

**AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE
PAJARITO, BOYACÁ**



PAOLA ANDREA VARGAS PÉREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA

Director:

TATIANA FERREIRA BORDA

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ, 01 FEBRERO DE 2018**

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE PAJARITO, BOYACÁ

THREAT THROUGH GROUND MOVEMENTS IN THE MUNICIPALITY OF PAJARITO, BOYACÁ

Paola Andrea Vargas Pérez
Ingeniero Geólogo, Aspirante a especialista en geomática
Estudiante de Posgrado, Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia,
u3101391@unimilitar.edu.co

RESUMEN

La ocurrencia de los deslizamientos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas y la modificación de estas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad. En el municipio de Pajarito se realizó el estudio de amenazas por Movimientos en Masa a fin de identificar los detonantes que generan dichos movimientos y los sectores más críticos que se pueden ver afectados por los mismos. Con la información recopilada se busca establecer la espacialización de las áreas amenazantes por Movimientos en Masa en el área de interés, a partir de la interacción de los diferentes factores según sus propiedades geomecánicas en cuenta al nivel de estabilidad. Con esto en mente, podría decirse que se ha construido una visión sistémica de la susceptibilidad del medio que, según Eakin y Luers (2006), se centra en evaluar los procesos, condiciones y características de los sistemas que se extienden más allá de la sensibilidad del entorno y que inhiben las respuestas adaptativas. Con base en el procesamiento realizado se encontró que el área de estudio está controlada por zonas de Baja a Media inestabilidad, sin embargo es de tener en cuenta que el municipio está en una zona de piedemonte llanero y en cualquier momento se podrían presentar localmente problemas de remoción en masa.

Palabras clave: Amenaza; Cobertura vegetal; Fenómenos de Remoción en Masa; Geología; Geomorfología; Susceptibilidad; Suelo; Zonificación.

ABSTRACT

The occurrence of landslides is the product of geological, hydrological and geomorphological conditions and the modification of these by geodynamic processes, vegetation, land use and human activities, as well as the frequency and intensity of rainfall and seismicity. In the municipality of Pajarito, the study of the threats by Mass Movements was carried out to identify the triggers that were affected by them. With the information gathered, the spatialization of the

threatening areas is planned by mass movements in the area of interest, based on the interaction of the different factors according to their geometric properties at the level of the safety basin. With this in mind, it could be said that a systemic view of the susceptibility of the environment has been constructed that, according to Eakin and Luers (2006), is focused on evaluating the processes, conditions and characteristics of the systems that extend beyond the sensitivity of the environment and that inhibit adaptive responses. Based on the processing carried out, it was found that the study area is controlled by zones of Low to Medium instability, however it is important to bear in mind that the municipality is located in an area of foothills and at any time there could be local problems of mass removal.

Key words: Threat, Land cover, Mass Removal Phenomena, Geology, Geomorphology, Susceptibility, Soil, Zoning.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se le ha dado bastante importancia a la gestión del riesgo en Colombia, con el propósito de reducir los desastres naturales principalmente, dada la falta de información y gestión en lo que a las condiciones del entorno refiere (características fisicomecánicas), así como a la ubicación poblacional. Los movimientos en masa son desastres naturales que ocurren en todas partes bajo diferentes condiciones y sus repercusiones económicas, sociales y ambientales han ido en aumento.

El municipio de Pajarito, ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia se ha caracterizado por presentar varios movimientos en masa, de los cuales el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), del Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha reportado 20 movimientos entre 1984 y 2012. La cuenca alta del Río Cusiana se caracteriza por presentar una alta torrencialidad en época de invierno convirtiéndose éste en un factor de riesgo para la cabecera municipal, la cual se localiza sobre la margen derecha del Río Cusiana, es a partir de esta problemática que surge la idea de realizar la zonificación de amenaza por movimientos en masa del municipio.

Por otro lado, la gestión de los datos e información se convierte en un elemento importante en el proceso de zonificación, ya que un buen manejo de la información permitirá generar una base de conocimiento confiable para la toma de decisiones. En general, los SIG son empleados para el almacenamiento, análisis e integración de datos de campo, información proveniente de sensores remotos (imágenes o fotografías aéreas), cartografía, estadísticas y percepción de las comunidades [5].

Bajo este contexto, y sabiendo que la zonificación de la amenaza es una herramienta importante para la planificación de planes ambientales y de contingencias de una determinada región, para lo cual es necesario la ejecución de una serie de pasos, cruces y análisis de datos. Todas las etapas utilizadas en el proceso de manipulación de los datos: generación de mapas, cruce, análisis

de resultados y generación de salidas gráficas, involucraron la utilización de un sistema de información geográfica, buscando la obtención del mapa final de la zonificación [6].

El presente estudio tiene por objetivo sectorizar, a partir de un análisis de susceptibilidad, la probabilidad de ocurrencia de los movimientos en masa en un área circundante al municipio de Pajarito; busca además contribuir –desde una perspectiva geográfica– al conocimiento y comportamiento espacial de estos fenómenos, para ello se realiza un análisis multicriterio basado en factores considerados relevantes para el área estudiada.

1. MÉTODOS E INSUMOS

Los insumos utilizados en este estudio corresponden a información geográfica digital en formatos ráster y vector, Sistemas de Información Geográfica (SIG), cartas topográficas e instrumentos de campo. Para la obtención de la información vectorial como: geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra se utilizó una imagen satelital ÁSTER (tamaño de pixel 30x30 m) correspondiente al 2015 y un Modelo Digital de Elevación (DEM) ALOS PALSAR (resolución por pixel 12,5 m), para modelar pendientes y altura. También se utilizó la información topográfica base del lugar estudiado, los instrumentos de campo, a su vez, permitieron verificar y levantar datos en la localidad y sectores aledaños. El conjunto de información obtenida por las distintas fuentes señaladas se trabajó mediante un SIG, con la finalidad de obtener la susceptibilidad mediante la aplicación del análisis multicriterio.

Para realizar el análisis multicriterio se subdivide cada factor a analizar en clases, a las que se asignan pesos en función de su influencia en la estabilidad del terreno. A continuación se determina analíticamente el peso relativo de cada factor con respecto a los demás, usando para ello el método de evaluación multicriterio de las jerarquías analíticas [7]. Con este método se crea primero una matriz cuadrada, en la que el número de filas y columnas viene definido por el número de factores a partir de los que se va a realizar el análisis de susceptibilidad del área de interés. Para establecer el rango de susceptibilidad de cada clase se utilizó la ecuación:

$$LAI = \sum_{i=1}^n (Wi * Ri) \quad (1)$$

Donde:

LAI = Índice de Amenaza de los Movimientos en Masa

Wi = Peso del factor

Ri = Peso de la clase

Por último, para obtener una representatividad y visualización óptima de la información se procedió a clasificar el grado de amenaza en un SIG, en cinco rangos de amenaza a movimientos en masa: muy bajo, bajo, medio o moderado,

alto y muy alto; donde los valores de LAI bajos corresponden a amenazas bajas y los valores de LAI altos corresponden a amenaza altas.

Tabla 1. Rangos de amenaza

N	INTERVALO		AMENAZA
1	0,13	0,173	<i>Muy baja</i>
2	0,173	0,216	<i>Baja</i>
3	0,216	0,259	<i>Media</i>
4	0,259	0,302	<i>Alta</i>
5	0,302	0,345	<i>Muy alta</i>

Fuente: Elaboración propia

Los mapas intermedios generados, junto con el mapa final de amenaza por procesos de remoción en masa en el municipio de Pajarito Boyacá, se espacializan a escala 1:25.000, sin embargo, las figuras que se ilustran en el presente artículo están a escala 1:120.000, buscando que el lector tenga una mejor apreciación de la temática.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LOS FACTORES

1.1.1. Geología

En el municipio de pajarito afloran rocas sedimentarias con edades del cretáceo inferior a cuaternarios recientes y una pequeña apósis de rocas ígneas riolíticas del terciario. El Ígneo de Pajarito (Kiip) corresponde a la formación más antigua del municipio y está conformado por lamprófiro intruyendo las rocas de edad cretácica pertenecientes a la formación Lutitas de Macanal. Superficialmente sólo se puede evidenciar un material arcilloso producto de la alteración de la roca ígnea [8].

En lo referente a las rocas sedimentarias que afloran en el municipio; de base a techo son: Formación Lutitas de Macanal, Formación Areniscas de Las Juntas, Formación Fómeque, Formación Une y Formación Chipaque, de edades cretácicas; Formación Palmichal, Formación Areniscas del Limbo y Formación San Fernando, del Terciario inferior y Depósitos aluviales, coluviales y fluvio-glaciares de edades recientes.

Las rocas más antiguas presentes en el área de estudio que fueron acumuladas durante el cretáceo inferior se depositaron en un ambiente marino, motivo por el cual los bloques sedimentados están dispuestos como una estructura dúplex con capas arenosas intercaladas con capas arcillosas de tipo lutítico principalmente. Esta zona se encuentra actualmente bajo la regencia de una tectónica compresiva generando una inversión de las fallas normales preexistentes [9]. La Falla de Pajarito de tipo inverso pone en contacto las formaciones de edad cretácica con las formaciones terciarias.

Los depósitos Cuaternarios están constituido por bloques de areniscas de diferentes tamaños desde varios metros a pocos centímetros, fragmentos de roca envueltos en una matriz areno-limosa de grano medio a grueso. Los

depósitos originados por la dinámica fluvial del río Cusiana son de tipo Aluvial, mientras que los originados por desprendimiento de rocas superiores son de tipo coluvial o fluvioglaciares.

1.1.2. Geomorfología

En la zona se presentan geoformas de origen estructural, deposicional, denudacional y fluvial; cada uno generando una morfografía diferente al terreno. Las geoformas estructurales se caracterizan por presentar cimas agudas y buzamientos fuertes dando origen a cuchillas que sobresalen, o estructuras plegadas que aparece limitada por escarpes que varían en su altura y composición [8].

Las geoformas de tipo denudacional presentan formas onduladas o inclinadas de pendiente moderada, afectadas por numerosos tipos de erosión: Laminar, en surcos, carcavamiento. Estas geoformas, y dadas las condiciones estructurales del área ha generado que se presenten fenómenos de remoción en masa en algunos sectores provocando inestabilidad en el terreno.

Algo similar ocurre con las geoformas deposicionales, los cuales por ser depósitos inconsolidados son vulnerables a procesos morfodinámicos activos o han sido afectadas por fallamiento, presentándose flujos, reptación y deslizamientos. El área influenciada por los apartes longitudinales, acarreados por una corriente principal, los cuales están dispuestos en niveles de terrazas, vegas y sobrevegas. Dentro de éste paisaje geomorfológico se tiene el tipo de relieve Terraza Erosional, la cual está constituida por cantos de arenisca, bloques de diferente diámetro los cuales están embebidos en una matriz areno-limosa [8].

1.1.3. Pendientes

Uno de los aspectos de mayor importancia para la identificación de una geoforma se hace con base en la relación de superficies, ángulos y demás nociones geométricas; de acuerdo a esto, es el mapa de pendientes que se puede observar en la Tabla 2 en el cual se identifican y clasifican sistemáticamente estas nociones geométricas, con el fin de servir más adelante, como guía en la delimitación y caracterización de unidades de terreno.

Tabla 2. Rango de pendientes en el área de influencia indirecta y directa del proyecto

COLOR	DESCRIPCIÓN
0 – 1	A Nivel
1 - 3	Ligeramente plana
3 - 7	Ligeramente inclinada
7 – 12	Moderadamente inclinada
12 – 25	Fuertemente inclinada
25 – 50	Ligeramente escarpada o ligeramente empinada
50 – 75	Moderadamente escarpada o moderadamente empinada
75 – 100	Fuertemente escarpada o fuertemente empinada
> 100	Totalmente escarpada

Fuente: Elaboración propia.

1.1.4. Suelos

La dinámica más sobresaliente consiste en los procesos erosivos de las laderas su acumulación posterior en las zonas de pie de montaña, por lo tanto los suelos se relacionan con estos dos procesos. En general, en el Municipio de Pajarito los suelos son superficiales y muy superficiales, afloramientos rocosos o áreas dominadas por erosión severa y muy severa. Las limitaciones para el uso son muy severas e incluyen los criterios de pendiente, clima por temperaturas muy bajas o déficit de agua muy fuerte.

Los suelos que se encuentran en los paisajes de montaña y de altiplanicie en climas frío, medio y cálido tienen limitaciones severas por lo cual no son adecuadas para cultivos limpios y densos. En estas zonas se restringen su uso a ganadería extensiva, a bosques o vida silvestre, las restricciones son mucho más fuertes que las de la clase VI.

La zonificación del uso de la tierra facilita la planificación y el manejo del medio ambiente porque cada zona se determina de acuerdo con sus condiciones. Los factores asociados a la pérdida de suelo se encuentran entre las principales variables utilizadas para la planificación de la conservación del suelo. Estas variables se utilizan para aislar y describir áreas que son vulnerables a la erosión y para orientar las medidas de conservación inmediatas que se adoptarán en sitios específicos (Lee 2004) [10].

1.1.5. Coberturas de la tierra

La cobertura de la tierra resulta de la interacción de múltiples aspectos tanto bióticos como abióticos, naturales o antrópicos que derivan en el tipo de vegetación o cobertura sobre una zona determinada. La determinación de las coberturas de la tierra se realizará con base en la metodología CORINE Land Cover 2010 adaptada para Colombia por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), de tal manera que se definan áreas homogéneas en términos bióticos que posean afinidad de rasgos estructurales y funcionales [11].

1.1.6. Precipitación

Debido a su posición geográfica en la zona ecuatorial, Colombia se sitúa bajo la influencia de los alisios del noreste y sureste, que confluyen a la llamada Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), donde se favorece el desarrollo de nubosidad y lluvias [12]. Para el área de influencia el régimen pluviométrico es monomodal, es decir que se presenta un único periodo de lluvias en el año, la humedad inicia en el mes de marzo y se extiende hasta noviembre; presenta valores promedio mensuales que oscilan entre 118 mm y 176 mm.

Tabla 3 Precipitación Anual en mm.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VALOR ANUAL
CORINTO	46,6	59,5	147,4	270,2	425,5	423,3	405,7	395,9	332,1	353,8	271,6	95,5	3227,2

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VALOR ANUAL
TOQUILLA	17,0	28,2	67,2	119,6	158,3	191,5	185,9	171,4	133,4	125,2	69,2	32,1	1298,9
PAJARITO	25,7	47,9	140,6	312,9	432,4	474,6	465,2	444,9	372,1	307,1	187,2	73,6	3284,0
PROMEDIO	29,7	45,2	118,4	234,2	338,7	363,1	352,3	337,4	279,2	262,0	176,0	67,1	2603,3

Fuente: IDEAM

1.1.7. Sismicidad

Tectónicamente se encuentra ubicada en dos regiones remarcables por su topografía, la primera corresponde a la zona de los Llanos Orientales, al suroriente de la cuenca, que ocupa cerca del 50% del área y se caracteriza por su morfología plana, principalmente fallada. La segunda zona corresponde a la cordillera, en donde las principales estructuras las constituyen los sinclinales y anticlinales, además de un fallamiento complejo. La mayoría de las estructuras siguen la dirección N40E, eje principal de la Cordillera Oriental en esta región [13].

1.2. SUPERPOSICIÓN DE FACTORES

La tierra es un sistema dinámico que está en constante cambio, tanto en su interior como en superficie. De acuerdo a lo anterior, es preciso entender que se pueden generar movimientos de masas de roca, suelo o flujos indiferenciados a través de las laderas, con velocidades que pueden ser desde imperceptibles hasta devastadoras e impredecibles.

Los movimientos de masas de material ladera abajo son comúnmente conocidos como “Procesos de Remoción en Masa (PRM)” y están controlados por factores intrínsecos o condicionantes como el tipo de litología, las formas del terreno en un contexto geomorfológico (involucrando aspectos genéticos y dinámicos), el grado de inclinación de las laderas, el tipo de suelo y la cobertura de la tierra; a su vez, existen factores exógenos que actúan como agente detonante ante la ocurrencia de PRM, como son la precipitación y los movimientos sísmicos.

Es importante considerar, de acuerdo a los trabajos realizados en campo, la información recopilada y el análisis de los factores espacializados, que no todas las temáticas poseen el mismo nivel de importancia o grado de trascendencia, en lo que a estabilidad del terreno se refiere, motivo por el cual, y de manera subjetiva, se le asigna un peso específico a cada factor según su posible influencia a la generación de movimientos en masa.

En la Tabla 4 se muestra una matriz multicriterio basada en el Análisis Jerárquico de Saaty (ver [7]), en donde cada factor se condiciona según su incidencia en la estabilidad del terreno, definido bajo criterio de un profesional competente. Además, características particulares de cada elemento y un valor que define sus condiciones de estabilidad.

Tabla 4. Matriz cuadrada según Método de Jerarquización Analítico

FACTOR	PESO	CLASE	PESO	PESO FINAL
Geología (Litología)	0,15	Lamprófiros	0,4	0,06
		Lutita	0,3	0,045

FACTOR	PESO	CLASE	PESO	PESO FINAL
		Gravas	0,2	0,03
		Areniscas	0,1	0,015
Geomorfología	0,1	Estructural	0,2	0,02
		Deposicional	0,3	0,03
		Denudacional	0,5	0,05
Pendientes	0,2	0 – 7%	0,4	0,08
		7 – 25%	0,3	0,06
		25 – 50%	0,15	0,03
		50 – 100%	0,1	0,02
		>100%	0,05	0,01
Suelos	0,1	Clase I	0,5	0,05
		Clase IV	0,25	0,025
		Clase VII	0,15	0,015
		Clase VIII	0,1	0,01
Cobertura vegetal	0,1	Cuerpos de agua	0,35	0,035
		Cultivos transitorios	0,25	0,025
		Pastos enmalezados	0,15	0,015
		Arbustal denso	0,1	0,01
		Vegetación secundaria	0,1	0,01
		Bosque Natural	0,05	0,005
Precipitación	0,2	2100	0,1	0,02
		2200	0,2	0,04
		2300	0,3	0,06
		2400	0,4	0,08
Amenaza sísmica	0,15	Muy alta	0,6	0,09
		Alta	0,3	0,045
		Intermedia	0,1	0,015
TOTAL	1,0			1,0

Fuente: Adaptado de [7]

Esta matriz consta de cinco columnas, el **Factor** o componente a evaluar; el **Peso** o grado de importancia de estos componentes según su trascendencia en términos de estabilidad (la suma de esta debe ser igual a 1), la **Clase**, hace referencia a características particulares de cada componente que definen su grado de sensibilidad y dan un toque de subjetividad dentro del proceso; el **Peso**, define el potencial de estabilidad; y el **Peso Final**, que define el valor asignado por las características particulares del elemento dentro del porcentaje de importancia asignado al componente. Finalmente este valor es procesado a través de un SIG para espacializar el grado de amenaza.

1.2.1. Determinación del peso de los factores

Para establecer el valor de importancia o trascendencia que tiene cada factor en términos de estabilidad, se dio lugar a un análisis minucioso involucrando todos los elementos que intervienen durante la ocurrencia de un PRM. Es de tener en cuenta que el 100% corresponde al valor máximo de importancia y se distribuyó de manera ponderada entre los componentes previamente definidos.

La **pendiente** del terreno es fundamental en la generación de movimientos en masa, ya que a través de esta actúan las fuerzas gravitatorias y controla elementos como la velocidad, la longitud y la magnitud del movimiento. Se debe

interpretar de forma cuidadosa, ya que actúa en conjunto con otros factores como la litología. Por ejemplo, una ladera completamente escarpada sobre rocas competentes puede llegar a presentar unas condiciones de alta estabilidad y, laderas suavemente inclinadas sobre suelos arcillosos y saturados pueden exhibir movimientos tipo “creep”. De acuerdo a lo anterior, a este componente se le asignó un peso del 20%.

La **precipitación** actúa directamente sobre el suelo y las rocas, infiltrándose a través de sus intersticios y saturando los materiales, lo que reduce las cualidades de capacidad portante y favorece las condiciones de falla. De acuerdo a lo anterior, el peso asignado a este componente es del 20%.

El componente **geológico** se evalúa desde el punto de vista litológico y textural, donde se tiene en cuenta el tamaño de grano y las implicaciones que representan frente a los procesos de remoción. Para este factor se asignó un valor del 15%.

La **amenaza sísmica** actúa como detonante ante la ocurrencia de PRM, esta consiste en la acumulación de tensiones y/o presiones que al liberarse emiten vibraciones y desestabiliza masas de roca o suelo. Este factor recibe una valoración del 15%.

Los componentes relacionados con la **geomorfología**, la **cobertura vegetal** y los **suelos**, reciben una valoración del 10% cada uno. Son elementos de tipo condicionante que pueden contribuir o contrarrestar las condiciones para que se generen movimientos en masa.

1.2.2. Determinación del peso de la clase

La clase hace referencia a las características propias de cada componente que definen el grado de estabilidad, estas a su vez son encasilladas en rangos que clasifican cuantitativamente dichos atributos.

Para definir el peso de la clase, se contextualiza cada componente a evaluar en términos de estabilidad, de esta forma, se identifica bajo qué condiciones el factor ofrece escenarios donde las condiciones de falla del terreno son favorables, moderadas o desfavorables.

Bajo condiciones desfavorables de estabilidad se califica con el valor más alto, mientras que en escenarios estables, el valor asignado corresponde al más bajo posible. Las clases se pueden definir a partir del criterio del profesional, teniendo en cuenta la información disponible de cada factor.

1.2.3. Determinación del peso final

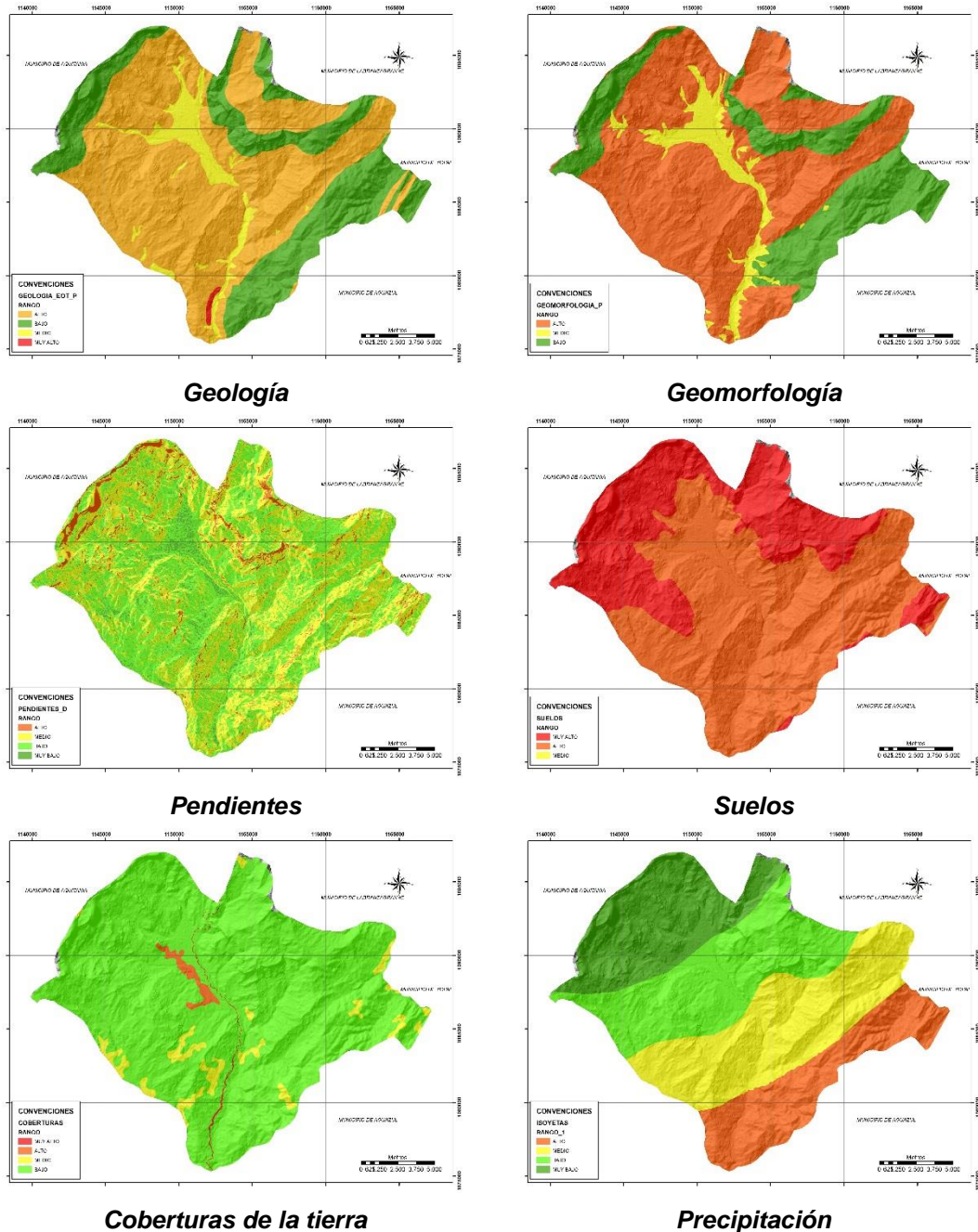
El peso final define el valor asignado por las características particulares del elemento (clase) dentro del porcentaje de importancia asignado al componente. Este valor es el que se utiliza para calificar los atributos de cada componente empleando herramientas SIG, donde finalmente se da lugar a una operación

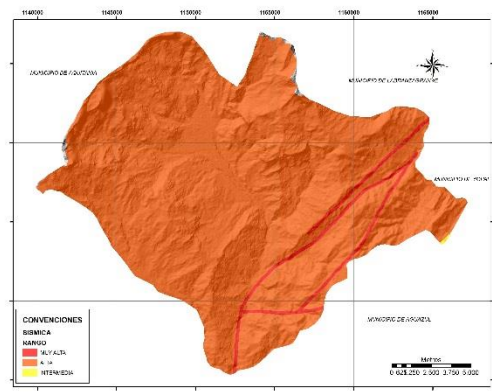
matemática simple que define polígonos con características afines en términos de estabilidad.

1.2.4. Generación de mapas intermedios

Una vez definida la matriz, se da lugar al proceso de calificación de factores para establecer los mapas intermedios, los cuales, son generados a partir de herramientas SIG que permiten almacenar atributos (como el peso final) que posteriormente son geoprocesados y dan lugar a la zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa.

Tabla 5. Mapas intermedios. Componentes evaluados en términos de estabilidad





Amenaza sísmica

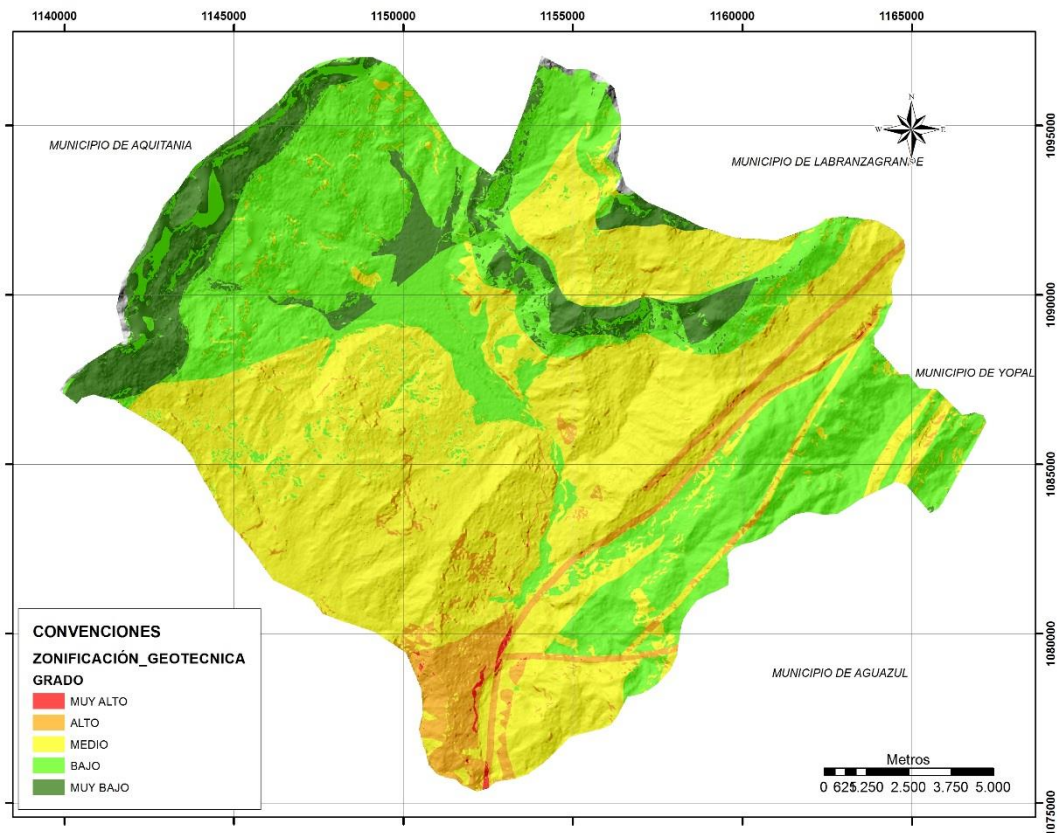
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La implementación de herramientas tecnológicas, como los sistemas de información geográfica, permiten desarrollar instrumentos de planificación y control en diferentes aspectos prácticos de la sociedad. Tal es el caso de la zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa, la cual, por medio de una caracterización física y un análisis semicuantitativo, ofrece la posibilidad de identificar polígonos con características homogéneas de estabilidad, insumo fundamental para, por ejemplo, el ordenamiento territorial de un municipio.

Como se mencionó a lo largo de la descripción metodológica, el peso final se emplea para calificar los componentes a evaluar, los cuales son llevados a un mapa final a través de un geoprocésamiento denominado “Unión”, donde se da lugar a una suma básica que permite establecer un intervalo entre el número mayor y el número menor, el cual se divide en cinco rangos proporcionales que establecen zonas de muy baja a muy alta inestabilidad.

A continuación se presenta el mapa de amenazas por procesos de remoción en masa del municipio de Pajarito, Boyacá, generado a partir de una superposición ponderada de componentes que controlan las condiciones de estabilidad del terreno.

Figura 1. Mapa de amenaza ante movimientos en masa del municipio de Pajarito, Boyacá



La figura anterior representa zonas con características homogéneas de inestabilidad distribuidas en cinco rangos así:

Muy Baja Inestabilidad: Se evidencia en la parte Noroccidental y Norte – Centro del municipio. Indudablemente está controlada por rocas sedimentarias competentes, posiblemente areniscas cuarzosas con muy poca presencia de material arcilloso; las pendientes pueden llegar a ser muy escarpadas o incluso suavemente inclinadas. Por demás, se puede presumir que la actividad antrópica es mínima y se mantiene una cobertura de la tierra nativa.

Baja inestabilidad: Esta evidencia dos escenarios principales, una zona con pendientes bajas constituidas por depósitos de material granular con bloques de gran tamaño, dispuestos a lo largo del cauce principal del río Cusiana (depósitos aluviales) y, Laderas sin un patrón definido de inclinación pero constituidas por rocas arenosas con algún tipo de intercalación de materiales menos competentes, que le da un toque de sensibilidad mayor ante la posible ocurrencia de PRM.

Media inestabilidad: Se puede observar en una franja de sentido SW – NE, posiblemente controlada por patrones estructurales que definen la disposición de las rocas. Se puede sugerir que este rango contiene unidades de material

arenoso y arcilloso, con cobertura de la tierra de pastos y a lo largo de pendientes indiferenciadas que pueden oscilar entre suavemente inclinadas hasta completamente escarpadas.

Alta inestabilidad: Se presenta en la zona Sur – SW del municipio, en este sector es dominante la presencia de rocas arcillosas afectadas por discontinuidades activas y factores exógenos que debilitan las cualidades del material y favorecen las condiciones de meteorización y erosión. Las pendientes dentro de este intervalo suelen ser abruptas, típicamente se pueden generar diferentes tipos de movimientos de diversas magnitudes.

Cabe resaltar que la incidencia de las fallas geológicas activas juega un papel importante dentro de este grupo, generando incluso una prolongación del polígono en sentido NE a través de rocas competentes, debilitando sus condiciones de estabilidad.

Muy Alta inestabilidad: Está controlada por zonas de pendiente escarpada, fallas geológicas activas, rocas sedimentarias arcillosas muy meteorizadas e incluso rocas ígneas fracturadas y cataclizadas. Son pequeñas franjas ubicadas en la parte Sur del municipio donde son frecuentes los procesos de remoción en masa.

3. CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada necesaria para realizar la zonificación de amenaza por movimientos en masa del área de interés, y con ayuda del software ArcGIS se determinó en Índice de Amenaza por Movimientos en Masa para cada uno de los factores o componentes analizados.

Con la implementación de esta metodología se puede zonificar un terreno y establecer los escenarios desde el extremo inferior hasta el extremo superior, permitiendo, en este caso, encasillar polígonos con características homogéneas en términos de inestabilidad, desde Muy Baja hasta Muy Alta.

Se debe contar con insumos que mantengan una escala semejante y preferiblemente, que la información sea de carácter primario, lo cual, incrementa el grado de certidumbre y hace más certero el producto final

El área de estudio está controlada por zonas de Baja a Media inestabilidad, en vista que son los polígonos de mayor extensión dentro del mapa final. Sin embargo es de tener en cuenta que el municipio está en una zona de piedemonte llanero y en cualquier momento se podrían presentar localmente PRM.

La parte Sur del municipio es la más susceptible ante la ocurrencia de procesos de remoción en masa, se puede inferir que factores endógenos como la litología y el grado de inclinación de las laderas, son desfavorables y, al sumarle la incidencia del incremento en los índices de precipitación, las condiciones se tornan para establecer polígonos con materiales muy inestables.

El grado de consolidación de los materiales no es directamente proporcional con la estabilidad del terreno, sabiendo que, depósitos cuaternarios de tipo aluvial dispuestos en zonas planas, adyacentes al río Cusiana, exhiben una inestabilidad Baja mientras que rocas arenosas en pendientes abruptas y con cierto grado de fracturamiento pueden llegar a ser muy inestables.

Al analizar la incidencia de los factores exógenos o detonantes dentro del área de estudio, se puede afirmar que estos tienen un papel fundamental al momento de establecer las zonas inestables, lo anterior es fácil de evidenciar en el resultado final, donde la parte Sur del municipio tiene las condiciones más desfavorables de estabilidad, así, como la precipitación y la amenaza sísmica.

Referencias

- [1] J. Suarez, «Deslizamientos,» de *Análisis Geotécnico*, vol. I, Bucaramanga, 2012, pp. 527-582.
- [2] C. D. O. JORDÃO y E. M. MORETTO, «THE ENVIRONMENTAL VULNERABILITY AND THE TERRITORIAL PLANNING OF THE SUGARCANE CULTIVATION,» *Ambiente & Sociedade*, vol. XVIII, nº 1, pp. 75-95, 2015.
<https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc675v1812015en>
- [3] J. Salanié y T. Coison, «Environmental Zoning and Urban Development: Natural Regional Parks in France,» Paris, 2016.
<https://doi.org/10.1787/5jlsk97vpwtd-en>
- [4] M. RODRIGUES RIBEIRO DOS SANTOS y V. E. LIMA RANIERI, «CRITERIA FOR ANALYZING ENVIRONMENTAL ZONING AS AN INSTRUMENT IN LAND USE AND SPATIAL PLANNING,» *Ambiente & Sociedade*, vol. XVI, nº 4, pp. 43-62, 2013.
- [5] Á. López Rodríguez, P. Lozano Rivera y P. C. Sierra Correa, «CRITERIOS DE ZONIFICACIÓN AMBIENTAL USANDO TÉCNICAS PARTICIPATIVAS Y DE INFORMACIÓN: ESTUDIO DE CASO ZONA COSTERA DEL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO*,» *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, vol. 41, nº 1, pp. 61-83, 2012.
<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2012.41.1.73>
- [6] S. Gomes de Souza, E. Pereira de Cerqueira Junior, A. Quintão de Almeida y C. T. Amâncio Rodrigues, «ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E AMBIENTAL DA CULTURA DO CAJU PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO,» *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, vol. 7, nº 6, pp. 330-339, 2013.
<https://doi.org/10.7127/rbai.v7n600176>
- [7] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [8] Alcaldía de Pajarito, «Esquema de Ordenamiento Territorial Pajarito Boyacá,» Pajarito - Colombia, 2005.
- [9] C. Ulloa y E. Rodriguez, «PLANCHA 192, LAGUNA DE TOTA. Escala 1:100.000. 2001,» Bogotá, 1976.
- [10] P. T. S. de Oliveira, T. A. Sobrinho, D. B. B. Rodrigues y E. Panachuki, «Erosion Risk Mapping Applied to Environmental Zoning,» *Water Resources Management*, vol. 25, nº 3, pp. 1021-1036, 2011.
<https://doi.org/10.1007/s11269-010-9739-0>
- [11] F. A. Delgado Rivera, «Zonificación Ambiental de Áreas de Interés Petrolero. Guía Metodológica,» 2014.
- [12] M. y. E. A. I. Instituto de Hidrología, «EL Medio Ambiente de Colombia,» *Ideam*, p. 15, 1998.
- [13] CORPORINOQUIA, «Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Rio Cusiana,» environmental ingenieros consultores Ltda, 2007.