiliza en la toma de decisiones para escenarios complejos, en los que las personas trabajan juntas para tomar decisiones cuando las percepciones, los juicios y las consecuencias humanas tienen repercusiones a largo plazo (Bhushan & Rai, 2004).

La aplicación del AHP comienza con la descomposición de un problema en una jerarquía de criterios para que sea más fácil analizarlo y compararlo de forma independiente. Una vez construida esta jerarquía lógica, los responsables de la toma de decisiones pueden evaluar

sistemáticamente las alternativas realizando comparaciones por pares para cada uno de los criterios elegidos. Esta comparación puede utilizar datos concretos de las alternativas o juicios humanos como forma de introducir información subyacente (Saaty, 2008).

El AHP transforma las comparaciones, que suelen ser empíricas, en valores numéricos que se procesan y comparan posteriormente. El peso de cada factor permite evaluar cada uno de los elementos dentro de la jerarquía definida. Esta capacidad de convertir los datos empíricos en modelos matemáticos es la principal aportación distintiva de la técnica AHP cuando se contrasta con otras técnicas de comparación.

Una vez realizadas todas las comparaciones y establecidos los pesos relativos entre cada uno de los criterios a evaluar, se calcula la probabilidad numérica de cada alternativa. Esta probabilidad determina la probabilidad que tiene la alternativa de cumplir el objetivo esperado. Cuanto mayor sea la probabilidad, más posibilidades tendrá la alternativa de satisfacer el objetivo final de la cartera. El cálculo matemático que implica el proceso AHP puede parecer sencillo en un principio, pero cuando se trata de casos más complejos, los análisis y cálculos se vuelven más profundos y exhaustivos.

La mejor manera de entender el método es describiendo sus tres funciones básicas: estructurar la complejidad donde se halla una manera de resolver el problema de la complejidad, y se utiliza la estructuración jerárquica de los problemas en subproblemas homogéneos, medir en una escala realizando mediciones de factores tanto subjetivos como objetivos a partir de estimaciones numéricas, verbales o gráficas, lo cual le provee una significativa flexibilidad (Saaty, 1994) y sintetizar, aunque analiza las decisiones a partir de la descomposición jerárquica, en ningún momento pierde de vista el objetivo general y las interdependencias existentes entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas (Salazar, A., 2020).

Tabla 2

Escala fundamental de comparación por pares

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente importancia	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
7	Importancia muy grande	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede demostrar su dominio
9	Importancia extrema	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro
2, 4, 6 y 8	Se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores. Estos son valores intermedios de preferencia	

Nota. Fuente: Saaty (1980)

Matriz de prioridades

Se denomina matriz de prioridades a la que resume las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas tenemos (Toskano,G., 2015):

Figura 1

Matriz de prioridades para m criterios y n alternativas

	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio m
Alternativa 1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1m}
Alternativa 2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2m}
...	...	...	...	...
Alternativa n	P_{n1}	P_{n2}	...	P_{nm}

Nota. Fuente: Toskano,G., (2015)

Donde P_{ij} es la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j , para $i=1,2, \dots, n$; y $j=1,2, \dots, m$.

La prioridad global para cada alternativa de decisión se resume en el vector columna que resulta del producto de la matriz de prioridades con el vector de prioridades de los criterios.

Figura 2

Matriz de prioridades

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Pg_1 \\ Pg_2 \\ \dots \\ Pg_n \end{pmatrix}$$

Nota. Fuente: Toskano,G., (2015)

Donde P_{gi} es la prioridad global (respecto a la meta global) de la alternativa i ($i=1, 2, \dots, n$).

Consistencia

El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que proporciona el decisor. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión, si el grado de consistencia es inaceptable, es necesario reconsiderar y modificar algunos juicios para continuar con el análisis (Toskano,G., 2015).

Tenemos que el índice de consistencia (IC) es el índice de A , donde el valor $n_{máx}$ se determina calculando primero el vector A y después sumando sus elementos.

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

IA es el índice de consistencia aleatoria de A, es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada en forma aleatoria. Esta se genera a partir de la formula:

$$IA = \frac{1.98(n-2)}{n}$$

Se calcula la razón de consistencia (RC), donde si obtiene valor menor a 0.1 se considera señal de consistencia en las comparaciones pareadas; en cambio, si se excede el valor de 0.10 son señal de inconsistencia y el analista debe considerar y modificar los valores seleccionados en la matriz de comparaciones pareadas (Saaty, 1980). Cabe resaltar que en este trabajo se implementa una matriz de decision 4x4, es decir, 4 variables, donde el radio de confianza no debe superar el 9%.

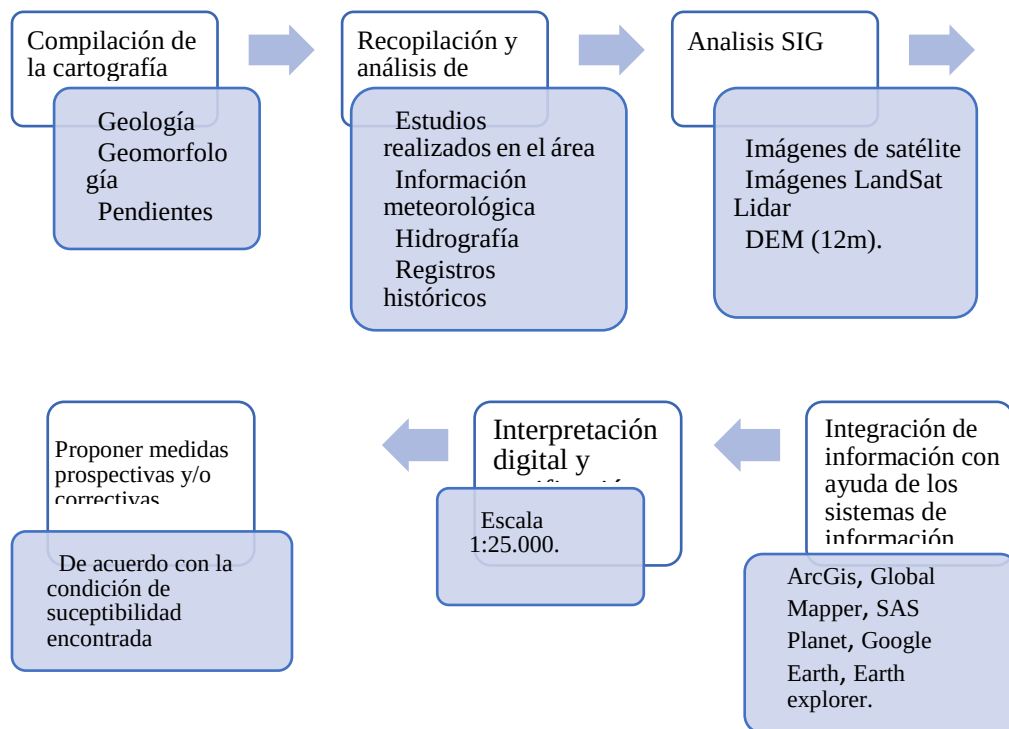
$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Proponer medidas prospectivas y/o correctivas de acuerdo con la zonificación de la susceptibilidad a inundación del municipio.

De acuerdo con los resultados obtenidos y el grado de susceptibilidad a inundación del municipio se proponen intervenciones prospectivas e intervenciones correctivas y medidas estructurales y no estructurales.

Figura 3

Ilustración de la metodología aplicada



Nota. Elaboración propia, (2022).

Nota. Fuente: Elaboración propia (2022)

Hidrografía

En el municipio de Fortul se localizan la cuenca del río Caranal, la cuenca del río Banadía y la cuenca del río Ele, las cuales se localizan dentro de la gran unidad hidrográfica del río Orinoco (Consortio Caranal, 2015). Por tal razón, existe gran riqueza hídrica, contando con abundantes cursos de agua que nacen en la cordillera Oriental y corren en dirección este, originando numerosos ríos y caños secundarios como el Cusay, Banadía, Calafitas, Caranal y las quebradas Colorada, Caño Negro, Citacá, Quiripal y Caño Salibon (EOT, 2012).

La cuenca del río Caranal situada en zonas planas, correspondientes a zonas con depósitos aluviales, tiene su origen en el sector occidental, en las derivaciones de la cordillera oriental, donde se conforma el cauce principal con las aguas recogidas por escurrimiento de la cuenca en esta zona y del desborde del río Cusay. En la parte media y baja de la cuenca hay presencia de lagunas, humedales y pantanos. Así mismo, esta cuenca dentro de su codificación se encuentra en el área hidrográfica río Orinoco, zona hidrográfica Río Arauca y subzona hidrográfica directos Río Arauca (Consortio Caranal, 2015).

La cuenca del río Banadía nace en las estribaciones de la Sierra Nevada del Cocuy y Piedemonte llanero de la zona de Arauca, aproximadamente a 2000 msnm, en su recorrido recibe las aguas del río Calafitas, San Miguel, Satocá y del brazo del río Madre Vieja. Las aguas del río Banadía corren en sentido sur-noreste en dirección hacia la cuenca del río Arauca y a su vez al Orinoco.

Clima

De acuerdo con el plan de ordenamiento territorial departamental, elaborado por IGAC (2006), en el municipio de Fortul predomina el clima tropical lluvioso en la zona plana y el clima de montaña tropical – clima de alta montaña en la parte alta. Existe un régimen unimodal caracterizado por dos periodos: un periodo seco de mediados de noviembre a mediados de marzo y un periodo lluvioso de mediados de marzo a mediados de noviembre, con algunos veranillos (periodos secos) en agosto.

Pendiente

La obtención de las pendientes se realiza a partir del análisis del terreno mediante el Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución de 12,5 m/pixel, donde se pueden observar los diferentes condicionantes de un terreno en particular, realizado en su totalidad para el municipio de Fortul (Arauca), a partir de los siete (7) rangos de clasificación establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con el fin de establecer una correlación directa con el tipo de capacidad de uso del suelo, así como también zonas de inestabilidad potencial de laderas, zonas inundables y adicionalmente, el correspondiente análisis para las áreas de subcuencas y microcuencas hidrográficas identificadas en el área de estudio (CORPOBOYACÁ, 2017).

El municipio de Fortul (Arauca) se encuentra localizada en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de la República de Colombia, conformando el mejor llamado piedemonte Araucano, con topografías variables; la zona más septentrional occidental del municipio cuenta con zonas escarpadas mientras su sector más oriental con grandes

planicies inundables. Aplicando el software SIG ArcGis se aprovecha el DEM de 12.5 m/píxel dando lugar al análisis de pendiente en porcentaje según la siguiente ecuación:

$$\Theta (\%) = 100 \times \left(\frac{h_2 - h_1}{DH} \right)$$

Donde:

Θ (%): Pendiente en porcentaje

h_1 : Altura en la primera celda

h_2 : altura en la segunda celda

DH : Distancia entre celdas (ESRI, 2017).

De acuerdo lo estipulado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se establecieron las siete (7) categorías de clasificación de las pendientes, siendo las siguientes 0-3%, 3-7%, 7-12%, 12-25%, 25-50%, 50- 75% y 75-100%. Se determina que el rango de pendiente predominante a lo largo del municipio de Fortul (Arauca) es de 3-7% con una topografía ligeramente inclinada y representando un total de 23,9 % del área del municipio, seguido de zonas ligeramente inclinadas o ligeramente escarpadas (rango de pendiente 25-50%) con un 17,3%, moderadamente inclinada (rango de pendiente 7-12%) con un 15,7%. Así mismo, se identifican zonas fuertemente escarpadas, moderadamente escarpada, fuertemente inclinada y a nivel con valores de 12,7%, 12,5%, 10,5% y 7,5%, respectivamente.

Tabla 3

Rangos de pendientes en porcentaje establecidos para el municipio de Fortul (Arauca).

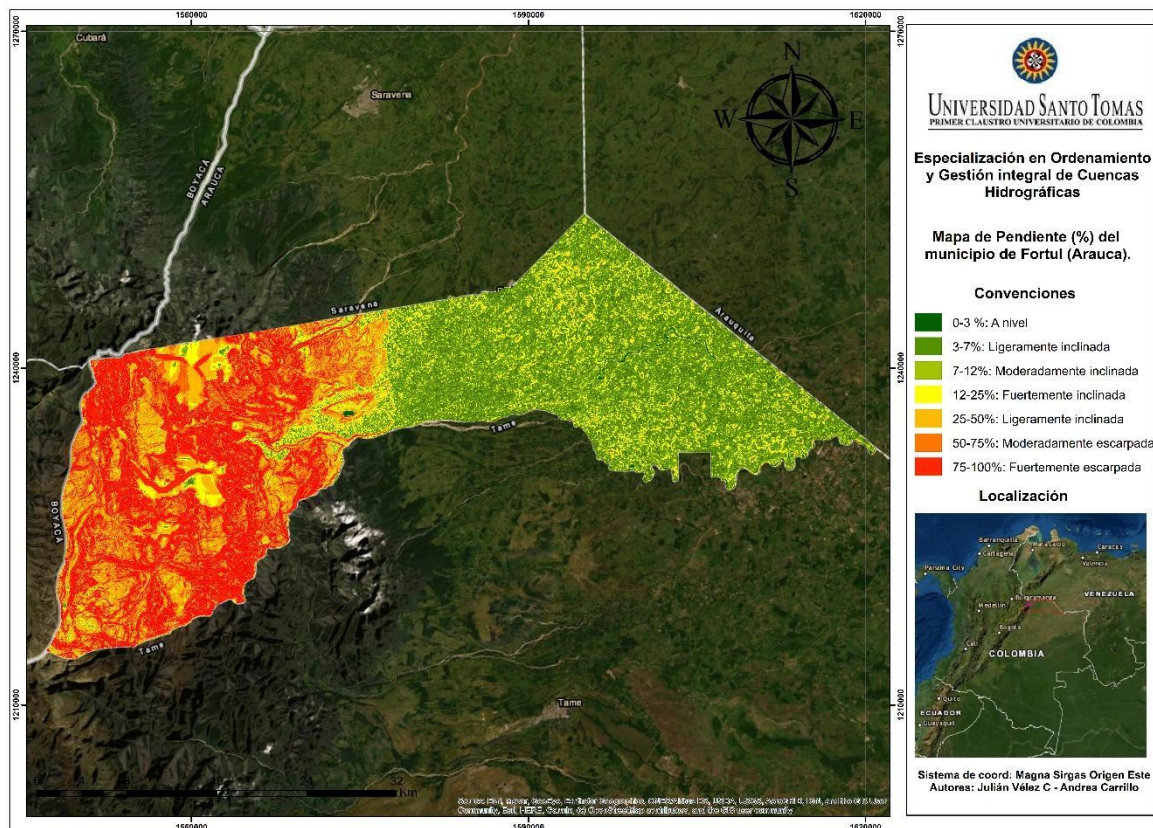
Rangos (%)	Interpretación	Área de la cuenca (Km²)	Porcentaje de cubrimiento
0-3	A nivel	81,8	7,5
3-7	Ligeramente Inclínada	262,0	23,9
7-12	Moderadamente Inclínada	172,1	15,7
12-25	Fuertemente Inclínada	115,3	10,5
25-50	Ligeramente Inclínada o ligeramente escarpada	189,2	17,3
50-75	Moderadamente empinada o moderadamente escarpada	136,8	12,5
75-100	Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	139,0	12,7

Nota. Fuente: Elaboración propia (2022)

Gráficamente se representa (Figura 5) el mapa de pendientes en porcentajes para el municipio de Fortul (Arauca) donde como se mencionó anteriormente, se evidencia zonas de mayor pendiente en el sector occidental del municipio perteneciente al flanco oriental de la Cordillera Oriental, un punto intermedio representado por zona deltaica o piedemonte llanero y un sector oriental que abarca la gran llanura de inundación del municipio.

Figura 5

Mapa de pendientes en porcentaje, Municipio de Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia (2022)

Geomorfología

El municipio de Fortul (Arauca) está ubicada en la zona de transición entre la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales, en estas dos zonas de topografía contrastante se han formado unidades geomorfológicas con diferentes orígenes. Para la definición y delimitación de las unidades geomorfológicas se adoptó la propuesta de la cartografía geomorfológica de Carvajal (2011), se nombran y clasifican las geoformas definidas para la

escala de trabajo; las cuales se agrupan en dos ambientes morfogenéticos; estructural y fluvial, dependiendo del proceso predominante que las ha generado (SGC, 2013). La delimitación de estas unidades se apoyó en el uso de imágenes de sensores remotos y modelo de elevación digital.

Para el área del municipio se identifican geomorfologías estructurales asociadas a la Cordillera Oriental en su flanco oriental (sector occidental del municipio) tales como estructural plegado, estructural plegado denudado y superficie de erosión glaciar y en el sector central y oriental del municipio una distribución de geoformas aluviales de las cuales se destacan abanico aluvial, llanura de inundación, planicie de inundación y terraza de acumulación.

La unidad estructural plegado denudado (Spd) ubicado en el sector occidental de Fortul ocupa 467,4 Km² con un 42,6% del total del municipio, representado por la Serie Río Negro-Une (K1rnu) con relieve de montañas de contraste extremadamente alto, laderas abruptas e inclinadas muy largas y extremadamente largas, también, se observa un patrón de drenaje dendrítico pero con tramos alineados debido a los controles estructurales, la densidad de la red de drenaje es moderada a alta y los cauces principales corren por valles en V. la unidad estructural plegado (Sp) abarca el sector centro-occidental de Fortul con 67,1 Km² y el 6,1% del municipio asociadas a rocas sedimentarias plegadas de la Formación Caja (N1c) con lineamientos en dirección N-NE a NNW correlacionable con la estratificación que es el resultado de los esfuerzos que han actuado en ésta región.

Los abanicos aluviales (Faa) ocupan un área aproximada de 114,7 Km² con 10,5% del total del municipio, estos se distinguen el ápice apuntando hacia la cordillera y el lóbulo deposicional hacia la llanura con una longitud variable que puede superar los 30 km. El

origen de esta geoforma está ligado a la orogenia Andina durante la cual las corrientes provenientes de valles estrechos en las montañas pasaron a una zona plana donde depositaron el material que transportaban; Los abanicos tienen relieve plano con laderas levemente inclinadas en la dirección de la corriente, estas son extremadamente largas y rectas, de forma plana. Ocasionalmente son cortadas por drenajes subparalelos muy largos y de baja densidad (SGC, 2013).

Las terrazas de acumulación (Fta) son la actividad más reciente de los principales drenajes del área con 26 Km² y 2,4%, ha generado terrazas a lo largo de los principales cauces. Estas geoformas presentan relieve plano a levemente ondulado y pueden ocurrir a diferentes alturas permitiendo deducir los periodos de ascenso y descenso de los cauces (SGC, 2013).

La planicie de inundación (Fpi) corresponde al área que han ganado los drenajes actuales y que se ubica a ambos lados de estos. Esta puede extenderse según el nivel del agua y en ella se acumula el material transportado por los ríos que recorren la plancha (SGC, 2013), el área calculada es de 81,2 Km² y 7,4% del total del municipio. Por último, la llanura de inundación (Fli) que se localiza hacia el oriente del área de Fortul se caracteriza por ser una zona plana, con un contraste de relieve muy bajo, se diferencia de la planicie de inundación en que en esta unidad no se da actualmente la deposición de material transportado por los ríos que recorren la plancha, aunque puede estar sometida a inundaciones en épocas de alta pluviosidad con un importante 337,6 Km² y reflejando 30,8% del total del municipio.

Tabla 4

Áreas establecidas por cada unidad geomorfológica, municipio de Fortul (Arauca).

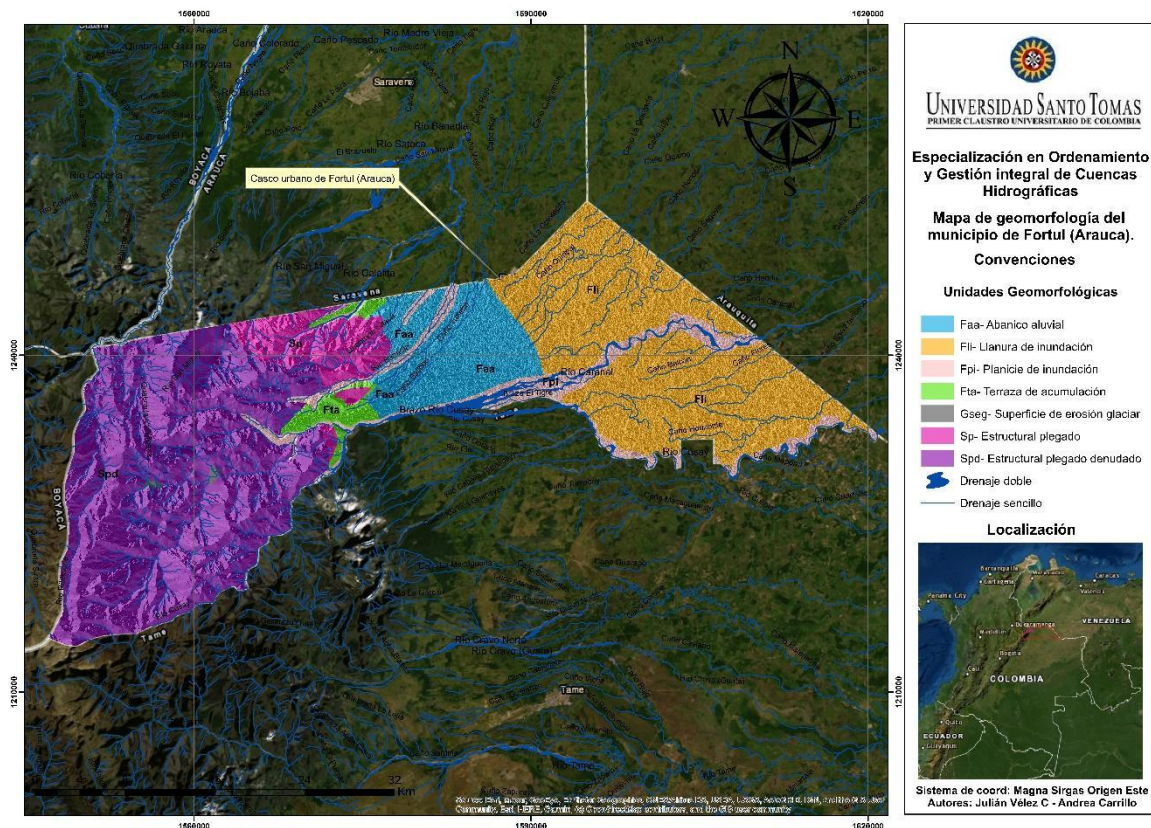
Unidad Geomorfológica	Área (Km²)	Porcentaje (%)
Gseg- Superficie de erosión glaciár	2,3	0,2
Spd- Estructural plegado denudado	467,4	42,6
Sp- Estructural plegado	67,1	6,1
Fta- Terraza de acumulación	26,0	2,4
Fpi- Planicie de inundación	81,2	7,4
Faa- Abanico aluvial	114,7	10,5
Fli-Llanura de inundación	337,6	30,8

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

En la figura 6 se observa una salida gráfica en escala 1:25.000 donde se representa la geomorfología presente para la plancha 123 Saravena, 124 Arauquita, 138 Tame y 139 Betoyes las cuales conforman en su totalidad el municipio de Fortul, esta es tomada y modificada del SGC (2013) según los lineamientos de Carvajal (2011) en pro de ilustrar el mapa geomorfológico.

Figura 6

Geomorfología 1:25.000 de la plancha 123 Saravena.



Nota. Fuente: Tomado y modificado de SGC (2013).

Geología

Serie Río Negro-Une

Ulloa & Arias (1998), propusieron para el conjunto espeso de rocas sedimentarias y falladas el nombre informal de Serie Río Negro-Une, donde, la parte inferior de la serie, correspondiente a la Formación Río Negro, se encuentra muy bien documentada en el trabajo de Fabre (1985) la cual morfológicamente la unidad representa un área con grandes

alturas, con picos alargados, en donde las pendientes estructurales muestran superficies inclinadas y la contrapendiente, grandes escarpes (SGC, 2013).

Fabre (1985) define a la Formación Rio Negro como areniscas cuarzosas de grano fino a medio en bancos medianos a muy gruesos, con algunas intercalaciones blandas de lutitas limosas negras y en su parte inferior, localmente un paquete de conglomerados.

Fabre (1985) a la Formación Rio Negro, parte inferior y media de la Serie, plantea un ambiente marino, probablemente en zona litoral, ambientes de costa. Sin embargo, por su gran espesor, también esta unidad puede haberse depositado en ambientes deltaicos, tal como lo plantea (García et al.; en: Fabre, 1985).

La fauna encontrada en los miembros inferiores de la Formación Río Negro, determinan que estos se depositaron en la parte alta del Valanginiano inferior, mientras los miembros superiores se depositaron probablemente durante el Valanginiano superior, Hauteriviano, Barremiano y posiblemente hasta el Aptiano inferior (Fabre, 1981), mientras que, Fabre (1985), en la región de la Sierra Nevada del Cocuy, le asigna a la Formación Une una edad que abarca todo el Albiano y una parte, mal definida, del Cenomaniano. Por esto en este trabajo se define que la Serie Rio Negro – Une, abarca desde Valanginiano al Cenomaniano.

Formación Caja

El nombre de Formación Caja fue asignado por Valencia y Samper (1938, Informe inédito de la Shell; en De Porta, 1974), y publicado por Van der Hammen (1958) con una descripción muy general, Ulloa & Rodríguez (1976), mencionan que la Unidad se

encuentra reposando concordantemente sobre la Formación Diablo e infrayaciendo discordantemente a la Formación La Corneta.

Litológicamente se identifica alternancia de arenisca gris amarillenta, de grano fino a conglomeráticas, en estratos gruesos a muy gruesos, con intercalaciones de limolitas, lodolitas, limolitas arenosas, limolitas conglomeráticas con guijos, cantos, fragmentos de arenitas y cherts, en estratos de 10 a 15 m, separados por conjuntos de limolitas y lodolitas, de 8 a 15 m de espesor. Las areniscas y conglomerados presentan estratificación plano paralela continua, tabular y ondulosa (SGC, 2013).

Su contacto superior es observado discordante con la Formación La Corneta en el anticlinal Corozal y el contacto inferior de la Formación Caja no se observa, según Ulloa & Rodríguez (1976) la Unidad en su parte inferior es marina, zona de oleaje, y en la parte superior es pantanosa a fluvial. De acuerdo con Ulloa & Rodríguez (1976), “Van der Hammen (1957) le asigna una edad probable de Oligoceno Superior, pudiendo incluir también la parte baja del Mioceno. Con base en información palinológica y micropaleontológica, la edad es del Mioceno medio a Pleistoceno (Ramírez, 2010).

Formación Corneta

Ulloa & Rodríguez (1976), proponen este nombre para representar una serie de gravas interestratificadas con limolitas que afloran en el Sinclinal de Nazareth. En la localidad tipo, la Formación La Corneta está formada por gravas con cantos de arenisca y cuarzo hasta 70 cm de diámetro y un espesor de 120 m. La Formación La Corneta se encuentra suprayaciendo en discordancia los estratos de la Formación Caja. La distribución

geográfica y expresión geomorfológica La formación aflora en ambos flancos del Anticlinal de Cubara y Sinclinal del río Bojaba (SGC, 2013).

Esta formación está compuesta por gravas con clastos entre 2 y 30 cm, de areniscas cuarzosas, lodolitas y arcillolitas, subredondeados y subesféricos a subelongados, embebidos en una matriz arena cuarzosa no litificada, de color naranja amarillento oscuro, dado por el contenido de óxidos de hierro, con tamaño de grano desde arena fina hasta gravas. Intercalados con capas de arena media, de composición cuarzosa, con granos subredondeados a subangulares y subesféricos. La unidad reposa discordantemente o en paraconformidad sobre la Formación Caja e infrayace discordantemente a las unidades de abanicos y terrazas (SGC, 2013).

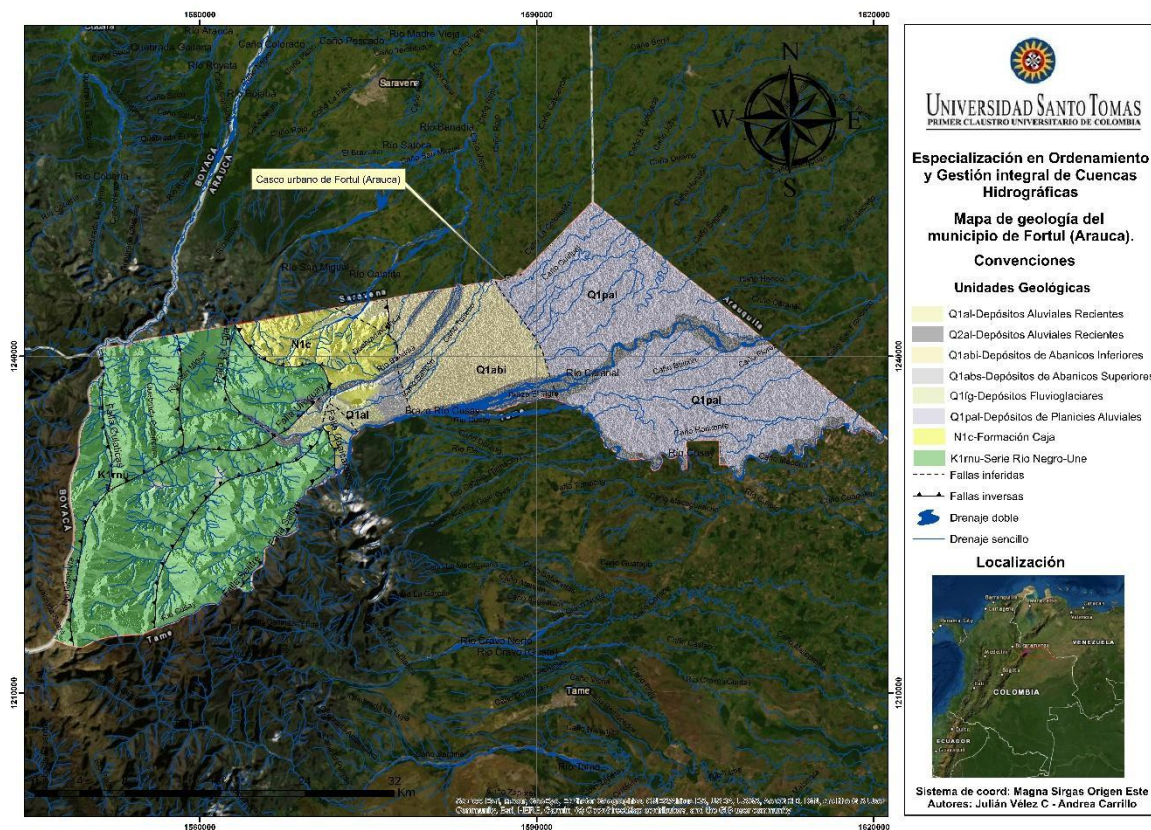
La unidad, por sus características litológicas compuesta principalmente por gravas con guijos gruesos a medianos, puede corresponder a ambientes fluviales de llanuras aluviales, y su edad ha sido considerada del Pleistoceno superior, Ulloa & Rodríguez (1976).

Depósitos Cuaternarios

Representan un 51,1 % del área superficial del municipio Fortul (Arauca) exhibiendo una morfología de pendientes suaves del 1,8 al 1,3 de pendiente a completamente planas y se diferencian areniscas, lodos y conglomerados no consolidados, abanicos inferiores, abanicos superiores, depósitos aluviales antiguos con geoformas de terrazas, cuaternarios de planicies aluviales y depósitos aluviales recientes.

Figura 7

Geología del municipio de Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022)

Usos del suelo

El municipio de Fortul (Arauca) se caracteriza por sus abundantes planicies fértiles aprovechadas por el hombre para cultivos, ganadería y otras actividades. La información de uso del suelo para el municipio es generada gracias a proyecto Corine Land Cover ejecutado por el IDEAM el cual realiza la adquisición, preparación de la información,

análisis e interpretación de las coberturas; verificación de campo, control de calidad y generación de la capa temática aproximada a la situación real.

Con ayuda del software ArcMap se proyecta la capa temática y se calcula el área por cada uso de suelo, posteriormente se calcula el porcentaje que representa dicha cobertura determinando que el uso de suelo más representativo es pastos limpios con 383,9 Km² reflejado en 34,9 % del área total de municipio, este es seguido por bosque denso alto de tierra firme con 362,6 Km² y 32,9%.

Los demás usos de suelo se distribuyen en mosaico de pastos, cultivos, herbazales, vegetación secundaria, arbustal, arenales, afloramientos rocosos y tierras denudadas.

Tabla 5

Usos del suelo para el municipio de Fortul (Arauca).

Uso del suelo	Área (Km ²)	Área (%)
Tejido urbano continuo	1,5	0,1
Tejido urbano discontinuo	0,8	0,1
Aeropuerto con infraestructura asociada	0,2	0,0
Pastos limpios	383,9	34,9
Pastos arbolados	16,6	1,5
Pastos enmalezados	13,0	1,2
Mosaico de pastos y cultivos	9,5	0,9
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2,6	0,2
Mosaico de pastos con espacios naturales	10,4	0,9
Mosaico de cultivos con espacios naturales	1,0	0,1
Bosque denso alto de tierra firme	362,6	32,9
Bosque denso bajo de tierra firme	0,6	0,1
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	21,5	2,0
Bosque de galería y ripario	31,0	2,8

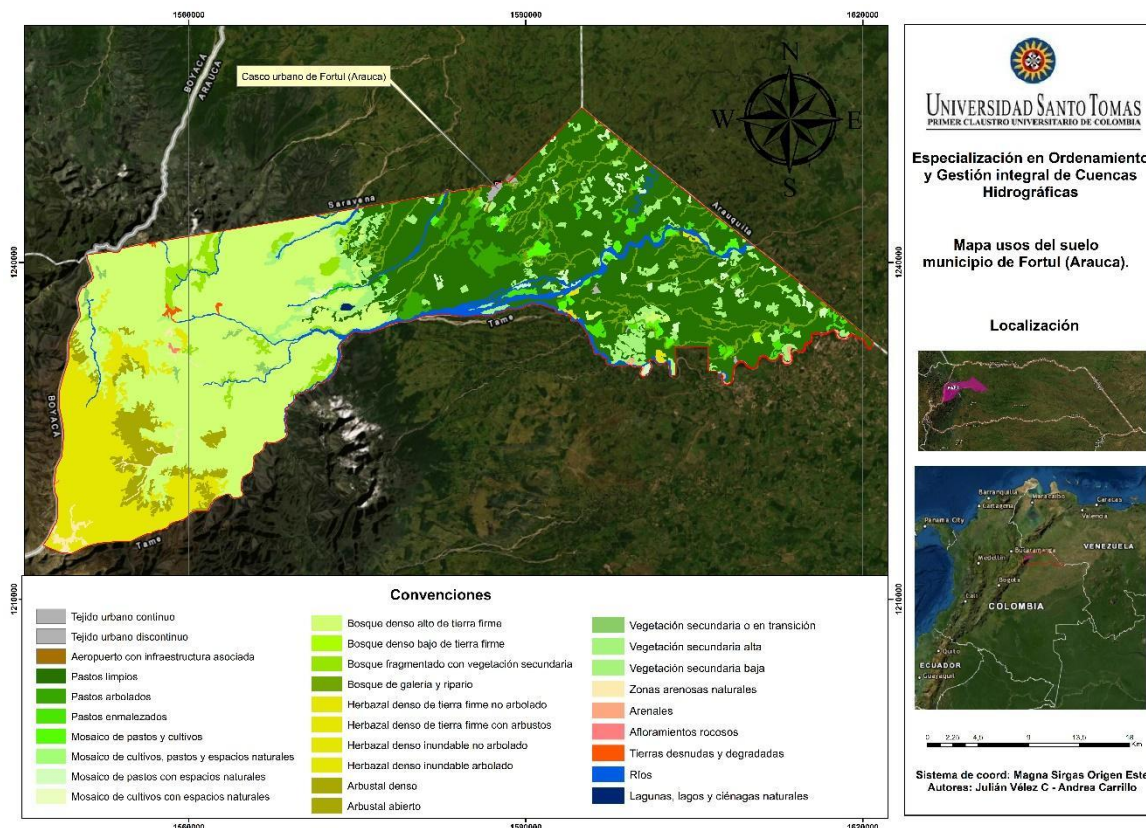
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	85,7	7,8
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	32,1	2,9
Herbazal denso inundable no arbolado	1,4	0,1
Herbazal denso inundable arbolado	1,0	0,1
Arbustal denso	22,0	2,0
Arbustal abierto	10,6	1,0
Vegetación secundaria o en transición	2,3	0,2
Vegetación secundaria alta	21,8	2,0
Vegetación secundaria baja	31,3	2,8
Zonas arenosas naturales	4,7	0,4
Arenales	1,1	0,1
Afloramientos rocosos	0,4	0,0
Tierras desnudas y degradadas	1,2	0,1
Ríos	29,3	2,7
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,6	0,1

Nota. Fuente: Elaboración propia (2022)

En la figura 8 se puede diferenciar en el sector occidental del municipio (zona cordillerana) predominio de herbazal, en la zona de transición (delta o abanico aluvial) es observable vegetación secundaria, mosaico de pastos con espacios naturales y tierras degradadas, para el sector oriental (planicie de inundación), es apreciable la alta presencia de mosaico de pastos y cultivos acompañado por el casco urbano.

Figura 8

Usos del suelo para el municipio de Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Susceptibilidad de la geomorfología

En categoría muy alto se registra planicie de inundación (Fpi) con un 7,2% con 79,5 Km² distribuido en sentido E-W a lo largo del municipio de Fortul, con mayor concentración en el sector este y una predominante extensión en área en el río Cusay seguido del río Caranal y en menor medida el río Banadia.

En la categoría alto se registra terraza de acumulación (Fta) y abanico aluvial (Faa) distribuidos en el centro del territorio pertenecientes a un cambio de pendiente abrupto entre cordillera-llanura cortado por el río Banadía y Cusay; a esta categoría también pertenece llanura de inundación (Fli) distribuido en el sector este, asociado al río Caranal y río Cusay con acompañamiento de caños como Quiripal, Balcón, Flores y Horizonte, principalmente. Esta categoría alto representa el 43,7% del municipio de Fortul con 482,4 Km² de extensión.

La categoría medio es representada por superficie de erosión glaciaria (Gseg) con 0,2% y un área de 2,3 Km² ubicado exclusivamente en el sector oeste del municipio.

La categoría bajo abarca la unidad estructural plegado (Sp) localizada en el sector oeste del municipio de Fortul y un porcentaje de 6,1% en una extensión de 67,7 Km².

Por último, la categoría muy bajo está representado por la unidad estructural-plegado denudado (Spd) con un 42,7% y un área de 470,9 Km² (Ver tabla 5).

Tabla 6

Clasificación de susceptibilidad de la geomorfología, Fortul (Arauca).

Categoría	Valor Categoría	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	1	470,9	42,7
Bajo	2	67,7	6,1
Medio	3	2,3	0,2
Alto	4	482,4	43,7
Muy Alto	5	79,5	7,2

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Clasificación de susceptibilidad de la geomorfología, Fortul (Arauca).

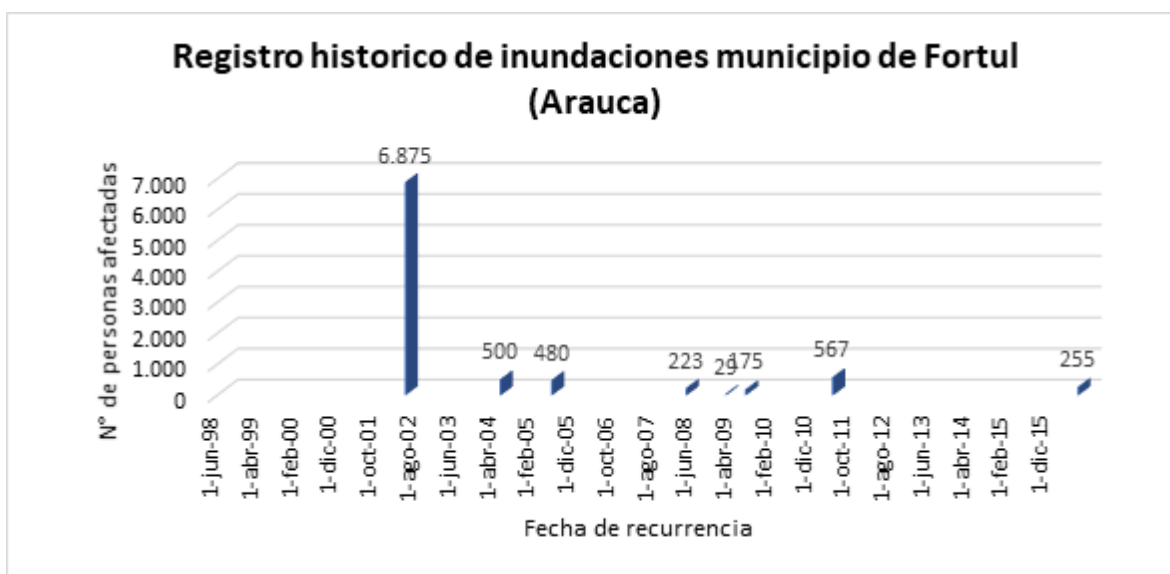


Los registros históricos de inundación del municipio de Fortul (Arauca) han sido compilados y almacenados en la estación de bomberos del mismo municipio gozando de hiatos de información y como tal, esta hasta la fecha no reposa en UNGRD. De dichas referencias se tiene que para el año 1998 se tiene reporte de inundación por desbordamiento de los ríos Cusay y Banadia sin registro de sitios y personas afectadas. Para el año 2002 se

evidencia la afectación de 6875 personas a causa del desbordamiento del río Cusay resultando involucradas veredas como Alto Bello, Brucelas, El Tigre, Orquideas y barrios en el casco urbano como Centro, Villa Esperanza, El Roble, El triunfo y 12 de Octubre. Para el año 2004 es reportado la afectación de 500 personas por desbordamiento del río Cusay y Caranal donde los principales afectados obedecieron a Las Islas Cusay y vereda Caranal. Para los años 2005, 2008, 2009, 2011 y 2016 se registra afectación de 480, 223, 204, 567 y 255 personas, respectivamente. En este periodo de tiempo no se exhiben los lugares de ocurrencia por parte de la entidad. Para el año 2017 se registraron 80 personas afectadas distribuidas en la vereda Brucelas (con pérdida total de cultivos), Los andes, Alto Bello, Islas del Cusay, Caranal y caserío Nuevo Caranal, San Francisco y Caracoles asociadas a creciente súbita de los ríos Cusay, Banadia, Caranal y Tigre.

Figura 10

Registro histórico de inundaciones municipio de Fortul (Arauca)



Nota. Fuente: Estación de bomberos del municipio de Fortul - Arauca, (2022).

Susceptibilidad de pendiente

En categoría muy alto se registra planicie a nivel (0-3% de pendiente) con un 7,5% con 81,8 Km² distribuido en sentido E-W a lo largo del municipio de Fortul, con mayor concentración en el sector este y una predominante extensión en área asociado a planicies de inundación en el río Cusay seguido del río Caranal y en menor medida el río Banadia.

En la categoría alto se registra terreno de ligero a moderadamente inclinado (3-12% de pendiente) pertenecientes a un cambio de pendiente abrupto entre cordillera-llanura intersectado por el río Banadia, Cusay y Caranal; esta categoría presenta morfogénesis asociada a llanura de inundación, terraza de acumulación y abanico aluvial distribuido en el sector centro-este, con acompañamiento de caños como Quiripal, Balcón, Flores y Horizonte, principalmente. Esta categoría alto representa el 23,9% del municipio de Fortul con 262 Km² de extensión.

La categoría medio definida como fuertemente inclinada (12-25% de pendiente) es representada parcialmente por algunos sectores de terraza de acumulación, abanico aluvial y en menor proporción llanura de inundación con valores de 15,7% y un área de 172,1 Km² con distribución heterogénea en centro y este del municipio.

La categoría bajo definida como ligera a moderadamente escarpada (25-75% de pendiente) y la categoría muy bajo definida como fuertemente escarpado (75-100% de pendiente) reflejan valores de 27,8% y 25,2%, respectivamente. Estas dos categorías se distribuyen en el sector oeste en unidades de estructural plegado y estructural plegado denudado (ver tabla 6).

Tabla 7

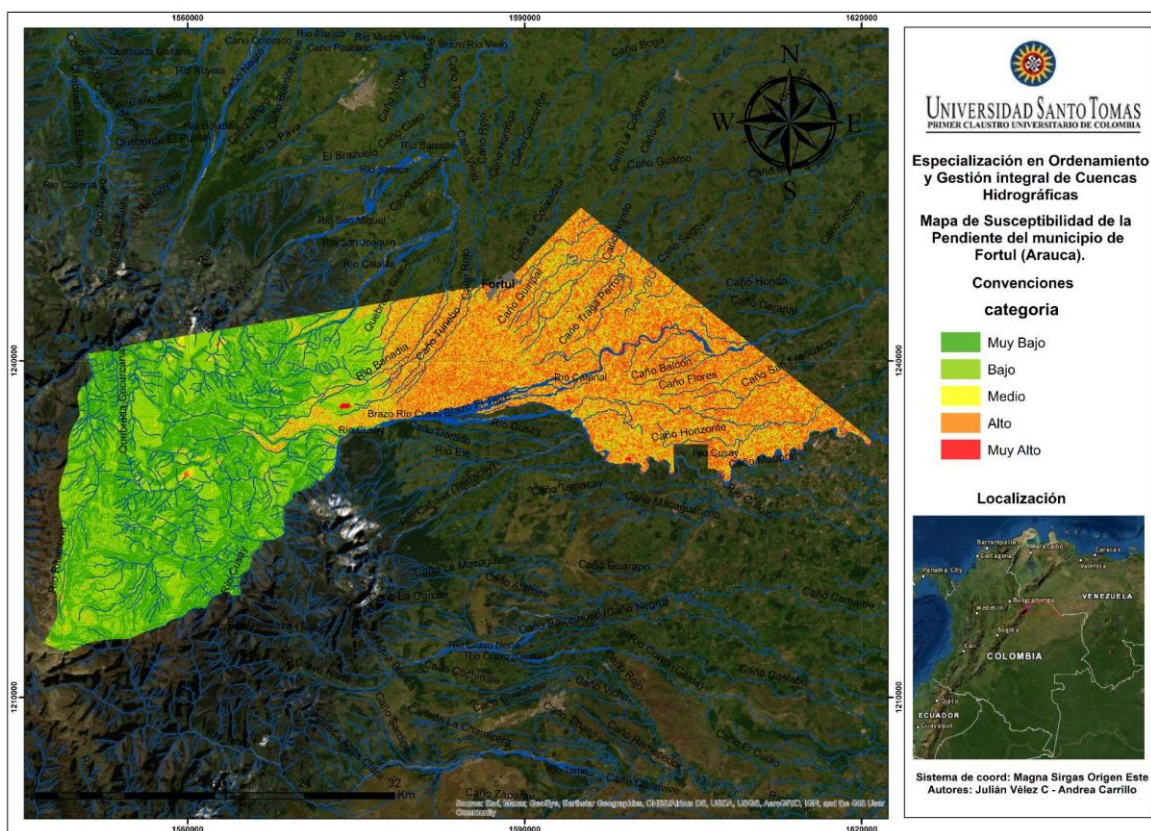
Clasificación de susceptibilidad de la pendiente, Fortul (Arauca).

Categoría	Valor Categoría	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	1	275,7	25,2
Bajo	2	304,5	27,8
Medio	3	172,1	15,7
Alto	4	262,0	23,9
Muy Alto	5	81,8	7,5

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Figura 11

Clasificación de susceptibilidad de la pendiente, Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Susceptibilidad de la geología

En categoría muy alto se registra depósitos aluviales recientes (Q2al) con un 7,4% con 81,2 Km² distribuido en sentido E-W a lo largo del municipio de Fortul, con mayor concentración en el sector este y una predominante extensión en área en el río Cusay seguido del río Caranal y en menor medida el río Banadia.

En la categoría alto se registra depósito de planicie aluvial (Q1pal), depósito de abanico inferior (Q1abi), depósito de abanico superior (Q1abs) y depósitos aluviales recientes (Q1al y Q2al) distribuidos en el centro-este del territorio pertenecientes a un cambio de pendiente abrupto entre cordillera-llanura originados por el río Banadia, Cusay y Caranal. Esta categoría alto representa el 43,6% del municipio de Fortul con 478,3 Km² de extensión.

La categoría medio es representada por depósitos fluvioglaciares (Q1fg) con 0,2% y un área de 2,3 Km² ubicado exclusivamente en el sector oeste del municipio.

La categoría bajo abarca la Formación Caja (N1c) localizada en el sector oeste del municipio de Fortul y un porcentaje de 6,1% en una extensión de 67,1 Km².

Por último, la categoría muy bajo está representado por la Serie Río Negro – Une (K1rnu) con un 42,6% y un área de 467,4 Km² (Ver tabla 7).

Tabla 8

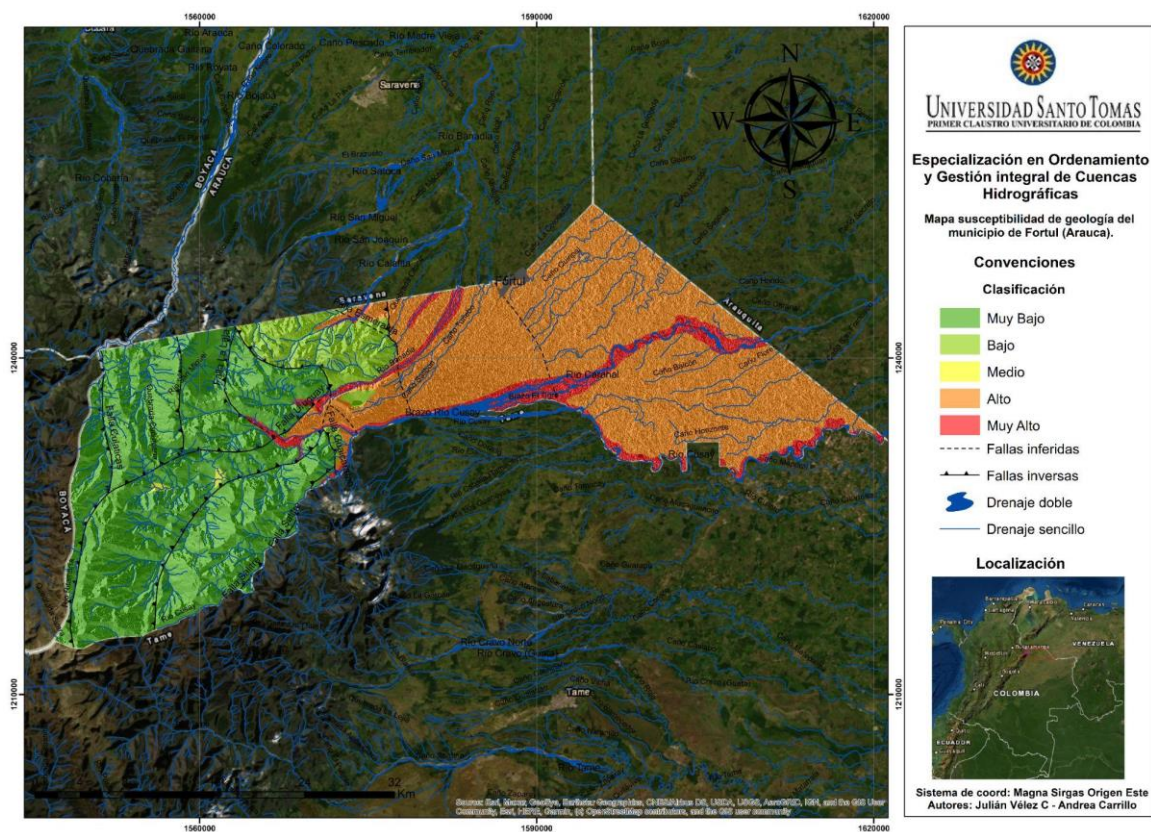
Clasificación de susceptibilidad de la geología, Fortul (Arauca).

Categoría	Valor Categoría	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	1	467,4	42,6
Bajo	2	67,1	6,1
Medio	3	2,3	0,2
Alto	4	478,3	43,6
Muy Alto	5	81,2	7,4

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Figura 12

Clasificación de susceptibilidad de la geología, Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Susceptibilidad de usos del suelo

En categoría muy alto se registra tejidos urbanos continuos, tejidos urbanos discontinuos, aeropuerto y estructuras asociadas, pastos limpios, arenales y cauces actuales de los ríos con un 37,9% y un área de 416,8 Km² distribuido en sentido E-W a lo largo del municipio de Fortul sobre planicie de inundación, con mayor concentración en el sector este y una predominante extensión en área en el río Cusay seguido del río Caranal y en menor medida el río Banadia.

En la categoría alto se registran pastos arbolados, pastos enmalezados, mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales, tierras denudadas y degradadas, lagunas, lagos y ciénagas naturales asociadas representando 5% con un área de 54,9 Km² distribuidos parcialmente sobre abanico aluvial y llanura de inundación, es decir sector centro-este.

La categoría medio es representada por bosque fragmentado con vegetación secundaria, bosque de galería y ripario, arbustal denso y vegetación secundaria con 13,2% y un área de 145,3 Km².

La categoría bajo abarca bosque denso de tierra firme, herbazal firme no arbolado y herbazal denso de tierra firme con arbustos con porcentaje de 11% en una extensión de 120,9 Km². Por último, la categoría muy bajo está representado por bosque denso alto de tierra firme y afloramiento rocoso con un 33% y un área de 363 Km². Es importante anotar que la localización de las categorías bajo y muy bajo tienen una distribución en el oeste del municipio sobre estructural plegado y estructural plegado denudado (Ver tabla 8).

Tabla 9

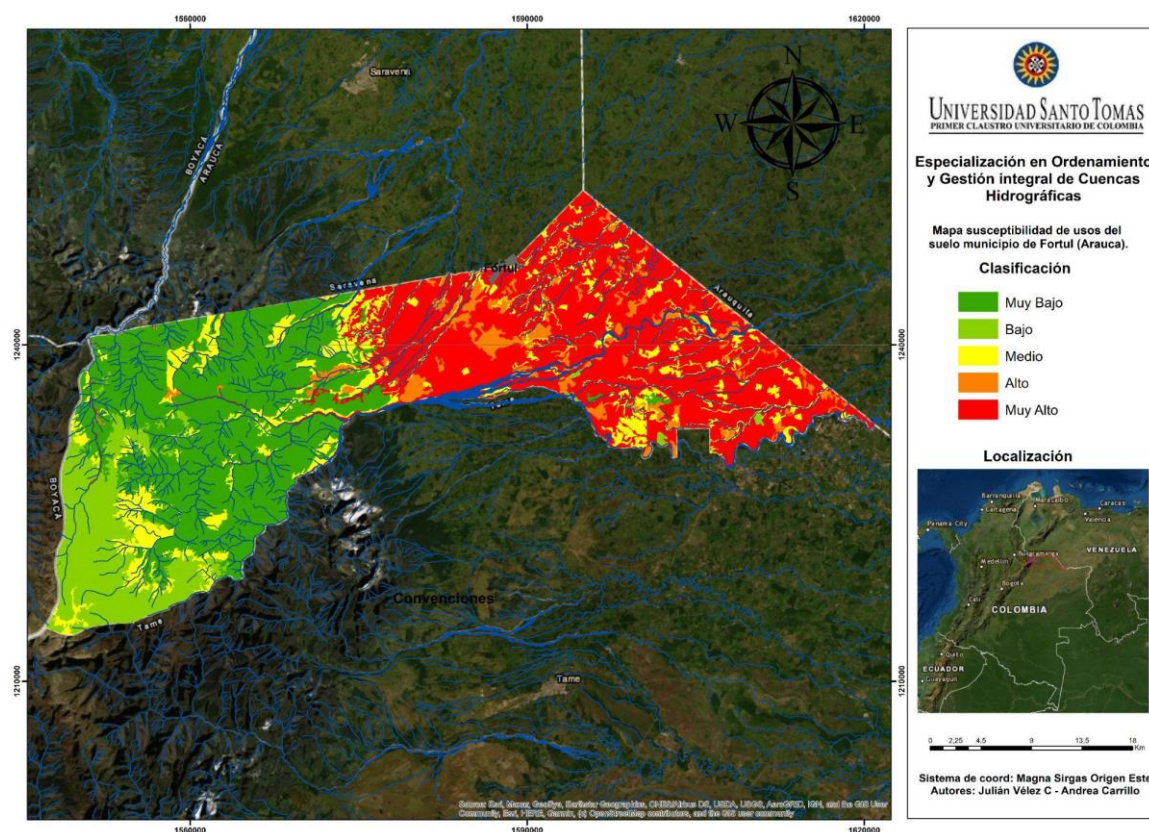
Clasificación de susceptibilidad de usos del suelo, Fortul (Arauca).

Categoría	Valor Categoría	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	1	363,0	33,0
Bajo	2	120,9	11,0
Medio	3	145,3	13,2
Alto	4	54,9	5,0
Muy Alto	5	416,8	37,9

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Figura 13

Clasificación de susceptibilidad de usos del suelo, Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Zonificación de susceptibilidad por inundación

Categoría muy alto

La categoría muy alto presenta una distribución en sentido E-W a lo largo del municipio de Fortul, con mayor concentración en el sector este y una predominante extensión en área en el río Cusay seguido del río Caranal y en menor medida el río Banadia, acorde a la planicie de inundación, con pendientes catalogadas como a nivel (0-3%), unidades geológicas como depósitos aluviales recientes (Q2al) y usos del suelo como tejidos urbanos continuos, tejidos urbanos discontinuos, aeropuerto y estructuras asociadas, pastos limpios, arenales y cauces actuales de los ríos. Los valores obtenidos para esta clasificación corresponden a 27,6% y un área en el municipio de 303,6 Km².

Categoría alto

La categoría alto registra distribución en el centro-este del territorio pertenecientes a un cambio de pendiente abrupto entre cordillera-llanura cortado por el río Banadia, Cusay y Caranal; esta categoría se caracteriza por ocurrir en llanura de inundación, terraza de acumulación, abanico aluvial, caños como Quiripal, Balcón, Flores y Horizonte, principalmente. Adicionalmente, se exhibe un terreno de ligero a moderadamente inclinado (3-12% de pendiente) sobre unidades geológicas como depósito de planicie aluvial (Q1pal), depósito de abanico inferior (Q1abi), depósito de abanico superior (Q1abs) y depósitos aluviales recientes (Q1al y Q2al) con superposición de usos del suelo como pastos arbolados, pastos enmalezados, mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales, tierras denudadas y degradadas, lagunas, lagos y ciénagas naturales asociadas. Esta categoría refleja valores de 19,6% y un área de 215,6 Km².

Categoría medio

La categoría medio con distribución heterogénea en centro y este del municipio presenta pendiente fuertemente inclinada (12-25% de pendiente), es representada parcialmente por algunos sectores de terraza de acumulación, abanico aluvial y en menor proporción llanura de inundación, así como unidades geológicas como depósitos fluvio-glaciares, usos de suelo como bosque fragmentado con vegetación secundaria, bosque de galería y ripario, arbustal denso y vegetación secundaria. El valor porcentual para esta categoría corresponde a 4,7% y un área superficial sobre el municipio de 55,4 Km².

Categoría bajo

La categoría bajo enfoca su distribución exclusivamente en el sector oeste del municipio de Fortul, en esta se evidencia la presencia de unidad estructural plegado y estructural plegado denudado, ligera a moderadamente escarpada (25-75% de pendiente), ocurrencia de unidades geológicas como serie Rio Negro-Une y Formación Caja con usos del suelo de bosque denso de tierra firme, herbazal firme no arbolado y herbazal denso de tierra firme con arbustos. La clasificación de categoría bajo exhibe un valor de 8% y un área en terreno de 88,1 Km².

Categoría muy bajo

La categoría muy bajo está representado por la unidad estructural-plegado denudado y estructural plegado localizados en el sector oeste del municipio, con pendiente fuertemente escarpado (75-100% de pendiente) incidencia de unidades geológicas como la Serie Rio Negro – Une y en menor proporción sobre la Formación Caja, con usos de suelo de bosque denso alto de tierra firme y afloramiento rocoso. Esta clasificación por mayoría refleja un valor de 40,1% con un área de extensión de 440,4 Km².

Tabla 10

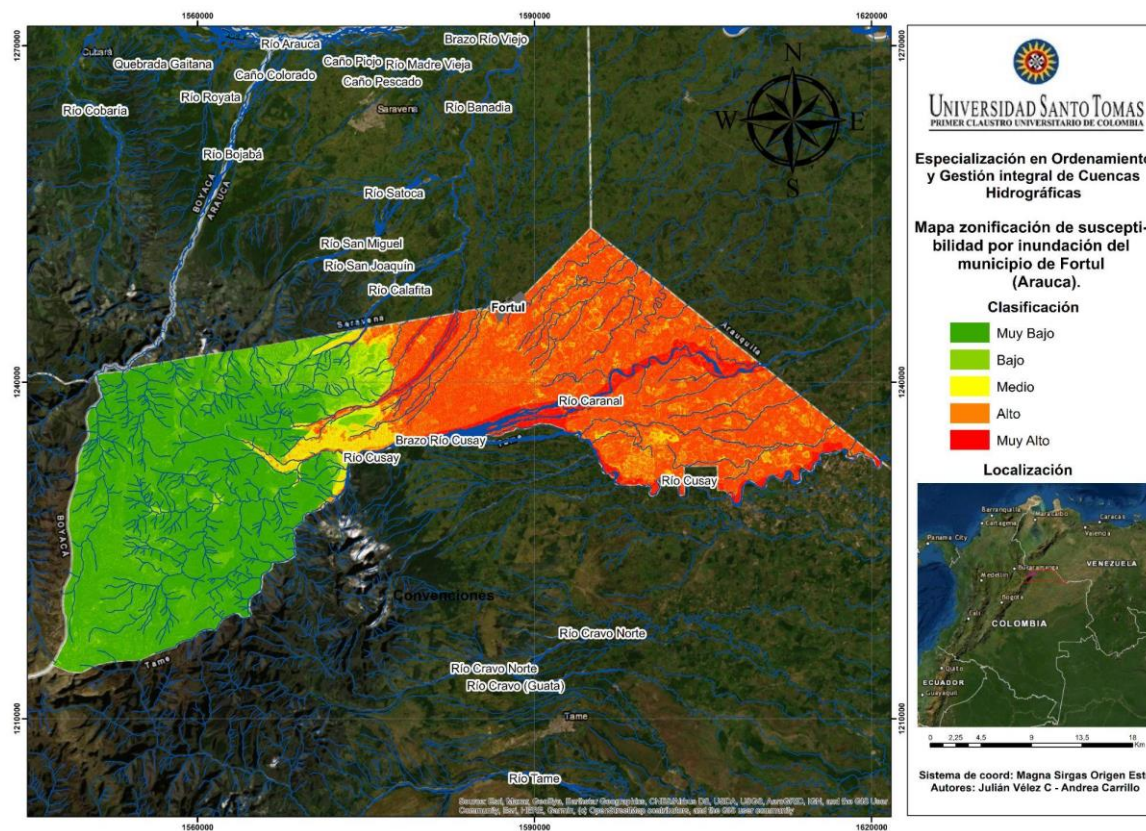
Zonificación de susceptibilidad de inundación, Fortul (Arauca).

Categoría	Valor Categoría	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	1	440,4	40,1
Bajo	2	88,1	8,0
Medio	3	51,4	4,7
Alto	4	215,6	19,6
Muy Alto	5	303,6	27,6

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Figura 14

Zonificación de susceptibilidad de inundación, Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Proceso analítico jerárquico (AHP)

A partir de la propuesta metodológica de Saaty (1980) donde se genera una poderosa herramienta definida como proceso analítico jerárquico (AHP) para la toma de decisiones bajo el fundamento matemático y contraste empírico con escalas de comparación pareada teniendo en cuenta las cuatro variables denominadas geomorfología, pendiente, geología y usos del suelo.

Dichas variables y sus valores porcentuales fueron discutidos y consensuados con la experta Magister en Ingeniería ambiental Verónica Ruiz quien labora a la fecha de esta investigación en el Servicio Geológico Colombiano corroborando criterios, características, porcentajes de influencia de las variables, robustez matemática de reciprocidad, homogeneidad y razón de consistencia. La matriz trabajada es de 4x4 y el valor obtenido para índice de consistencia (IC) de 0,082, índice de consistencia aleatoria (IA) de 0,99 y razón de consistencia fue de 0,0836 u 8,36%, dato válido según rangos existentes (porcentaje máximo de razón de consistencia (CR) es 9%). Así mismo, se obtienen los valores de vector propio para ser aplicados en el Software ArcGis (ArcMap) con su herramienta Overlay.

Tabla 11

Matriz correspondiente al análisis jerárquico.

	Geomorfología	Pendiente	Geología	Usos del suelo	Vector propio
Geomorfología	1,00	5,00	3,00	7,00	0,55
Pendiente	0,20	1,00	0,33	5,00	0,14
Geología	0,33	3,00	1,00	5,00	0,26
Usos del suelo	0,14	0,20	0,20	1,00	0,05
Σ	1,68	9,20	4,53	18,00	1,00
CR	8,36				

Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Overlay : Superposición de la información

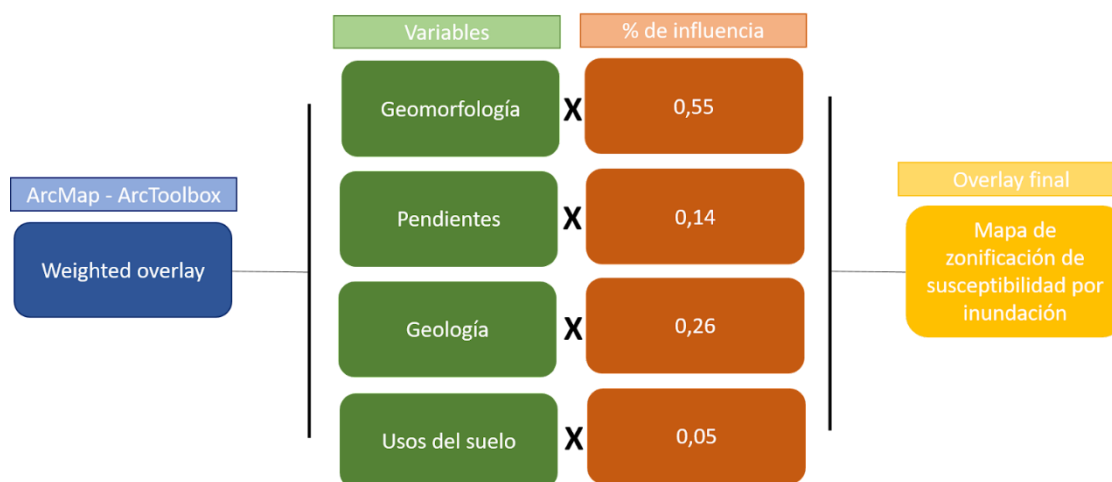
En el momento de tener las 4 variables de susceptibilidad (geomorfología, pendiente, geología y usos del suelo) en formato raster y clasificadas en las 5 categorías se procede a realizar la superposición con valores porcentuales obtenidos en el proceso analítico jerárquico (AHP). En ArcMap, sección ArcToolbox, Spatial analyst tools, overlay, weighted overlay, donde se cargan ráster con porcentaje de influencia, campo de datos y escala de valor, aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 1. *Valores asignados a variables para obtener overlay.* Fuente: Elaboración propia, (2022)

$$\text{Overlay} = (\text{Geomorfología} \times 0,55) + (\text{Pendiente} \times 0,14) + (\text{Geología} \times 0,26) + (\text{Usos del suelo} \times 0,05)$$

Figura 15

Ruta de aplicación para obtener overlay correspondiente a mapa de zonificación de susceptibilidad de inundación para el municipio de Fortul (Arauca).



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Medidas prospectivas y correctivas

A partir de la caracterización de la susceptibilidad por inundación del municipio de Fortul, se proponen medidas prospectivas y correctivas dirigidas a modificar o disminuir las condiciones de susceptibilidad, para evitar los daños y pérdidas en caso de presentarse un evento de inundación.

Cabe destacar que la *intervención prospectiva* es un proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas condiciones de riesgo a través de acciones de prevención para evitar nuevos riesgos e intervenir de forma correctiva si es necesario. Los mecanismos de esta gestión prospectiva son las políticas, normas y ordenamiento (Guerrero, 2021).

En este sentido, es prioritario plantear las investigaciones en mayor detalle para profundizar el conocimiento del fenómeno de susceptibilidad de inundación y que se articulen con los procesos de reducción y manejo de desastres. Se plantea realizar estudios hidráulicos a los ríos Cusay, Banadia y Caranal, así como estudios para determinar la viabilidad del aprovechamiento del material pétreo de estos y la construcción de obras hidráulicas de contención a partir de los resultados de estos estudios a detalle.

Incorporar e implementar los resultados de la zonificación a través de normas urbanísticas dentro del Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio, así como su socialización, promoción y divulgación de normas de urbanismos y construcción. Así mismo, se debe de incluir este trabajo dentro del Plan Municipal de Gestión del Riesgo como instrumento técnico que guíe a la toma de decisiones al comité municipal y ente encargado de la gestión del riesgo en el municipio.

Se sugiere la expedición de actos administrativos para proteger los suelos en riesgo, dentro del EOT y la inclusión de estas zonas como parte de la estructura ecológica principal de la zonificación ambiental.

Además del fortalecimiento de estos documentos técnicos, es indispensable la creación de la secretaría municipal de gestión del riesgo de emergencia y desastres y el fortalecimiento del consejo municipal de gestión del riesgo.

Condicionar el uso del suelo, delimitando las zonas de expansión urbana, controlar y vigilar los procesos urbanísticos, teniendo en cuenta que la zonificación de ambiental permite definir las áreas a ocuparse en un futuro y que requieran o no de obras de mitigación.

Se debe restringir el uso del suelo para la ocupación de asentamientos de origen informal en las áreas que se encuentran en categorías alta y muy alta de susceptibilidad a inundación.

De igual forma, se propone la promoción y ejecución de buenas prácticas agrícolas y pecuarias que permitan la mitigación y adaptación al cambio climático, así como la conservación de zonas de protección y control del cauce de las principales fuentes hídricas.

En el municipio no existen estaciones de monitoreo hidrometeorológico ni sistemas de alertas tempranas, lo que hace prioritario su instalación e implementación como una de las principales medidas de prevención del riesgo de inundación; con estas se pueden identificar y/o predecir fenómenos meteorológicos como lluvia intensa y fenómenos hidrometeorológicos inundaciones súbitas, crecientes súbitas y desbordamientos.

La *intervención correctiva* busca reducir el nivel de riesgo existente a través de acciones de mitigación, con el fin de disminuir o reducir las condiciones de susceptibilidad y de vulnerabilidad. Para la intervención correctiva se puede aplicar desde medidas estructurales y no estructurales.

Una vez identificadas las áreas susceptibles a inundación, es indispensable el reasentamiento de familias en áreas de categoría alta y muy alta y seguidamente iniciar el proceso para recuperar los suelos degradados.

Se propone la recuperación de áreas degradadas, rondas hídricas y el espejo de agua de los humedales, esto permite reducir la susceptibilidad de inundación por desbordamiento, teniendo en cuenta que el humedal actúa como una esponja conteniendo el exceso de humedad. En este sentido se propone la reforestación de rondas hídricas, recuperación de

cauces y laderas y la implementación de sistemas silvopastoriles y agroforestales para hacerle frente al problema de deforestación que acelera los procesos de inundaciones.

Así mismo, otra medida correctiva propuesta es el reforzamiento estructural de la infraestructura social, de gobierno, económica y de servicios públicos, así como la construcción del alcantarillado pluvial o combinado, con el cual se reduce la probabilidad de inundación del casco urbano por el colapso del alcantarillado sanitario.

Es importante analizar y estudiar a detalle la viabilidad de construcción de obras hidráulicas de contención y adecuación de los cauces, así como el control y la vigilancia del aprovechamiento del material de arrastre de los ríos.

Es vital el apoyo y fortalecimiento a los cuerpos de socorro para la gestión del riesgo, pues su función principal es actuar ante cualquier emergencia o evento que se presente, por lo tanto, deben estar dotados y con capacidad técnica y operativa para atender las emergencias oportunamente.

En la figura 16 se presentan las medidas prospectivas y correctivas, estructurales y no estructurales propuestas para la prevención y mitigación del riesgo en el municipio de Fortul.

Figura 16

Medidas prospectivas y correctivas propuestas para la prevención y mitigación del riesgo por inundación en el municipio de Fortul.



Nota. Fuente: Elaboración propia, (2022).

Conclusiones

Se realizó la caracterización, análisis y evaluación para la zonificación de susceptibilidad por inundación en el municipio de Fortul (Arauca) aplicando el proceso analítico jerárquico (AHP) obteniendo cinco categorías distribuidas en muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto con valores de 40,1%, 8%, 4,7%, 19,6% y 27,6%, respectivamente.

Una desventaja en la metodología implementada es la falta de insumos primarios SIG en una escala detallada puesto que en el momento de escudriñar la cartografía existente para geología, geomorfología y usos del suelo en escala 1:25.000, esta información no se encuentra disponible en las bases de datos de las instituciones encargadas de generarlas (se halla 1:100.000), por ende se hace necesario la digitalización a partir del modelo de elevación digital del terreno de 12,5m/pixel y se recurre a imágenes satelitales como LandSat Lidar 8 y Sentinel 2B con las cuales realizando las combinaciones correctas de RGB se pueden visualizar superficies diferenciadas con falsos colores como macizos rocosos, litologías, relieves, coberturas vegetales, suelos denudados, urbanización, entre otros, que son de utilidad para lograr una interpretación acertada a la escala de detalle.

Al generar la zonificación de susceptibilidad por inundación del municipio de Fortul a escala 1: 25 000 se define que la categoría muy alto presenta una distribución con mayor concentración en el sector este especialmente en zonas ribereñas en el río Cusay, Caranal y el río Banadía y es representado por el 27,6% del municipio. La categoría alto registra distribución en el centro-este del territorio pertenecientes a un cambio de pendiente abrupto entre cordillera-llanura cortado por el río Banadia, Cusay y Caranal; esta categoría se

caracteriza por ocurrir en llanura de inundación donde se encuentra el casco urbano y algunos caños con valores de 19,6%. En la categoría medio con distribución en el centro y este del municipio sobre terrazas de acumulación y abanicos aluviales con un valor de 4,7%. Por otra parte, la categoría bajo y muy bajo enfoca su distribución exclusivamente en el sector oeste del municipio de Fortul, es decir en la zona montañosa con un valor de 48,1%.

El proceso analítico jerárquico (AHP) de Saaty (1980) con escalas de comparación pareada teniendo en cuenta las cuatro variables denominadas geomorfología, pendiente, geología y usos del suelo son un instrumento poderoso para la toma de decisiones y elaboración de este instrumento de zonificación de susceptibilidad por amenaza de inundación ya que permite corroborando criterios, características, porcentajes de influencia de las variables, robustez matemática de reciprocidad, homogeneidad y razón de consistencia fundamentales para superposición de capas en software GIS.

Una de las bondades encontradas en la aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP) es que no requiere de software especializados pues puede ser desarrollado en tablas de Excel con la formulación correcta.

El hecho de que el mayor peso se haya asignado a la variable geomorfología (55%), no es coincidencia. Esta rama de la geología no sólo comprende la forma de la superficie terrestre, también se enfoca en la génesis y el comportamiento actual de la misma (Ritter, D., Kochel, R. & Miller, J., 2011). es el resultado del balance dinámico – que evoluciona en el tiempo-entre procesos constructivos y destructivos, a lo largo de los diferentes fenómenos litosféricos (Charlton, R., 2008; Anderson, R. & Anderson, S., 2011). Es decir,

abarca la hidrología, hidrografía, climatología, pedología, glaciología, que han regido en la zona desde sus orígenes.

Esta investigación cuenta con un impacto positivo que debe ser usado para el mejoramiento de los procesos de gestión del riesgo y ordenamiento del territorio en otros municipios que exhiban propiedades similares como los de Fortul (Arauca) y porque no, en otras regiones que disten en características que permitan establecer su utilidad técnico-científica.

Este documento y la metodología empleada permite zonificar el municipio de Fortul acorde a las condiciones de susceptibles por inundación, lo cual lo convierte en un instrumento condicionante, restrictivo y de priorización para estudios más detallados.

Recomendaciones

Cabe resaltar que este documento aquí generado debe ser divulgado y tenido en cuenta como instrumento de zonificación de susceptibilidad por inundación y permita orientar estrategias a mediano o largo plazo acorde con la gestión del riesgo y su integración en el EOT, útiles para restricciones de posibles urbanizaciones, limitaciones de uso de suelo, acciones de mitigación, entre otras.

Se recomienda continuar con esta línea de investigación en escalas de detalle como mínimo 1:5000, aprovechando el auge de la tecnología de drones que se vive actualmente y permita obtener actualización fehaciente de las variables implementadas, disminuyendo margen de error en pro de la comunidad.

Referencias

- Aerts, J. C. J. H., & Wouter Botzen, W. J. (2011). Flood-resilient waterfront development in New York City: Bridging flood insurance, building codes, and flood zoning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1227(1), 1–82.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06074.x>
- Aguilar, A., Bedoya, G. & y Hermelin, M. (2008). “Inventario de los desastres de origen natural en Colombia, 1970-2006- *limitantes, tendencias y necesidades futuras.*” *Gestión y Ambiente* 11 (1): 109-120.
- Anderson, R. & Anderson, S. (2011). *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge: *Cambridge University Press*. ISBN 978-0521519786.
- Barrantes-Castillo, G. & Vargas-Bogantes, J. (2011). LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN EL VALLE DEL RÍO SIXAOLA. *Revista Geográfica de América Central, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica*. vol. 1, núm. 46, pp. 67-85
- Berga, L. (2017). Resiliencia territorial frente a las inundaciones. ROP 3587. P. 74-81.
- Bhushan, N. and Rai, K. (2004) Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process. Springer, Berlin, 9, 11-21. Recuperado de:
<http://www.springer.com/978-1-85233-756-8>
- Calixto-Ramòn, L. (2017). *Determinación de zonas susceptibles de inundación mediante el uso de herramientas SIG en el área de influencia del río Cravo Sur, ubicado en el*

municipio de Yopal, Departamento de Casanare. [Tesis de especialización,

Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Archivo digital.

https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/Calixto-Ram%C3%B3n-Liliana-Lisbeth.pdf

Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*.. London:

Rutledge. ISBN 978-0-415-33454-9.

Consorcio Caranal. (2015). *Plan de ordenación y manejo de la Cuenca hidrografica del río*

Caranal. Resumen ejecutivo- fase diagnostic. P. 1-30.

CORPOBOYACÁ. (2017). Actualización POMCA Río Garagoa, *Plan de Ordenación y*

Manejo de la cuenca Hidrográfica. Fase Diagnostico. p. 5 -14.

Decreto Numero 1077 de 2015 por medio del cual se expide el Decreto Único

Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015, 26 de mayo).

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Sección 3.

<https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/1077%20-%202015.pdf>

EOT- Esquema de Ordenamiento Territorial de Fortul (2009). *Revisión y Ajuste del*

Esquema de Ordenameinto Territorial. Documento Diagnostico. p.66-67.

Fernandez-Illescas,C. & Buss, S. (2016). Ocurrencia y gestión de inundaciones en America

Latina y el Caribe – Factores claves y experiencia adquirida. *División de agua y*

saneamiento. Banco Interamericano de Desarrollo. Nota tecnica N° IDB-TN-924.

Flórez, Antonio, y Myriam Suavita Bejarano. 1997. “Génesis y manifestación de las

inundaciones en Colombia.” Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de*

Geografía 6 (1-2): 60-110.

Gallegos Reina, A., & Perles Roselló, M. J. (2020). Methodology for the integrated analysis of hazards associated to flooding: proposal adapted to the spatial planning in Mediterranean regions. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (86). <https://doi.org/10.21138/bage.2950>

Guerrero – Rojas, M. (2021). Gestión del riesgo de Desastres. Oficina de Educación virtual – Universidad Santo Tomás.

Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: Metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 5–25. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-01>

IDEAM. (2021). Boletín de predicción climática y recomendación sectorial. Publicacion N° 319. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/prediccion-climatica?p_p_id=110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm_struts_action=%2Fdocument_library_display%2Fview_file_entry&_110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Ftiempo-y-clima%2Fprediccion-climatica%2F%2Fdocument_library_display%2FljPLJWRaQzCm%2Fview%2F112700454%3F_110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm_redirect%3Dhttp%253A%252F%252Fwww.ideam.gov.co%252Fweb%252Ftiempo-y-clima%252Fprediccion-climatica%253Fp_p_id%253D110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm%2526p_p_lifecycle%253D0%2526p_p_state%253Dnormal%2526p_p_mode%253Dview%2526p_p_col_id%253Dcolumn-

1%2526p_p_col_count%253D1&_110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm_fileEntryId=1
19346751

Ley 1523 de 2012 Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de
desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se
dictan otras disposiciones. (2012, abril 24). *Congreso de*
Colombia.[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141)
141

Liendro Moncada J.V., & Ojeda, E. C. (2018). Aproximación al mapa de susceptibilidad a
inundación en la cuenca del río Boconó, Estado Trujillo, Venezuela. *Terra Nueva*
Etapa, XXXIV (Aproximación al mapa de susceptibilidad a inundación en la cuenca
del río Boconó, Estado Trujillo, Venezuela), 119–140.

Lopez, B. (2018). Generación de información primaria para la zonificación de amenazas
por movimientos en masa e inundaciones en un contexto urbano. *Trabajo de*
pregrado. Facultad de ingeniería. Universidad del Valle- Cali, Colombia.

MADS, M. d. (2014). *Guia Tecnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y*
Manejo de Cuencas Hidrograficas POMCAS . Obtenido de
[https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Gu](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Gu%C3%ADa_POMCAS/3._ANEXO_B._Gesti%C3%B3n_del_Riesgo.pdf)
[%C3%ADa_POMCAS/3._ANEXO_B._Gesti%C3%B3n_del_Riesgo.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Gu%C3%ADa_POMCAS/3._ANEXO_B._Gesti%C3%B3n_del_Riesgo.pdf)

MARTINEZ, E. A., & PEREZ, J. V. (2014). ESTUDIO HIDROLÓGICO, DE
INUNDACIÓN Y EROSIÓN URBANIZACIÓN NUEVO AMANECER –
MUNICIPIO DE PIEDECUESTA SANTANDER. Bucaramanga.

Quesada-Román, A. (2017). Geomorfología fluvial e inundaciones en la Cuenca alta del río General, Costa Rica. *Anuário do Instituto de Geociências* – UFRJ. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_278_288

Rahmati O; Zeinivand H; Besharat M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis _ *Enhanced Reader. Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7 (3), 1000–1017.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>

Ramos, A. M., Reyes, A. A., Munévar, M. A, Ruiz, G. L., Machuca, S. V., Rangel, M. S., Prada, L. F., Cabrera, M. Á., Rodríguez, C. E., Escobar, N., Quintero, C. A., Escobar, J. A., Giraldo, J. D., Medina, M. S., Durán, L., Trujillo, D. E., Medina, D F., Capachero, C. A., León, D., Ramírez, K. C., ... Pérez, M. A. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales. Servicio Geológico Colombiano y Pontificia Universidad Javeriana. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>

Ritter, D., Kochel, R. & Miller, J. (2011). Process Geomorphology. London: Waveland Pr Inc, 2011. ISBN 1577666690.

SAATY, T.L. (1977): A scaling method for priorities in herarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281.

SAATY, T.L. (1980): The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York. [66]

SAATY, T.L. (1986): Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32(7), 841- 855.

SAATY, T.L.; VARGAS, L.G. (1984): The legitimacy of rank reversal. Omega 12, 513-516.

SAATY, T.L. (1987): Rank generation, preservation and reversal in the analytic hierarchy process. Decision Science 18, 157-177.

SAATY, T.L. (1990): An exposition of the AHP. In reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process". Management Science 36(3), 259-268.

SAATY, T.L. (1994): Fundamentals of Decision Making. RSW Publications.

SAATY, T.L. (1994a): How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. Proceedings of the 3th. ISAHP, vii-xxviii.

SAATY, T.L. (1996): The Analytic Network Process. RSW Publications.

Saaty, T.L. (2008) Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. International Journal of Services Sciences, 1, 83.

Salazar, A. M. (2020). *Evaluación de la susceptibilidad a eventos de inundación mediante características morfológicas y de relieve en las cuencas del río Guarapas y las Ceibas departamento del Huila* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás].

Archivo digital.

<https://repository.usta.edu.co/jspui/bitstream/11634/29066/1/2020andressalazar.pdf>

Trefethen, J. 1987. Geología para ingenieros. Traducido por José Luis de La Loma. México: Continental S.A.

Universidad de los Llanos – Gobernación de Arauca. (2019). Formulación e Implementación del Plan de Ordenamiento Departamental de Arauca. Informe

técnico final “Evaluación, apoyo y recomendaciones a los Planes de Ordenamiento Territorial municipales (municipio de Fortul)”. Convenio interadministrativo 532 de 2016. Villavicencio – Colombia.

UNGRD. (2014). Historia del Sistema Nacional para la Atención y Prevención de Desastres. *Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres*. Bogotá, Colombia. Recuperado de:
<http://www.gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=79>

Varón Gutiérrez, S. D., & Vargas Cuervo, G. (2019). Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas a la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia. Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 152–174. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.70856>

Vega – Lopez, L. & Castiblanco-Muñoz, J. (2016). *Inundaciones y gestión del riesgo en Colombia: un análisis del comportamiento de la gestión del riesgo del estado y el rol del aseguramiento desde el 2003 al 2013* [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle]. Archivo digital.
<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1056&context=economia>

Vega-Serratos, B., Dominguez-Mora, R. & Posada-Vanegas, G. (2018). Evaluación estacional del riesgo por inundación en zonas agrícolas. DOI:10.24850/j-tyca-2018-03-04

Vera Rodríguez, J. M., & Albarracín Calderón, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales

en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109–136.

<https://doi.org/10.18359/rcin.2309>

Wilches-Chaux Gustavo (1993). La vulnerabilidad Global In. Los desastres no son naturales. In Maskrey Comp.

Wright, E. (2016). Zonificación de áreas potencialmente urbanizables en la ciudad de Esquel –provincia del Chubut- con relación a la susceptibilidad a inundaciones y remoción en masa. Trabajo final de la Especialización en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Aplicados al estudio del Medio Ambiente. Universidad Nacional de Luján.

Wurl, J., C. N. Martínez G. y M. Á. Imaz L. (2015), “Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 87, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 76-87, [dx.doi.org/10.14350/rig.41858](https://doi.org/10.14350/rig.41858).

385, W. M.-N. (2012). *INTERNATIONAL GLOSSARY OF HYDROLOGY*. Obtenido de <http://unesco Guatemala.org/wp-content/uploads/2014/11/glosario.pdf>