

Zonificación de susceptibilidad por amenazas a escala 1:2.000 por movimientos en masa e inundación a partir de las características geológicas, geomorfológicas y cobertura del suelo en el asentamiento Juan Pablo II del municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander para su proceso de regularización y legalización

Hazard susceptibility zoning at a scale of 1:2000 for mass movements and flooding based on geological and geomorphological characteristics and land cover in the Juan Pablo II settlement in the municipality of San José de Cúcuta, Norte de Santander for its regularisation and legalisation process

Karina Cely Riveros ^a; William Rincón Pabón ^b

^a Universidad de Pamplona, Colombia; Mail: Karina.cely@unipamplona.edu.co

^b Universidad de Pamplona, Colombia; Mail: William.rincon@unipamplona.edu.co

Correspondencia: Karina.cely@unipamplona.edu.co / William.rincon@unipamplona.edu.co

Recibido: . Aceptado: . Publicado:

Resumen

El asentamiento Juan Pablo II, situado al suroeste del municipio de San José de Cúcuta en el departamento de Norte de Santander, se estableció de manera ilegal en 2005 y ha mantenido esa condición hasta la fecha, excluyéndolo de los planes de ordenamiento territorial (POT). Este contexto motiva la necesidad de contribuir a su proceso de legalización y regularización mediante un estudio detallado a escala 1:2.000, como lo establece el Decreto 1077 del 2015.

El trabajo se estructuró en cuatro fases. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión bibliográfica para recopilar datos sobre inundaciones y movimientos en masa en el asentamiento, complementada con la búsqueda de imágenes aéreas históricas entre 1991 y 2023. A continuación, se utilizó la interpretación de sensores remotos para caracterizar la geología y la geomorfología, manteniendo la escala del estudio. Posteriormente, se realizaron visitas al área de estudio para la recolección de datos cada 20 metros. En la última fase, se ejecutó un análisis determinístico mediante álgebra de mapas, generando informes y mapas para identificar y evaluar la susceptibilidad en periodos pasados y actuales por movimientos en masa e inundaciones.

Los resultados revelaron que, aunque el asentamiento carece de pendientes abruptas, lo que implica una baja actividad de remoción en masa debido a la topografía plana, sigue siendo propenso a inundaciones. Estas amenazas se delimitaron y se detallaron en el análisis, resaltando la importancia de abordar específicamente los riesgos asociados a las inundaciones en la zona. Este estudio proporciona una base crucial para el proceso de legalización y destaca la importancia de considerar amenazas específicas en el diseño de estrategias de gestión de riesgos.

Palabras clave: Susceptibilidad; Movimientos en Masa; Inundaciones.

Abstract

The Juan Pablo II settlement, located southwest of the municipality of San José de Cúcuta in the department of Norte de Santander, began illegally in 2005 and has maintained that condition to date, excluding it from the territorial planning plans (POT). This context motivates the need to contribute to its legalization and regularization process through a detailed study on a 1:2,000 scale, as established by Decree 1077 of 2015.

The work was structured in four phases. First, a literature review was carried out to collect data on flooding and mass movements in the settlement, complemented by the search for historical aerial images between 1991 and 2023. Remote sensing interpretation was then used to characterize the geology and geomorphology, maintaining the scale of the study. Subsequently, visits were made to the study area to collect data every 20 meters. In the last phase, a deterministic analysis was executed using map algebra, generating reports and maps to identify and evaluate past threats from mass removal and flooding.

The results revealed that, although the settlement lacks steep slopes, implying low mass removal activity due to the flat topography, it is still prone to flooding. These threats were outlined and detailed in the analysis, highlighting the importance of specifically addressing the risks associated with flooding in the area. This study provides a crucial foundation for the legalization process and highlights the importance of considering specific threats in the design of risk management strategies.

Keywords: Susceptibility; mass movements; Floods.

1 Introducción

En Colombia, debido a su topografía diversa y la marcada influencia antrópica, así como la significativa presencia de fenómenos naturales, en particular en climas intertropicales, el país se encuentra vulnerable a posibles cambios climáticos. Estas condiciones predisponen a Colombia a experimentar procesos erosivos y la eventual ocurrencia de movimientos en masa. [1], así como el incremento de los caudales debido a la confluencia de drenajes desde zonas altas hasta llegar a los lugares ribereños de asentamiento humanos [2], donde el incremento demográfico, la falta de recursos, el desconocimiento del peligro se proponen construir zonas aledañas a taludes y quebradas.

La alcaldía de San José de Cúcuta ha seleccionado el asentamiento Juan Pablo II, junto con otros nueve, para llevar a cabo estudios detallados y zonificar la susceptibilidad ante movimientos en masa e inundaciones. Aunque existen datos cartográficos del Plan de Ordenamiento Territorial de 2019, estos resultan insuficientes para una zonificación precisa debido a la incertidumbre sobre las problemáticas reales. La falta de evaluaciones sobre fenómenos naturales en estos asentamientos a detalle deja a las poblaciones expuestas y vulnerables ante posibles contingencias.

La susceptibilidad por amenaza ante movimientos en masa e inundación se refiere a la evaluación sistemática de la probabilidad de que ciertas áreas sean afectadas por eventos geodinámicos específicos, como movimientos en masa o inundaciones [3] adicionalmente la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC) para la zonificación de susceptibilidad por movimiento en masa es principalmente el enfoque bivariado; además, ha desarrollado guías metodológicas específicas para llevar a cabo este proceso a diversas escalas p. ej. [4].

La evaluación de la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa implica de un método estadístico bivariado combinado con el conocimiento local, utilizando subunidades geomorfológicas y criterios de campo. [3] Independientemente del método, el inventario de procesos morfodinámicos se destaca como el insumo clave para establecer la relación entre los factores condicionantes y la posible ocurrencia de movimientos en masa. Este análisis del inventario permite formular hipótesis sobre las zonas más o menos propensas a la inestabilidad, que luego se verifican mediante estadísticas y evaluación de expertos. Para estimar la contribución relativa de cada factor, se sugiere la aplicación de un método estadístico bivariado conocido como "Pesos de Evidencia", que sugiere un enfoque basado en la teoría de probabilidad bayesiana para evaluar la posibilidad de movimientos en masa, considerando factores condicionantes [3] [5].

El análisis histórico permite observar la morfodinámica del área de estudio a través de sensores remotos que permitan definir y entender la evolución de la zona p. ej. [6] [7]; para esto, se destacan zonas que serán evaluadas en campo a través de la toma de datos a escala 1:2.000 con el fin de recaudar información generando los factores de geomorfología que evalúa la génesis y

la dinámica; la geología en la cual se definen las estructuras y litología en la cual está ubicado el asentamiento; la cobertura y uso del suelo permiten definir el geoambiente, el cual tendrá peso en la asignación de los valores de características desencadenantes en los movimientos en masa e inundación. Adicionalmente, las unidades geológicas superficiales se refieren al material expuesto en la superficie del terreno [3]. En Conjunto con la fotogrametría podemos obtener insumos como el valor de las pendientes y laderas. Sandoval [8] menciona que la precisión de los mapas de susceptibilidad está estrechamente ligada a la calidad y cantidad de datos disponibles, a la escala de trabajo seleccionada, y a la elección adecuada de la metodología de análisis y modelación. Dentro de estas consideraciones, se pueden emplear enfoques cualitativos y cuantitativos.

El factor condicionante aborda la presencia o potencial existencia de elementos que contribuyen a la predisposición del terreno para la ocurrencia de movimientos en masa o inundaciones, estableciendo un conjunto de condiciones que aumentan la susceptibilidad del área. Por otro lado, la hipótesis de falla se centra en la probabilidad de generación de un movimiento en masa o inundación, indicando eventos o factores específicos que desencadenan directamente estos fenómenos. Elementos como lluvias intensas, terremotos o saturación del suelo, actúan como detonantes, provocando la pérdida de estabilidad en una ladera o pendiente y desencadenando el fenómeno. [3]

2 Localización

El asentamiento Juan Pablo II presenta un área de 2.47 hectáreas y se encuentra localizado en la parte Suroeste del municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander, pertenece a la comuna 8 del municipio y se encuentra delimitado en su costado Norte por el asentamiento 13 de Mayo, al Oeste por el barrio Minuto de Dios y al Sur por el asentamiento Campo Alegre (Figura 1)

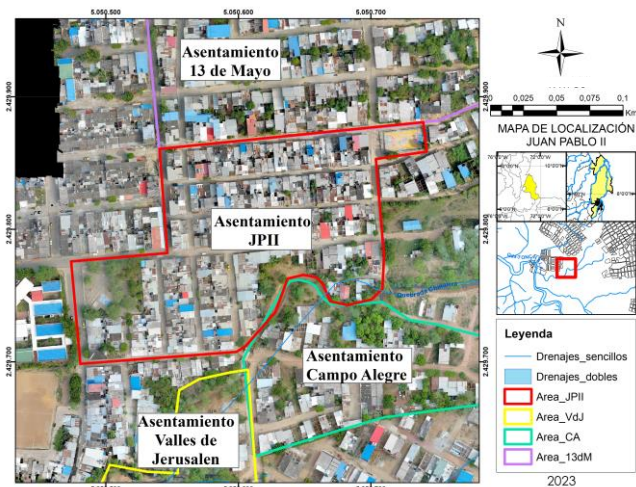


Figura 1. Mapa de localización del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.

3 Metodología

El siguiente estudio se desarrolló en cuatro fases para obtener la zonificación de susceptibilidad por Amenaza de movimientos en masa e inundación donde se tuvo como base las propuestas metodológicas del Servicio Geológico Colombiano (SGC) [9]

Fase I

El estudio comenzó con una recopilación y análisis bibliográfico para establecer una línea base de información sobre la zona de estudio con el fin de generar un marco geológico, geomorfológico y de gestión del riesgo.

Fase II

En esta fase de Interpretación de Sensores remotos se lleva a cabo el levantamiento de fotogrametría mediante Dron Autel Evo II con RTK y se determina la ortofoto con un modelo digitan de elevación que ayudará a determinar y cuantificar la zona de estudio; paralelamente, se realiza un análisis multitemporal en busca de lugares importantes a tener en cuenta en la siguiente fase.

Fase II

Durante esta fase, se realizaron observaciones detalladas en el terreno para la construcción de los factores como mapas: Geomorfológico, Geológicos, Unidades Geológicas Superficiales, Coberturas y Usos del Suelo.

Fase IV

En este apartado se ponderó los parámetros anteriores usando el método determinístico mediante un enfoque estadístico bivariado para finalmente hacer un geoprocesamiento y validación mediante el uso de álgebra de mapas en el software ArcMap; finalmente se determinaron los niveles de susceptibilidad de amenaza por movimientos en masa e inundación del asentamiento Juan Pablo a escala 1:2.000, para dar cumplimiento a los criterios establecidos según el Decreto 1077 de 2015.

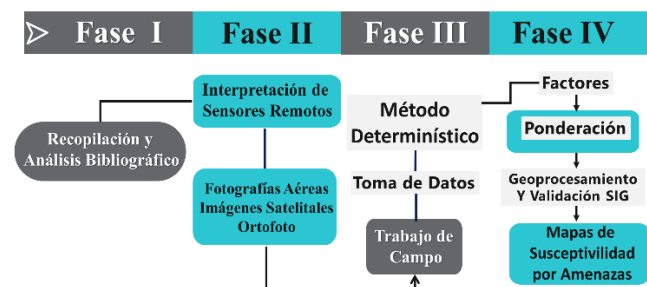


Figura 2. Diagrama de metodología aplicada. Fuente: Autores.

4 Resultados

4.1 Antecedentes

En el 2012, la Ley 1523 estableció políticas de gestión del riesgo. Según el Artículo 38, todos los proyectos de inversión pública deben incluir un análisis de riesgo de desastres adaptado a su complejidad [10]. En 2014, el Decreto 1807 reafirmó la necesidad de estudios para la revisión a largo plazo de los planes de ordenamiento territorial [11]. En el año 2017, Alarcón propuso un método para la zonificación de amenazas por avenidas torrenciales [12]. El enfoque incluyó la identificación de causas, tipos y factores influyentes, utilizando datos topográficos, geológicos y otros. Se generó un mapa de amenazas mediante un método estadístico bivariado centrado en eventos de torrencialidad, y los resultados se modelaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG). En 2021, la alcaldía de San José de Cúcuta inició la legalización de 10 asentamientos urbanos, incluyendo Juan Pablo II [13], con el fin de mejorar las condiciones de vida de los residentes. Este proceso implica la formalización de asentamientos informales, aplicando la reglamentación urbana para su reconocimiento como barrios. A principios de las 2023 lluvias intensas afectaron gravemente varios sectores del municipio de Cúcuta, hubo inundaciones, colapsos de viviendas y daños en infraestructuras. La Secretaría de Gestión del Riesgo y Desastre advirtió sobre la necesidad de limpiar canales, mantener alcantarillados libres de basura y evitar construcciones en zonas de riesgo [14].

4.2 Análisis multitemporal y dinámica fluvial

La evaluación temporal a través del análisis de imágenes satelitales mediante Google Earth Pro es un elemento crucial ya que permite revisar intervalos de tiempo la morfodinámica llegando a entender cómo las condiciones cambian con el tiempo [7].

Se lleva a cabo un análisis que abarca el periodo desde 1991 hasta 2023. La zona presenta características fluviales con cambios de pendientes, algunos originados por niveles de terrazas altas y bajas en contacto con una ladera al norte. La evolución de los procesos erosivos, desde surcos a cárcavas derivadas de canales intermitentes en precipitaciones constantes. Las áreas marcadas por antiguos procesos erosivos que posteriormente se construyen, a veces desconociendo la estabilidad del suelo genera problemas a los habitantes en un futuro.

La dinámica fluvial de la quebrada La Chinalera exhibe una moderada actividad, destacando zonas con erosión lateral y orillas cóncavas por erosión, así como áreas convexas por depósito aluvial. Además, se observa un aumento en la población (Fig.3-b), una disminución en la cobertura vegetal y un incremento de construcciones en dirección norte-sur.



Figura 3. Mosaico de fotografías aéreas del análisis multitemporal del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.

4.3 Geomorfología

La geomorfología analiza la estructura del relieve y la creación de paisajes, explorando cómo se forman y cambian a través de la degradación y la creación. Para estudiarlos, se emplea un enfoque jerárquico, desde escalas amplias hasta detalles específicos, tal como lo propuso Carvajal [15]. En un área específica, se identifican diferentes unidades geomorfológicas en una jerarquía según la escala de trabajo. Esto permite un análisis detallado de la evolución geológica y geomorfológica. En nuestro estudio a una escala de 1:2.000, se asignan elementos geomorfológicos (escala > 1:10.000), representando el máximo detalle de las características del relieve y la forma del terreno.

4.3.1 Morfogénesis

Se enfoca en el origen y evolución de las características del terreno, que resultan de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Estos procesos, tanto antiguos como actuales, han moldeado y siguen moldeando el relieve a lo largo de extensos periodos de tiempo, determinando el aspecto actual de las formas geológicas y unidades de terreno.

4.3.1.1 Elementos Geomorfológicos para movimientos en masa

Los mapas de elementos geomorfológicos aplicados a la zonificación de amenazas por movimientos en masa, son interpretaciones subjetivas de la formación del relieve en una región. Estas interpretaciones se basan en las características morfológicas, morfométricas, cambios en la geología (rocas y suelos) y la estructura del terreno. También consideran procesos activos e inactivos, como movimientos en masa y erosión, que han modelado la superficie del territorio [15]. Con base a esto, se generó el mapa geomorfológico del entorno del área de estudio (Figura 9) del cual se pudo conocer la distribución porcentual de los componentes morfogenéticos presentes, determinando que el ambiente de origen fluvial presenta la mayor área, correspondiente al 78% del área cartografiada, con una extensión aproximada de 3ha; seguido del ambiente de origen denudacional que presenta el 14%, con una extensión aproximada de 0,5ha y por último el ambiente antrópico que presenta el 8% del área cartografiada, con una extensión aproximada de 0,3 ha.

Tabla 1 Ambientes morfogenéticos para movimientos en masa y su distribución en área.

Elemento Geomorfológico	Acrónimo	Área (Ha)	%
Fluvial	F	3	77
Antrópico	A	0,5	15
Denudacional	D	0,3	8

Fuente: Autor(es)

4.3.1.1.1 Ambiente denudacional

Abarca las formas del terreno moldeadas por la erosión, transporte y acumulación de sedimentos, tanto remodelando las unidades preexistentes como creando nuevas.

4.3.1.1.1.1 Ladera erosiva levemente inclinada (Dleli)

Esta unidad representa una ladera con leve inclinación, longitud muy corta menor a 5 grados; su perfil se caracteriza por presentar pequeñas rupturas de pendiente debido a los procesos erosivos, lo que da lugar a la formación cóncava y convexa. Se observa de manera alargada de Este a Oeste en la parte Noreste del asentamiento, atravesando las manzanas A, B y la mitad de la C, teniendo contacto en la parte Noreste de la terraza alta (Fig.4-a).

4.3.1.1.2 Ambiente fluvial lagunar

Las formas creadas por la erosión y sedimentación de corrientes de agua, tanto en inundaciones como en su flujo normal. Estas unidades están cerca de ríos y quebradas, con depósitos acumulados cuando el agua pierde su capacidad de arrastre.

4.3.1.1.2.1 Terraza alta (Fta)

Esta unidad se encuentra marcada por una geomorfología plana ligeramente inclinada marcada por cambios de pendiente se forman por la acumulación de material, mediante procesos fluviales antiguos, desarrollando superficies escalonadas o terrazas más o menos planas y horizontales, poco disectadas que alcanzan elevaciones de 5 m aproximadamente (Fig.4-b).

4.3.1.1.2.2 Terraza baja (Ftb)

Esta unidad se caracteriza por una geomorfología plana ligeramente inclinada, marcada por cambios de pendientes que se forman por la acumulación de material, mediante procesos fluviales recientes, desarrollando superficies escalonadas o terrazas más o menos planas y horizontales, poco disectadas que alcanzan elevaciones de 2.5 m aproximadamente (Fig. 4-c).

4.3.1.1.2.3 Cauce aluvial intermitente (Fcai)

Los drenajes intermitentes transportan el flujo de agua desde la parte más alta, que corresponde al límite del asentamiento 13 de Mayo, hacia la parte más baja, siguiendo una dirección hacia Valles de Jerusalén. Mayormente, siguen las vías a lo largo de los andenes, con rumbo a desembocar en la quebrada de La Chinalera (Fig. 4-d).

4.3.1.1.2.4 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)

Se presenta bordeando al cauce aluvial permanente marcado por un cambio de pendiente, erosionando la terraza de acumulación. En el borde superior se observa erosión irregular causada por los drenajes intermitentes, y en la parte inferior erosionada por la socavación de la quebrada de La Chinalera (Fig. 4-e).

4.3.1.1.2.5 Cauce aluvial antiguo (Fcaa)

Se observa como un sistema de drenaje abandonado, el cual presenta relictos de grava, arena, limo y guijarros, que son evidencia de la actividad fluvial pasada, también se observa un depósito con una estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa (Fig.4-f).

4.3.1.1.2.6 *Cauce aluvial permanente (Fcap)*

El cauce se presenta de forma irregular profundizado por erosión de los sedimentos, con una geometría meandriforme de canal único, con sinuosidad de 1% a 2%, con una fuerza de flujo baja y erodabilidad de las márgenes moderada, con carácter erosivo en la parte cóncava o del meandro y un carácter de acumulación de sedimentos en la orilla convexa. El cauce presenta un ancho de 4m aproximadamente y recorre en dirección Este a Oeste con un flujo de aguas negras conocido como Caño de La Chinalera (Fig.4-g).

4.3.1.1.3 *Ambiente antrópico*

Abarca las formas del terreno creadas por la intervención humana, como construcciones, obras de ingeniería, disposición de desechos y la creación de nuevas vías, alterando la morfología natural del terreno.

4.3.1.1.3.1 *Antrópico lleno mixto (Allm)*

Esta unidad se encuentra como un depósito antrópico (Relleno antrópico), compuesto principalmente de arcilla de color café moteado con rojizo, con una estructura matriz soportado, con la presencia de clastos de tamaño gravas y bloques, estos clastos se observan subredondeados a redondeados con una esfericidad moderada, los cuales han sido dispuestas de la quebrada La Chinalera (Fig.4-h).

4.3.1.1.3.2 *Superficie de explanación (Asp)*

Esta unidad se encuentra como una explanación antrópica hecha sobre una ladera erosiva con el fin de adecuar el terreno para la construcción de una cancha (Fig.4-i).

4.3.1.2 *Elementos geomorfológicos por inundación*

Se basan en eventos pasados o recientes, obteniendo datos de fuentes como documentos históricos o imágenes de satélite. Estos mapas muestran límites, niveles, caudales, profundidades e información detallada sobre inundaciones [16].

Se generó el mapa geomorfológico del entorno del área de estudio (Figura 10), del cual se pudo conocer la distribución porcentual de los componentes morfogenéticos presentes, determinando los elementos morfológicos establecidos en la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación del IDEAM [16] en donde el ambiente de origen fluvial y lagunar presenta la mayor área, correspondiente al 100% del área cartografiada, con una extensión aproximada de 3,4 ha.

4.3.1.2.1 *Terrazas con pendiente media plana con presencia de diques y cauces abandonados (DAf2)*

En la parte de la terraza se observa marcada por una geomorfología plana ligeramente inclinada marcada por cambios de pendiente se forman por la acumulación de material, mediante procesos fluviales antiguos, desarrollando superficies escalonadas o terrazas más o menos planas y horizontales, poco disectadas que alcanzan elevaciones de 3 m aproximadamente como se observa en la figura 5-a.

Por otro lado, para la parte del escarpe de terraza de acumulación se presenta bordeando al cauce aluvial

permanente marcado por un cambio de pendiente erosionando la terraza de acumulación. En el borde superior se observa erosión irregular causada los drenajes intermitentes, y en la parte inferior erosionada por la socavación de la quebrada de La Chinalera (Fig. 5-b).

4.3.1.2.2 *Valles con pendiente media plana, con conos terraza, terrazas bajas (DTI2)*

Esta unidad se encuentra marcada por una geomorfología plana ligeramente inclinada marcada por cambios de pendiente se forman por la acumulación de material, mediante procesos fluviales recientes, desarrollando superficies escalonadas o terrazas más o menos planas y horizontales, poco disectadas que alcanzan elevaciones de 2.5 m aproximadamente (Fig. 5-c).

4.3.1.2.3 *Valles planocóncavos con pendiente media plana, que cortan las superficies de denudación (DAf5)*

Esta unidad morfogenética se presenta como un sistema de drenaje que funciona solo en momentos específicos, estos flujos de agua se evidencian cuando ocurren precipitaciones; es decir, naturalmente no opera de manera continua, sino en respuesta a las condiciones climáticas. Algunos se observan como pequeñas zanjas, ya que tiene una dirección definida debido a las pendientes locales del terreno en dirección a la quebrada de La Chinalera (Fig. 5-d).

4.3.1.2.4 *Valles de pendiente plana, con profundidades de 20 a 50 m en relación con el nivel de la altillanura (DOf3)*

Esta unidad se presenta como un cauce de forma irregular profundizado por erosión de los sedimentos, con una geometría meandriforme de canal único, con sinuosidad de 1% a 3%, con una fuerza de flujo baja y erodabilidad de las márgenes moderada, con carácter erosivo en la parte cóncava o del meandro y un carácter de acumulación de sedimentos en la orilla convexa. El cauce presenta un ancho de 4m aproximadamente y recorre en dirección Este a Oeste con un flujo de aguas negras conocido como Caño de La Chinalera. (Fig. 5-e).

Adicionalmente, esta unidad también se presenta como un cauce antiguo actuando como un sistema de drenaje abandonado, el cual presenta relictos de grava, arena, limo y guijarros, que son evidencia de la actividad fluvial pasada, también se observa un depósito con una estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa (Fig. 5-f).

4.3.1.2.5 *Planicies aluviales de pendiente media plana, con diques, cubetas de inundación y antiguos cauces (DAf4)*

Planicie aluvial de pendiente media plana, compuesto en la parte superficial por un depósito principalmente de arcilla de color café moteado con rojizo, con una estructura matriz soportado, con la presencia de clastos de tamaño gravas y bloques, estos se observan subredondeados a redondeados con una esfericidad moderada, los cuales han sido dispuestos de la quebrada La Chinalera (Fig. 5-g).



Figura 4. Fotografías de los elementos geomorfológicos para movimientos en masa. Fuente: Autor(es).



a. Terrazas con pendiente media plana con presencia de diques y cauces abandonados (DAf2)



b. Terrazas con pendiente media plana con presencia de diques y cauces abandonados (DAf2)



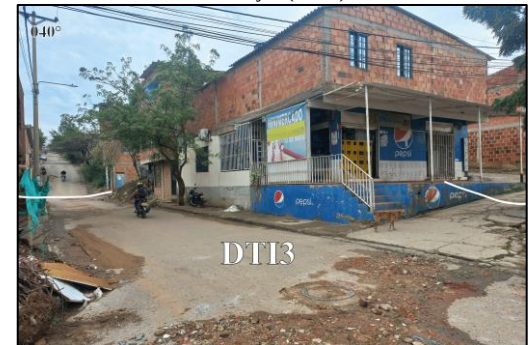
c. Valles con pendiente media plana, con conos terraza, terrazas bajas (DTi2)



d. Valles planocóncavos con pendiente media plana, que cortan las superficies de denudación (DAf5).



e. Valles de pendiente plana, con profundidades de 20 a 50 m en relación con el nivel de la altillanura (DOf3)



f. Valles de pendiente plana, con profundidades de 20 a 50 m en relación con el nivel de la altillanura (DOf3)



g. Planicies aluviales de pendiente media plana, con diques, cubetas de inundación y antiguos cauces (DAf4).

Figura 5. Fotografías de los elementos geomorfológicos para inundación. Fuente: Autores.

4.3.2 Morfometría

Se encuentra relacionado con los aspectos cuantitativos: medidas de longitud, área, forma y pendiente. La morfometría abarca los rasgos dimensionales de las geoformas, derivados de una representación numérica de la topografía. Los componentes del terreno para su descripción son:

4.3.2.1 Pendientes

La pendiente mide la tasa de cambio de la elevación en la dirección descendente más y corresponde al ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyos valores pueden expresarse en grados de 0 a 90 [17]. De acuerdo a esto, realizó la clasificación de pendientes siguiendo el rango propuesto por Zuidam [18]. Clasificándose en 7 campos de acuerdo a la inclinación del terreno. Con base a esto se realizó el mapa de pendientes (Fig.6-a) obteniendo como resultados pendientes principalmente planas (0° - 2°) a suavemente inclinadas (2° - 4°) con un porcentaje de 73% del área del terreno; seguido de pendientes inclinada (4° - 8°) con un 23%; seguido de pendientes moderadamente abrupta (8° - 16°) con un 4%; por último, en menor proporción se obtuvieron pendientes abruptas (16° - 35°) a muy abrupta (35° - 55°) con un 0,3%

4.3.2.2 Curvatura

La curvatura de la pendiente indica el grado de convexidad/concavidad del terreno, considerando el radio de curvatura que posee una celda según un plano vertical [19], de acuerdo con Santacana [20], la curvatura se relaciona con los deslizamientos en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión de la escorrentía o drenaje superficial. De acuerdo a estos parámetros establecidos se determinó, una zona cóncava hacia la parte SE concentrando un mayor flujo subsuperficial, mientras que, para la parte NE se presenta de manera convexa donde el flujo se dispersa, asumiendo que la captación de agua lluvia sea poco efectiva y por tanto exista menos probabilidad de inestabilidad.

4.3.2.3 Inclinación de ladera

Se refiere al ángulo que forma con un plano horizontal y está vinculada al tipo de material presente y a la propensión a movimientos en masa. Se realizó la caracterización de la ladera con respecto a su inclinación (Fig. 6-b), teniendo en cuenta la propuesta metodológica del servicio geológico colombiano [9], en el cual indican las características del material de acuerdo al rango de inclinación. Con esto se obtuvo que en el terreno predominan pendientes suavemente inclinadas (0° - 5°) de material muy blando y baja susceptibilidad; pendientes inclinadas (6° - 10°) de material blando con un 73% del área del terreno; seguido de pendientes muy inclinada (11° - 15°) de material moderadamente blando con un 23%; por último en menor proporción se obtuvieron pendientes abrupta (16° - 20°) muy abrupta (21° - 30°) y escarpada (30° - 45°) de materiales moderadamente resistentes a muy resistentes con una alta susceptibilidad.

4.3.2.4 Longitud de ladera

Es un indicador de la homogeneidad del material constitutivo de las geoformas. Teniendo en cuenta la propuesta metodológica del servicio geológico colombiano [9], en el cual, clasifican la ladera entre muy corta a extremadamente larga de acuerdo a su medida en metros, con base a esto, en el área de estudio se clasifica una ladera corta por su medida de 73m, ubicada en la parte NE del asentamiento.

4.3.2.5 Forma de ladera

La forma de la ladera influye en el tipo de deslizamientos: pendientes rectas provocan deslizamientos planos, mientras que pendientes irregulares generan movimientos más complejos. Teniendo en cuenta la propuesta metodológica del servicio geológico colombiano [9], donde se clasifican las laderas de acuerdo a las características del material y el movimiento en masa asociado, con base a esto, se determinó que en el área de estudio la ladera presenta una forma cóncava para la parte SE con material blando y disposición estructural no definida y convexa para la parte NE de material blando y disposición estructural casi horizontal, con posibles deslizamiento rotacionales.

4.3.2.6 Patrón de drenajes

La red de cursos de agua influye en la configuración y diseño de las formas del terreno. Este depende de la topografía, geología, vegetación y el clima. Teniendo en cuenta la propuesta establecida por Huggett [21], donde clasifica los drenajes de acuerdo a 9 tipos de patrones y con base a esto, se identificó el patrón de los drenajes distribuidos en el área de estudio (Fig.6-c), obteniendo como resultado un patrón de tipo rectangular, ya que, sus afluentes muestran curvas casi rectas, esto debido a las modificaciones antrópicas del asentamiento que cambiaron la dirección del curso del agua de estos.

4.3.3 Morfodinámica

Se ocupa de los procesos geodinámicos externos, mayormente denudativos, que han dado forma al relieve en el pasado y lo siguen haciendo. Estos procesos son clave para entender el estado actual de las geoformas o unidades de terreno. [9]. Con base a esto se realiza la identificación de los fenómenos amenazantes en el área de estudio de acuerdo a la metodología propuesta por el IDEAM [16], en donde se identifican los criterios amenazantes por inundaciones y a las causas a las que pueden relacionarse tales eventos. En el área de trabajo se determinaron zonas donde las principales causas de ocurrencia tanto detonantes, como contribuyentes e inherentes corresponden a fuertes lluvias, ocurridas en los diferentes periodos invernales. Considerando esto se realizó el mapa con la morfodinámica presente (**Figura 7**) y el mapa de los elementos de inundación. Además, de la información levantada se tiene el análisis multitemporal que aporta un inventario y catálogo histórico bastante completo de las últimas tres décadas (**Figura 3**)

4.3.3.1 Cambios de pendiente

Se notan pequeños cambios en la elevación de los límites de los elementos geomorfológicos, especialmente en la Terraza alta (Fta), Ladera erosiva levemente inclinada (Dleli) y Terraza baja (Ftb). Estos cambios de pendiente son más notables en el área de estudio y se pueden apreciar en el mapa morfodinámico (Fig.6-d) al considerar los límites de estos elementos junto con los de menor elevación (Fig. 8-a).

4.3.3.2 Dirección de flujo

La dirección de flujo de los drenajes intermitentes en el área de estudio está influenciada por la acción antrópica, la topografía, la pendiente del terreno y los grados de inclinación. Estos causas son dirigidos al S-W aportando a la Quebrada La Chinalera. Cabe resaltar durante el análisis multitemporal y en la actualidad, no se ha evidenciado un cambio significativo en la dirección en la que sus aguas circulan (Fig. 8-b).

4.3.3.3 Erosión Lateral

Se presenta adyacente al cauce permanente y en temporadas de lluvia erosiona el borde del relleno antrópico no tecnificado aportando sedimento al drenaje (Fig.8-c)

4.3.3.4 Cauces intermitentes

Se encuentran distribuidos en todo el asentamiento y se caracterizan por presentar longitudes que varían desde 40 hasta 60 m y por ser cauces rectos con una cantidad de meandros mínima (Fig. 8-d).

4.3.3.5 Cauce permanente

En el caso del cauce permanente, se encuentra en el Sur del asentamiento, limitando con el asentamiento Campo Alegre, este se caracteriza por tener un espesor superior al de los cauces intermitentes de aproximadamente 5 m y por la presencia de meandros marcados que producen socavación (Fig.8-e).

4.4 Hidrología

Se delimitaron las microcuencas hidrográficas de la cuenca La Chinalera que impactan en el asentamiento, empleando análisis topográfico (Fig. 6-d) Este proceso identificó la influencia de 8 microcuencas, proporcionando datos clave como área, perímetro, longitud y ancho, fundamentales para calcular factores de forma e índices de compacidad (**Tabla 2**).

Tabla 2. Parámetros de área, perímetro, longitud y ancho para las microcuencas del asentamiento Juan Pablo II.

Microcuenca	Área (m ²)	Perímetro (m)	Longitud (m)	Ancho (m)
A	12048	754	239	102
B	1689	391	114	35
C	4430	787	195	47
D	11917	678	229	87
E	47023	1678	456	229
F	29408	1380	282	102
G	33148	1575	383	189
H	24091	1017	289	130

Fuente: Autores.

4.4.1 Índice de compacidad de Gravelius (Kc)

Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico [22].

$$KC = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Dado los parámetros básicos de forma de las microcuencas y a su clasificación, se realizó el cálculo de índice de compacidad con el que se determinó que estas se presentan como oval oblonga a rectangular oblonga (**Tabla 3**).

Tabla 3. Índice de compacidad de Gravelius para las microcuencas del asentamiento Juan Pablo II.

Microcuenca	Índice de Gravelius (Kc)
A	1.92
B	2.26
C	3.31
D	1.96
E	2.16
F	2.25
G	2.42
H	1.83

Fuente: Autores.

El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuerte volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano sea a la unidad, lo cual quiere decir que entre más bajo sea Kc mayor será la concentración de agua [22]. En este caso las microcuencas presentan valores mayores a 1,5 lo que indica que estas presentan menor concentración de agua.

4.4.2 Factor de forma (Kf)

Índice propuesto por Gravelius. Es la relación entre el área (A) de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido (L). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas o lentas y sostenidas, según que su factor de forma tienda hacia valores extremos grandes o pequeños [22].

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Tabla 4. Factor forma para las microcuencas del asentamiento Juan Pablo II

Microcuenca	Factor de forma (Kf)
A	0.21
B	0.13
C	0.11
D	0.002
E	0.001
F	0.001
G	0.001
H	0.28

Fuente: Autores.

De acuerdo a la estimación de los parámetros básicos, se clasificó a las microcuencas como factor forma alargadas (**Tabla 4**). Dado que estos coeficientes son un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial, se puede concluir que aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz, es decir, no es propensa a presentar crecidas súbitas cuando se presentan lluvias intensas simultáneamente en toda o en gran parte de su superficie.

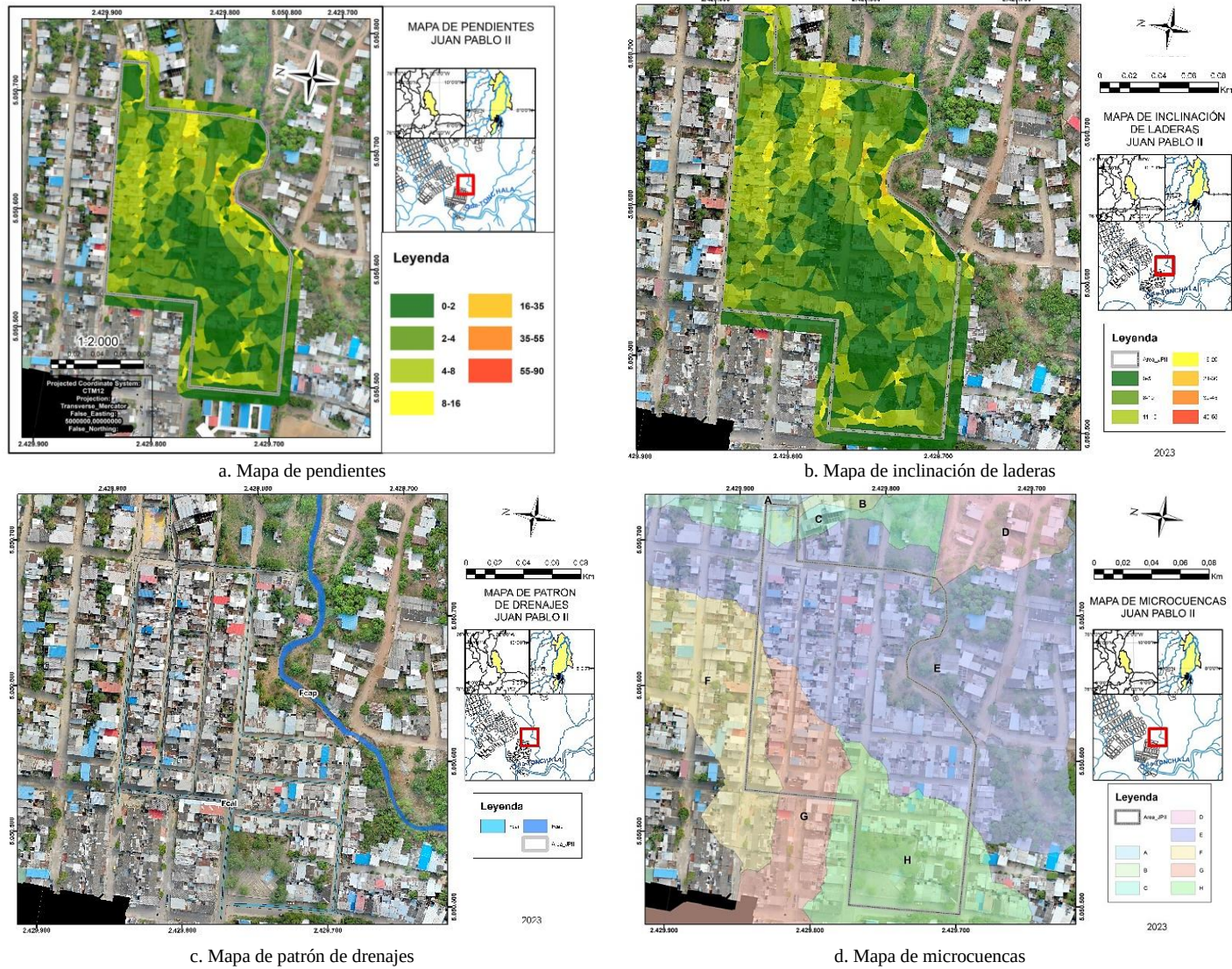


Figura 6. Mosaico de mapas asociados a la morfodinámica y la hidrología del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.



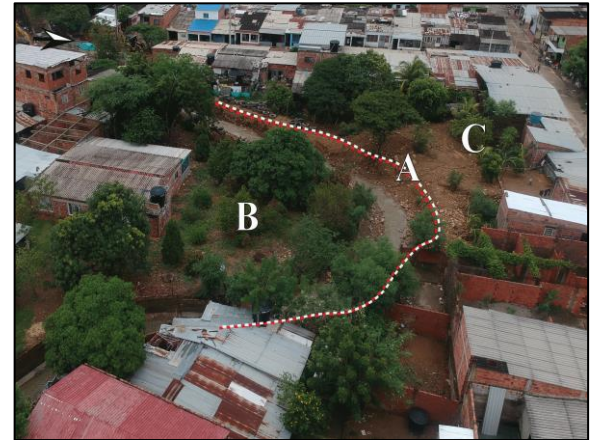
Figura 7. Mapa morfodinámico del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.



a. Cambio de pendiente



b. Dirección de flujo



c. Erosión lateral (A), Zona de depósito (B) y Zona de Erosión latente de forma cóncava (C)



d. Cauce intermitente (A) y Depósito aluvial reciente (B)



e. Cauce permanente (A) y Jarillón (B)



f. Zona de inundación recientemente rellenada

Figura 8. Mosaico de fotografías de elementos de fenómenos amenazantes. Fuente: Autores.

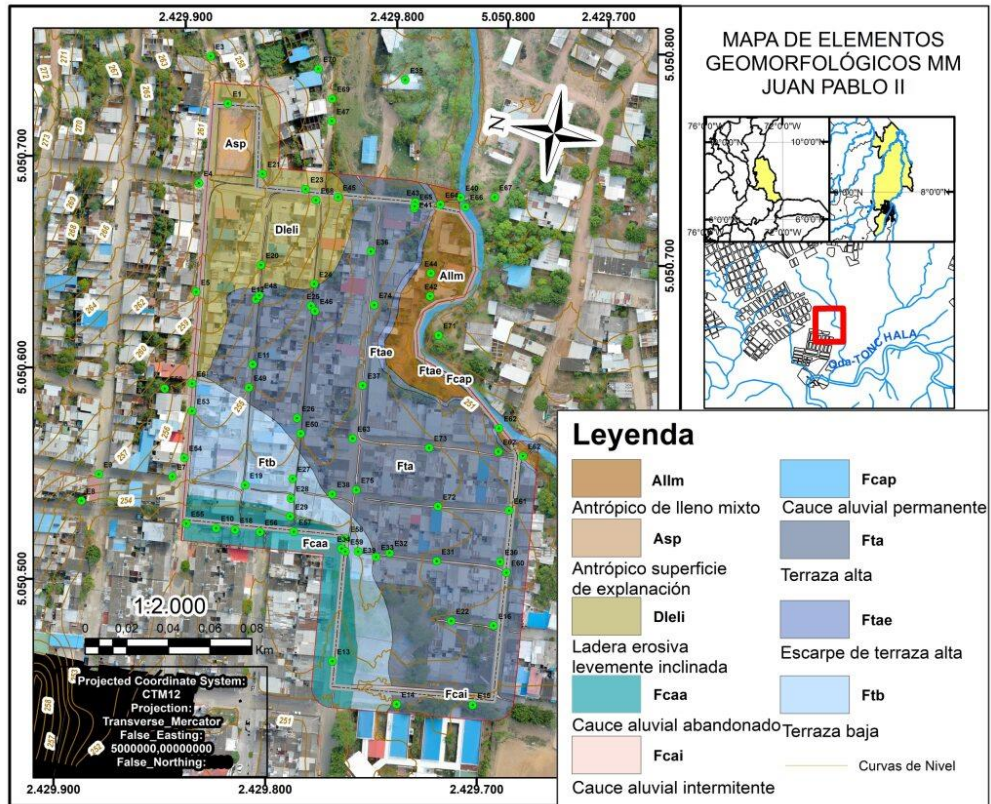


Figura 9. Mapa geomorfológico por movimientos en masa. Fuente: Autores.

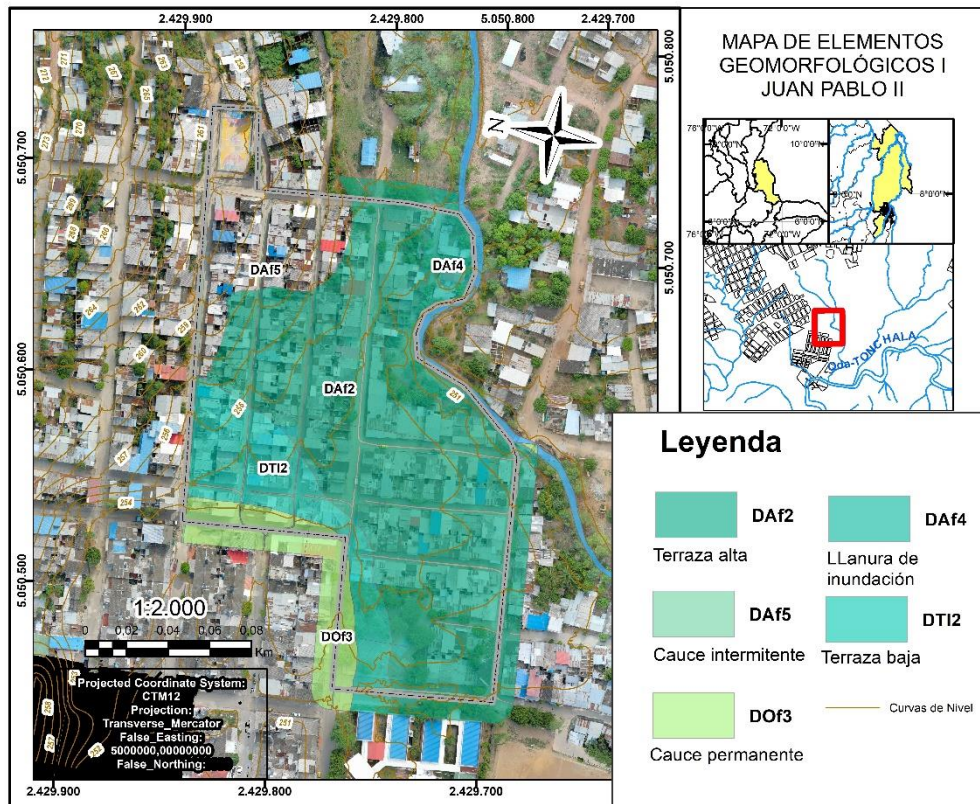


Figura 10. Mapa geomorfológico por inundación. Fuente: Autores.

4.5 Geología

Geológicamente, las unidades que afloran en el asentamiento Juan Pablo II, del municipio de Cúcuta, Norte de Santander, según la cartografía y las memorias explicativas de la Plancha Geológica 88-Cúcuta [23] corresponden a una sucesión litoestratigráfica de rocas de la Formación León (E3N11), principalmente arcillolitas del periodo Oligoceno [24]. También se identificaron depósitos aluviales, de terraza y de origen antrópico que corresponden a las sedimentaciones más jóvenes, suprayaciendo a las formaciones del terciario, depositados por la acción de los tres grandes afluentes como los ríos Zulia, Pamplonita y Táchira. Con base a las unidades geológicas presentes en el asentamiento Juan Pablo II, y considerando la Plancha Geológica 88- Cúcuta [23], se realizó el mapa geológico del aérea de estudio (**Figura 11**)

4.5.1 Unidades litológicas del Paleógeno

4.5.1.1 Formación León (E3N11)

Esta unidad se denomina la Formación Shale de León por Hedberg [25] de la Quebrada León, donde también se ubica la sección tipo a nueve (9) kilómetros al NW de Puerto Villamizar (Norte de Santander), en el flanco oriental del Anticlinal de Petrolea [25]. El ambiente de sedimentación de la Formación León se relaciona a aguas salobres y relativamente poco profundas [25] señala que la unidad posiblemente representa una transgresión marina. Su edad es del periodo Oligoceno [24].

Descripción litológica

Se encuentran afloramientos de roca altamente meteorizadas de muy mala calidad. El depósito natural consiste en un saprolito de muy alta meteorización; con presencia de grietas de disecación (características principalmente de las arcillas) con material arcilloso de color amarillo moteado con marrón correspondiente a la Formación León. Presenta una permeabilidad alta, índice de plasticidad moderada, compacta (se penetra fácilmente con una barra de refuerzo), con una resistencia en seco moderada y una dilatancia nula (Fig 12-a).

4.5.2 Depósitos cuaternarios

4.5.2.1 Depósitos de terraza reciente (Qtr)

Se encuentra marcada por cambios de pendiente que se forman por la acumulación de material, mediante procesos fluviales recientes, desarrollando superficies escalonadas poco disectadas que alcanzan elevaciones de 2.5 m aproximadamente. Se puede observar como un depósito con una estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa con la presencia de clastos de tamaño que oscilan entre guijos, guijarros y bloques, los cuales están subredondeados con esfericidad moderada, mal gradados y heterométricos (Fig. 12-b).

4.5.2.2 Depósitos de terraza antigua (Qtan)

Se encuentra marcada por cambios de pendiente que se forman por la acumulación de material, mediante procesos fluviales antiguos, desarrollando superficies escalonadas

poco disectadas que alcanzan elevaciones de 5m aproximadamente (Fig. 12-c). También se presenta como un depósito aluvial sedimentario resultado de la acción de la socavación lateral de la quebrada La chinalera en sedimentos circundantes al cuerpo hídrico, con una estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa con la presencia de clastos de tamaño guijos, guijarros y bloques, los cuales están subredondeados con esfericidad moderada, mal gradados y heterométricos (Fig. 12-d).

4.5.2.3 Depósitos aluviales (Qal)

Depósitos resultados de la acción directa de la quebrada La Chinalera, junto con depósitos de corrientes de agua estacionales que depende de factores estructurales de la zona de estudio como la pendiente. Presenta una estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa con la presencia de clastos de tamaño guijos, guijarros y bloques, los cuales están subredondeados, mal gradados y heterométricos. La matriz se presenta húmeda en la parte del cauce aluvial, con permeabilidad alta y plasticidad media. (Fig. 12-e).

4.5.2.4 Depósitos de cauce aluvial antiguo (Qala)

Los depósitos de cuaternario aluvial antiguo en el asentamiento Juan Pablo II, se puede identificar como suelo transportado areno-arcilloso los cuales fueron transportados y depositados por ríos antiguos en el pasado delimitados por las terrazas recientes (Qtr). Un rasgo a tener en cuenta es la erosión la cual pudo haber desplazado o cubierto parte de estos depósitos, lo que hace que su identificación y caracterización sea siempre minuciosa de realizar a la hora de asociarlo a rellenos antrópicos superficiales (Fig. 12-f).

4.5.2.5 Depósitos de lleno mixto (QAllm)

Deposito antrópico polimíctico compuesto por una variedad de materiales, que incluyen bloques, arenas y otros desechos de origen humano, como materiales de construcción y neumáticos. Se presenta con una estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa con la presencia de clastos de tamaño guijos, guijarros y bloques, los cuales están subredondeados con esfericidad moderada, mal gradados y heterométricos (Fig.12-g).

4.5.2.6 Depósitos de superficie de explanación (QAsp)

Deposito antrópico de estructura matriz soportada color café moteado con rojizo de textura arcillosa con la presencia de clastos, principalmente bloques, los cuales se pueden observar los alrededores de la cancha o en los andenes de las viviendas, estos se encuentran subredondeados con esfericidad moderada, mal gradados y heterométricos. Se puede observar como una construcción de una cancha sobre las arcillas de la formación León, en el límite NE del asentamiento Juan Pablo II, limitando con el asentamiento 13 de Mayo (Fig. 12-h)..

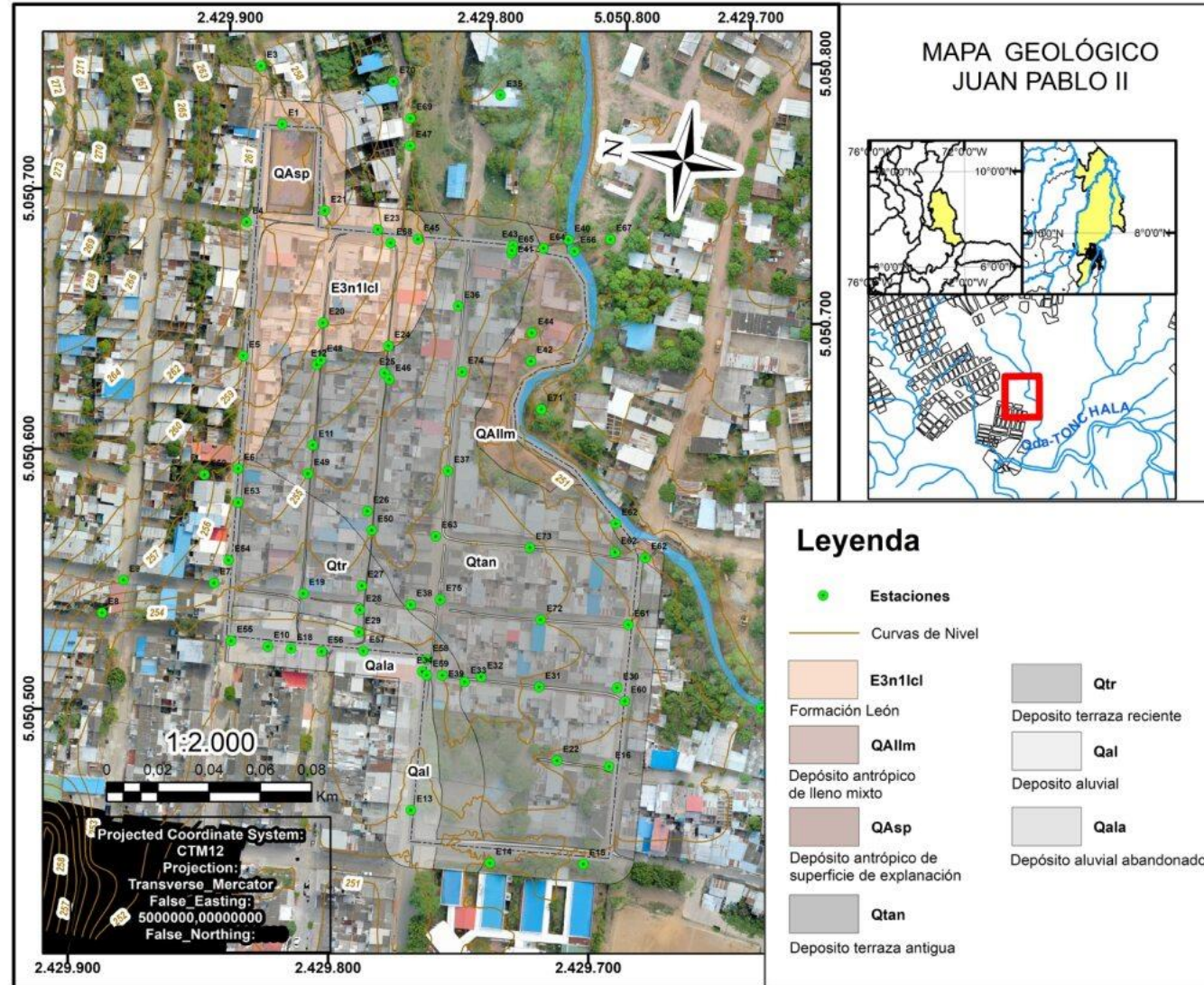


Figura 11. Mapa geológico del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.



Figura 12. Mosaico de fotografías de unidades geológicas del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores

4.6 Unidades geológicas superficiales (UGS)

Para la elaboración de la cartografía de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), se utilizó la metodología propuesta por el SGC [3] [26], y para la clasificación se basó en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) que clasifica en función del tamaño y la distribución de las partículas y de su plasticidad. Para la descripción del suelo en campo se desarrolló con la guía Field Soil Description Guide [27] permitiendo un análisis rápido de las características del suelo incluyendo el símbolo del grupo y nombre del grupo y unos términos descriptivos que pueden dar un valor cuantitativo.

Las unidades de suelos son consideradas como materiales no consolidados, y se cartografiaron de acuerdo con su origen; en el aérea de estudio se identificaron suelos transportados de ambiente fluvial. Considerando esto, se generó el mapa de Unidades Geológicas Superficiales del entorno del área de estudio (**Figura 13.**), a partir del cual se pudo conocer la distribución porcentual, de las mismas. Se cartografiaron seis UGS categorizadas en (1) unidad de roca de calidad muy mala calidad y (5) unidades de suelos clasificados según su origen como transportado (**Tabla 5**).

Tabla 5. Distribución porcentual de las unidades UGS.

Unidad Geológica Superficial	Acrónimo	Área (Ha)	%
Roca muy blanda de la formación León	Rble	0,5018	16%
Suelo transportado de terraza antigua	StQtan	1,8384	60%
Suelo transportado de terraza reciente	StQtr	0,4309	14%
Suelo transportado aluvial	Stal	0,0066	1%
Suelo antrópico de relleno no tecnificado	Sarnt	0,2061	7%
Suelo antrópico de relleno tecnificado	Sart	0,0586	2%

Fuente: Autores.

4.6.1 Unidades de roca

4.6.1.1 Roca muy blanda de la formación León (Rble)

En esta unidad, se presentan intercalaciones de arcillolitas y lodolitas fisiles grisáceos concoideos, en una matriz de color marrón moteado con gris, altamente meteorizada mostrando características en algunas zonas extremadamente blandas con un rango aproximado de resistencia a la compresión simple de 0,5 a 1 Mpa tipo III, según Hermelín [28], aun con evidencias de roca original se define una arcilla formada a partir del desgaste compuesta por silicato y feldespato, las cuales se pueden encontrar en diversas coloraciones debido a la oxidación mineral (Fig. 14-a) .

4.6.2 Unidades de suelo

4.6.2.1 Suelo transportado de terraza antigua (StQtan)

Suelo transportado grueso grava arenosos poco consolidado heterogéneo, subredondeado a redondeado pobremente gradado de color amarillo claro con matriz arenosa arcillosa

con 10% de materia orgánica, con dilatancia nula, fuerza en seco medio a alta, con un brillo leve a brillante, con un índice de plasticidad moderada, ya que se puede realizar un hilo de diámetro entre 1mm a 3mm, la dureza del hilo es media. De esta manera se clasifica como un suelo de tipo arcilla limoso (CL), de color marrón moteado con amarillo, no cohesivo, húmedo y compacto, ya que se penetra fácilmente con una barra de refuerzo (Fig. 14-b).

4.6.2.2 Suelo transportado de terraza reciente (StQtr)

Suelo transportado grava arenosa lodosa, que exhibe un distintivo color amarillo similar a los depósitos vistos en la parte alta al norte del asentamiento Juan Pablo II, el asentamiento Nuevo Horizonte que seguramente se asocia a las terrazas sobreelevadas. Este depósito está asociado al desagüe en una cárcava antigua que anteriormente fungía como drenaje intermitente. La intervención humana, manifestada en la construcción de viviendas y vías, ha alterado el patrón de drenaje, desviando su dirección y sentido. No obstante, persiste la huella de la antigua cárcava y los depósitos sobre el asentamiento Juan Pablo (Fig. 6-d microcuenca F) (Fig. 14-c).

4.6.2.3 Suelo transportado aluvial (Stal)

Suelo de transportado grava arenosa matriz soportada con menos del 10% de materia orgánica, con dilatancia nula, fuerza en seco medio a alta, con un brillo leve a brillante, con un índice de plasticidad moderada, ya que se puede realizar un hilo de diámetro entre 1mm a 3mm, la dureza del hilo es media. De esta manera se clasifica como un suelo de tipo arcilla limoso (CL), de color marrón moteado con amarillo, no cohesivo, húmedo y compacto, ya que se penetra fácilmente con una barra de refuerzo (Fig. 14-d).

4.6.2.4 Suelo antrópico relleno no tecnificado (Sarnt)

Suelo de relleno areno gravosa lodosa, heterogéneo de color gris, pobremente seleccionado con menos del 10% de materia orgánica, no cohesivo, húmedo y suelto, ya que se penetra fácilmente con una barra de refuerzo empujada a mano. con un rango aproximado de resistencia a la compresión simple de 100 a 200 kPa. También presenta una gran variedad de materiales, que incluyen bloques, arenas y otros desechos de origen humano, como materiales de construcción y neumáticos (Fig. 14-e).

4.6.2.5 Suelo antrópico relleno tecnificado (Sart)

Suelo de relleno grava arenoso, clasto soportado, con dilatancia nula, fuerza en seco medio a alta, con un brillo leve a brillante, con un índice de plasticidad moderada, ya que se puede realizar un hilo de diámetro entre 1mm a 3mm, la dureza del hilo es media. De esta manera se clasifica como un suelo de tipo arcilla limoso (CL), de color marrón moteado con gris, no cohesivo, húmedo y suelto, ya que se penetra fácilmente con una barra de refuerzo empujada a mano (Fig. 14-f)

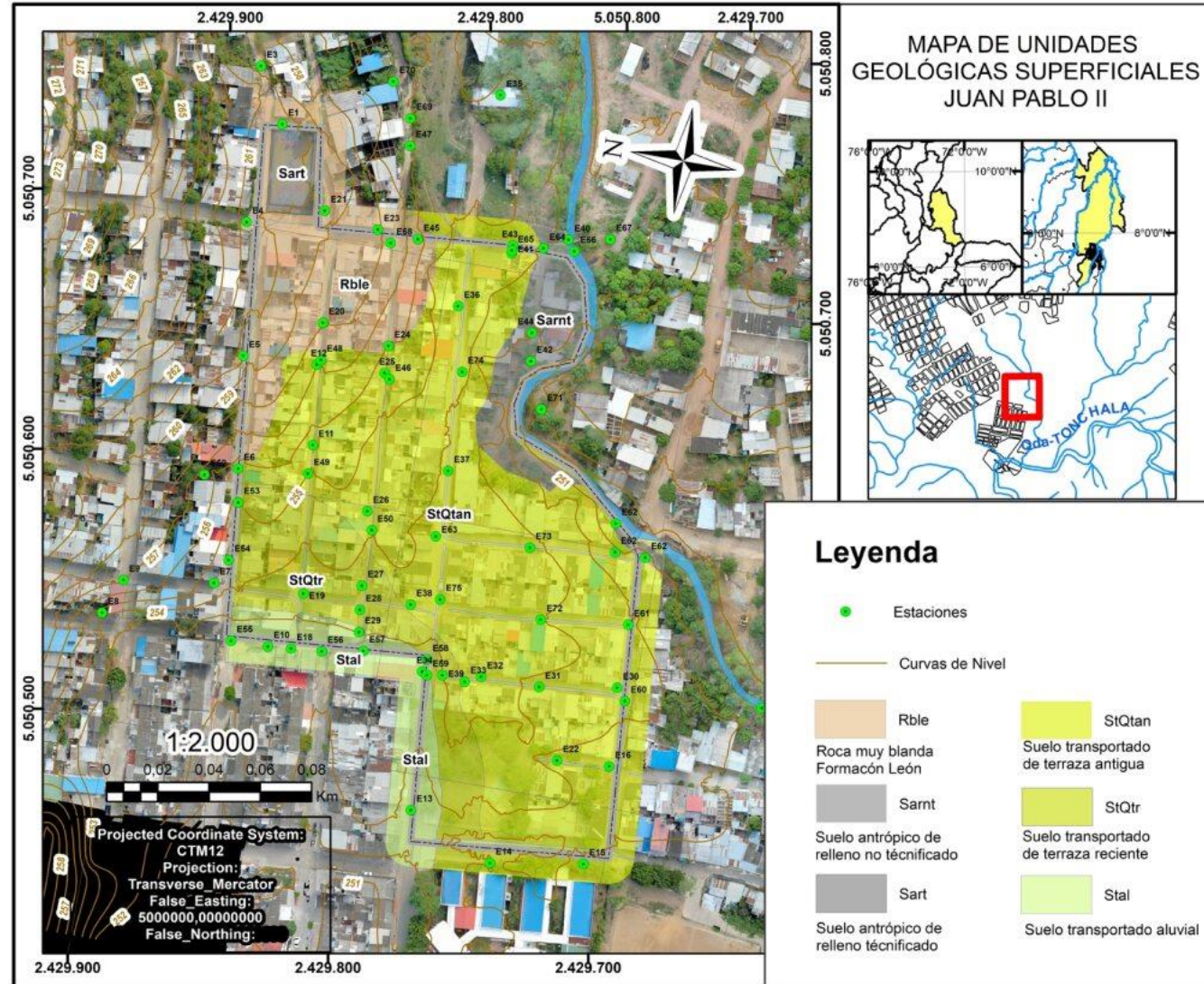


Figura 13. Mapa de unidades geológicas superficiales del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.



a. Roca muy blanda de la formación León (Rble)



b. Suelo transportado de terraza antigua (StQtan)



c. Suelo transportado de terraza reciente (StQtr)



d. Suelo transportado aluvial (Stal)



e. Suelo antrópico relleno no tecnificado (Sarnt)



f. Suelo antrópico relleno tecnificado (Sart)

Figura 14. Mosaico de fotografías de los elementos UGS del asentamiento Juan Pablo II. Fuente: Autores.

4.7 Cobertura y uso del suelo

Para la identificación de las coberturas de la tierra, se tuvo en cuenta los criterios establecidos por la leyenda CORINE LAND COVER [29]. En la cual se realiza la interpretación visual de la superficie de la tierra para la clasificación de acuerdo a su tipo de cobertura. Con base a esto se identificaron 5 unidades de cobertura del cual se pudo conocer la distribución porcentual de cada unidad (**Tabla 6**). En concordancia con lo anterior se realizó un mapa de cobertura y uso del suelo (**Figura 15**), reflejando la dinámica de las actividades ejercidas sobre el territorio.

Tabla 6. Cobertura del suelo del asentamiento Juan Pablo II

Cobertura	Área (Ha)	%
Tejido urbano continuo	3,199	85%
Vegetación secundaria o transición	0,478	13%
Canal	0,042	2%
Obra hidráulica	0,007	0,1%

Fuente: Autores.

4.7.1 Territorios artificializados

4.7.1.1 Tejido urbano continuo

Se presentan como construcciones de viviendas y espacios adyacentes a la infraestructura construida. Las viviendas, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano.

4.7.1.2 Obra hidráulica

Corresponden a una construcción de pequeña magnitud (puente), con el fin de adecuar el paso para los habitantes por la presencia del canal.

4.7.2 Territorios agrícolas

4.7.2.1 Vegetación secundaria o en transición

Comprende superficies del territorio ocupadas por cobertura vegetal originada por el proceso de intervención y sucesión de la vegetación natural. Se desarrollan áreas abandonadas y algunos de estos han sido introducidos intencionalmente por el hombre en sectores urbanísticos.

4.7.3 Superficies de agua

4.7.3.1 Canal

Corresponde a la presencia de un cauce que contiene agua en movimiento de forma permanente, en la parte límite Sur del asentamiento.

4.8 Análisis de Susceptibilidad

4.8.1 Susceptibilidad por movimiento en masa

En la ejecución de este proyecto, se realiza el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa siguiendo las pautas establecidas por el Servicio Geológico Colombiano [3]; de tal manera que, se utilizan como insumos:

- Elementos geomorfológicos para movimientos en masa
- Unidades Geológicas de Superficie
- Cobertura de la tierra y uso de suelo y
- Inventario de procesos morfodinámicos
- Pendientes

4.8.1.1 Variable de Agrupamiento – inventario movimiento en masa

En la fase de agrupamiento, se detallan los elementos (movimientos en masa) que se incorporarán en el cálculo y análisis del modelo de susceptibilidad por movimientos en masa mediante el método bivariado. En el caso específico del asentamiento Juan Pablo II, la recopilación de datos para evaluar los grados de susceptibilidad se basa en la caracterización de elementos registrados, tanto a través de antecedentes como de fotointerpretación, además de los datos recopilados en el campo. A pesar de que el inventario indica la ausencia de movimientos en masa actuales en la zona del asentamiento, se consideran todos los eventos para la modelación de la susceptibilidad debido a la baja densidad de eventos en la región. Este último aspecto se convierte en la variable de agrupamiento relevante para la caracterización de la susceptibilidad por movimientos en masa en cada categoría.

4.8.1.2 Hipótesis de Falla

Basándonos en el estudio de las temáticas relacionadas con la caracterización geoambiental y la información secundaria (geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología, procesos morfodinámicos, usos y coberturas de la tierra, etc.), así como en la fotointerpretación evaluada en factores de multitemporalidad, se formuló la hipótesis de falla para el asentamiento Juan Pablo II. Esta hipótesis se centra en los factores que generan puntos de inestabilidad en las laderas, específicamente en movimientos en masa, integrando todos estos aspectos con la caracterización obtenida en el trabajo de campo. Como resultado de este proceso, se establecieron premisas clave que contribuyeron a la definición de la hipótesis de falla:

- El factor primordial que condiciona la formación de puntos de inestabilidad en el terreno radica en la calidad de la roca de la formación León, la cual exhibe un grado III de meteorización moderada, afectando la resistencia del terreno. Este fenómeno se ve influenciado por condiciones morfométricas, especialmente en la unidad Rble, donde las pendientes oscilan entre 16° y 20°, actuando como un factor determinante y contribuyente a la inestabilidad de las laderas.

- Los suelos de rellenos mixtos, al ser una matriz de material no cohesivo y heterogéneo, exhiben altos valores de relación de vacíos. Esta característica posibilita que, en condiciones de fuertes precipitaciones, el material tenga la capacidad de saturarse, lo que puede desencadenar inestabilidades en la ladera contigua al cauce permanente

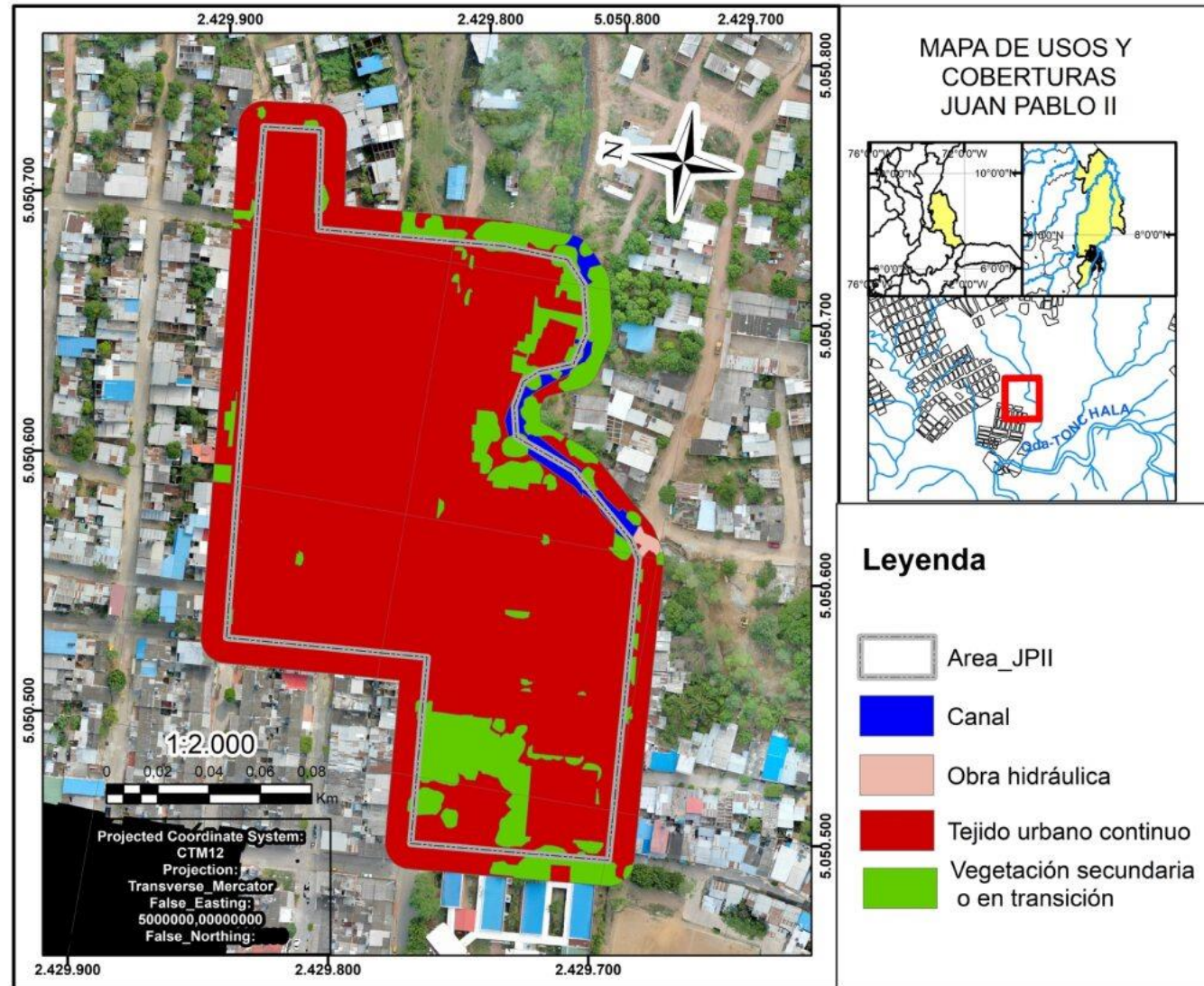


Figura 15. Mapa de coberturas y uso del suelo. Fuente: Autores.

- Este fenómeno se manifiesta especialmente en áreas donde se ha rellenado artificialmente una llanura de inundación con el propósito de expandir la propiedad. Se establece una relación entre las coberturas de la tierra, el uso del suelo y las pendientes. Esta combinación de factores, crea condiciones propicias para el desarrollo progresivo de procesos de erosión hídrica superficial, lo que podría contribuir a la generación de movimientos en masa.

4.8.1.3 Factores condicionantes – pesos evidencia

En el área del asentamiento, se identificaron los elementos clave para calcular la susceptibilidad a movimientos en masa. A pesar de no presentar alta tendencia a movimientos masa, este enfoque se basó en la variable de agrupamiento, conforme al análisis efectuado en la hipótesis de falla. La determinación final de la susceptibilidad se sustentó en la descripción temática de variables como las Unidades Geológicas Superficiales, la cobertura vegetal actual y aspectos morfométricos, incluyendo la pendiente. Se utilizaron las unidades definidas en cada variable temática, combinadas con el criterio de expertos, para calcular la función final de susceptibilidad a movimientos en masa. Este enfoque permite explicar la variabilidad en la susceptibilidad del terreno ante posibles eventos de inestabilidad en las laderas.

- Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) fueron clasificadas según se detalla en el capítulo dedicado a ellas, y posteriormente fueron agrupadas en Unidades de Modelación (UM) basándose en tres factores específicos:

- i) -Por el concepto definido en la hipótesis de falla
- ii) -Por su correlación con eventos de inestabilidad (movimientos en masa)
- iii) -Por la calidad de la roca y por el origen del suelo

Tabla 7. Relación de UGS en unidades de modelación

Nombre UGS	Acronimo UGS	Unidad de Modelación
Roca blanda de la formación León	Rble	UM1
Suelo transportado de terraza antigua	StQtan	UM2
Suelo transportado de terraza reciente	StQtr	UM2
Suelo transportado aluvial	Stal	UM3
Suelo antrópico de relleno no tecnificado	Sarnt	UM4
Suelo antrópico de relleno tecnificado	Sart	UM2

Fuente: Autores.

- La clasificación de la Cobertura y Uso del Suelo se llevó a cabo hasta el tercer nivel, seguido por la agrupación en unidades de modelación para las diversas coberturas.

Tabla 8. Relación de cobertura y uso del suelo en unidades de modelación

Nombre de la cobertura y uso del suelo	Unidad de Modelación
Tejido urbano continuo	UM1
Obra hidráulica	UM2
Vegetación secundaria o en transición	UM3
Canal	UM4
Tierras desnudas y degradadas	UM5

Fuente: Autores.

- En la clasificación de las pendientes, se consideró su influencia en relación con los eventos, estableciendo categorías en función de esta consideración.

Tabla 9. Relación de pendientes en unidades de modelación

Valor de la Pendiente	Unidad de Modelación
0-2	UM1
2-4	UM1
4-8	UM2
8-16	UM3
16-35	UM4
35-55	UM5
>55	UM6

Fuente: Autores.

-En la clasificación de la geomorfología, se consideró su correlación con los eventos, de acuerdo a la geoforma del elemento, para agruparlas en unidades de modelación

Tabla 10. Relación de gmf en unidades de modelación

Nombre GMF	Acronimo GMF	Unidad de Modelación
Terraza alta	Fta	UM1
Terraza baja	Ftb	UM2
Cauce aluvial intermitente	Fcai	UM3
Escarpe de terraza de acumulación	Ftae	UM4
Cauce aluvial antiguo	Fcaa	UM3
Cauce aluvial permanente	Fcap	UM3
Ladera erosiva levemente inclinada	Dleli	UM5
Antrópico lleno mixto	Allm	UM6
Superficie de explanación	Asp	UM7

Fuente: Autores.

Para la integración final se calculan los pesos de evidencia para el modelo de susceptibilidad por movimientos en masa mediante el método estadístico bivariado y los parámetros predefinidos. Estos pesos indican la presencia o ausencia de movimientos en el área de estudio. El resultado se basa en la premisa de que el modelo representa eventos pasados y genera suposiciones sobre futuros movimientos en condiciones similares. Posteriormente, se asignan estos pesos a las variables del asentamiento según el cálculo realizado.

La integración final de los factores y de sus clases respectivas, definen el Índice de Susceptibilidad por movimientos en masa (ISM), que es la suma ponderada de los pesos de los factores y clases definidos (Nguyen 2008).

$$ISM = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij}$$

Para esto se determinaron los valores de las variables para la obtener la relación final de cada categoría (Wf).

Tabla 11. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades Geológicas Superficiales

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría MM	Wfinal
UM1	0,1	0	0
UM2	0,05	0	0
UM3	0	0	0
UM4	0,5	0,7	0,35

Fuente: Autores.

Tabla 12. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades de cobertura y uso del suelo

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría de MM	Wfinal
UM1	0,23	0,25	0,0575
UM2	0,05	0	0
UM3	0,2	0,2	0,04
UM4	0	0	0
UM5	0,76	0,76	0,5776

Fuente: Autores.

Tabla 13. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades de pendientes.

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría de MM	Wfinal
UM1	0	0	0
UM2	0,05	0,1	0,005
UM3	0,2	0,2	0,04
UM4	0,4	0,8	0,32
UM5	0,75	1	0,75
UM6	1,2	1,2	1

Fuente: Autores.

Tabla 14. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades de geomorfología.

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría de MM	Wfinal
UM1	0,1	0	0
UM2	0,05	0	0
UM3	0	0	0
UM4	1	1	1
UM5	0,2	0,4	0,08
UM6	0,15	0,2	0,03
UM7	0	0,1	0

Fuente: Autores.

Se calcula la función de susceptibilidad utilizando los pesos de evidencia obtenidos mediante el método bivariado. Estos pesos reflejan la relación entre las categorías de cada variable y los movimientos en masa. Luego, todas las variables se incorporan en una ecuación algebraica para determinar la susceptibilidad. La ecuación resultante se presenta como la función final de susceptibilidad o LSI (Landslide Susceptibility Index, por sus siglas en inglés).

$LSI = Wf(UGS) + Wf(Cobertura) + Wf(Pendiente) + Wf(Gmf)$
Dando como resultado el mapa de susceptibilidad por movimiento en masa (**Figura 16**).

4.8.1.4 Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa

La susceptibilidad a movimientos en masa se clasifica mediante el cálculo del LSI, ajustado y validado para una predicción precisa de eventos de inestabilidad del terreno. Siguiendo la guía metodológica del SGC [3], se propone la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad:

- Alta susceptibilidad: más del 75% de todos los movimientos en masa.
- Media susceptibilidad: entre un 25% a un 75 % de todos los movimientos en masa.
- Baja susceptibilidad: menos del 25% de todos los movimientos en masa.

La categorización establecida para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa determina los grados de

susceptibilidad, que serán un componente clave en la categorización final de la susceptibilidad. El modelo de susceptibilidad para el asentamiento incluye la categorización geoambiental, explicando la susceptibilidad, su ubicación geográfica y el porcentaje de área en relación con el área total de estudio.

Tabla 15. áreas y porcentajes obtenidos de la categorización final de la susceptibilidad.

Nivel	Área (m2)	%
Baja	39176	98,72%
Media	507	1,27%

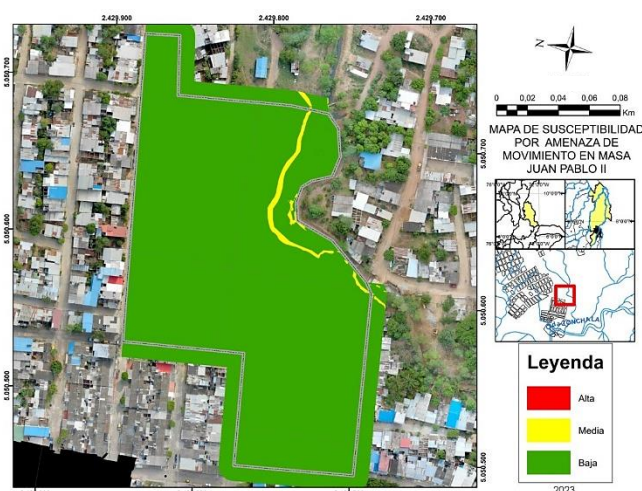
Fuente: Autores.

4.8.1.4.1 Susceptibilidad media

Esta categoría del 1,27% en el asentamiento Juan Pablo II se manifiesta de manera tangible en el terreno, evidenciando un cambio significativo en la pendiente a lo largo del tiempo. Esta transformación se ha llevado a cabo mediante el relleno de material antropogénico extraído de las áreas circundantes, en un proceso no tecnificado y, por ende, poco consolidado. La susceptibilidad del terreno se incrementa, generando condiciones que podrían dar lugar a fenómenos potencialmente adversos. La falta de técnicas especializadas en este proceso de relleno conlleva a una consolidación insuficiente, aumentando la probabilidad de la zona a fenómenos naturales o antropogénicos.

4.8.1.4.2 Susceptibilidad baja

Se delimita el área para esta categoría teniendo un porcentaje del 98,72% representado una baja probabilidad para que se generen movimientos en masa, al estar sobre una baja pendiente y la ausencia de factores desencadenantes significativos contribuyen a la baja susceptibilidad. Cabe anotar que en estas áreas no hay movimientos en masa.

**Figura 16.** Mapa de susceptibilidad por amenaza de movimiento en masa, según los parámetros del SGC. Fuente: Autores.

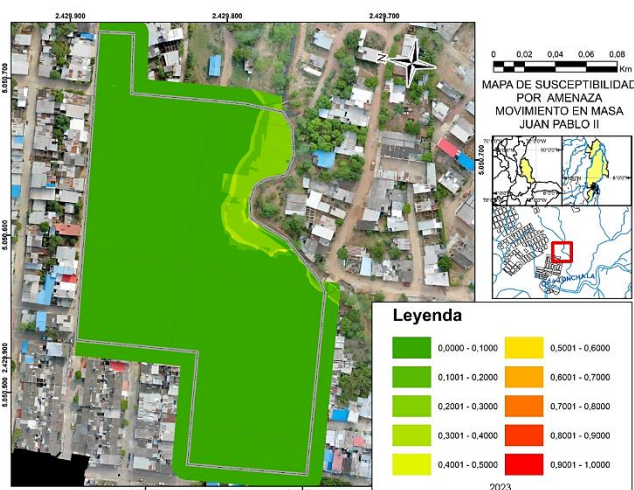


Figura 17. Mapa de susceptibilidad por amenaza de movimiento en masa, según los parámetros propuestos. Fuente: Autores.

4.8.2 Susceptibilidad por inundaciones

En el contexto de las inundaciones, el análisis de susceptibilidad se lleva a cabo mediante un enfoque estadístico bivariado, en el cual se recomienda incorporar las siguientes variables:

- i) Elementos geomorfológicos para inundaciones
- iii) Pendiente
- iv) UGS
- v) Uso de suelo o cambio en la cobertura

4.8.2.1 Variable de Agrupamiento – inventario de inundaciones

En la fase de agrupamiento, se detallan los elementos (inundaciones) que se incorporarán en el cálculo y análisis del modelo de susceptibilidad por inundaciones mediante el método bivariado. En el caso específico del asentamiento Juan Pablo II, la recopilación de datos para evaluar los grados de susceptibilidad se basa en la caracterización de elementos registrados, tanto a través de antecedentes como de fotointerpretación, además de los datos recopilados en el campo.

Se identificaron un total de 10 amenazas actuales por inundación en el área del asentamiento. Se utilizaron todos estos eventos en la modelación de la susceptibilidad por inundación, considerando esta variable como la base para la caracterización de la susceptibilidad en cada categoría.

4.8.2.2 Hipótesis de falla

Basándonos en el estudio de las temáticas relacionadas con la caracterización geoambiental y la información secundaria (geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología, procesos morfodinámicos, usos y coberturas de la tierra, etc.), así como en la fotointerpretación evaluada en factores de multitemporalidad, se formuló la hipótesis de falla para el asentamiento Juan Pablo II. Esta hipótesis se centra en los factores que generan puntos de posible acumulación de agua, integrando todos estos aspectos con la caracterización obtenida en el trabajo de campo:

- La morfometría de la región emerge como un factor esencial que favorece la acumulación de agua principalmente en áreas con curvaturas cóncavas más suaves en el terreno, propiciando una mayor acumulación de agua. Esta condición, combinada con las pendientes existentes, crea superficies que van desde suaves hasta planas, generando así condiciones propicias para inundaciones.

- La relación entre las coberturas de la tierra, el uso del suelo y las pendientes también se considera. La vegetación secundaria, generada por la destrucción o intervención en la vegetación primaria (árboles, arbustos, pastos, entre otros), carece de una protección significativa debido a su limitada capacidad radicular. Esta combinación con la pendiente del terreno propicia el desarrollo de acumulación de agua e inundaciones.

4.8.2.3 Factores condicionantes - pesos de evidencia

En el área del asentamiento, se identificaron los elementos clave para calcular la susceptibilidad por inundación. Este enfoque se basó en la variable de agrupamiento, conforme al análisis efectuado en la hipótesis de falla. La determinación final de la susceptibilidad se sustentó en la descripción temática de variables como las Unidades Geológicas Superficiales, la cobertura vegetal actual y aspectos morfométricos, incluyendo la pendiente. Se utilizaron las unidades definidas en cada variable temática, combinadas con el criterio de expertos, para calcular la función final de susceptibilidad a inundación. Este enfoque permite explicar la variabilidad en la susceptibilidad del terreno ante posibles eventos.

- Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) fueron clasificadas según se detalla en el capítulo dedicado a ellas, y posteriormente fueron agrupadas en Unidades de Modelación (UM) basándose en tres factores específicos:

- i) Por el concepto definido en la hipótesis de inundación
- ii) Por su correlación con eventos de inundación
- iii) Por la calidad de la roca y por el origen del suelo

Tabla 16. Relación de UGS en unidades de modelación

Nombre UGS	Acrónimo UGS	Unidad de Modelación
Roca blanda de la formación León	Rble	UM1
Suelo transportado de terraza antigua	StQtan	UM2
Suelo transportado de terraza reciente	StQtr	UM3
Suelo transportado aluvial	Stal	UM4
Suelo antrópico de relleno no tecnificado	Sarnt	UM5
Suelo antrópico de relleno tecnificado	Sart	UM6

Fuente: Autores.

-La clasificación de la Cobertura y Uso del Suelo se llevó a cabo hasta el tercer nivel, seguido por la agrupación en unidades de modelación para las diversas coberturas.

Tabla 17. Relación de cobertura y uso del suelo en unidades de modelación

Nombre de la cobertura y uso del suelo	Unidad de Modelación
Tejido urbano continuo	UM1
Obra hidráulica	UM2
Vegetación secundaria o en transición	UM3
Canal	UM4
Tierras desnudas y degradadas	UM5

Fuente: Autores.

-En la clasificación de las pendientes, se consideró su influencia en relación con los eventos, estableciendo categorías en función de esta consideración.

Tabla 18. Relación de pendientes en unidades de modelación

Valor de la Pendiente	Unidad de Modelación
0-2	UM1
2-4	UM2
4-8	UM3
8-16	UM4
16-35	UM5
35-55	UM6
>55	UM6

Fuente: Autores.

-En la clasificación de la geomorfología, se consideró su correlación con los eventos, de acuerdo a la geoforma del elemento, para agruparlas en unidades de modelación

Tabla 19. Relación de gmfi en unidades de modelación

Acronimo	Unidad de Modelación
GMF	UM1
DAF2	UM2
DTI2	UM2
DAF5	UM3
DOF3	UM4
DAF4	UM4

Fuente: Autores.

Para la integración final se calculan los pesos de evidencia para el modelo de susceptibilidad por inundación mediante el método estadístico bivariado y los parámetros predefinidos. Estos pesos indican la presencia o ausencia de inundaciones en el área de estudio. El resultado se basa en la premisa de que el modelo representa eventos pasados y genera suposiciones sobre futuros inundaciones en condiciones similares. Posteriormente, se asignan estos pesos a las variables del asentamiento según el cálculo realizado. La integración final de los factores y de sus clases respectivas, definen el Índice de Susceptibilidad por inundación (ISI), que es la suma ponderada de los pesos de los factores y clases definidos (Nguyen 2008).

$$ISI = \sum_j^n W_j w_{ij}$$

Para esto se determinaron los valores de las variables para la obtener la relación final de cada categoría (Wf).

Tabla 20. Pesos de evidencia para la Variable de UGS

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría I	Wfinal
UM1	0	0	0
UM2	0	0,2	0
UM3	0	0,4	0
UM4	1,5	1	1,5
UM5	1,5	0,2	0,3
UM6	0	0,1	0

Fuente: Autores.

Tabla 21. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades de cobertura y uso del suelo

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría I	Wfinal
UM1	0,2	0,25	0,05
UM2	0	1	0
UM3	0,2	0,2	0,04
UM4	0,7	1	0,7
UM5	1	1	1

Fuente: Autores.

Tabla 22. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades de pendientes.

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría I	Wfinal
UM1	0,9	1	0,9
UM2	0,9	0,8	0,72
UM3	0,9	0,6	0,54
UM4	0,8	0,2	0,16
UM5	0,7	0,1	0,07
UM6	0	0	0

Fuente: Autores.

Tabla 23. Pesos de evidencia para la Variable de Unidades de geomorfología.

Clasificación	Peso Unidad	Peso por Categoría de I	Wfinal
UM1	0,4	0,4	0,16
UM2	0,05	0,35	0,0175
UM3	1,25	1	1,25
UM4	1,5	1	1,5

Fuente: Autores.

Se calcula la función de susceptibilidad utilizando los pesos de evidencia obtenidos mediante el método bivariado. Estos pesos reflejan la relación entre las categorías de cada variable y la inundación. Luego, todas las variables se incorporan en una ecuación algebraica para determinar la susceptibilidad. La ecuación resultante se presenta como la función final de susceptibilidad o LSI (Landslide Susceptibility Index, por sus siglas en inglés).

$$LSI = Wf(UGS) + Wf(Cobertura) + Wf(Pendiente) + Wf(Gmf)$$

Dando como resultado el mapa de susceptibilidad por inundaciones (**Figura 18**).

4.8.2.4 Categorías de susceptibilidad por inundación

La susceptibilidad por inundación se clasifica mediante el cálculo del LSI, ajustado y validado para una predicción precisa de eventos de inestabilidad del terreno. Siguiendo la guía metodológica del SGC [3], se propone la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad:

-Alta susceptibilidad: más del 75% en inundaciones.

-Media susceptibilidad: entre un 25% a un 75 % en inundaciones.

-Baja susceptibilidad: menos del 25% en inundaciones.

La categorización establecida para el mapa de susceptibilidad por inundación determina los grados de susceptibilidad, que serán un componente clave en la categorización final de la susceptibilidad. El modelo de susceptibilidad para el asentamiento incluye la categorización geoambiental, explicando la susceptibilidad, su ubicación geográfica y el porcentaje de área en relación con el área total de estudio.

Tabla 24. áreas y porcentajes obtenidos de la categorización final de la susceptibilidad.

Nivel	Área (m2)	%
Baja	29176	73,3%
Media	7270	18,3%
Alta	3363	8,4%

Fuente: Autores.

4.8.2.4.1 Susceptibilidad alta

Esta categoría indica una probabilidad del 8.4% de inundación, reflejando con precisión en la realidad observada en el terreno. Las áreas en cuestión, mayormente ocupadas por drenajes intermitentes, subrayan la importancia estratégica del asentamiento Juan Pablo II, situado en una zona de baja pendiente. Este asentamiento desempeña una función crucial durante episodios de precipitaciones intensas al actuar como un desagüe natural para las áreas circundantes de mayor altitud. No obstante, se detecta una susceptibilidad específica en las viviendas adyacentes al cauce permanente. Estas estructuras se encuentran en una posición elevada debido a la trayectoria semirecta del drenaje permanente en dirección este-oeste. A medida que la energía del agua se acerca al asentamiento, el curso del drenaje experimenta una transición de una forma recta a una sinuosa, atravesando formas cóncavas y mostrando una dinámica intensa en el borde, resultando en erosión lateral en esta zona. Es importante destacar que el área donde se concentra la erosión lateral corresponde a una zona históricamente propensa a inundaciones, es decir de llanura de inundación, la cual fue posteriormente ocupada mediante relleno antropogénico. Este relleno introduce un factor de susceptibilidad adicional frente a periodos de retorno de lluvias, resaltando la necesidad de abordar de manera integral de la amenaza asociados con la interacción entre el asentamiento y el entorno hidrológico circundante, subrayando la necesidad de medidas preventivas y un monitoreo constante para mitigar los posibles riesgos asociados con las fluctuaciones en el curso del agua.

4.8.2.4.2 Susceptibilidad media

Las áreas identificadas con un 18.3% de susceptibilidad media para amenazas de inundaciones plantean un diagnóstico anómalo. Dada su proximidad al drenaje permanente, deberían haber sido clasificadas en una categoría más alta, ya que estas zonas de nivel medio parecen representar niveles más bajos en comparación con la observación in situ. Se destaca la necesidad de una evaluación experta y correcciones durante el geoprocesamiento y la validación del modelo, especialmente

considerando la historia de inundaciones en esta zona, su alteración antropogénica con material degradado y su relevancia para futuros estudios.

4.8.2.4.3 Susceptibilidad baja

La susceptibilidad baja para el asentamiento humano abarca un 73.3%, y se destaca especialmente en las estructuras situadas en pendientes que oscilan entre 4 y 16 grados. En particular, las últimas cuentan con andenes que direccionan el agua de manera efectiva durante las precipitaciones. Asimismo, tanto el parque como la zona deportiva fueron construidos de manera adecuada, mostrando resistencia a inundaciones debido a medidas preventivas implementadas en su diseño.

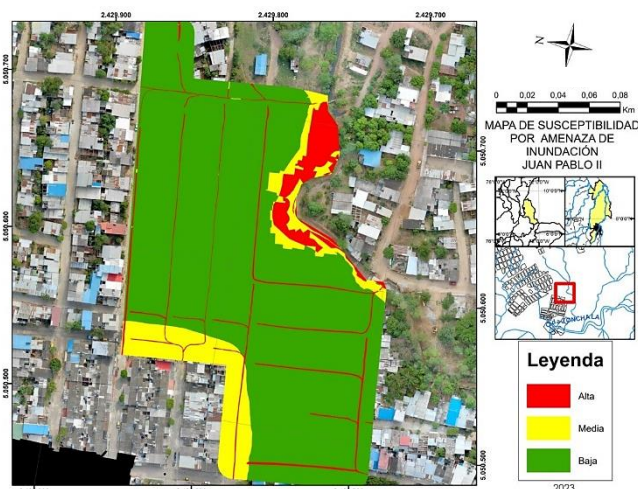


Figura 18. Mapa de susceptibilidad por amenaza de inundación, según los parámetros del SGC. Fuente: Autores.

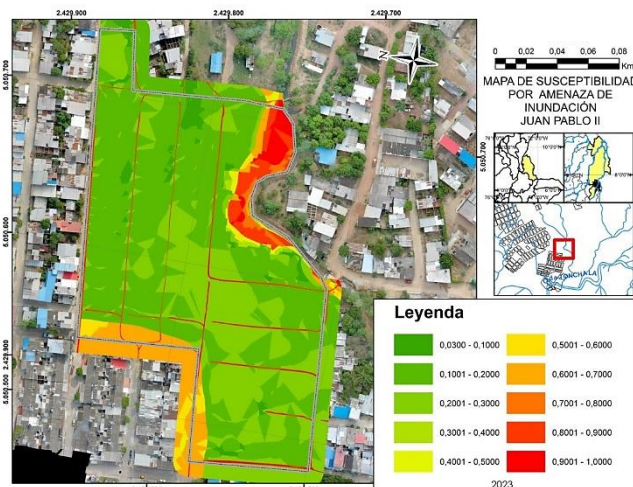


Figura 19. Mapa de susceptibilidad por amenaza de inundación, según los parámetros propuestos. Fuente: Autores.

5 Discusión

La metodología Servicio Geológico Colombiano (SGC) para evaluar la susceptibilidad ante amenazas como movimientos en masa e inundaciones se categoriza en tres niveles: Alto, Medio y Bajo. Se establece que valores inferiores al 25% corresponden a zonas de baja amenaza, del 25% al 75% a zonas de amenaza media, y todos los valores superiores al 75% se asignan a zonas de alta amenaza (**Figura 16**), (**Figura 18**).

Sin embargo, la naturaleza de los datos, obtenidos mediante el álgebra de mapas, presenta una variabilidad que se traduce en valores comprendidos entre 0 y 1. Ante esta diversidad, se opta por reclasificarlos en 10 clases para abordar la incertidumbre inherente a los datos recopilados (**Figura 17**), (**Figura 19**). Surge una preocupación respecto a la limitación de los tres rangos definidos por el SGC, especialmente en la gama baja de factores.

En este sentido, se propone un modelo más amplio que abarque 10 parámetros, como se observa en la Figura 17 y Figura 19 lo cual permitiría capturar matices y variaciones en la topografía, coberturas y uso del suelo, unidades geológicas, unidades geomorfológicas, patrones de drenaje, entre otros. A pesar de la mayor complejidad, este enfoque podría conducir a una representación más precisa de la realidad. Este ajuste es crucial, especialmente considerando que los estudios realizados operan a nivel de detalle.

La inclusión de más parámetros no solo ofrece la posibilidad de obtener predicciones más precisas, sino que también se presenta como fundamental para adaptarse al entorno en constante cambio. La consideración de la susceptibilidad a las amenazas en relación con el tiempo refuerza la importancia de abarcar un mayor número de parámetros, ya que esto permitiría una evaluación más completa y contextualizada de la dinámica de riesgos. En última instancia, la complejidad del modelo se traduce en una herramienta más robusta y adaptativa para la toma de decisiones en situaciones de riesgo.

6 Conclusiones

El análisis de imágenes satelitales en Google Earth Pro (1991-2023) revela cambios en la morfodinámica de la zona, evidenciando la complejidad del entorno con características fluviales, cambios de pendientes y terrazas. Procesos erosivos, desde surcos hasta cárcavas, resultan de canales intermitentes y precipitaciones constantes. La construcción en áreas con antiguos procesos erosivos, sin considerar la estabilidad del suelo, plantea preocupaciones. La dinámica fluvial de la quebrada La Chinalera muestra actividad moderada a fuerte, con zonas de erosión lateral y orillas cóncavas por erosión, junto a áreas convexas por depósito aluvial. Destaca el aumento poblacional, disminución de cobertura vegetal y un incremento de construcciones en dirección norte-sur.

Se identificó una amenaza de movimientos en masa en el asentamiento Juan Pablo II, de nivel medio con 98.72%, vinculada a cambios significativos de pendiente debido a rellenos no tecnificados con material antropogénico. La falta

de técnicas especializadas contribuye a una consolidación insuficiente. En contraste, el 1.27% muestra baja susceptibilidad en áreas con pendientes reducidas y sin factores desencadenantes significativos ni registros de movimientos en masa. Estos resultados subrayan la necesidad de abordar eficazmente los riesgos asociados a los movimientos en masa en la zona.

La susceptibilidad a inundaciones se divide en tres categorías: alta (8.4%), media (18.3%), y baja (73.3%). La alta susceptibilidad destaca la importancia estratégica del asentamiento como desagüe natural, aunque las viviendas cercanas al cauce presentan vulnerabilidades específicas. La erosión lateral, agravada por rellenos antropogénicos, subraya la necesidad de medidas preventivas y monitoreo constante en periodos de lluvias intensas. La discrepancia entre la susceptibilidad media y las observaciones in situ sugiere la importancia de evaluaciones expertas y correcciones para mejorar la precisión del modelo. La eficacia de medidas preventivas en estructuras específicas destaca en la susceptibilidad baja. En conjunto, estos hallazgos resaltan la necesidad de abordar la complejidad de la interacción entre el asentamiento y su entorno hidrológico para una gestión integral de riesgos de inundación.

7 Reconocimiento

Quiero agradecer, primeramente, a mis padres, Heladio Cely González y María Gilma Riveros, por su respaldo, proporcionándome no solo el apoyo emocional sino también las bases económicas necesarias para mi formación. Su constante motivación ha sido mi impulso para superarme en cada etapa de mi vida. Agradezco a mis hermanos, en particular a Heidy Katherine y Luis Fernando, quienes siempre han estado presentes en momentos cruciales, brindándome su apoyo incondicional. También quiero agradecer a mi compañero de vida Jefferson Darío Amaya Pérez por su constante respaldo y amor inquebrantable en cada instante. A la universidad de Pamplona, sus docentes, en especial a Ilich Sebastián Villamizar Solano, por su orientación y contribución para mi formación profesional y laboral.

Karina Cely Riveros

A mi madre y padre, Aura Pabón Peñaloza, Cesar Rincón Vera le agradezco por la vida y el apoyo en mi desarrollo personal y profesional. A mis hermanos, Sandra Milena, y el prodigio, Cesar Iván, gracias por el súper apoyo y por enseñarme con amor que todo es posible cuando se abraza con determinación. A Laura Ávila, por ser mi fuente de amor e inspiración. A mi amigo Fer gracias por el apoyo. A la Universidad de Pamplona y sus profesores, en especial a Ilich Villamizar, gracias por su apoyo en el área académica investigativa y laboral.

William Rincón Pabón

8 Referencias

- [1] O. J. Jiménez, «Propuesta metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa,» *Facultad de ingeniería*, 19(28), 7-19, 2010.
- [2] A. Arabameri, «Flood susceptibility mapping using meta-heuristic algorithms,» *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vols. %1 de %2vol. 13, no. 1, pp. 949–974, 2022, 2022.
- [3] SGC, Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2017.
- [4] P. A. Cortéz Salazar y S. Grajales Ruiz, «Comparación entre los métodos estadísticos bivariado y Multivariado para la zonificación de la susceptibilidad por Movimientos en masa en escala 1:10.000 en el municipio de la Estrella – Antioquia,» *Trabajo de grado, Departamento de ciencias de la tierra, Universidad EAFIT*, 2018.
- [5] C. J. R. N. & S. R. Van Westen, Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment, *Natural Hazards*, 2003.
- [6] S. Dudei, G. Vargas y V. Gutiérrez, «Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas con la dinámica fluvial del río Guataquí en la ciudad de Villavicencio, Colombia,» *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 28 (1): 152-174..
- [7] C. E. Jiménez Peñaranda, E. E. Rojas Martínez, F. D. Lascarro Navarro y D. C. Manco, «Análisis multitemporal y dinámica fluviales del brazo de Mompos (rio Magdalena) corregimiento de Cantera, Bolívar, Colombia,» 2022.
- [8] J. H. Sandoval, C. A. Florez, E. M. Bello y J. G. Nuñez, «Zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicando un método bivariado y un proceso heurístico. Caso aplicado a la cuenca del Río Combeima,» 2012.
- [9] SGC, Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenaza, Escala 1:100.000, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2012.
- [10] Departamento Administrativo de la Función Pública, «Portal Único del Estado Colombiano (GOV.CO),» abril 2012. [En línea]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>.
- [11] Departamento Administrativo de la Función Pública, «Portal Único del Estado Colombiano (GOV.CO),» Septiembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>.
- [12] N. e. a. Alarcón, «METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE AMENAZA POR EVENTOS DE AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000,» *Universidad La Gran Colombia*, pp. 35 - 37, 2017.
- [13] La Opinión, «Iniciamos el proceso de legalización de 10 asentamientos en Cúcuta,» 2021. [En línea]. Available: <https://cucuta.gov.co/alcaldia-iniciara-el-proceso-de-legalizacion-de-10-asentamientos-en-cucuta/>.
- [14] La Opinión, «Este es el panorama de las afectaciones por fuertes lluvias en Cúcuta y sus alrededores,» 2023. [En línea].
- [15] J. H. Carvajal, Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2012.
- [16] IDEAM, Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación, Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2017.
- [17] Wilson, J., & Gallant, J., *Terrain Analysis: Principles and Applications*, New York: Wiley, 2000.
- [18] R. A. van Zuidam, *Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*, The Hague: Smiths Publishers, 1986.
- [19] ESRI, «Environmental system research Institute. Curvature. The help document ArcGis,» 2019. [En línea]. Available: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>.
- [20] Santacana, N., Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. BarcelonaBarcelona.: Tesis doctoral, Barcelona: UPC, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2001.
- [21] R. Huggett, *Fundamentals of Geomorphology*. 2nd Edition, Master e-book, 2007.
- [22] POMCA, «Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río La Vieja,» 2017.
- [23] SGC, Geología de la plancha 88 - Cúcuta a escala 1:100.000 Departamento de Norte de Santander - Colombia, Bogotá, 2016.
- [24] Uribe Portilla, E. & Villamizar Solano, I., *Inventario y divulgación del patrimonio geológico del departamento Norte de Santander*, Pamplona: Sello Editorial Unipamplona, 2023.
- [25] Notestein, F.B., Hubman, C.W., Bowler, J.W., «Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia- South America,» *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull.* 55 (10), pp. 1165-1216, 1944.
- [26] INGEOMINAS, Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica: Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geológica para Ingeniería - Volumen II. Bogotá, Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2004.
- [27] Golder Associates Inc, «Fiel Soil Description Guide,» p. 2, 2012.
- [28] M. Hermelín, «Suelos, Rocas y Formaciones Superficiales,» *DYNA* (106), pp. 25-29, 1985.
- [29] H. Catellanos Quiroz, «Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000,» 2010.