



GEOMORFOLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

5	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	1
5.1	MEDIO ABIÓTICO	1
5.1.2	GEOMORFOLOGÍA	1
5.1.2.1	Jerarquización geomorfológica	2
5.1.2.1	Patrón y densidad del drenaje	21
5.1.2.2	Pendientes del terreno.....	22
5.1.2.3	Análisis y evolución de los procesos morfodinámicos.....	25
5.1.2.4	Análisis multitemporal de procesos morfodinámicos.....	38
5.1.2.5	Susceptibilidad ante la ocurrencia de procesos erosivos	72
5.1.2.6	Susceptibilidad ante procesos de remoción en masa	86
5.1.2.7	Susceptibilidad ante procesos de avenidas torrenciales	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.2.1 Unidades geomorfológicas regionales para el área de influencia abiótica del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote	4
Tabla 5.1.2.2 Subunidades geomorfológicas en el área de influencia abiótica.....	9
Tabla 5.1.2.3 Distribución de las categorías utilizadas en el mapa de pendientes24	
Tabla 5.1.2.4 Áreas de los procesos morfodinámicos presentes en el área de influencia abiótica.....	37
Tabla 5.1.2.5 Fotografías aéreas utilizadas en el análisis multitemporal en el EIA del año 2015	39
Tabla 5.1.2.6 Sensores remotos adicionales utilizados en el MEIA – 2025 para el Proyecto Gramalote	39
Tabla 5.1.2.7 Análisis multitemporal de procesos de remoción en masa – sector Providencia.....	47
Tabla 5.1.2.8 Procesos de erosión en surco – Afluente quebrada La Palestina ..	51
Tabla 5.1.2.9 Proceso de erosión lateral de orillas – Quebrada Guacas, vereda Peñas Azules (San Roque)	53
Tabla 5.1.2.10 Procesos de terracetos por sobrepastoreo – Sector quebrada El Topacio y Guacas	56
Tabla 5.1.2.11 Sedimentación activa	57
Tabla 5.1.2.12 Áreas de intervención minera en el sector del Cerro Gramalote	59
Tabla 5.1.2.13 Erosión antrópica sobre la ribera derecha del río Nus con progresión entre los años 1974 y 2025	61
Tabla 5.1.2.14 Área con intervención minera en cercanías a la quebrada San Antonio con recuperación progresiva	64
Tabla 5.1.2.15 Área con intervención minera sobre la ribera izquierda del río Nus y al frente de la desembocadura de la quebrada Guacas.....	66
Tabla 5.1.2.16 Áreas de intervención minera con progresiva recuperación en el tiempo (sector hacia la desembocadura de la quebrada Guacas)	68
Tabla 5.1.2.17 Zona estable entre el periodo 1996 – 2025 en la cuenca baja de la quebrada La Palestina.....	70
Tabla 5.1.2.18 Calificación del parámetro Vegetación (V).....	73
Tabla 5.1.2.19 Calificación del parámetro pendiente (s)	81
Tabla 5.1.2.20 Calificación del parámetro geología (geo)	82

Tabla 5.1.2.21 Categorías de susceptibilidad por remoción en masa	87
Tabla 5.1.2.22 Calificaciones del parámetro M en el área de estudio	88
Tabla 5.1.2.23 Valores de R en función de la pendiente y la forma del perfil de la ladera.....	89
Tabla 5.1.2.24 Valores del parámetro D – Pendiente y densidad de drenaje	91
Tabla 5.1.2.25 Valores del parámetro V – Vegetación	92
Tabla 5.1.2.26 Homologación coberturas vegetales vs Corine Land Cover (Parámetro V)	92
Tabla 5.1.2.27 Porcentajes de ocupación de las categorías de susceptibilidad para el área de influencia abiótica del proyecto.....	94
Tabla 5.1.2.28 Identificación de las cuencas en el área de estudio	94
Tabla 5.1.2.29 Torrencialidad según el Índice de Melton de las cuencas presentes en el área de influencia abiótica	96
Tabla 5.1.2.30 Categorías de susceptibilidad del Índice de Variabilidad (IV).....	98
Tabla 5.1.2.31 Índice de Variabilidad (IV) para las cuencas de la zona de estudio .	98
Tabla 5.1.2.32 Relaciones para categorizar el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT).....	99
Tabla 5.1.2.33 Relaciones entre variables para el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT).....	100
Tabla 5.1.2.34 Susceptibilidad para el cálculo de densidad de drenaje para cada cuenca	100
Tabla 5.1.2.35 Susceptibilidad para el cálculo de la pendiente media de cada una de las cuencas en el área de influencia.....	101
Tabla 5.1.2.36 Susceptibilidad para el cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius en cada una de las cuencas del área de estudio.....	102
Tabla 5.1.2.37 Susceptibilidad por Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) de las cuencas del área de influencia	103
Tabla 5.1.2.38 Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET).....	104
Tabla 5.1.2.39 Zonificación del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)	104
Tabla 5.1.2.40 Susceptibilidad geomorfológica para zonificar avenidas torrenciales	106
Tabla 5.1.2.41 Calificación de susceptibilidad de las unidades de terreno a eventos torrenciales	107
Tabla 5.1.2.42 Tabla de calificación para las zonas geomorfológicas.	107

Tabla 5.1.2.43 Susceptibilidad a avenidas torrenciales en las zonas geomorfológicas en el área de estudio.....	108
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1.2.1 Esquema de jerarquización geomorfológica.....	2
Figura 5.1.2.2 Unidades geomorfológicas regionales en el área de influencia de la modificación de la licencia ambiental del Gramalote	6
Figura 5.1.2.3 Geomorfología local del área de influencia abiótica del proyecto	11
Figura 5.1.2.4 Planicie aluvial confinada (Fpac) en la vereda Peñas Azules sobre la quebrada Guacas.....	18
Figura 5.1.2.5 Principales afluentes dentro del área de influencia abiótica para la modificación de licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote	22
Figura 5.1.2.6 Pendientes	25
Figura 5.1.2.7 Deslizamiento activo en las inmediaciones de la quebrada Guacas, margen derecha (Imagen satelital del año 2023)	27
Figura 5.1.2.8 Cicatriz de deslizamiento en las inmediaciones del río Nus. Margen izquierda (Imagen satelital del año 2023).....	28
Figura 5.1.2.9 Erosión laminar en la vereda La María (Imagen satelital del año 2023).....	30
Figura 5.1.2.10 Surco en las inmediaciones de la quebrada La Palestina.....	31
Figura 5.1.2.11 Sedimentación activa en el río Nus	33
Figura 5.1.2.12 Erosión antrópica en la vereda Guacas.....	34
Figura 5.1.2.13 Procesos morfodinámicos año 2018	35
Figura 5.1.2.14 Procesos morfodinámicos año 2021	36
Figura 5.1.2.15 Procesos morfodinámicos año 2023	37
Figura 5.1.2.16 Mapa de procesos morfodinámicos del año 1974.	40
Figura 5.1.2.17 Mapa de procesos morfodinámicos del año 1996.	41
Figura 5.1.2.18 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2011.	42
Figura 5.1.2.19 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2018	43
Figura 5.1.2.20 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2021	44
Figura 5.1.2.21 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2023	45
Figura 5.1.2.22 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2025	46

Figura 5.1.2.23 Distribución de susceptibilidad por vegetación en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	75
Figura 5.1.2.24 Variable vegetación (V) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	76
Figura 5.1.2.25 Distribución de la susceptibilidad por lluvias en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	77
Figura 5.1.2.26 Variable lluvia – precipitación (Lm) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	78
Figura 5.1.2.27 Distribución de la susceptibilidad por escorrentía en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	79
Figura 5.1.2.28 Acumulación de flujo variable escorrentía (Es) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	80
Figura 5.1.2.29 Distribución de la susceptibilidad por pendiente en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	81
Figura 5.1.2.30 Pendientes – variable pendiente (s) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	82
Figura 5.1.2.31 Distribución de la susceptibilidad por geología en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	83
Figura 5.1.2.32 Susceptibilidad por geología (geo) en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental ...	84
Figura 5.1.2.33 Susceptibilidad antes la ocurrencia de procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental	85
Figura 5.1.2.34 Distribución de la susceptibilidad por procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para modificación de licencia ambiental	86
Figura 5.1.2.35 Valores de calificación para el parámetro M (En el recuadro rojo se presentan los pesos asignados a los materiales del área de estudio)	88
Figura 5.1.2.36 Clases del terreno de acuerdo con el perfil de las superficies (índice de curvatura: Cóncavo, rectilíneo y convexo) y las pendientes	90

Figura 5.1.2.37 Susceptibilidad por remoción en masa	93
Figura 5.1.2.38 Variables que determinan la zonificación de la susceptibilidad a avenidas torrenciales	95
Figura 5.1.2.39 Índices implícitos en el cálculo de IVET	97
Figura 5.1.2.40 Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales	109

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1.2.1 Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco) en el sector Este de la vereda Guacas	13
Fotografía 5.1.2.2 Lomos denudados (Dlde) en el sector noroeste de la vereda Guacas	14
Fotografía 5.1.2.3 Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo) en el sector norte de la vereda Guacas	15
Fotografía 5.1.2.4 Cauce aluvial. A. Río Nus, B. Quebrada Guacas, C. Quebrada La Palestina	17
Fotografía 5.1.2.5 Plano o llanura de inundación (Fpi) visto en la zona del Proyecto Gramalote	19
Fotografía 5.1.2.6 Explotación minera (Aemc) en el sector noreste de la vereda Guacas	20
Fotografía 5.1.2.7 Superficies de explanación (Asp) en la vía de Barbosa – Puerto Berrío.....	21
Fotografía 5.1.2.8 Deslizamiento activo en la vereda El Iris	27
Fotografía 5.1.2.9 Laderas afectadas por sobrepastoreo en la margen izquierda de la quebrada La María	29
Fotografía 5.1.2.10 Zonas afectadas por minería en el sector del Cerro Gramalote	31
Fotografía 5.1.2.11 Cárcavas observadas en el sector noreste de la vereda Guacas	32
Fotografía 5.1.2.12 Socavación de orillas en quebradas tributarias del río Nus. A. Erosión lateral en la margen izquierda de la quebrada Guacas, B. Erosión lateral en la margen derecha de la quebrada El Topacio.....	32
Fotografía 5.1.2.13 Sedimentación activa	33

MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL PROYECTO DE MINERÍA DE ORO A CIELO ABIERTO GRAMALOTE.

ATENCIÓN A REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN ADICIONAL ACTA 30 DE 30 DE JUNIO DE 2026

5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.2 GEOMORFOLOGÍA

Las geoformas son la expresión superficial del terreno, resultado de la interacción de los materiales que las constituyen, disposición estructural, los procesos morfológicos que interactúan según el ambiente morfogenético donde se desarrollan y el tiempo de duración de la acción que los moldea. El análisis para determinar la evolución del terreno está definido por las condiciones de procesos morfodinámicos como la remoción en masa, erosión, eventos hídricos relacionados con la dinámica de las corrientes y asociados a la actividad tectónica y antrópica que en conjunto modelan el relieve. La caracterización geomorfológica con énfasis en morfodinámica suministra información valiosa sobre posibles amenazas naturales, usos potenciales del suelo y coberturas (Carvajal, 2012).

La evolución del relieve para el departamento de Antioquia, según el SGC (2012) está determinada por levantamientos tectónicos en la cordillera Central y los cambios climáticos propios de esta zona tropical, evidenciados en diferentes características, entre ellas, las geoformas de los diferentes ambientes morfogenéticos que describen el origen y la evolución de la denominada unidad geomorfológica.

Los espesos perfiles de meteorización de las rocas ígneas asociadas al Batolito Antioqueño que constituyen los terrenos donde se ubica el área de influencia de la modificación de licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote, son determinantes al momento de clasificarlos geomorfológicamente, sumado a las condiciones tropicales típicas del territorio que permiten la configuración de un ambiente en parte denudacional, con rasgos morfológicos secundarios de un ambiente estructural relacionado con patrones tectónicos de segundo orden asociados con la Falla Cisneros. Además de lo anterior, la dinámica fluvial asociada al río Nus y sus tributarios más importantes favorecen las condiciones para que en los sectores aledaños a estos cuerpos predomine un ambiente fluvial de sedimentación. Por último,

se presentan geoformas que suavizan el relieve hacia sectores intermedios y la base de las laderas, y que comprenden depósitos coluviales y de flujos derivados de los horizontes de suelos del Batolito Antioqueño.

A continuación, se presenta el análisis geomorfológico del área de influencia de la modificación de la licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote, definido a partir de la litología, patrones de drenaje, pendiente del terreno, y morfogénesis. Incluyendo, además, la evolución de los procesos morfodinámicos.

5.1.2.1 Jerarquización geomorfológica

En este estudio se siguen los lineamientos de jerarquización propuestos por Carvajal (2012), con un enfoque al análisis a partir de un proceso analítico del terreno desde una visión regional a local. De esta forma, según la escala aplicada, se tiene una base regional de génesis geológica para las geoformas y los ambientes morfogenéticos. Por otro lado, una base detallada según expresión morfológica, litológica y de procesos morfodinámicos.

En la Figura 5.1.2.1 se observa la representación esquemática de la jerarquización geomorfológica según Carvajal en el año 2012.

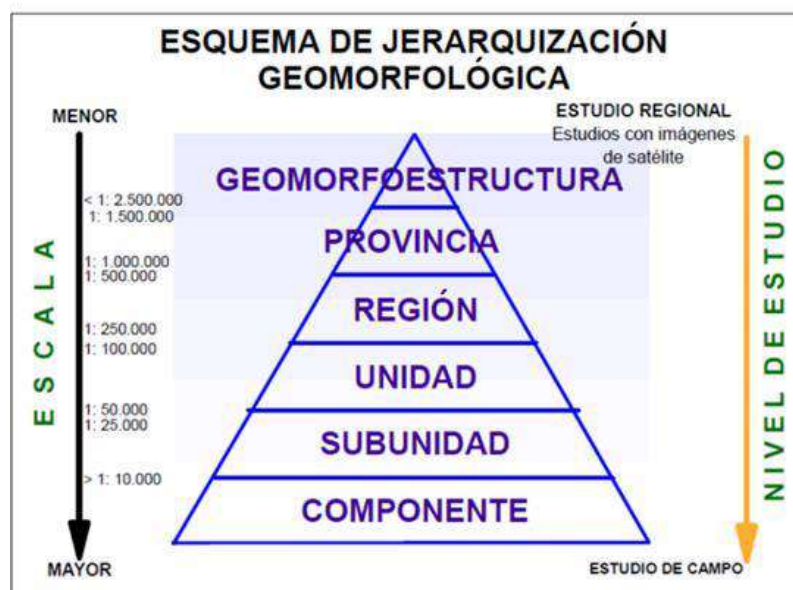


Figura 5.1.2.1 Esquema de jerarquización geomorfológica

Fuente: En Carvajal, (2012) tomado y modificado de Velásquez, (1999), Ingeominas, (1999) y Carvajal J. H., (2002 - 2008).

5.1.2.1.1 Geomorfoestructura

Se refiere a grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intracontinentales caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han tenido deformación o basculamiento y posiblemente metamorfismo

o intrusión ígnea (Carvajal, 2012). Esta unidad presenta grandes áreas geográficas y se define por estructuras geológicas y topográficas a nivel regional, es decir, escala entre <1:2.500.000 y 1:1.500.000.

A nivel de geomorfoestructura el área de influencia para la modificación de la licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote se encuentra dentro de la unidad de Sistema Orogénico Andino, correspondiente a una unidad geomorfoestructural regional resultante de procesos tectónicos compresivos de larga duración asociados a la subducción de placas oceánicas bajo la placa Sudamérica, que han generado el levantamiento, plegamiento y fallamiento de la corteza.

5.1.2.1.2 Provincia geomorfológica

Las provincias son un conjunto de regiones con geoformas parecidas y definidas por un macrorrelieve y génesis geológica similar, su delimitación se da por trazos de megafracturas y suturas definidas o inferidas (Carvajal, 2012).

Como provincia geomorfológica, escala entre 1:1.000.000 y 1:500.000, el área de influencia para la modificación de la licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote se ubica en la cordillera central de Colombia en el departamento de Antioquia. Esta provincia, se distingue por su topografía y morfología montañosa, donde los procesos erosivos actúan sobre los suelos generados por la meteorización de los macizos rocosos, dejando ver zonas con pendientes altas que han sido incisadas por corrientes fluviales para conformar relieves caracterizados por sierras, lomos y valles asimétricos en forma de “V”.

5.1.2.1.3 Región geomorfológica

Es la agrupación de geoformas relacionadas genética y geográficamente, definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomórficos parecidos. La escala de trabajo está definida entre 1:250.000 y 1:500.000 (Carvajal, 2012).

El ambiente morfogenético alude a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las cuales se generaron las geoformas y se determina con base en la interpretación de los procesos geomorfológicos registrados (origen tanto endógeno como exógeno), que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de éstas. En la zona de estudio se da lugar principalmente a un ambiente denudacional y en menor medida estructural, fluvial y antropogénico:

- **Ambiente denudacional (D):** determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y producto principalmente de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa sobre geoformas preexistentes (Servicio Geológico Colombiano, 2015).
- **Ambiente fluvial (F):** geoformas producidas por procesos (erosión – sedimentación), generalmente por corrientes de agua tales como ríos, arroyos, lagos y lagunas, respectivamente (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

- **Ambiente estructural (S):** geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente la asociada a plegamientos y fallamientos, cuya expresión morfológica está definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades (Servicio Geológico Colombiano, 2015).
- **Ambiente antropogénico (A):** Incluye las geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros, y adecuación de nuevas vías que modifica la morfología natural del terreno.

5.1.2.1.4 Unidad geomorfológica

La unidad geomorfológica, geoforma individual genéticamente homogénea, se genera por procesos constructivos o destructivos de un ambiente particular. Son los elementos básicos que componen el paisaje y los modelos geomorfológicos soportados por diferentes criterios en función de la génesis, forma y geometría con relación a la escala del proceso natural formador (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

La notación cartográfica propuesta corresponde a una abreviatura de hasta cinco caracteres, el primero en mayúscula, donde se utiliza para identificar el ambiente morfogenético (F – Fluvial, D – Denudacional, S – Estructural) y se usan letras adicionales para especificar tanto el relieve como el nombre de la geoforma típica de cada ambiente morfogenético (Carvajal, 2012).

En la Tabla 5.1.2.1 se muestran las áreas en hectáreas y en porcentajes de las unidades geomorfológicas que se encuentran en el área de influencia abiótica del proyecto, así mismo en la Figura 5.1.2.2 se presenta la cartografía geomorfológica regional (unidades geomorfológicas), esto según el Servicio Geológico Colombiano, (2015).

Tabla 5.1.2.1 Unidades geomorfológicas regionales para el área de influencia abiótica del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote

Unidad geomorfológica	Nomenclatura	Área ha en AI Abiótica	% del área en AI Abiótica
Ambiente Denudacional			
Conos y lóbulos coluviales	Dco	2,46	0,10
Lomo denudado	Dlde	515,63	20,66
Escarpe de erosión mayor	Deem	170,65	6,84
Escarpe de erosión menor	Deeme	73,47	2,94
Montículo y ondulaciones denudacionales	Dmo	736,29	29,51
Lomeríos muy disectados	Dlmd	188,65	7,56
Lomo denudado moderado de longitud media	Dldemm	180,67	7,24
Lomo denudado alto de longitud larga	Dldeal	273,72	10,97
Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldebc	28,61	1,15
Ambiente Fluvial			
Cauce aluvial	Fca	53,72	2,15

Unidad geomorfológica	Nomenclatura	Área ha en AI Abiótica	% del área en AI Abiótica
Cono de deyección	Fcdy	12,02	0,48
Plano o llanura de inundación	Fpi	194,29	7,79
Terraza de acumulación	Fta	65,09	2,61
TOTAL		2.495,27	100,00

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Servicio Geológico Colombiano, (2015)

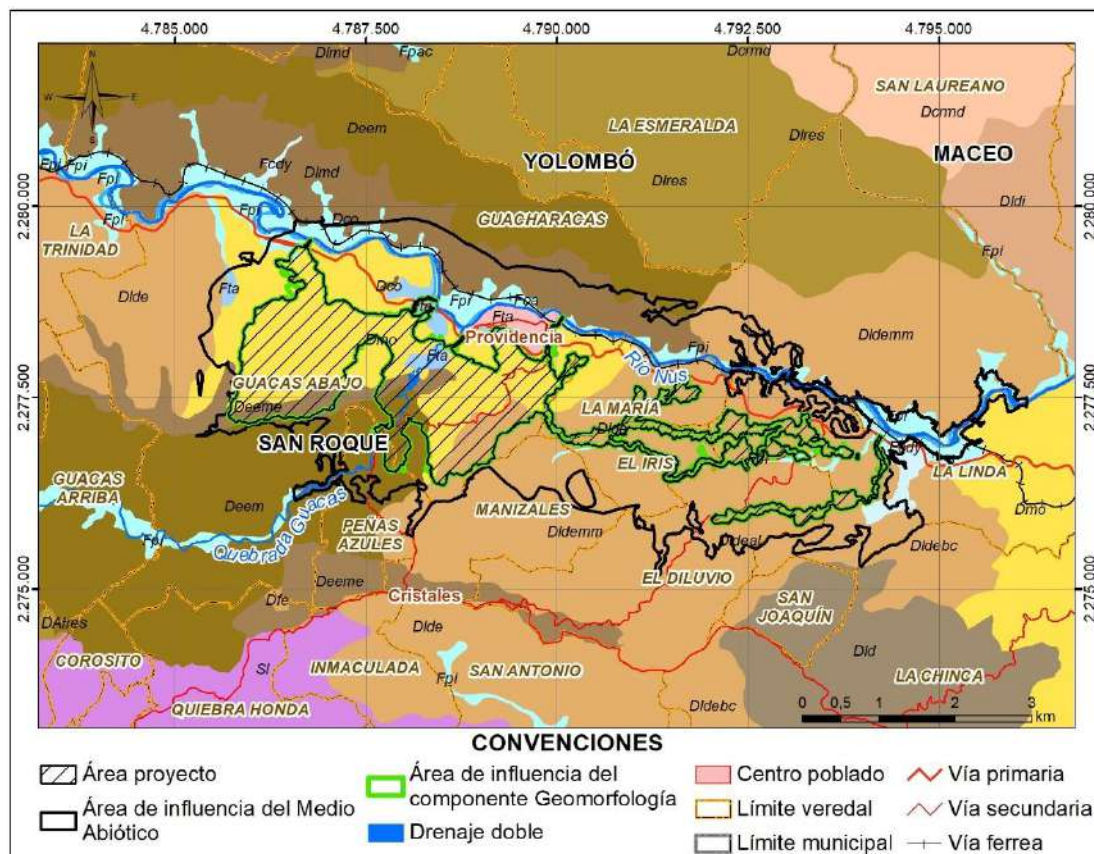


Figura 5.1.2.2 Unidades geomorfológicas regionales en el área de influencia de la modificación de la licencia ambiental del Gramalote

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Servicio Geológico Colombiano, (2015)

A continuación, se describen las unidades geomorfológicas presentes en la cartografía regional, dentro del área de influencia abiótica del proyecto, tomando como base el estudio del Servicio Geológico Colombiano, (2015).

A. Ambiente denudacional

Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y producto principalmente de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas existentes. A continuación, se describen las unidades geomorfológicas presentes a nivel regional.

a. Conos y lóbulos coluviales (Dco)

Unidad localizada en gran parte en las inmediaciones de las márgenes del río Nus. Corresponden a superficies en forma de lóbulo o cono, su morfología alomada baja, conformados por bloques y fragmentos heterométricos de rocas preexistentes, embebidos en una matriz arcillosa a areno limo arcilloso. Su origen se asocia a procesos de transporte y deposición de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales en suelos saturados y no saturados.

b. Lomo denudado (Dlde)

Gran parte de los terrenos en las veredas El Diluvio, El Iris, Guacas Abajo y Manizales están conformados por esta unidad geomorfológica. Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas con formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal.

c. Escarpe de erosión mayor (Deem)

Geoforma al sur de la vereda Guacas Abajo. Se trata de una ladera abrupta, con alturas mayores a 250 m, originados por procesos de meteorización y erosión diferencial acentuada en zonas de debilidad que dejan expuestas estas geoformas.

d. Escarpe de erosión menor (Deeme)

Escarpe localizado en la zona central de la vereda Guacas Abajo. Es de longitud corta a larga de forma cóncava a recta con pendientes entre escarpadas a muy escarpadas y alturas que varían entre 50 y 100 m, originados por socavación fluvial lateral y por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes.

e. Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo)

Son elevaciones localizadas al norte de la vereda Guacas. Su altura es menor a 50 m sobre su nivel de base local. Con una morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. Su origen está relacionado a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas intrusivas y metamórficas.

f. Lomeríos muy disectados (Dlmd)

Parte central de la vereda Guacharacas, al norte del río Nus. Son prominencias topográficas de morfología alomada o colinada. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por presentar una moderada disección, generando valles en V. Se caracteriza por presentar movimientos en masa y procesos erosivos intensos.

g. Lomo denudado moderado de longitud media (Dldemm)

Conjunto de lomos o filos ubicados al este de la vereda Guacharacas, al norte del río Nus. Están ubicados a diferentes alturas con formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. Se caracterizan por presentar un índice de relieve relativo entre 250 m y 1000 m.

h. Lomo denudado alto de longitud larga (Dldeal)

Gran parte de la vereda El Diluvio la conforman este conjunto de filos, ubicados a diferentes alturas. Tienen formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. Se caracteriza por presentar un índice de relieve relativo mayor que 1000 m y el eje principal tiene una longitud mayor que 100 m.

i. Lomo denudado bajo de longitud corta (Dldebc)

Una parte de la vereda La Linda, al este del área de influencia abiótica del proyecto, la conforman este sistema de lomos o filos a diferentes alturas con formas alargadas y en dirección perpendicular al drenaje principal. Se caracteriza por presentar un índice de relieve relativo menor que 250 m y la longitud del eje principal es mayor que 1000 m.

B. Ambiente fluvial

El ambiente fluvial corresponde a las geoformas producidas por procesos de erosión – sedimentación, generadas por corrientes de agua tales como ríos y arroyos que drenan los terrenos. A continuación, se describen las unidades geomorfológicas presentes a nivel regional:

a. Cauce aluvial (Fca)

Canal de forma irregular excavado por corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales y que dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias.

b. Cono de deyección (Fcdy)

Geoforma en la vereda La Linda, al este del área de influencia abiótica del proyecto. Corresponde a una superficie en forma de cono en planta y de 5° - 10° de inclinación, de decenas de metros de extensión, ubicados en el punto donde los canales o quebradas llegan a zonas de valles amplios. Se constituyen de tierras, arena y grava, en espesores, en donde los materiales más gruesos se localizan hacia el ápice en la zona de salida y los más finos en la zona distal.

c. Plano o llanura de inundación (Fpi)

Zonas circundantes al río Nus. Franjas del terreno planas, de morfología baja y ondulada eventualmente inundable. Se presenta bordeando los cauces fluviales y se limita localmente por escarpes de terraza. Se incluyen los planos fluviales menores en formas

de “U” o “V” y conos coluviales menores, localizados en los flancos de los valles intramontanos.

d. Terraza de acumulación (Fta)

Zonas localizadas en la margen derecha del río Nus, en la vereda Guacas Abajo. Plano elongado de morfología plana a suavemente ondulada y modelada sobre sedimentos aluviales. Su origen está relacionado con procesos de erosión y acumulación aluvial dentro en antiguas llanuras de inundación, por donde fluye una corriente. La formación de estas terrazas incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical.

5.1.2.1.5 Subunidad geomorfológica

Para la caracterización de la subunidad geomorfológica, en una escala comprendida entre 1:10.000 y 1:25.000, se consideran la fotointerpretación de imágenes satelitales, el Modelo de Elevación Digital (DEM) con resolución de 1 m y los recorridos de campo realizados. Igualmente, a partir de análisis espaciales realizados en la plataforma ArcGIS, se derivan el mapa de pendientes (véase mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-PEND) y el modelo de sombras, los cuales aportan información relevante para esta categoría. La caracterización está fundamentada en los contrastes morfológicos y morfométricos, donde el tipo de material o la disposición estructural están relacionados. Además, se asocia con procesos superficiales actuales, tales como meteorización, erosión, transporte y acumulación.

A continuación, en la Tabla 5.1.2.2 se presentan las subunidades geomorfológicas (geomorfología local) presentes en el área de influencia abiótica para el proyecto.

Tabla 5.1.2.2 Subunidades geomorfológicas en el área de influencia abiótica

Subunidades geomorfológicas	Nomenclatura	Área de influencia abiótica	
		ha	%
Ambiente denudacional			
Colina residual	Dcr	219,91	8,81
Colina residual muy disectada	Dcrmd	122,64	4,91
Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	Dco	16,55	0,66
Cono o lóbulo de flujo de lodo y tierra	Dlfl	66,25	2,43
Lomos denudados	Dlde	128,11	5,13
Montículos y ondulaciones denudacionales	Dmo	626,21	25,10
Escarpe de erosión mayor	Deem	8,34	0,33
Ladera erosiva	Del	126,46	0,70
Lomeríos muy disectados	Dlmd	95,95	3,85
Lomeríos poco disectados	Dlpd	64,89	2,60
Lomo denudado moderado de longitud media	Dldmm	134,70	5,40
Ambiente estructural			
Lomo de falla	Slf	426,24	17,08

Subunidades geomorfológicas	Nomenclatura	Área de influencia abiótica	
		ha	%
Ambiente Fluvial			
Cauce aluvial	Fca	37,91	1,52
Planicie aluvial confinada	Fpac	17,01	0,68
Plano o Llanura de inundación	Fpi	364,22	14,60
Cono de deyección	Fcdy	5,13	0,21
Ambiente antropogénico			
Explotación minera	Aemc	17,46	0,70
Planos y campos de llenos antrópicos	Ar	6,36	0,26
Superficies de explanación	Asp	10,47	0,42
Total		2.495,27	100,00

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Figura 5.1.2.3 se presenta la representación de la geomorfología local para el área de influencia abiótica del proyecto (véase mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-GEOM).

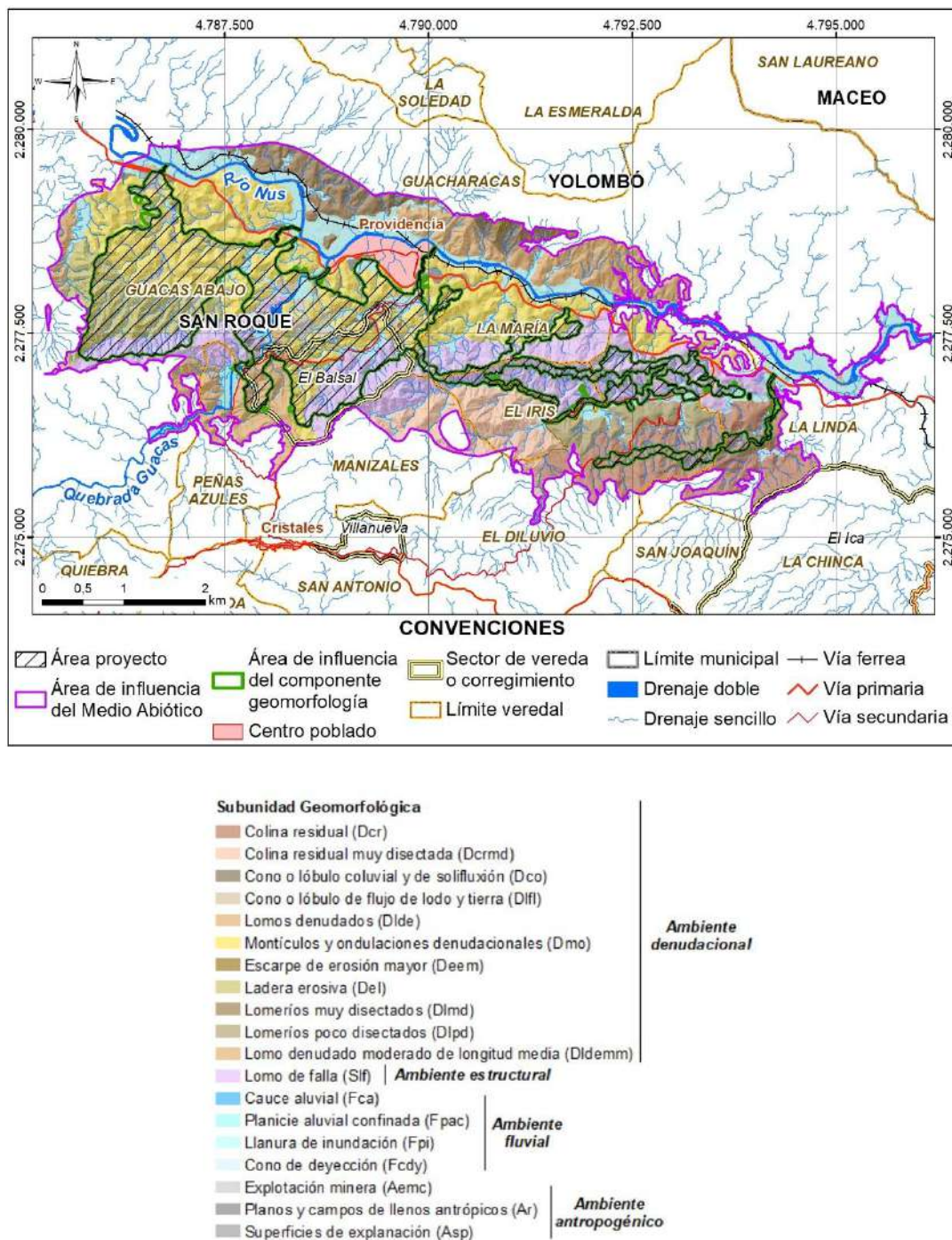


Figura 5.1.2.3 Geomorfología local del área de influencia abiótica del proyecto

Fuente: Integral S.A. 2025

A nivel local, en el área de influencia de la modificación de licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote se definen las subunidades según cuatro ambientes geomorfológicos; denudacional, estructural, fluvial y antrópico, a continuación, se describen las subunidades geomorfológicas cartografiadas para la zona de interés, algunas con registro fotográfico correspondiente a cada una de ellas.

A. Ambiente denudacional

Uno de los factores importantes encargados de modelar el relieve en el área de influencia abiótica del proyecto son los agentes exógenos, que acentúan los procesos de meteorización y erosión de la superficie del terreno. Este proceso geomorfológico se encarga de modificar las geoformas iniciales, llevándolas a evolucionar a superficies en ocasiones irregulares, debido a efectos de meteorización diferencial en rocas de origen ígneo con variaciones composicionales que confieren diversas competencias en la resistencia erosiva. Se desarrollan morfologías de topes subredondeados amplios y lomeríos elongados con vertientes medias a bajas, delimitados por drenajes subdendríticos. Este tipo de ambiente se encuentra distribuido de manera aleatoria en toda el área de análisis, siendo el ambiente más común.

a. Colinas residuales (Dcr)

Elevaciones topográficas con cimas redondeadas y amplias, cuyas laderas limitantes son cortas a moderadamente largas de pendiente inclinada a abrupta, de formas convexas a planas y un índice de relieve bajo a moderado. Se desarrollan sobre un relieve configurado por las rocas del Batolito Antioqueño. Esta morfología se observa hacia el este de la vereda El Diluvio.

b. Colina residual muy disectada (Dcrmd)

Elevaciones del terreno entre 200 y 399 metros sobre su nivel de base local. Su origen está relacionado con procesos tectónicos y a la acción conjunta de periodos de denudación y meteorización en rocas intrusivas como es el caso de las que componen el Batolito Antioqueño, donde se desarrolla meteorización esferoidal. Estas geoformas presentan un desarrollo de una red de drenaje con algún grado de disección. Esta morfología se observa al norte de la vereda el diluvio.

c. Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)

Esta subunidad geomorfológica en forma de lóbulo o cono, de morfología alomada baja, está relacionada con procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales en suelos saturados y no saturados, conformados por bloques y fragmentos heterométricos de rocas preexistentes (Batolito Antioqueño), embebidos en una matriz arcillosa a areno limo arcillosa (Fotografía 5.1.2.1). Estos se presentan localmente en toda el área de influencia abiótica del proyecto, en su mayoría en las partes medias y bajas de las laderas expuestas a factores exógenos como el clima, la actividad ganadera y los terrenos con baja densidad de cobertura vegetal potenciados por pendientes altas.



Fotografía 5.1.2.1 Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco) en el sector Este de la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

d. Cono o lóbulo de flujo de lodo y tierra (Dlfl)

Se presenta asociada con los drenajes de la zona y corresponde a una estructura con forma de lóbulo o flujo alomado, localmente aterrazado que se presentan siguiendo las hondonadas y drenajes fluviales, con longitudes cortas a muy largas, altamente disectadas. Estos conos están constituidos por bloques angulares diseminados en una matriz arcillo arenosa. Su presencia es de manera local en toda el área de influencia sobre materiales de suelos residuales y saprolitos de gran espesor que son susceptibles a generar procesos de remoción en masa con posterior depositación hacia la base de las vertientes conformadas por las unidades del Batolito Antioqueño.

e. Lomos desnudados (Dlde)

Son sistemas de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor a 150 m y longitudes de ejes que varían de 200 m a 1000 m (Fotografía 5.1.2.2). Los topos o parte superior pueden tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión de los drenajes, el tipo y grado de meteorización que ha desarrollado la roca dominante (Batolito Antioqueño) y de los procesos erosivos moldeantes. La inclinación y orientación del eje de los lomos puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto por tectónica, competencia del macizo rocoso y nivel erosivo de los drenajes que incisan el relieve.

Esta morfología se observa hacia el extremo noroeste de la vereda Guacas y los drenajes presentan un patrón subdendrítico.



Fotografía 5.1.2.2 Lomos denudados (Dlde) en el sector noroeste de la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

f. Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo)

Elevación del terreno con una altura menor de 100 m sobre su nivel de base local, con una morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente (Fotografía 5.1.2.3). Su origen está relacionado con procesos de meteorización y erosión intensa sobre las rocas ígneas del Batolito Antioqueño.

Esta morfología se observa en el sector norte de las veredas Guacas, La María y El Diluvio y contigua a la margen derecha del río Nus.



Fotografía 5.1.2.3 Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo) en el sector norte de la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

g. Escarpe de erosión mayor (Deem)

Escarpe de longitud corta, forma cóncava con pendientes que varían de escarpadas a muy escarpadas y alturas entre 50 a 100 m, originado por proceso de erosión intenso y movimientos en masa remontantes a lo largo de drenajes. Algunos escarpes pueden ser disectados y profundizados por procesos de erosión aluvial. En el área de influencia corresponde a dos geoformas pequeñas localizadas hacia el norte del río Nus, en el extremo occidental del polígono del área de influencia abiótica del proyecto.

h. Ladera erosiva (Del)

Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas. Pueden presentar procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos, etc. Sin embargo, para la zona de análisis se presentan algunas cicatrices de deslizamiento. Esta geoforma se localiza al sur de la vereda Guacas. Denotando un patrón de drenaje subparalelo.

i. Lomeríos muy disectados (Dlmd)

Prominencias topográficas de morfología alomada a colinada. Estas geoformas son originadas por procesos de denudación intensos y cuyas laderas se caracterizan por presentar una moderada disección. Esta geoforma se encuentra al norte del río Nus.

j. Lomeríos poco disectados (Dlpd)

Prominencias topográficas de morfología alomada o colinada que presentan alturas bajas con respecto al nivel de base local. En estos lomeríos los procesos de incisión son leves y actúan sobre suelos residuales del Batolito Antioqueño. Son frecuentes los procesos erosivos y eventualmente movimientos en masa tipo deslizamiento, como es el caso de la zona de análisis, pues se presentan algunas cicatrices de esta geoforma lo que indica antiguos deslizamientos. Esta geoforma se encuentra en algunos sectores de la vereda El Iris y El Diluvio.

k. Lomo denudado moderado de longitud media (Dldmm)

Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas, con formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. Se caracteriza por presentar un índice de relieve relativo entre 250 y 1000 m. Estas geoformas se distinguen al norte del río Nus.

B. Ambiente estructural

Este tipo de ambiente le confiere al paisaje índices de contrastes de relieve altos y laderas con pendientes abruptas a escarpadas. Se evidencian geomorfológicamente tendencias estructurales con dirección preferencial N70°- 80°E que corresponde a la tectónica regional que alinea el relieve de las rocas del Batolito Antioqueño.

a. Lomo de falla (Slf)

Prominencias topográficas conformadas por filos ubicados a diferentes alturas. Se caracterizan por presentar cimas alargadas, de topos agudos que siguen la tendencia estructural regional. Su origen se asocia a la acción conjunta de procesos tectónicos moderados e intensos y procesos de meteorización y denudación. Esta geoforma se ubica en las veredas La María, Peñas Azules y Guacas en menor medida.

C. Ambiente fluvial

Corresponde a las geoformas producidas por procesos de erosión y sedimentación, generados principalmente por corrientes de mayor jerarquía como el río Nus en el sector norte por fuera del área de influencia y las quebradas Guacas, El Balsal, La Colorada y La Palestina. Estos procesos fluviales conjugados con los procesos morfogenéticos estructurales y denudacionales, le confieren rasgos característicos al relieve asociado.

a. Cauce aluvial (Fca)

Subunidad que corresponde a los diferentes canales que desarrollan los drenajes que incisan y moldean el relieve que enmarca el área del proyecto. Estos exhiben diversos patrones que van desde subdendríticos, dendríticos, meándricos y subparalelos con tramos rectilíneos debido a controles litológicos y estructurales por fallamiento. Los cauces aluviales están representados en la cuenca del río Nus y relacionados con los drenajes tributarios hacia su margen derecha (Fotografía 5.1.2.4).



Fotografía 5.1.2.4 Cauce aluvial. A. Río Nus, B. Quebrada Guacas, C. Quebrada La Palestina

Fuente: Integral S.A., (2018)

b. Planicie aluvial confinada (Fpac)

Franja de terreno de morfología plana, muy angosta, eventualmente inundable. Esta se encuentra limitada por morfologías montañosas y alomadas localmente, que bordean los cauces fluviales, en los cuales se observa el estrangulamiento o estrechamiento de este. Constituida por material aluvial (arenas, limos y arcillas).

Esta subunidad geomorfológica se observa puntualmente en la quebrada Guacas en las veredas Guacas y Peñas Azules (Figura 5.1.2.4).



Figura 5.1.2.4 Planicie aluvial confinada (Fpac) en la vereda Peñas Azules sobre la quebrada Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

c. Plano o llanura de inundación (Fpi)

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza (Fotografía 5.1.2.5). Generalmente están constituidos por materiales finos con proporciones menores de materiales gruesos. Las expresiones mayores de esta subunidad están referidas con el río Nus y hacia la cuenca baja de las quebradas El Topacio, El Banco, San Antonio, Guacas, El Balsal, La María y La Palestina.



Fotografía 5.1.2.5 Plano o llanura de inundación (Fpi) visto en la zona del Proyecto Gramalote

Fuente: Integral S.A., 2025

d. Cono de deyección (Fcdy)

Superficie en forma de cono en planta y de 5° a 10° de inclinación. Localizados en los puntos donde canales y quebradas llegan a valles amplios. Se constituyen de tierra, arena y gravas en espesores en donde los materiales más gruesos se localizan hacia el ápice en la zona de salida y los más finos en la zona distal.

Esta geoforma se localiza en la vereda La Linda al este del área del proyecto.

D. Ambiente antropogénico

Este ambiente se encuentra modificando morfológicamente el terreno natural a causa de la intervención antrópica (explotación minera tradicional). Esto induce procesos erosivos como surcos, cárcavas, socavación de orillas, empozamientos y escurrimientos de agua. A su vez, se presentan llenos antrópicos y explanaciones de manera local en el desarrollo de vías terciarias y primarias (zona norte de la vía nacional Barbosa – Puerto Berrío).

a. Explotación minera (Aemc)

Si bien no constituye una unidad geomorfológica en el sentido estricto de su génesis natural, es importante separar las áreas en las que se ha modificado su morfología original por efectos de la acción antrópica, donde las unidades geomorfológicas preexistentes eran colinas residuales de origen denudacional. Son sitios que han sido intervenidos por procesos de explotación minera (Fotografía 5.1.2.6). Se localizan sobre

la unidad litológica de depósitos aluviales asociados al río Nus y en las laderas bajas conformadas por suelo residual y saprolito del Batolito Antioqueño. También se encuentran en las zonas de llanura de las quebradas afluentes del mismo.

Incluyen zonas de montículos, acumulaciones artificiales de material, zonas de empozamiento de agua, cambios que han facilitado la evolución de procesos morfodinámicos. En general de carácter erosivo relacionados con surcos y socavación de orillas.



Fotografía 5.1.2.6 Explotación minera (Aemc) en el sector noreste de la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., (2018)

b. Planos y campos de llenos antrópicos (Ar)

Planos hechos artificialmente con material de relleno para acondicionar o conformar terrenos contiguos a vías terciarias y primarias. Técnicamente son de material heterogéneo bien compactados pertenecientes a la misma unidad litológica aflorante (Batolito Antioqueño).

c. Superficies de explanación (Asp)

Esta geoforma está relacionada con las obras de la vía nacional Barbosa – Puerto Berrío y componentes relacionados a ésta (Fotografía 5.1.2.7).



Fotografía 5.1.2.7 Superficies de explanación (Asp) en la vía de Barbosa – Puerto Berrío

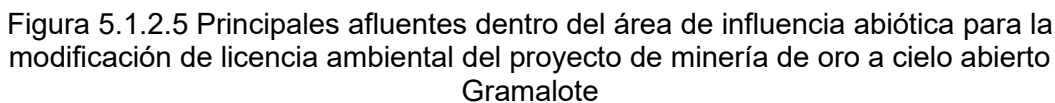
Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.1 Patrón y densidad del drenaje

La cuenca del río Nus presenta un patrón de drenaje sub-dendrítico, con un cauce mayor bien definido correspondiente al río Nus de patrón meándrico y una gran cantidad de pequeños afluentes. Este patrón de drenaje es típico de aquellas áreas donde el curso principal fluye en una zona en la que la pendiente y el control estructural son distintos a los de la zona por la que se desarrollan sus tributarios. En general, las quebradas del sector fluyen en dirección sur-norte y el río Nus en sentido oeste – este. Como principales afluentes en el área de influencia abiótica se destacan las quebradas: El Topacio, El Banco, El Balsal, La Linda, San Antonio, Guacas, La Palestina y La Colorada.

El río Nus presenta un valle amplio que conforma una superficie de baja pendiente entre zonas de vertientes. Esta planicie es modificada hacia los sectores de la base de las vertientes por la dinámica de ladera. Está representada en el sector, por depósitos aluviales que descienden a lo largo de los cauces por ambas márgenes del río.

En la Figura 5.1.2.5 se muestra los principales afluentes dentro del área de influencia abiótica.



5.1.2.2 Pendientes del terreno

5.1.2.2.1 A nivel, 0-1%

Este rango de pendientes se ubica en la zona cercana al río Nus y su llanura de inundación, ocupando un 1,25% del área de influencia abiótica del proyecto. Están asociadas a zonas de depositación y geológicamente con depósitos aluviales.

5.1.2.2.2 Ligeramente plana, 1-3%

Este rango de pendientes se ubica en la zona cercana al río Nus y su llanura de inundación, ocupando un 2,35% del área de influencia abiótica del proyecto. Están asociadas geológicamente con depósitos aluviales.

5.1.2.2.3 Ligeramente inclinada, 3-7%

También corresponden a zonas cercanas al cauce del río Nus y zonas que bordean los cauces de algunos afluentes del río tales como las quebradas: El Topacio, El Banco, San Antonio, Guacas, La Colorada, La Palestina y La María, estas planicies están conformadas por depósitos aluviales. Localmente y por el avanzado grado de evolución del paisaje se observan colinas con cimas planas, limitadas por las vertientes. Este tipo de pendiente ocupa un 5,48% del área de influencia abiótica del proyecto.

5.1.2.2.4 Moderadamente inclinada, 7-12%

Se presenta en superficies erosivas de colinas, lomeríos y cerros residuales, producto de la meteorización de la parte alta de las rocas intrusivas del Batolito Antioqueño, que definen un relieve suave colinado con drenajes erosionados y formando valles en U. Presenta una cobertura del 1,20% en el área de influencia abiótica del proyecto.

5.1.2.2.5 Fuertemente inclinada, 12-25%

Abarca una extensión en el área de influencia abiótica del proyecto del 11,12%. Se localiza en su mayoría entre las planicies y las áreas de pendientes moderadas. Están constituidas por el potente suelo residual de las rocas dioríticas del Batolito Antioqueño y localmente por depósitos coluviales y de tipo flujos, generados por los procesos de inestabilidad de las vertientes que han modelado el terreno.

5.1.2.2.6 Ligeramente escarpada o ligeramente empinada, 25-50%

Con una extensión de 27,18% del área de influencia abiótica del proyecto, se desarrolla sobre suelos residuales producto de la meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño formando colinas de topo redondeados. Se asocia a procesos erosivos de alto grado de evolución.

5.1.2.2.7 Moderadamente escarpada o moderadamente empinada, 50-75%

Ocupa un área de 42,70% siendo el dominio de pendiente más común en el área de análisis, se asocia con rocas del Batolito Antioqueño con alto grado de evolución por procesos erosivos.

5.1.2.2.8 Fuertemente escarpada o empinada, 75-100%

Con una extensión de 8,22% del área de influencia abiótica del proyecto, se localizan hacia la parte alta de las laderas limitando con la cima de estas. Constituidas por suelo residual cohesivo que permite inclinaciones. Son altamente susceptibles a ser

afectadas por procesos morfodinámicos y eventuales movimientos en masa. El material desplazado corresponde al horizonte de suelo residual y saprolito sobre la zona de transición suelo - roca del Batolito Antioqueño.

5.1.2.2.9 Totalmente escarpada, >100%

Con una extensión del 0,50% del área de influencia abiótica del proyecto. Suelen estar asociadas con rocas del Batolito Antioqueño.

En la Tabla 5.1.2.3, se presenta la distribución espacial del área de las diferentes categorías que componen el área de influencia abiótica del proyecto.

Tabla 5.1.2.3 Distribución de las categorías utilizadas en el mapa de pendientes

Descripción	Dominio %	Área (ha)	Porcentaje (%)
A nivel	0-1	31,09	1,25
Ligeramente plana	1-3	58,76	2,35
Ligeramente inclinada	3-7	58,76	2,35
Moderadamente inclinada	7-12	29,84	1,20
Fuertemente inclinada	12-25	277,47	11,12
Ligeramente escarpada o ligeramente empinada	25 - 50	678,29	27,18
Moderadamente escarpada o moderadamente empinada	50 - 75	1065,46	42,70
Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	75 - 100	205,04	8,22
Totalmente escarpada	>100	12,47	0,50
TOTAL		2.495,27	100,00

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Figura 5.1.2.6 se presenta las pendientes del área de influencia abiótica para la modificación de licencia ambiental del proyecto Minería de oro a cielo abierto Gramalote.

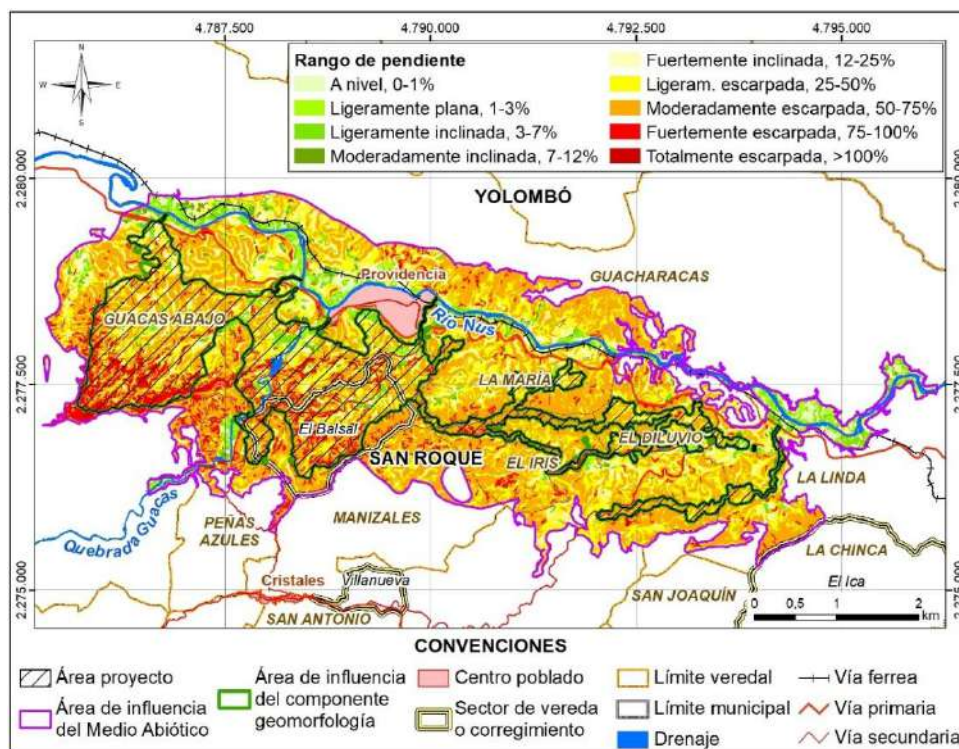


Figura 5.1.2.6 Pendientes

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3 Análisis y evolución de los procesos morfodinámicos

Para identificar los procesos morfodinámicos y su evolución en el tiempo, se realizó la cartografía detallada de procesos superficiales. Se analizaron movimientos en masa y procesos erosivos. Algunos de estos procesos han sido detonados por intervención antrópica (explotación minera artesanal, cortes viales, cultivos, etc.). En este numeral se presentan las características de cada proceso y su evolución a partir del análisis multitemporal.

La zona de interés hace parte de un paisaje de montaña dinámico, de clima tropical y elevadas precipitaciones. En este tipo de paisajes actúan una serie de procesos superficiales que se encargan de modelar las geoformas y definir su grado actual de estabilidad.

A partir de las labores de fotointerpretación, análisis de imágenes satelitales y recorridos de campo, se observó que la ocurrencia de procesos morfodinámicos tiene que ver con diferentes condiciones. Entre estas se incluyen altas pendientes, susceptibilidad de los suelos y alta densidad de drenajes. También influyen épocas de lluvias, e intervención antrópica relacionada con deforestación, cultivos y minería artesanal.

Se identificaron procesos de erosión laminar y concentrada (surcos y cárcavas), con alta densidad hacia el cerro Gramalote como resultado de la actividad minera artesanal, cicatrices de deslizamientos y deslizamientos activos, localizados en laderas escarpadas. También zonas de empozamiento de agua cercanas a surcos y flujos de agua. Además, procesos de reptación por sobrepastoreo en laderas suaves a medias. Procesos de sedimentación activa en las zonas cercanas a las corrientes que drenan el relieve y al río Nus y también procesos de socavación lateral. A continuación, se presentan las características de cada fenómeno y sus evidencias en los diferentes sectores.

5.1.2.3.1 Movimientos en masa

Son de tipo deslizamiento, con superficie de ruptura circular que se generan en zonas con gran espesor de suelo y detonados por la saturación de estos en épocas de lluvias. A nivel geomorfológico se pueden apreciar como pequeñas zonas de topografía escarpada. Tienen forma cóncava en el sentido de la pendiente, que demarcan el área desde donde se ha desprendido material por efecto de la gravedad y el agua contenida en ellos.

Estos fenómenos se llaman desgarres cuando son superficiales (<2 a 3 m) o deslizamientos cuando la superficie de ruptura es más profunda (véase la Fotografía 5.1.2.8 y Figura 5.1.2.7).

Este tipo de procesos se encuentran distribuidos por toda el área de influencia abiótica del proyecto, fueron cartografiados 27 deslizamientos activos, pocos de ellos concentrados hacia el cerro Gramalote (vereda Guacas) y áreas cercanas. Geológicamente, el terreno afectado por este proceso está conformado por suelo residual producto de la meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño.



Fotografía 5.1.2.8 Deslizamiento activo en la vereda El Iris

Fuente: Integral S.A., 2025



Figura 5.1.2.7 Deslizamiento activo en las inmediaciones de la quebrada Guacas, margen derecha (Imagen satelital del año 2023)

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.2 Cicatriz de deslizamiento

Con el paso del tiempo el movimiento en masa puede inactivarse y deja una huella de la superficie de ruptura circular (corona de deslizamiento) sobre la cual crece nuevo la vegetación. Esta evidencia de deslizamiento antiguo se llama cicatriz. En el área de influencia abiótica del proyecto fueron cartografiadas 287 cicatrices de deslizamiento, todas ellas presentan buena cobertura vegetal indicando la recuperación del terreno.

En la Figura 5.1.2.8 se presenta una cicatriz de deslizamiento en las inmediaciones del río Nus.

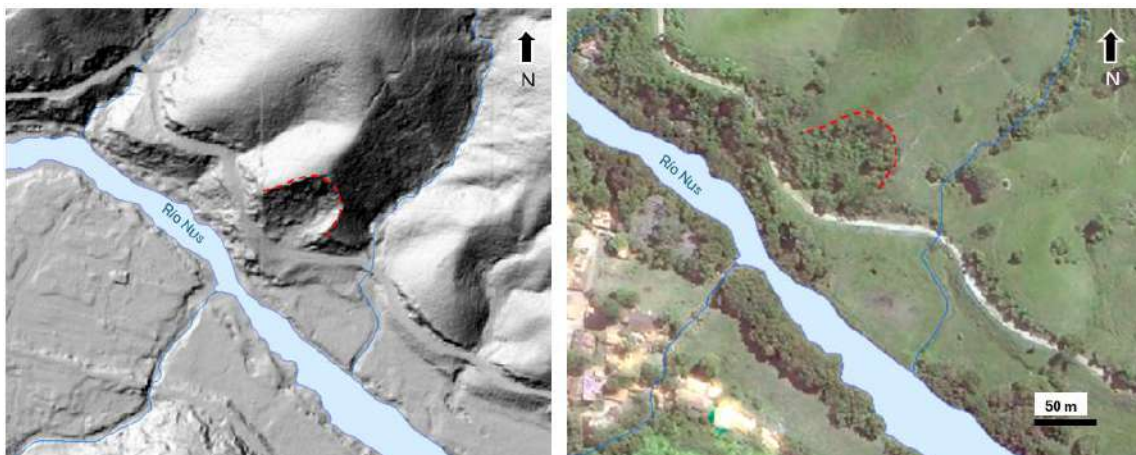


Figura 5.1.2.8 Cicatriz de deslizamiento en las inmediaciones del río Nus. Margen izquierda (Imagen satelital del año 2023)

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.3 Terraceo por sobrepastoreo

Este proceso es originado en mayor parte por las actividades ganaderas o agrícolas en la zona. Se identifica en la superficie por la presencia de escalones o desniveles en la ladera, resultado de la erosión, y que se intensifican por el paso del ganado, el cual incrementa la presión ejercida sobre los suelos involucrados y generan deformación sobre los mismos. Como consecuencia, estos procesos pueden desencadenar desprendimientos menores de carácter erosivo o movimientos en masa, como desgarres. En la vereda Guacas Abajo es donde más se evidencia este tipo de proceso.

En la Fotografía 5.1.2.9 se observa una ladera afectada por las terracetas en la vereda La María.



Fotografía 5.1.2.9 Laderas afectadas por sobrepastoreo en la margen izquierda de la quebrada La María

Fuente: Integral S.A, 2025

5.1.2.3.4 Erosión laminar

Este tipo de proceso erosivo se caracteriza por extenderse de manera relativamente homogénea en los terrenos que afecta. Los agentes erosivos como el viento y el agua que degradan el suelo de forma regular deterioran la capa más superficial a manera de láminas que se distinguen en las imágenes satelitales debido al contraste entre la vegetación de la zona afectada y la circundante, generalmente mostrándose más baja y de colores más opacos.

A diferencia de la erosión concentrada, la erosión laminar suele tener menor relación con la actividad urbana y más con las condiciones naturales del terreno o con el uso del suelo, por lo que frecuentemente obedecen a cambios litológicos marcados o a zonas de agricultura donde hay constantes procesos de deforestación y reforestación. En el área de influencia abiótica este tipo de erosión se presenta comúnmente en los terrenos que constituyen la vereda La María, y en menor medida en las veredas Guacas Abajo y El Diluvio.

En la Figura 5.1.2.9 se muestra un terreno afectado por este proceso en la vereda La María, cartografiado a partir de la imagen satelital del 2023.



Figura 5.1.2.9 Erosión laminar en la vereda La María (Imagen satelital del año 2023)

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.5 Erosión en surcos

Los surcos se generan cuando el agua de escorrentía labra por erosión pequeños canales por donde transcurrir. El fenómeno de remoción de partículas se concentra y acelera drásticamente hasta conformar oquedades alargadas en forma de canales (surcos). Cuando este proceso continúa, se transforman en cárcavas. En el área de influencia abiótica del proyecto para la modificación de licencia, fueron cartografiados 25 surcos, en su mayoría en la vereda El Iris.

Generalmente, se encuentran afectando los suelos residuales originados a partir de rocas del Batolito Antioqueño. En la Figura 5.1.2.10 se muestra un ejemplo de surco en las inmediaciones de la quebrada La Palestina.



Figura 5.1.2.10 Surco en las inmediaciones de la quebrada La Palestina

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.6 Erosión en cárcavas

Procesos de erosión asociados a suelos granulares de baja cohesión, donde la lámina del agua de escorrentía puede remover los materiales. Se evidencian en zonas sin vegetación y con desarrollo de minería artesanal reciente. Se presenta comúnmente en el cerro Gramalote (Fotografía 5.1.2.10) y alrededores de la quebrada El Balsal y La Colorada.



Fotografía 5.1.2.10 Zonas afectadas por minería en el sector del Cerro Gramalote

Fuente: Integral S.A., 2025



Fotografía 5.1.2.11 Cárcavas observadas en el sector noreste de la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.7 Socavación de orillas

Tiene lugar en las márgenes de los drenajes, generando pérdida de tierra por divagación de la corriente o aumento en el caudal y velocidad del flujo. Este último asociado a eventos de fuertes aguaceros (Fotografía 5.1.2.12). También se pueden presentar eventos de carácter torrencial por actividades de deforestación en partes altas de las cuencas que aumentan la escorrentía superficial directa.

Se aprecian procesos de socavación en algunos tramos del cauce del río Nus, cerca de zonas con intervención minera artesanal. Además, en las quebradas Guacas, El Topacio, La Palestina y Monjas.



Fotografía 5.1.2.12 Socavación de orillas en quebradas tributarias del río Nus. A. Erosión lateral en la margen izquierda de la quebrada Guacas, B. Erosión lateral en la margen derecha de la quebrada El Topacio

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.8 Áreas de sedimentación activa

Se encuentran asociadas a cauces activos según la dinámica fluvial de los últimos años; quebradas como La María, El Topacio, Guacas, El Banco, San Antonio, El Balsal, La Palestina y el río Nus. Estas áreas son modeladas por la dinámica natural del drenaje y a través del tiempo presentan variaciones relacionadas con etapas de erosión y sedimentación (Fotografía 5.1.2.13 y Figura 5.1.2.11).



Fotografía 5.1.2.13 Sedimentación activa

Fuente: Integral S.A., 2025

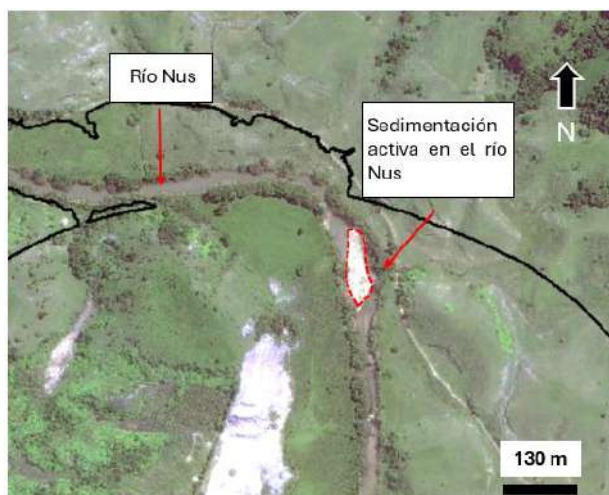


Figura 5.1.2.11 Sedimentación activa en el río Nus

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.3.9 Áreas de erosión antrópica

Estas áreas incluyen las zonas que han sido intervenidas, principalmente por avance minero en el área de influencia, la adecuación de terrenos para fines urbanísticos, infraestructurales, excavaciones, etc. Este tipo de procesos pueden afectar el terreno de tal manera que la relación de este con los agentes erosivos promueva el desarrollo de zonas de erosión concentrada (surcos y cárcavas). En el área de influencia abiótica del proyecto para la modificación de licencia ambiental, este tipo de erosión se concentra en el área donde se tiene el cerro Gramalote, principalmente asociadas con avances mineros.



Figura 5.1.2.12 Erosión antrópica en la vereda Guacas

Fuente: Integral S.A., 2025

A continuación, se presentan en la Figura 5.1.2.13, Figura 5.1.2.14 y Figura 5.1.2.15 los procesos morfodinámicos de los años 2018, 2021 y 2023 (procesos morfodinámicos actuales) respectivamente (Véase mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-MORF).

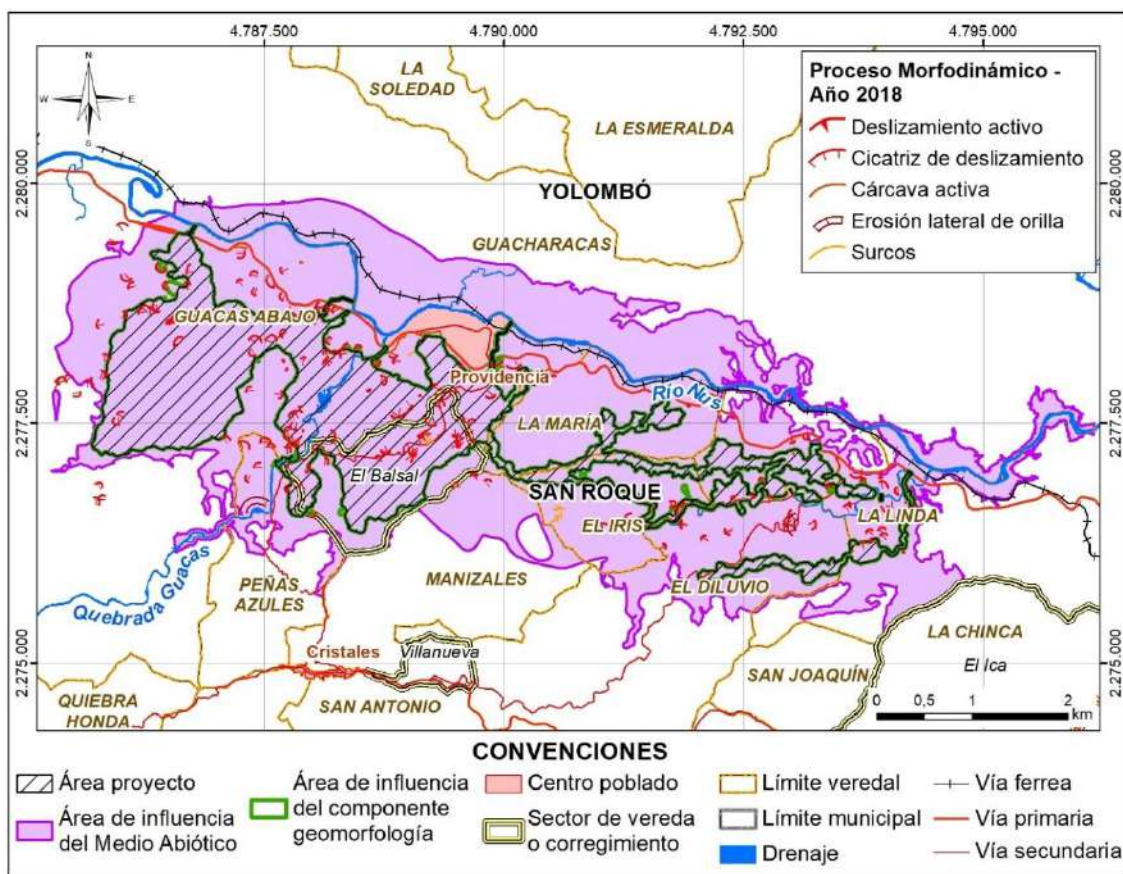


Figura 5.1.2.13 Procesos morfodinámicos año 2018

Fuente: Integral S.A., 2025

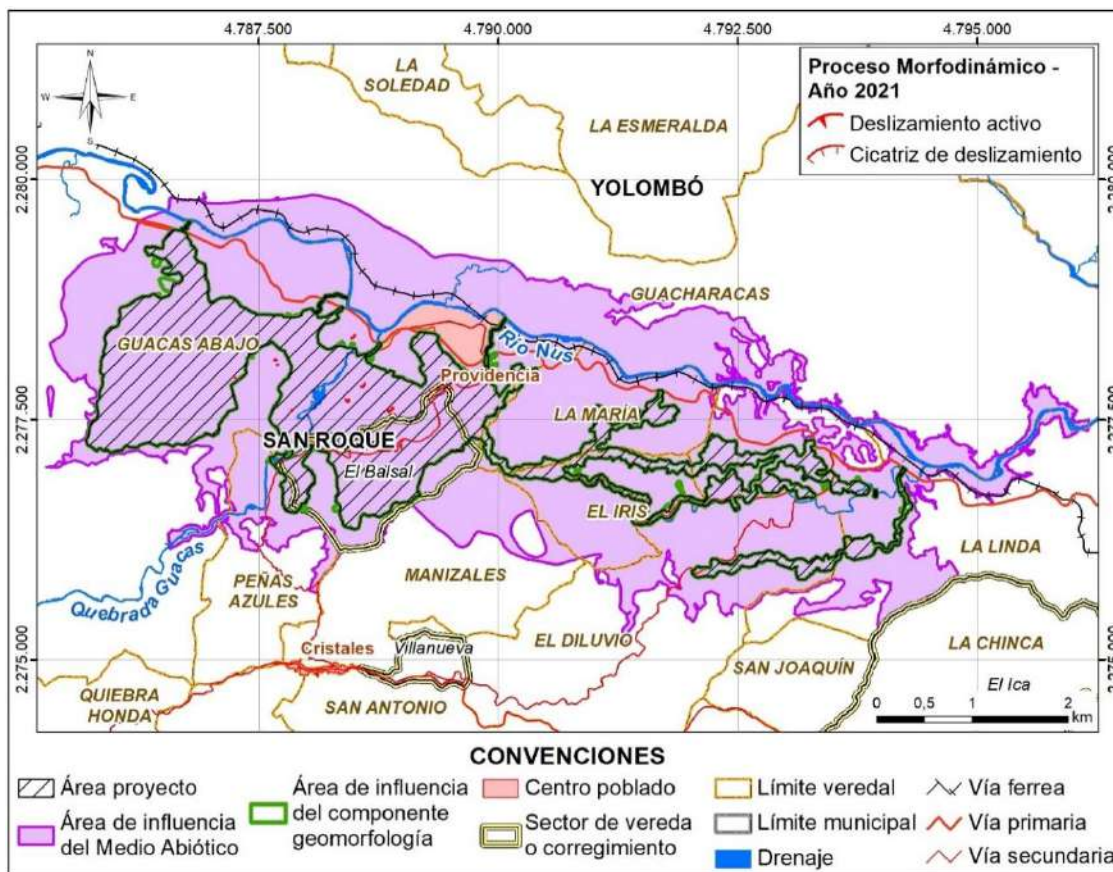


Figura 5.1.2.14 Procesos morfodinámicos año 2021

Fuente: Integral S.A., 2025

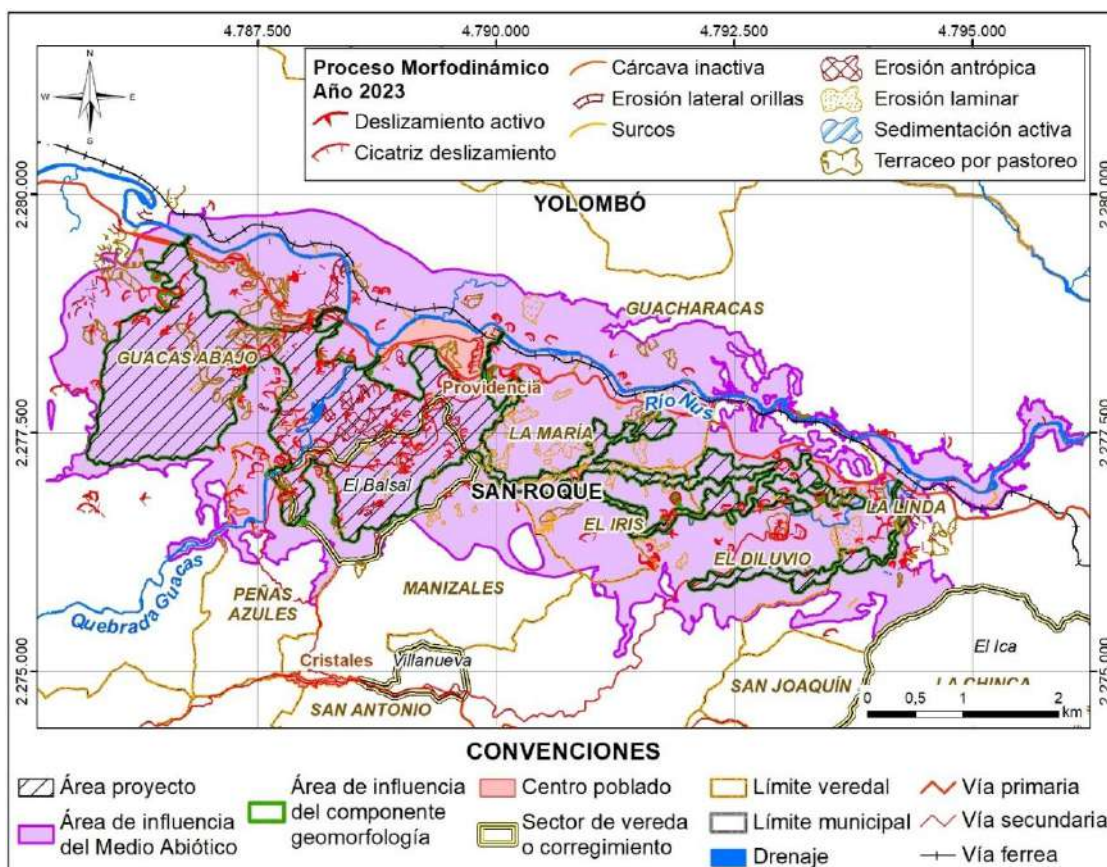


Figura 5.1.2.15 Procesos morfodinámicos año 2023

Fuente: Integral S.A., 2025

Adicionalmente, en la Tabla 5.1.2.4 se presentan las áreas, expresadas en hectáreas, correspondientes a los diferentes procesos morfodinámicos para el año más reciente (2023). Estas abarcan un total de 263,95 hectáreas, de las 2.495,27 hectáreas que conforman el área de influencia abiótica.

Tabla 5.1.2.4 Áreas de los procesos morfodinámicos presentes en el área de influencia abiótica.

Proceso Morfodinámico	Área (ha)
Erosión antrópica	24,17
Terraceo por sobrepastoreo	113,97
Erosión laminar	54,24
Sedimentación activa	4,04
Cárcava inactiva	2,57
Cicatriz de deslizamiento	67,75
Movimiento en masa	4,38

Proceso Morfodinámico	Área (ha)
Socavación de orillas	1,25
Surco	2,35
Total	263,95

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.4 Análisis multitemporal de procesos morfodinámicos

La morfodinámica es la rama de la geomorfología que se encarga de estudiar los procesos que han transformado el paisaje, identificarlos ayuda a determinar, por ejemplo, la dinámica de las corrientes hídricas o la susceptibilidad de una ladera a presentar fenómenos de inestabilidad. Estos procesos morfodinámicos son controlados por diferentes agentes como el agua, viento, hielo, entre otros, los cuales determinan el grado de actividad en la actualidad y de acuerdo con esto, son clasificados en procesos activos, inactivos o latentes.

Este análisis busca identificar y cartografiar los procesos morfodinámicos mediante métodos de fotointerpretación, modelos de elevación digital (DEM) e imágenes satelitales, bajo el esquema del análisis multitemporal. Se evalúa la dinámica de dichos procesos y se registran cambios en la evolución de estos en el tiempo. Se hace énfasis en procesos detonados por intervención antrópica (explotación minera artesanal, cultivos y cortes viales).

Para este informe se retomó tanto el análisis realizado en el marco del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto (Integral S.A, 2015), que utilizó fotografías aéreas de los años 1974, 1996 y 2011 (Tabla 5.1.2.5), como también de los recorridos de campo llevados a cabo por Integral S.A. en los periodos de 2016 y 2017. Adicionalmente, para la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del año 2025 se trazaron procesos morfodinámicos por medio de interpretación de imágenes satelitales y ortofotos específicas del área del Proyecto Gramalote (Tabla 5.1.2.6).

Tabla 5.1.2.5 Fotografías aéreas utilizadas en el análisis multitemporal en el EIA del año 2015

Vuelo/ Faja	Fotografías	Escala	Año
Fuente: Gramalote Colombia Limited			
9	871- 879	1:12 000	2011
10	897- 905		
11	933- 941		
12	906- 912		
13	947- 955		
14	177- 185		
15	501- 505 y 985- 987		
16	480- 486		
23	071- 084 y 452- 456		
24	604-605 y 611- 614		
24E	457- 461		
Fuente: Catastro Departamento de Antioquia			
21	883-886	1:10 200	1996
22	841-848	1:9 650	
23	265-272	1:9 550	
24	254-260	1:9 850	
25	223-229	1:9 800	
26	213-218	1:9 800	
27	176-182	1:9 650	
28	164-170	1:9 400	
29	1060-1063	1:10 250	
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi			
C-1526	009-010-066-067-068-084-085-103-104-105	1:25 800	1974

Fuente: Integral S.A., 2025

Tabla 5.1.2.6 Sensores remotos adicionales utilizados en el MEIA – 2025 para el Proyecto Gramalote

Tipo	Fecha	Descripción
Imagen satelital	2015	Imagen Google Earth con toma temporal en el 100 % del polígono del Proyecto Gramalote.
Modelo Digital de Terreno/Ortofoto	2018	Levantamiento con tecnología LiDAR en plataforma aerotransportada
Imagen satelital	1/08/2021	Imagen Google Earth con toma temporal en el 95 % del polígono del Proyecto Gramalote
Imagen satelital	23/07/2023	Ortoimagen EarthScanner - JL-1KF01 de archivo, Pansharpened, Multiespectral 4 Bandas
Ortofoto	2025	Levantamiento con dron por GCL. Tamaño de píxel de 0,05.

Fuente: Integral S.A., 2026

A continuación, se presentan los principales procesos morfodinámicos identificados en el área de influencia abiótica en los años 1974, 1996, 2011, 2018, 2021, 2023 y 2025, los cuales están cartografiados en la Figura 5.1.2.16 a la Figura 5.1.2.22.

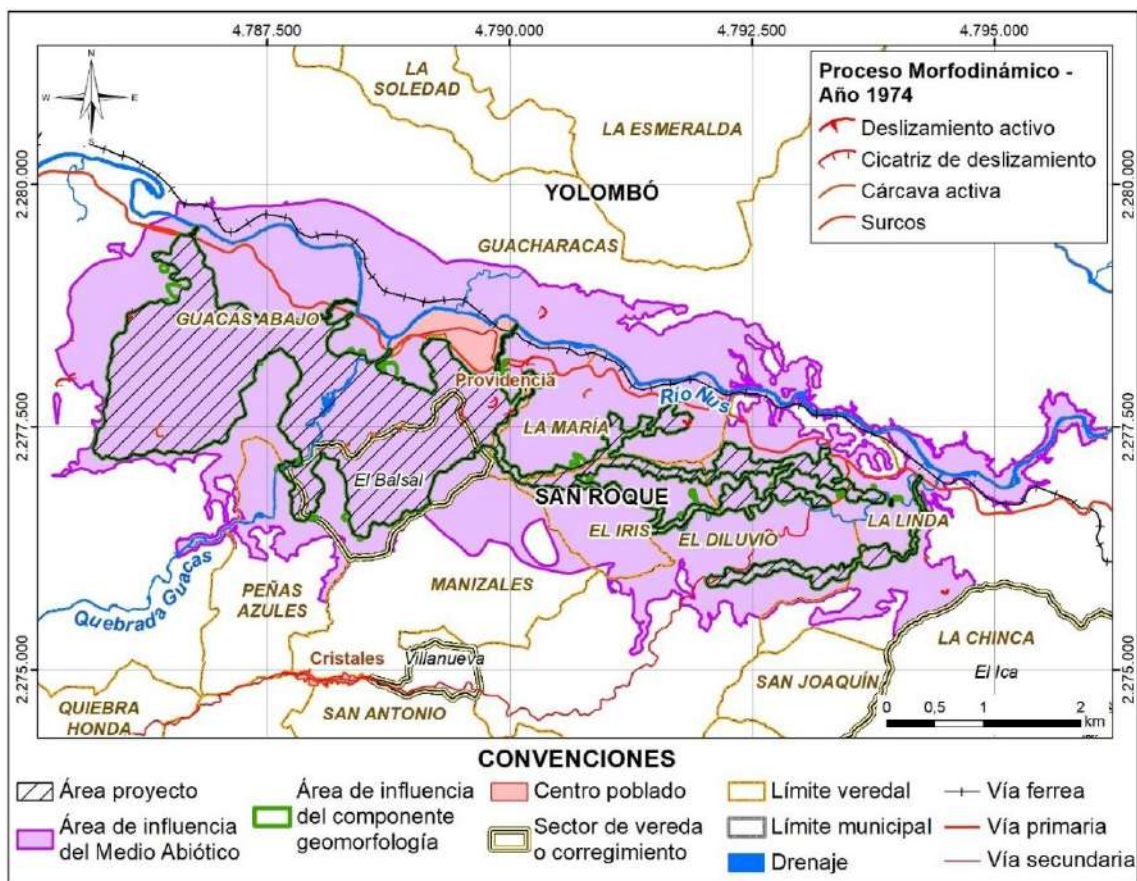


Figura 5.1.2.16 Mapa de procesos morfodinámicos del año 1974.

Fuente: Integral S.A., 2026

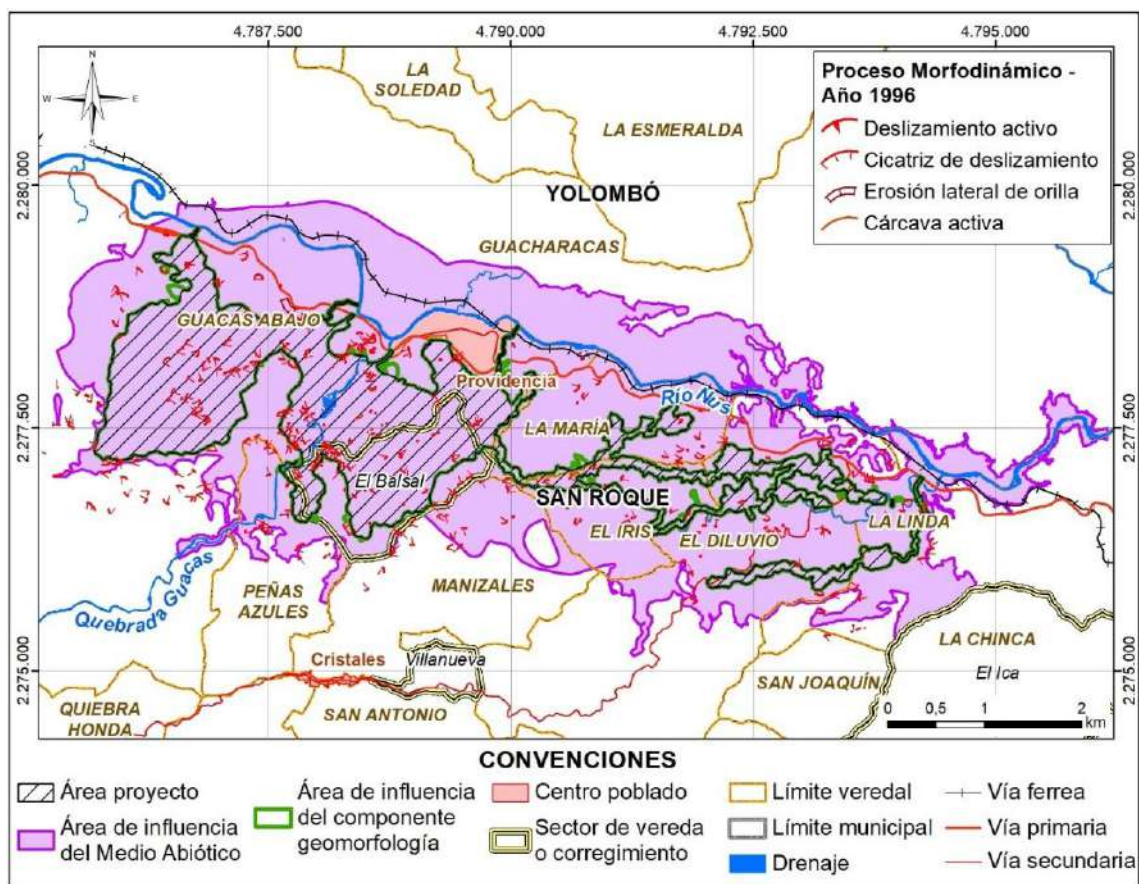


Figura 5.1.2.17 Mapa de procesos morfodinámicos del año 1996.

Fuente: Integral S.A., 2026

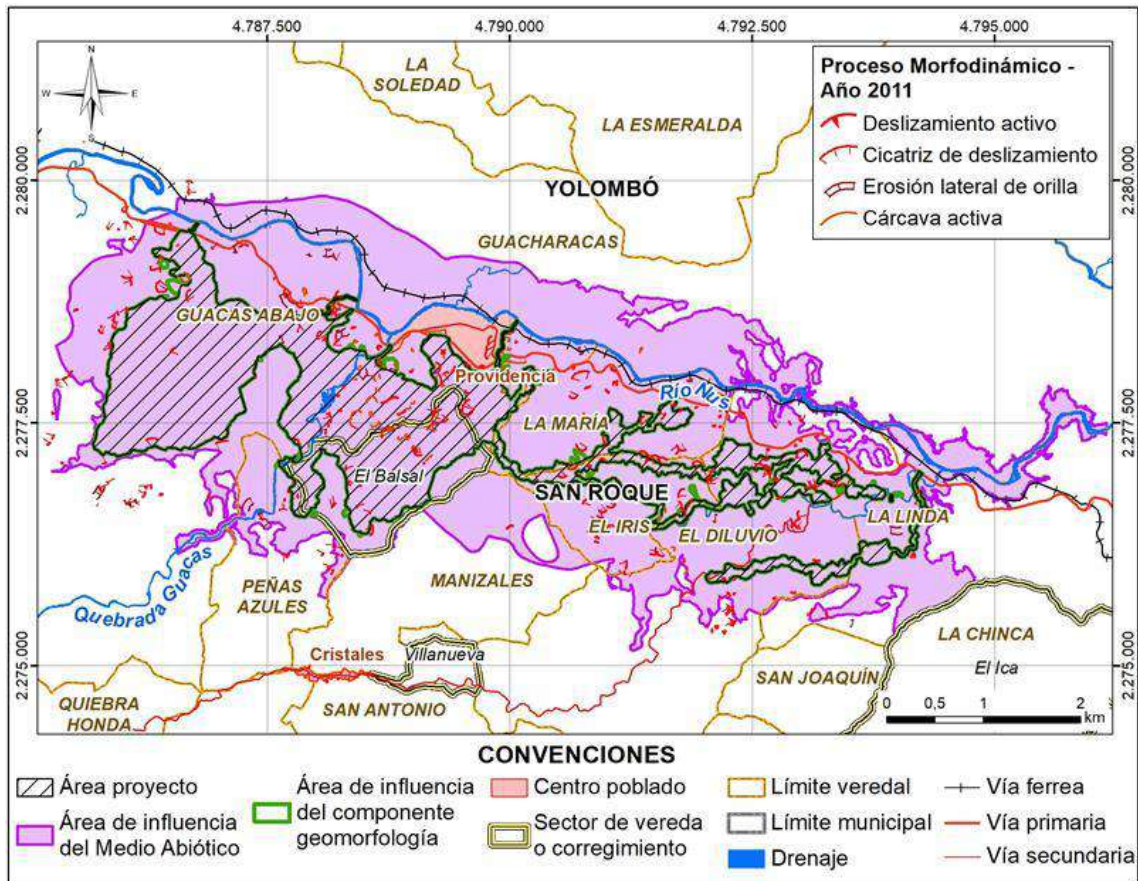


Figura 5.1.2.18 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2011.

Fuente: Integral S.A., 2026

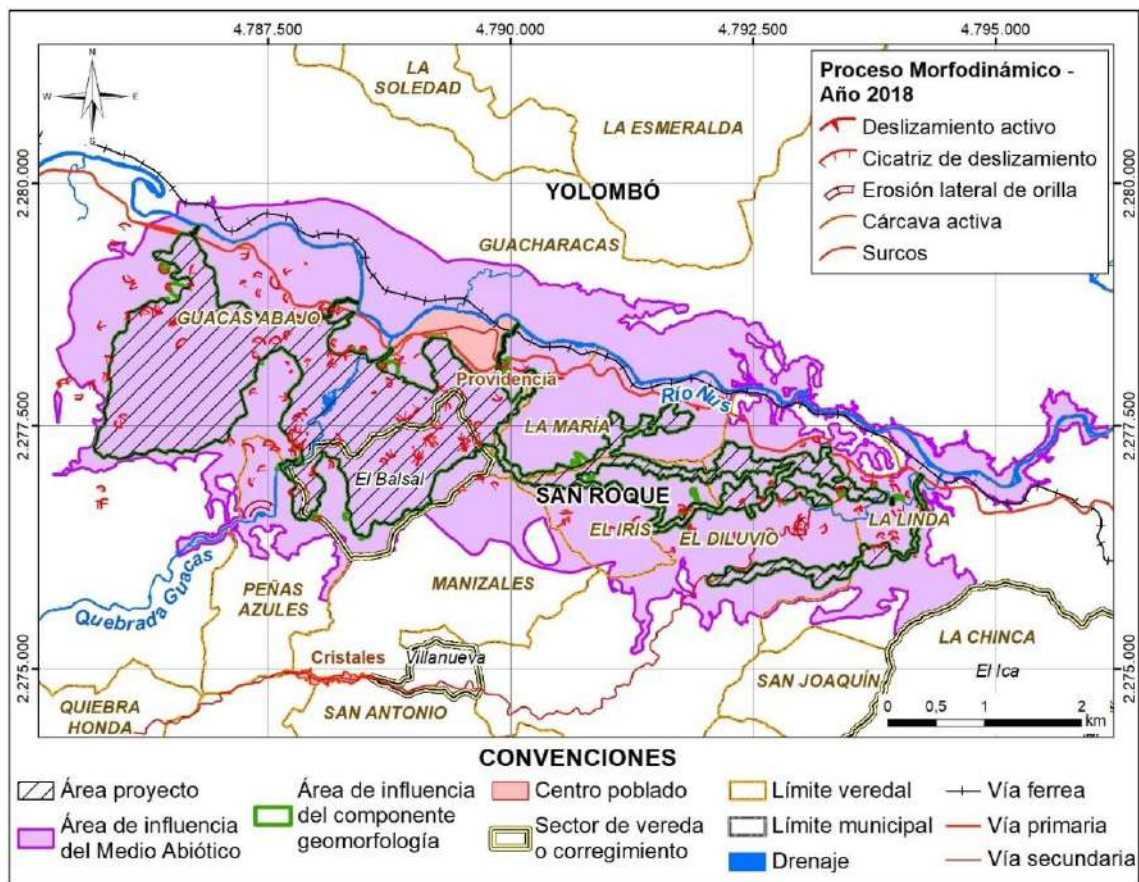


Figura 5.1.2.19

Mapa de procesos morfodinámicos del año 2018

Fuente: Integral S.A., 2026

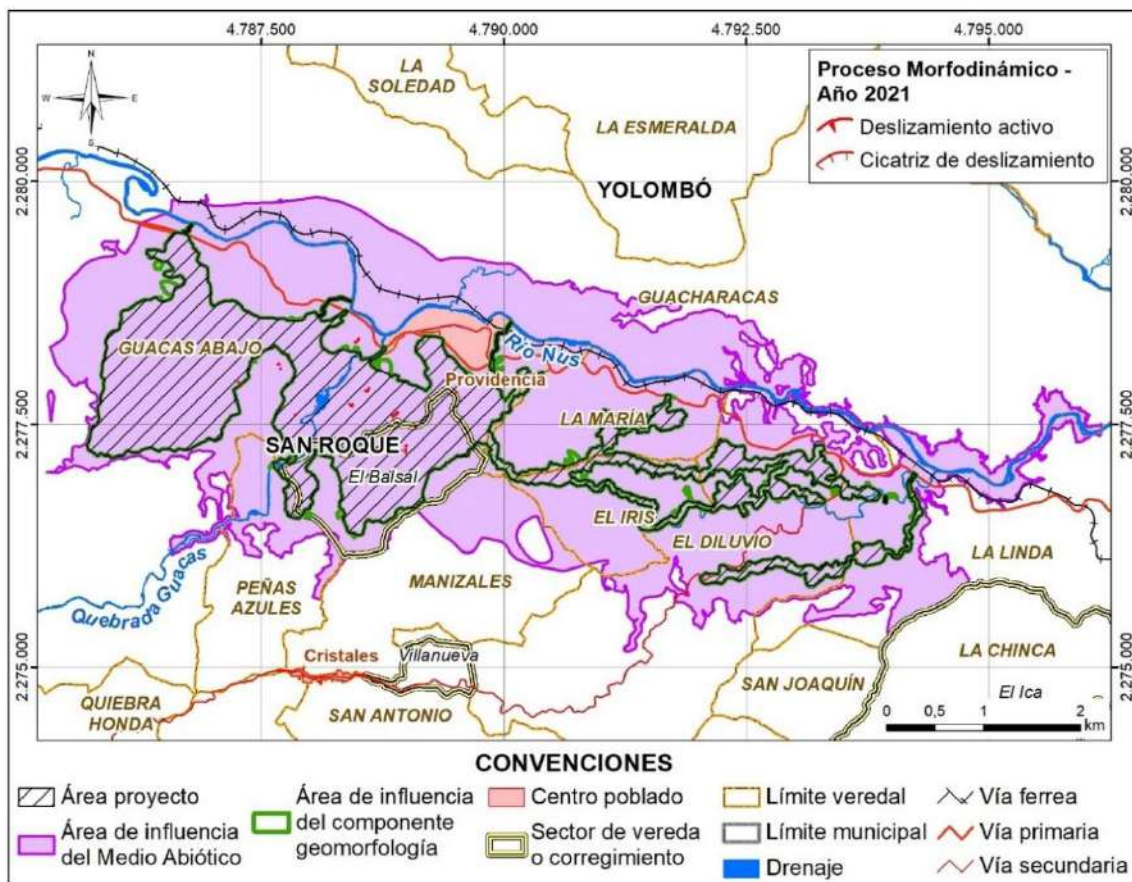


Figura 5.1.2.20

Mapa de procesos morfodinámicos del año 2021

Fuente: Integral S.A., 2026

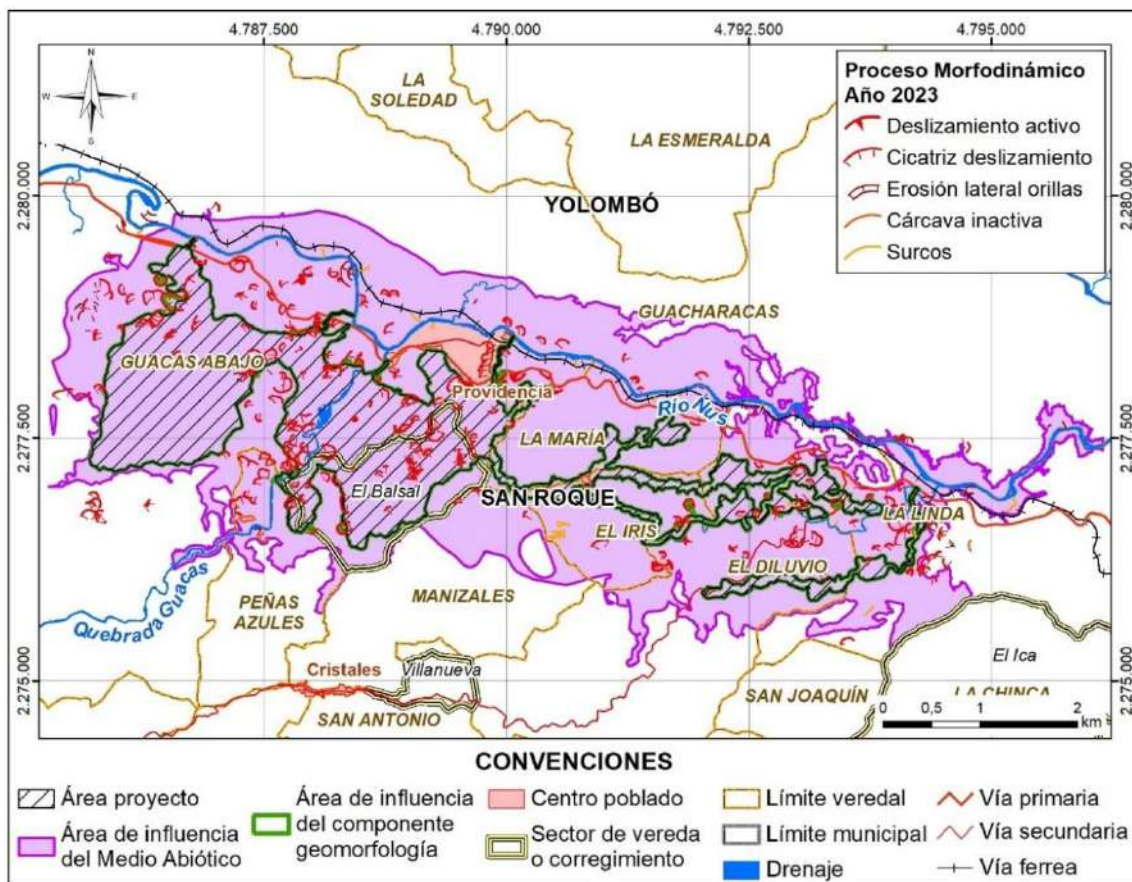


Figura 5.1.2.21

Mapa de procesos morfodinámicos del año 2023

Fuente: Integral S.A., 2026

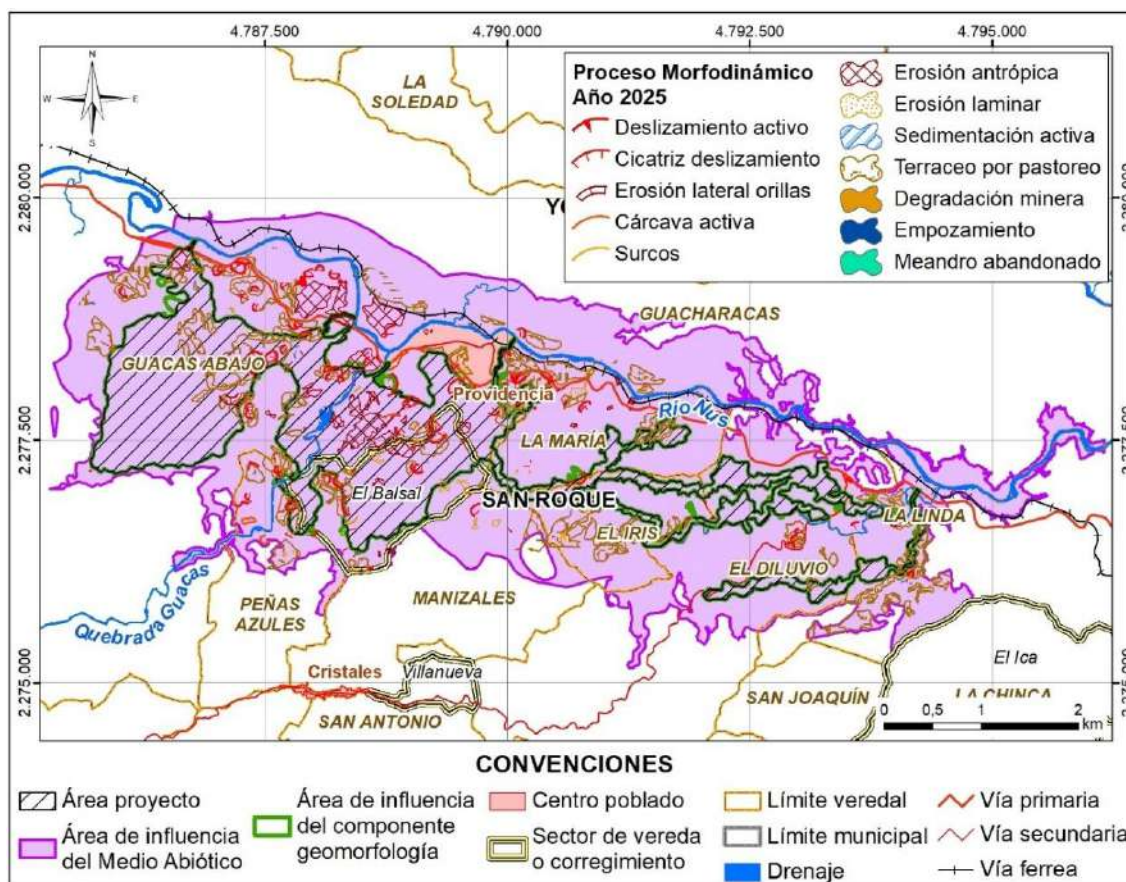


Figura 5.1.2.22 Mapa de procesos morfodinámicos del año 2025

Fuente: Integral S.A., 2026

El análisis multitemporal realizado para los años 1974, 1996, 2011, 2018, 2021, 2023 y 2025 evidencia que los procesos morfodinámicos del área de influencia presentan una distribución heterogénea y están controlados principalmente por la interacción entre las condiciones geomorfológicas del terreno, la dinámica hidrológica de las quebradas y del río Nus, y las intervenciones antrópicas asociadas históricamente a actividades mineras, ganaderas y apertura de vías.

En términos generales, la zona occidental y central del área de estudio concentra la mayor ocurrencia y persistencia de procesos de remoción en masa, erosión y degradación del terreno, particularmente en inmediaciones del cerro Gramalote, las quebradas La Colorada y Guacas. Por el contrario, sectores ubicados hacia la cuenca baja de la quebrada La Palestina muestran un comportamiento relativamente estable durante todo el período analizado.

La evaluación temporal permite identificar tres tendencias principales: (i) persistencia de procesos activos en zonas históricamente inestables; (ii) generación o intensificación de procesos asociados a intervenciones antrópicas, especialmente minería artesanal y uso pecuario; y (iii) recuperación progresiva de algunos sectores mediante revegetalización natural y estabilización superficial de laderas previamente intervenidas.

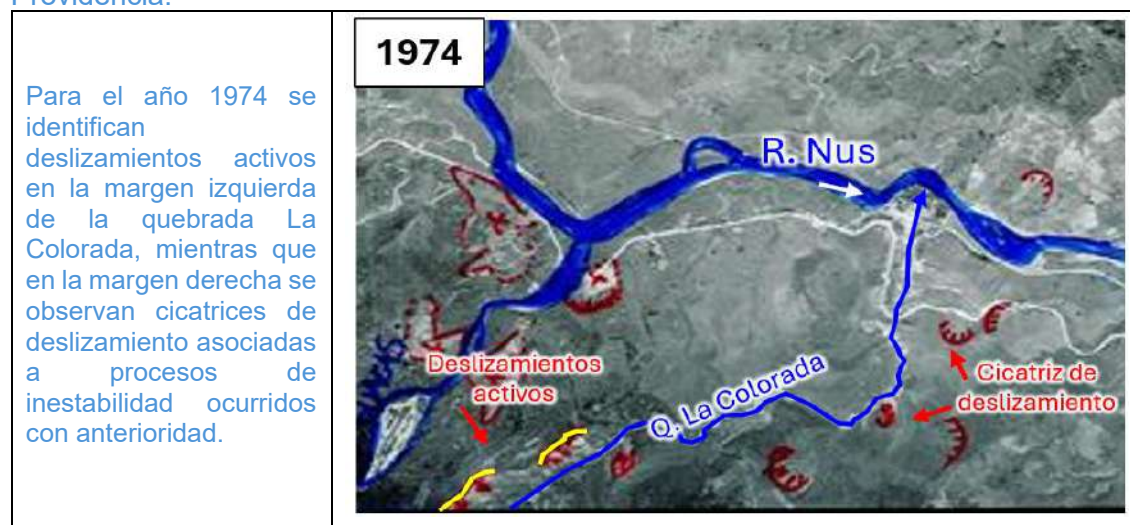
Los resultados evidencian que las mayores transformaciones geomorfológicas observadas a lo largo del periodo analizado están asociadas a actividades antrópicas localizadas, mientras que los procesos naturales presentan una distribución espacial relativamente constante y controlada por las características geomorfológicas e hidrológicas del área.

5.1.2.4.1 Movimientos en masa

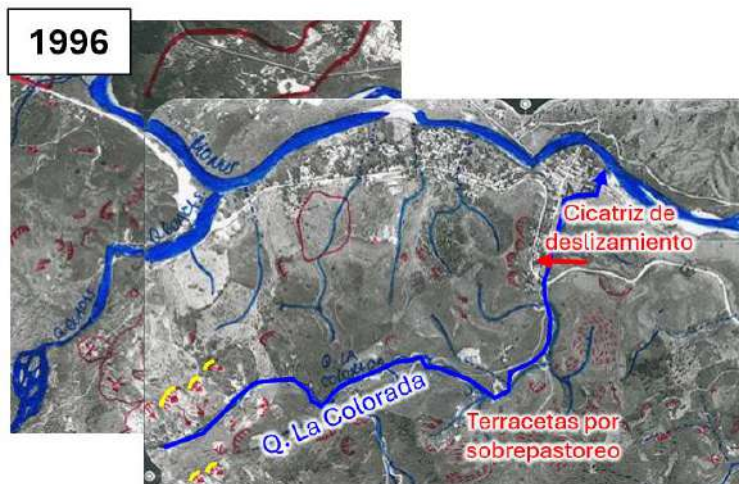
Dentro del área de estudio, estos procesos se concentran principalmente en las laderas asociadas a la quebrada La Colorada, la quebrada Guacas y algunos tramos del corredor vial del río Nus, donde convergen condiciones geomorfológicas e hidrológicas que favorecen la ocurrencia de fenómenos de inestabilidad.

En la Tabla 5.1.2.7 se muestra la evolución en el tiempo de los movimientos en masa activos e inactivos a través de fotografías aéreas e imágenes satelitales correspondientes a los años 1974, 1996, 2011, 2018, 2021, 2023 y 2025, en la zona de la quebrada La Colorada y el sector de Providencia, ubicados sobre la margen derecha del río Nus.

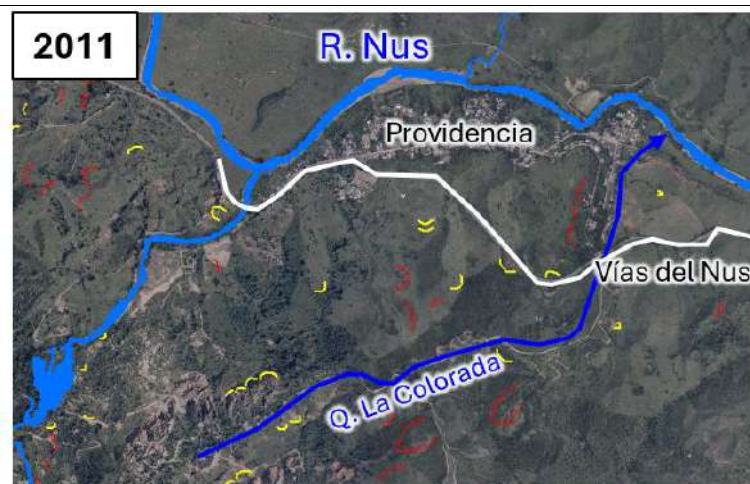
Tabla 5.1.2.7 Análisis multitemporal de procesos de remoción en masa – sector Providencia.

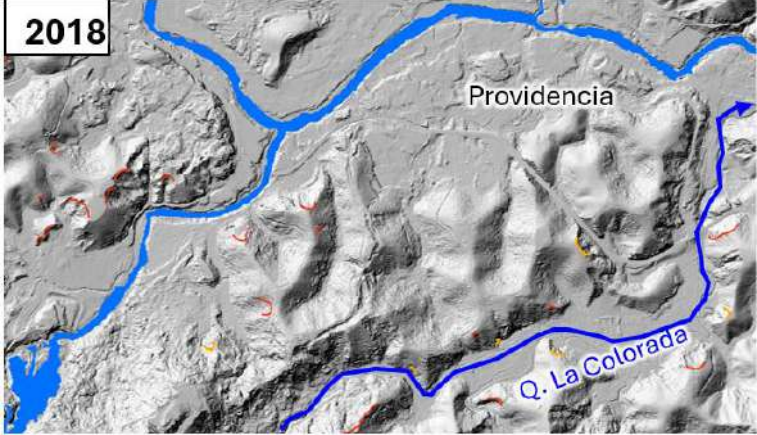


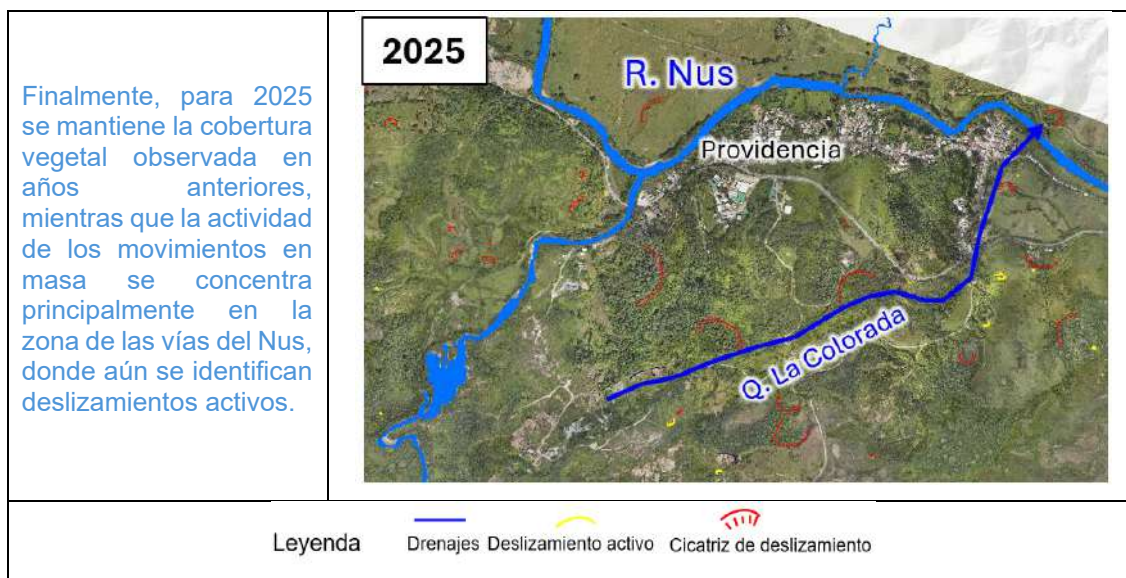
En 1996, los deslizamientos activos de la margen izquierda permanecen evidentes. Adicionalmente, se identifican nuevas cicatrices de deslizamiento en el sector de la desembocadura de la quebrada La Colorada al río Nus. Por su parte, las cicatrices observadas anteriormente en la margen derecha evolucionaron hacia formas tipo terracetos, posiblemente asociadas a procesos de sobrepastoreo.



Para 2011 se registra un incremento de la actividad de los movimientos en masa, evidenciado por la presencia de deslizamientos activos tanto en la margen izquierda como en la margen derecha de la quebrada La Colorada. Asimismo, se identifican procesos activos en el corredor vial del río Nus y en la margen derecha de la quebrada Guacas.



<p>En 2018 persisten los deslizamientos activos en ambas márgenes de la quebrada La Colorada, así como en el sector de las vías del Nus y en la margen derecha de la quebrada Guacas, indicando la continuidad de las condiciones de inestabilidad en la zona.</p>	<p>2018</p> 
<p>Para el año 2021, los movimientos en masa activos se concentran principalmente en la margen derecha de la quebrada La Colorada y en la margen derecha de la quebrada Guacas, observándose una reducción relativa de la actividad en otros sectores.</p>	<p>2021</p> 
<p>En 2023 continúan los deslizamientos activos en la margen derecha de la quebrada La Colorada, la margen derecha de la quebrada Guacas y el corredor vial del río Nus. Adicionalmente, se evidencia un aumento de la cobertura vegetal en varios sectores previamente afectados por procesos de remoción en masa, lo que sugiere procesos parciales de recuperación superficial.</p>	<p>2023</p> 



Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

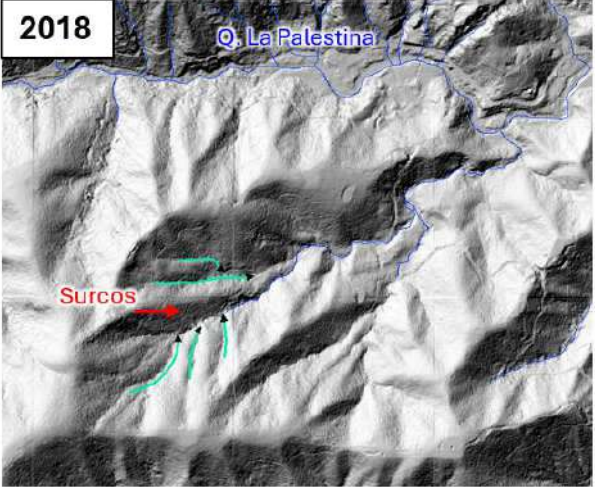
En términos generales, el análisis multitemporal evidencia que los movimientos en masa han constituido uno de los procesos morfodinámicos más persistentes dentro del área de estudio, especialmente en los sectores asociados a la quebrada La Colorada, la quebrada Guacas y el corredor vial del río Nus. Aunque algunos sectores muestran procesos de revegetalización y disminución de la actividad superficial hacia 2025, la recurrencia espacial de los deslizamientos indica la existencia de condiciones geomorfológicas e hidrológicas favorables para su reactivación, por lo que estas áreas continúan representando zonas de atención desde el punto de vista de la estabilidad del terreno

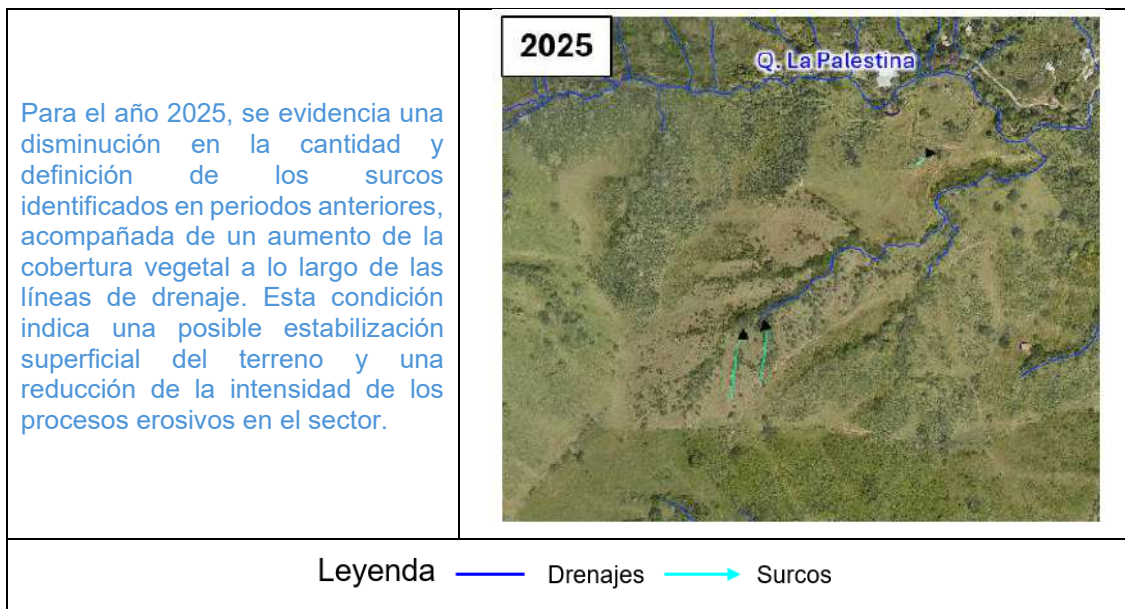
5.1.2.4.2 Erosión en surcos

En el área de estudio este proceso se identificó principalmente en zonas de pastoreo localizadas en la cuenca de la quebrada La Palestina.

En la Tabla 5.1.2.8 se presenta la evolución de los procesos de erosión concentrada, representados por surcos, identificados en la parte alta de un afluente de la quebrada La Palestina, localizado en la margen derecha.

Tabla 5.1.2.8 Procesos de erosión en surco – Afluente quebrada La Palestina

<p>Para el año 2018 se observa una serie de surcos bien definidos en la parte alta del afluente, evidenciando procesos activos de escorrentía superficial concentrada y remoción de suelo.</p>	<p>2018</p> 
<p>En 2023, los surcos continúan siendo visibles en el sector, el cual se encuentra dominado por coberturas de pastos. La persistencia de estas geoformas sugiere la continuidad de los procesos erosivos asociados al uso del suelo y al escurrimiento superficial.</p>	<p>2023</p> 



Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

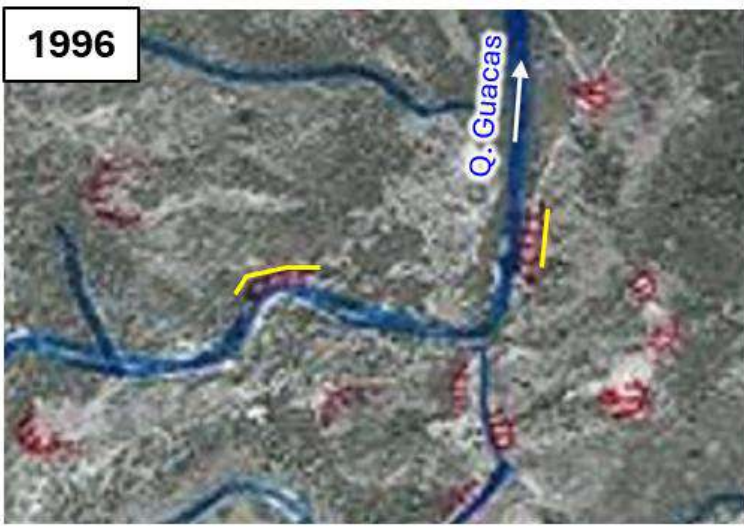
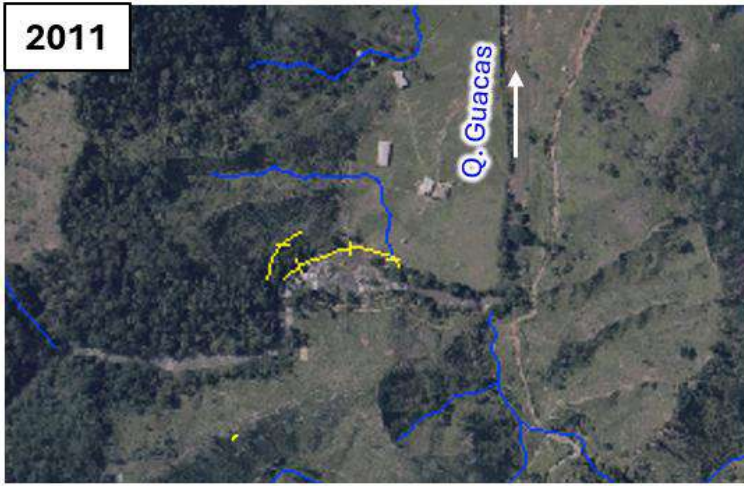
La evolución observada sugiere una reducción progresiva de la intensidad de los procesos de erosión en surcos en el sector analizado, asociada al incremento de la cobertura vegetal y a una mayor protección superficial del suelo. En consecuencia, este proceso presenta una tendencia hacia la estabilización, sin evidencia de expansión espacial significativa durante los últimos periodos evaluados.

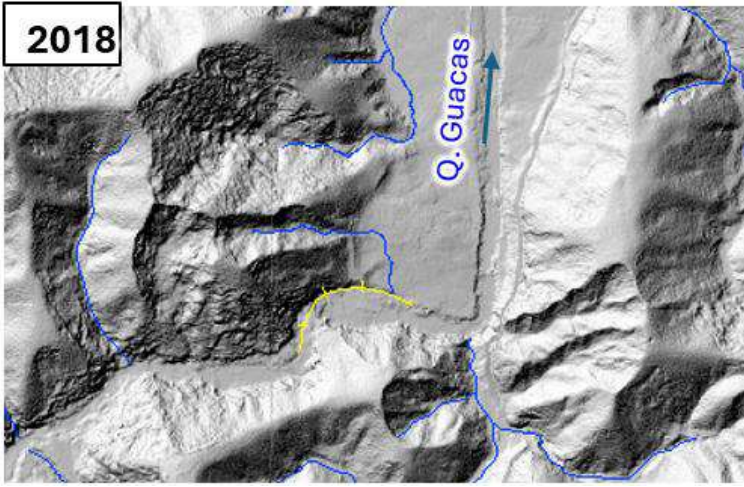
5.1.2.4.3 Erosión lateral de orillas

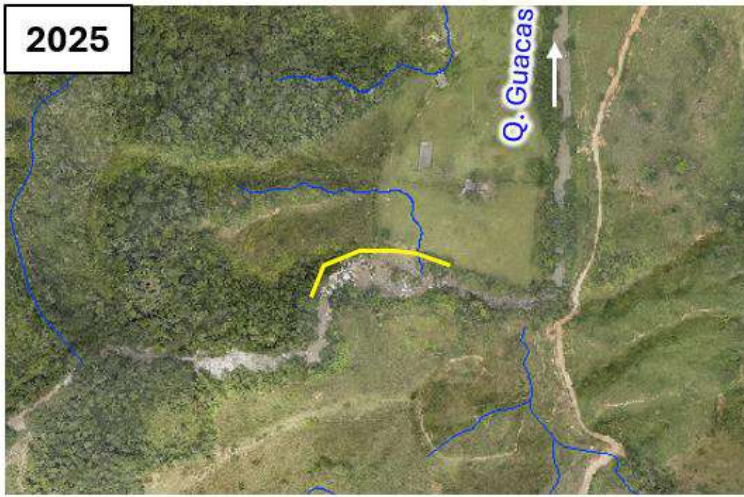
En el área evaluada este proceso se presenta principalmente en la quebrada Guacas, donde la dinámica hidráulica favorece el desgaste localizado de una de sus márgenes.

La Tabla 5.1.2.9 muestra la evolución del proceso de erosión lateral de orillas en la quebrada Guacas, en el sector de la vereda Peñas Azules del municipio de San Roque. El proceso se localiza sobre la margen izquierda del cauce y su comportamiento fue evaluado mediante imágenes correspondientes al periodo comprendido entre 1996 y 2025. A lo largo de los años analizados, el proceso permanece visible en la misma ubicación, evidenciando una condición recurrente de socavación y desgaste de la ribera.

Tabla 5.1.2.9 Proceso de erosión lateral de orillas – Quebrada Guacas, vereda Peñas Azules (San Roque)

<p>Desde 1996 se identifica un sector afectado por erosión lateral de orillas, asociado a la acción permanente del flujo de la quebrada sobre la margen izquierda.</p>	<p>1996</p> 
<p>En 2011 se observa la persistencia del proceso</p>	<p>2011</p> 

<p>En 2018 el proceso persiste</p>	<p>2018</p> 
<p>En 2021 el proceso persiste</p>	<p>2021</p> 

<p>En 2023 el proceso persiste</p>	<p>2023</p> 
<p>En 2025 la erosión lateral continúa manifestándose en el mismo sector, sin evidenciar cambios significativos en su localización general. La persistencia de este proceso sugiere una dinámica fluvial activa que mantiene las condiciones de inestabilidad en la margen afectada.</p>	<p>2025</p> 

Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

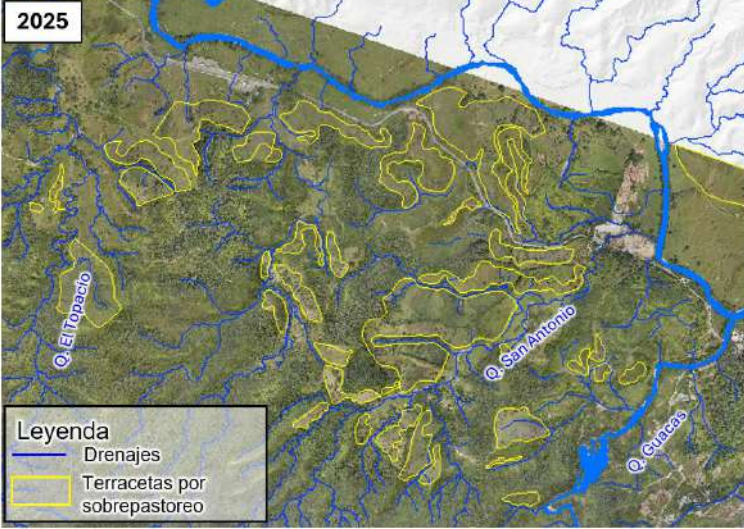
El comportamiento temporal de este proceso muestra una alta persistencia espacial, manteniéndose activo en la misma margen de la quebrada Guacas durante todo el periodo analizado. Lo anterior refleja una dinámica fluvial estable en términos de localización, pero activa desde el punto de vista geomorfológico, en la cual la interacción permanente entre el cauce y la ribera continúa favoreciendo procesos localizados de socavación y erosión lateral.

5.1.2.4.4 Terracetas por sobrepastoreo

En el área de estudio este proceso se concentra sobre las laderas localizadas entre las quebradas El Topacio y Guacas. La Tabla 5.1.2.10 presenta la evolución de las

terracetas por sobrepastoreo identificadas en la margen derecha del río Nus, en el tramo comprendido entre las quebradas El Topacio y Guacas.

Tabla 5.1.2.10 Procesos de terracetas por sobrepastoreo – Sector quebrada El Topacio y Guacas

<p>Para el año 2023 se observa una amplia presencia de terracetas asociadas a actividades de pastoreo, las cuales cubren un área significativa sobre laderas con predominio de cobertura en pastos. Estas geoformas reflejan la modificación progresiva del terreno producto del tránsito recurrente de ganado sobre pendientes.</p>	 <p>2023</p>
<p>En 2025 se evidencia un incremento en la extensión de las áreas afectadas por este proceso, registrándose una mayor cobertura de terracetas respecto al periodo anterior. Su distribución continúa estando estrechamente relacionada con las zonas ocupadas por pastos, lo que sugiere la persistencia e intensificación de las actividades de pastoreo en el sector.</p>	 <p>2025</p> <p>Leyenda Drenajes Terracetas por sobrepastoreo</p>

Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

El incremento en la extensión de las terracetas entre los años evaluados evidencia la continuidad de las actividades ganaderas sobre laderas y su influencia directa en la modificación del relieve superficial. La evolución temporal observada sugiere que este proceso continúa activo y estrechamente relacionado con el uso actual del suelo, constituyéndose en un indicador de presión antrópica sobre las pendientes intervenidas.

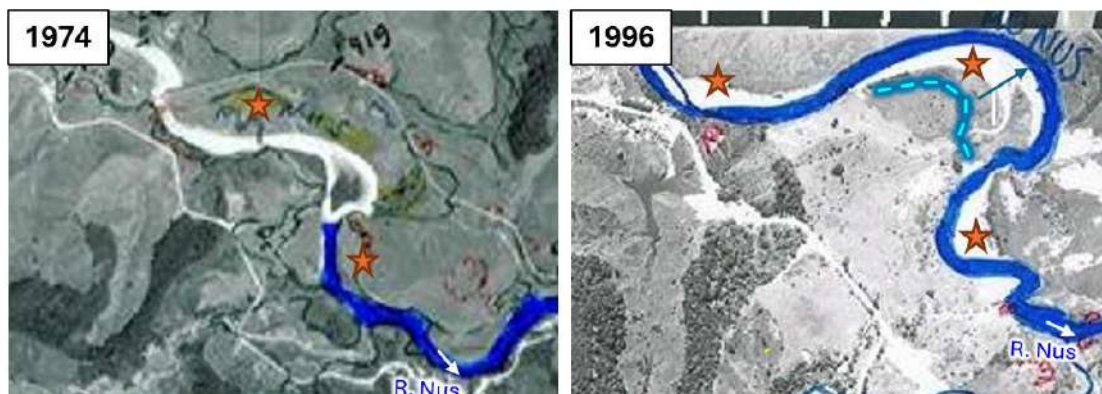
5.1.2.4.5 Procesos de sedimentación activa

En el área de estudio los procesos de sedimentación activa se desarrollan principalmente en el río Nus, donde el patrón meándrico favorece la generación periódica de nuevas zonas de depósito.

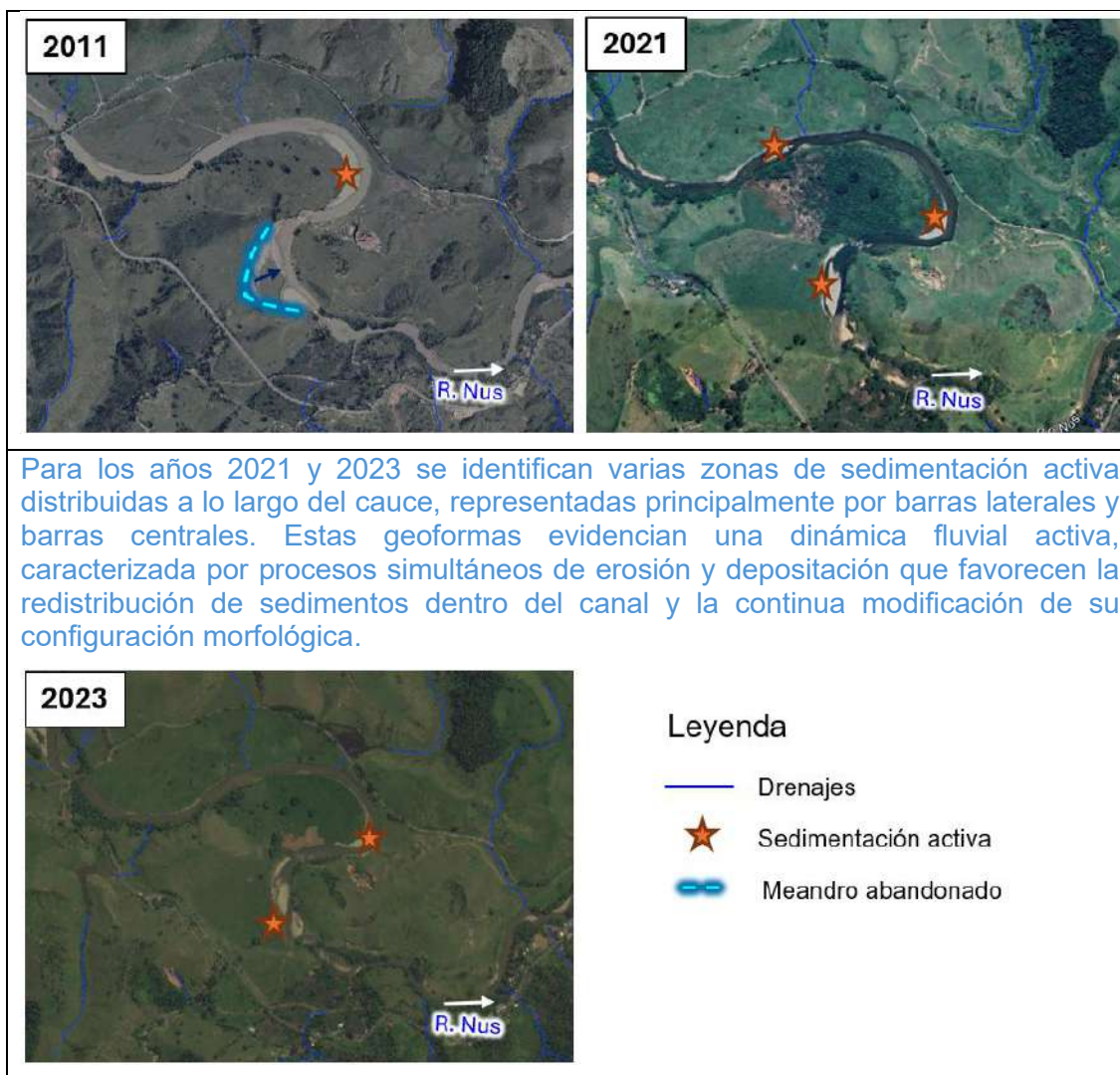
La Tabla 5.1.2.11 muestra la evolución de los procesos de sedimentación activa en el río Nus, en el sector de la desembocadura de la quebrada La Bella. En este tramo, el río presenta un patrón meándrico, caracterizado por una dinámica fluvial activa que favorece la migración lateral del cauce y la formación de zonas de sedimentación que varían espacialmente a lo largo del tiempo

Tabla 5.1.2.11 Sedimentación activa

Entre 1974 y 1996 se evidencia una migración del cauce principal hacia el noreste (NE), proceso que dio lugar al abandono de un meandro y a la formación de depósitos sedimentarios asociados a la antigua trayectoria del río.



Para el periodo comprendido entre 1996 y 2011, se observa una nueva migración lateral del cauce en un sector localizado aguas abajo del meandro anteriormente abandonado. Esta dinámica favoreció el desarrollo de otro meandro y la generación de nuevas áreas de acumulación de sedimentos, reflejando la continua reorganización morfológica del río.



Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

La evolución de los depósitos sedimentarios y de la geometría del cauce evidencia una dinámica fluvial natural asociada a los procesos de migración lateral del río Nus. Los cambios observados corresponden a mecanismos propios de ajuste morfológico del cauce y reflejan la permanente interacción entre erosión y sedimentación que caracteriza este sistema fluvial a lo largo del tiempo.

5.1.2.4.6 Zonas de degradación

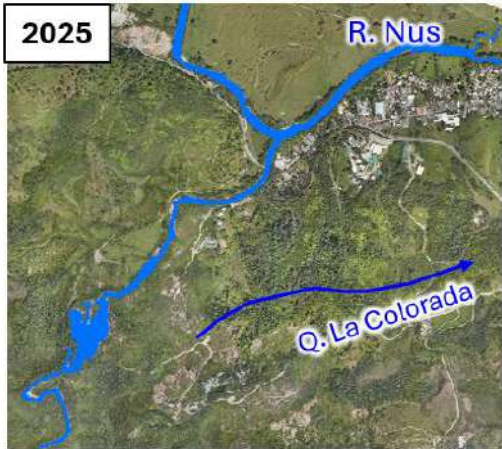
Agrupar sectores en los cuales, a lo largo del tiempo estudiado, se observa evolución de los procesos morfodinámicos, o sea una mayor inestabilidad, detonada por intervención antrópica, en los sectores intervenidos por minería artesanal. En estas zonas con

escasa cobertura vegetal se reduce la resistencia del suelo por descenso de las propiedades geotécnicas. Esto favorece la aparición o reactivación de procesos morfodinámicos. En la Tabla 5.1.2.12 se presenta la evolución de la zona de degradación en el sector de la quebrada La Colorada.

Tabla 5.1.2.12 Áreas de intervención minera en el sector del Cerro Gramalote

<p>Zonas de degradación identificadas en 1974, en el sector de la desembocadura de la quebrada Guacas</p>	<p>1974</p> 
<p>En 1996 la zona de degradación se ubica en la zona de la quebrada La Colorada</p>	<p>1996</p> 

<p>En 2011 el proceso de degradación se mantiene constante</p>	<p>2011</p> 
<p>En los años 2021 y 2023 se presenta una degradación marcada del terreno en el sector del Cerro Gramalote y áreas aledañas a las quebradas Guacas y La Colorada</p>	<p>2021</p> 
	<p>2023</p> 

<p>En el año 2025 se aprecia un aumento en la cobertura vegetal</p>	<p>2025</p> 
---	---

Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

También se observa una degradación del terreno por actividades antrópicas hacia la desembocadura de la quebrada San Antonio sobre la ribera derecha del río Nus (Tabla 5.1.2.13).

Tabla 5.1.2.13 Erosión antrópica sobre la ribera derecha del río Nus con progresión entre los años 1974 y 2025

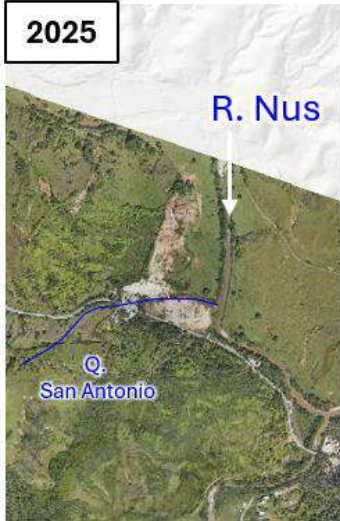
<p>En el año 1974 se observa una dinámica fluvial del río Nus hacia la ribera derecha que en la actualidad hace parte de una terraza aluvial baja. En la margen izquierda de la quebrada San Antonio no se observa modificación antrópica. Mientras que en la margen izquierda se aprecia un polígono de erosión antrópica, señalado en color rojo</p>	<p>1974</p> 
--	--

En el año 1996, en la margen izquierda de la Q. San Antonio se observan áreas puntuales con modificación antrópica. En la margen derecha se aprecian cicatrices de deslizamiento.



En 2011 ambas márgenes se aprecia un aumento en la cobertura vegetal



<p>Hacia el año 2023 se evidencia la modificación antrópica en el sector de la desembocadura de la quebrada San Antonio</p>	<p>2023</p> 
<p>El proceso persiste en el año 2025</p>	<p>2025</p> 

Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026

El análisis multitemporal permite establecer una relación directa entre la intensificación de los procesos morfodinámicos y las actividades antrópicas desarrolladas en el área, particularmente la minería artesanal. Los sectores asociados al cerro Gramalote y a las quebradas La Colorada, Guacas y El Balsal concentran la mayor evolución de las áreas degradadas, mostrando una tendencia hacia el incremento de las superficies afectadas y de los procesos de inestabilidad asociados.

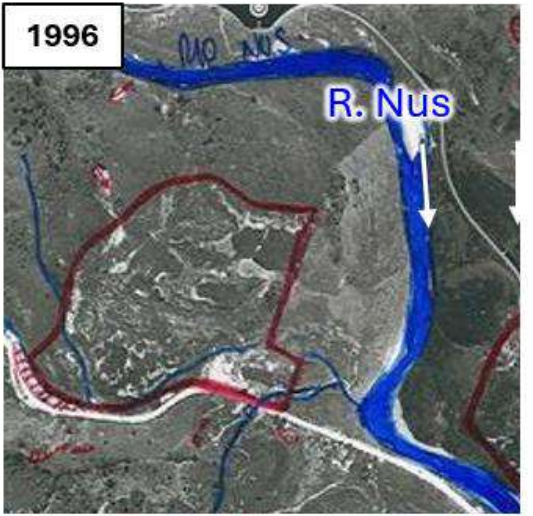
5.1.2.4.7 Zonas de recuperación

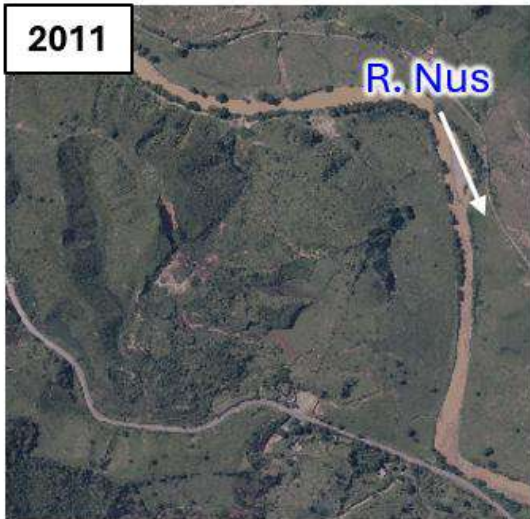
Son aquellas áreas que se encontraban afectadas por procesos morfodinámicos activos en los años 1974 y 1996, y que para los años 2011, 2023 y 2025 se mostraron inactivos.

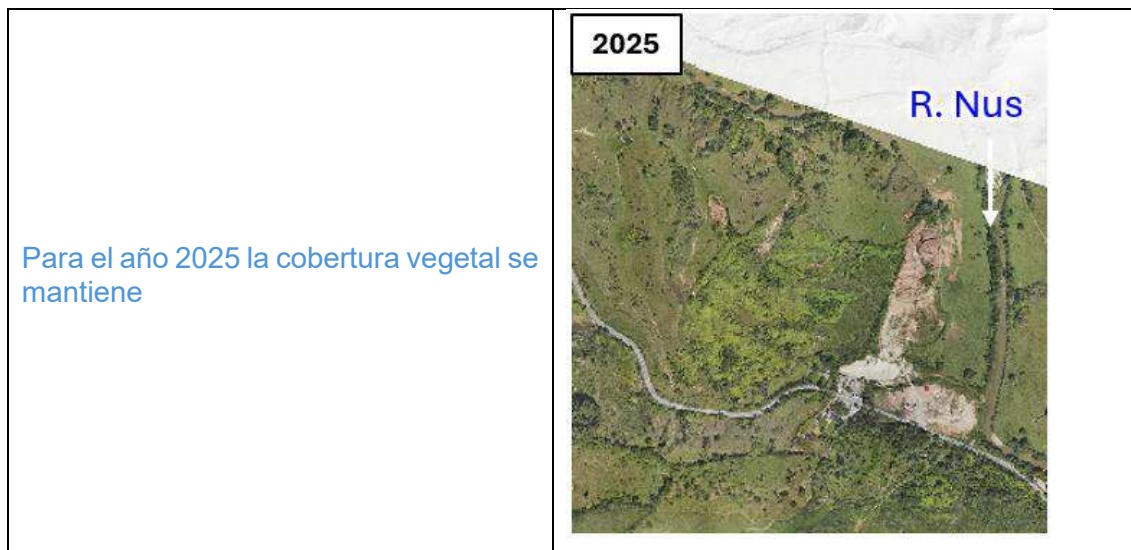
Esta recuperación se observa por el progreso de vegetación que asiste la estabilidad de la ladera.

En la Tabla 5.1.2.14 se presenta la evolución de una zona de recuperación se encuentra hacia el occidente de la desembocadura de la quebrada San Antonio al río Nus.

Tabla 5.1.2.14 Área con intervención minera en cercanías a la quebrada San Antonio con recuperación progresiva

<p>En el año 1974 se observa que la zona de la desembocadura de la quebrada San Antonio se encuentra sin intervención</p>	<p>1974</p> 
<p>Para el año 1996, se observa una afectación del terreno debido a la actividad minera artesanal</p>	<p>1996</p> 

<p>Para el año 2011 muestra una disminución en la extensión del área afectada y una recuperación de la ladera.</p>	<p>2011</p> 
<p>En el año 2023 observa un aumento en la densidad de la cobertura vegetal secundaria con únicamente un proceso morfodinámico de carcavamiento aislado de baja área en la periferia de este sector</p>	<p>2023</p> 

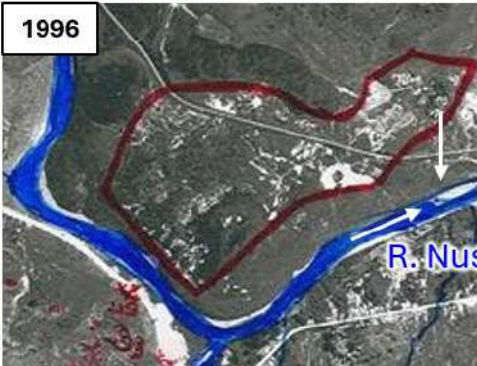


Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026.

Entre las quebradas San Antonio y Guacas y sobre la ribera izquierda del río Nus de ese tramo, se observa una reducción en la extensión del área afectada por minería entre los años 1974 y 2025 (Tabla 5.1.2.15).

Tabla 5.1.2.15 Área con intervención minera sobre la ribera izquierda del río Nus y al frente de la desembocadura de la quebrada Guacas



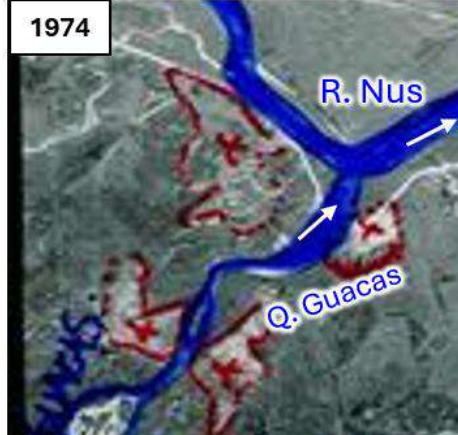
<p>Aumento de la erosión antrópica en la margen izquierda del río Nus</p>	<p>1996</p> 
<p>Se observa una reducción en la extensión del área afectada por minería</p>	<p>2011</p> 
<p>Se mantiene la zona sin intervención y con cobertura vegetal</p>	<p>2021</p> 
<p>Se mantiene la zona sin intervención y con cobertura vegetal</p>	<p>2023</p> 

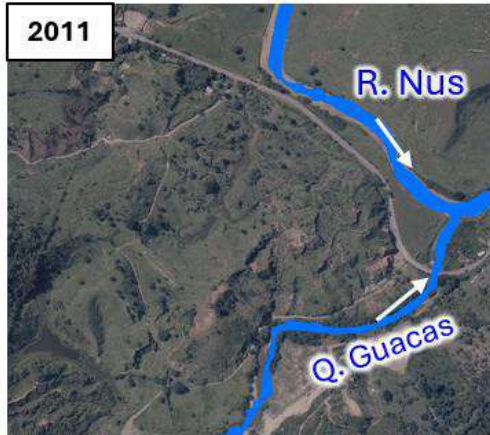
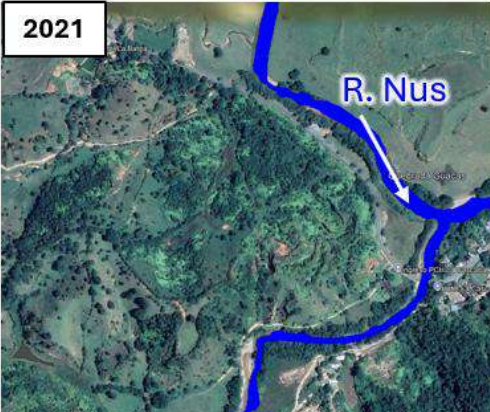
<p>Se mantiene la zona sin intervención y con cobertura vegetal</p>	<p>2025</p> 
---	--

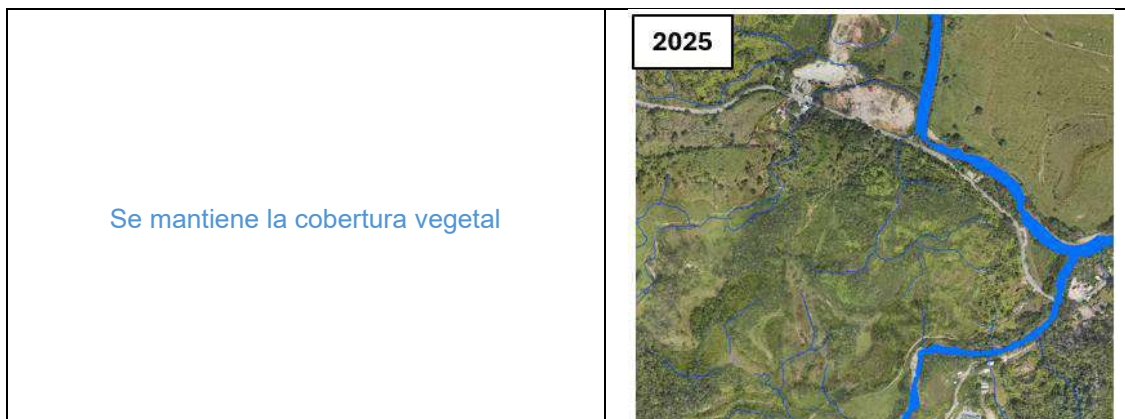
Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026.

En la Tabla 5.1.2.16 se presenta un sector hacia la desembocadura de la quebrada Guacas con rasgos relictos de actividad minera a través del tiempo.

Tabla 5.1.2.16 Áreas de intervención minera con progresiva recuperación en el tiempo (sector hacia la desembocadura de la quebrada Guacas)

<p>Áreas identificadas con erosión antrópica en el sector de la desembocadura de la quebrada Guacas</p>	<p>1974</p> 
<p>Evolución de la zona con evidencias de procesos morfodinámicos</p>	<p>1996</p> 

<p>Se observa un aumento en la densidad de coberturas vegetales secundarias</p>	<p>2011</p> 
<p>Se mantiene la cobertura vegetal</p>	<p>2021</p> 
<p>Se mantiene la cobertura vegetal</p>	<p>2023</p> 



Fuente: Modificado por Integral S.A., 2026.

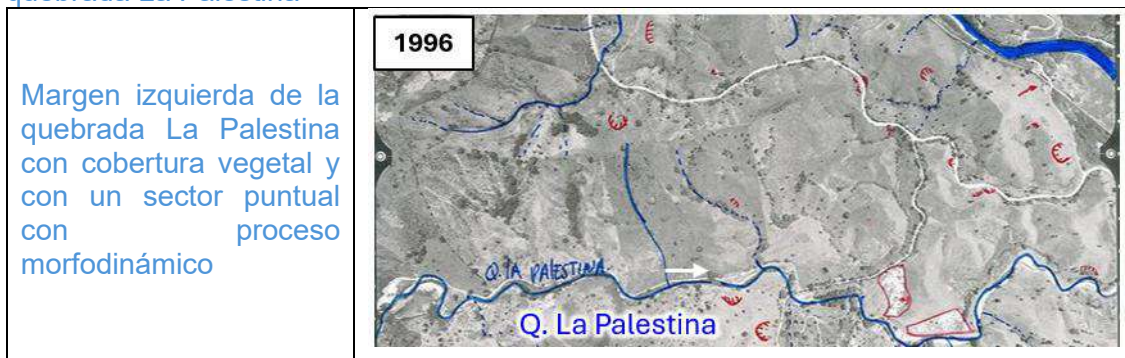
Los sectores identificados como zonas de recuperación evidencian una disminución progresiva de las áreas intervenidas y un incremento de las coberturas vegetales secundarias a través del tiempo. Esta evolución indica una tendencia favorable hacia la estabilización superficial del terreno y demuestra la capacidad de recuperación natural de algunas áreas previamente afectadas por actividades mineras y procesos erosivos localizados

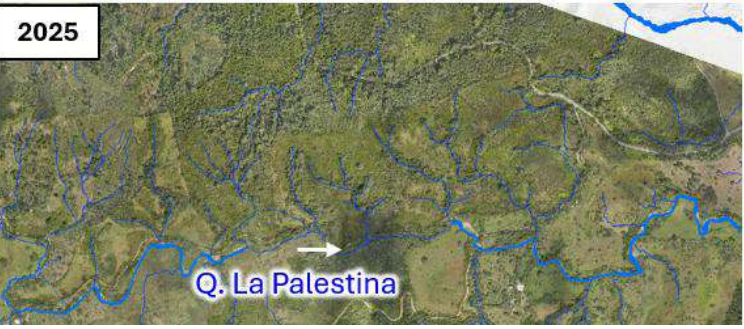
5.1.2.4.8 Zonas estables

Corresponde a aquellas que se han mantenido estables a lo largo del tiempo analizado. También involucran sectores con procesos morfodinámicos inactivos que se mantuvieron en ese estado durante el periodo del análisis multitemporal.

La Tabla 5.1.2.17 muestra la evolución de la margen izquierda de la quebrada La Palestina, en la cual predomina el aumento de vegetación y baja presencia de procesos morfodinámicos.

Tabla 5.1.2.17 Zona estable entre el periodo 1996 – 2025 en la cuenca baja de la quebrada La Palestina



Margen con cobertura de pastos	<p>2011</p> 
Aumento de bosque de galería	<p>2021</p> 
Aumento de vegetación secundaria	<p>2023</p> 
Aumento general de la vegetación	<p>2025</p> 

Fuente: Modificado por Integral S.A, 2026.

La permanencia de amplios sectores sin cambios significativos en la distribución de los procesos morfodinámicos constituye una evidencia de estabilidad geomorfológica durante el periodo analizado. Estas áreas conservan condiciones similares a las observadas en los registros históricos más antiguos y no presentan señales de generación o expansión de procesos activos, lo que permite considerarlas como sectores de comportamiento relativamente estable dentro del contexto regional.

5.1.2.5 Susceptibilidad ante la ocurrencia de procesos erosivos

Los suelos y materiales que conforman los terrenos, en general, tienen una respuesta diferente a los procesos erosivos, esto según aspectos propios como la litología y mineralogía o por factores externos como la tasa de precipitación, la pendiente del terreno o la cobertura vegetal.

Una de las formas para calcular la erosión es utilizar el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) descrito por Wischmeier & Smith, (1978) este evalúa los efectos del clima, suelo, topografía, cultivos y prácticas de conservación en la erosión de una pendiente o en una cuenca; la otra forma de evaluar este proceso es calculando la susceptibilidad a la erosión, definida como la capacidad de un área para ser modificada o afectada por factores externos, en su propensión para erosionarse (Empresas Públicas de Medellín, 2006) y es esta la forma que se empleará para este estudio.

Una vez definida la USLE, los estudios para predecir la pérdida de suelos por erosión hídrica han seguido, esencialmente dos vías. De una parte, acomodar la USLE a las situaciones específicas de diferentes países, haciendo, con ello, modificaciones en algunos de sus factores. De otra, formulando nuevas ecuaciones tendentes a predecir la producción de sedimentos en una cuenca. Con ello, se ha iniciado un nuevo proceso hacia el establecimiento de predicciones basadas en modelos físicos detallados, que simulen la erosión como un proceso dinámico y describan el movimiento del suelo a lo largo de una pendiente, y no solo a través de relaciones empíricas combinadas con ecuaciones (Ceballo & Toro, 2012).

El modelo USLE aplicado en un ambiente SIG puede servir de marco para la modelación de fenómenos naturales y socioeconómicos complejos, tales como el cálculo de la pérdida por celda. Este fenómeno puede combinarse con una modelación dinámica utilizando la estimación de la erosión, mediante la reclasificación de los parámetros derivados de los factores topográficos y repitiendo las simulaciones en un número de etapas (Geler, Ligtenberg, & Rolf, 2004).

En el año de 1996, Empresas Públicas de Medellín (EPM) en su estudio “Diagnóstico actividad y susceptibilidad erosiva Proyecto Porce II” evaluó la susceptibilidad a la erosión para la zona de influencia del proyecto hidroeléctrico de Porce II, tomando como modelo inicial de erosión la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE) y a partir del cual llevan a cabo análisis estadísticos para definir el modelo matemático con el cual se calcularía la susceptibilidad a los procesos erosivos (Ceballo & Toro, 2012). Para la validación del modelo, se analizaron 25 variables independientes y con datos de campo.

A raíz de la evaluación realizada por (Empresas Públicas de Medellín, 2006) se consideró que la ecuación más indicada para el cálculo de la susceptibilidad a la erosión es la presentada en la Ecuación 5.1 siendo esta una modificación a la USLE desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) y Ceballos & Toro, (2012).

$$Se = 0,162 \times V + 0,0092 \times Lm + 0,0057 \times Es + 0,0187 \times s + 0,023 \times Geo + 0,228$$

Ecuación 5.1 Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo

Donde:

V: Vegetación

Lm: Lluvia

Es: Escorrentía

s: Pendiente

Geo: Geología

La modificación a la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE) define la susceptibilidad a la erosión (Se) en función de cinco parámetros, algunos con características propias de los terrenos y otros asociados a agentes externos como los meteorológicos.

5.1.2.5.1 Parámetros de la susceptibilidad por procesos erosivos

Los parámetros que intervienen para el cálculo de la susceptibilidad por procesos erosivos son: vegetación (V), lluvia o precipitación (Lm), escorrentía (Es), pendiente del terreno (s) y geología (Geo). A continuación, se explica cada uno de ellos y se presentan los valores tomados para el análisis dentro del área de influencia del proyecto, siguiendo la metodología usada por (Ceballos & Toro, 2012).

A. Parámetro vegetación (V)

Las coberturas vegetales conforman el insumo principal para la calificación del parámetro Vegetación (V). A cada tipo de cobertura se le asigna una calificación para el parámetro V según su susceptibilidad a los procesos erosivos, siendo 1 el menor grado de susceptibilidad (Muy baja) y 5 el mayor grado de susceptibilidad (Muy alta). Las coberturas vegetales presentes en el área de influencia se presentan en la Tabla 5.1.2.18, a las cuales se les asigna un peso de susceptibilidad definido por los expertos teniendo en cuenta las características de cada tipo de cobertura y su protección al suelo.

Tabla 5.1.2.18 Calificación del parámetro Vegetación (V)

Cobertura de la tierra	Peso	Calificación
Bosque de galería y/o ripario	2	Baja
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	2	Baja

Cobertura de la tierra	Peso	Calificación
Cultivo permanente herbáceos - Caña	3	Media
Mosaico de Cultivos	3	Media
Pastos arbolados	3	Media
Pastos enmalezados	3	Media
Pastos limpios	4	Alta
Ríos (50 m)	1	Muy baja
Red vial y territorios asociados	1	Muy baja
Tejido urbano continuo	3	Media
Tejido urbano discontinuo	3	Media
Tierras desnudas y degradadas	5	Muy alta
Vegetación secundaria alta	2	Baja
Vegetación secundaria baja	2	Baja
Zonas industriales o comerciales	1	Muy baja
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	1	Muy baja
Zonas arenosas naturales	4	Alta
Zonas de extracción minera	5	Muy alta
Aeropuerto	1	Muy baja

Fuente: Integral S.A., 2025

En la [Figura 5.1.2.23](#) y [Figura 5.1.2.24](#) se observa la distribución de las coberturas en el área de influencia tras haber sido calificadas según los valores previamente establecidos.

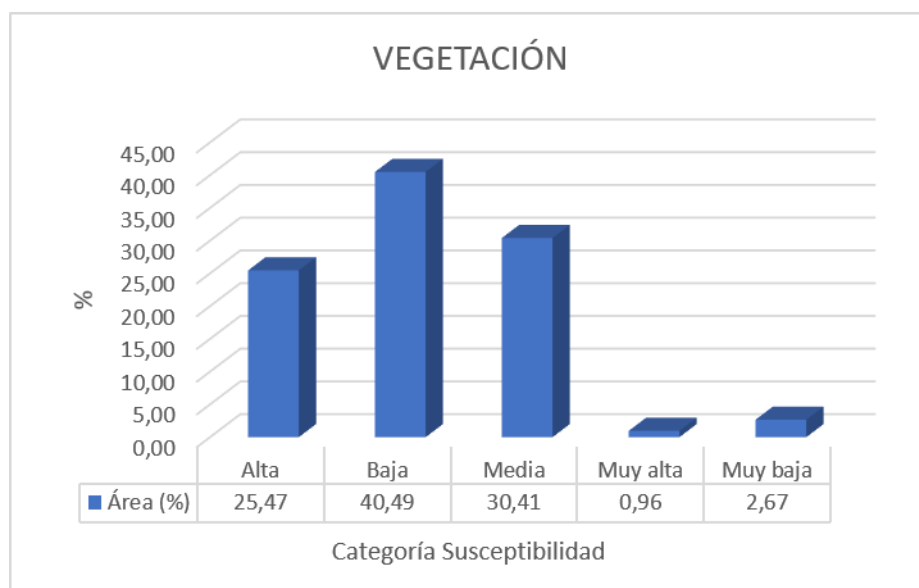


Figura 5.1.2.23 Distribución de susceptibilidad por vegetación en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental
Fuente: Integral S.A., 2025

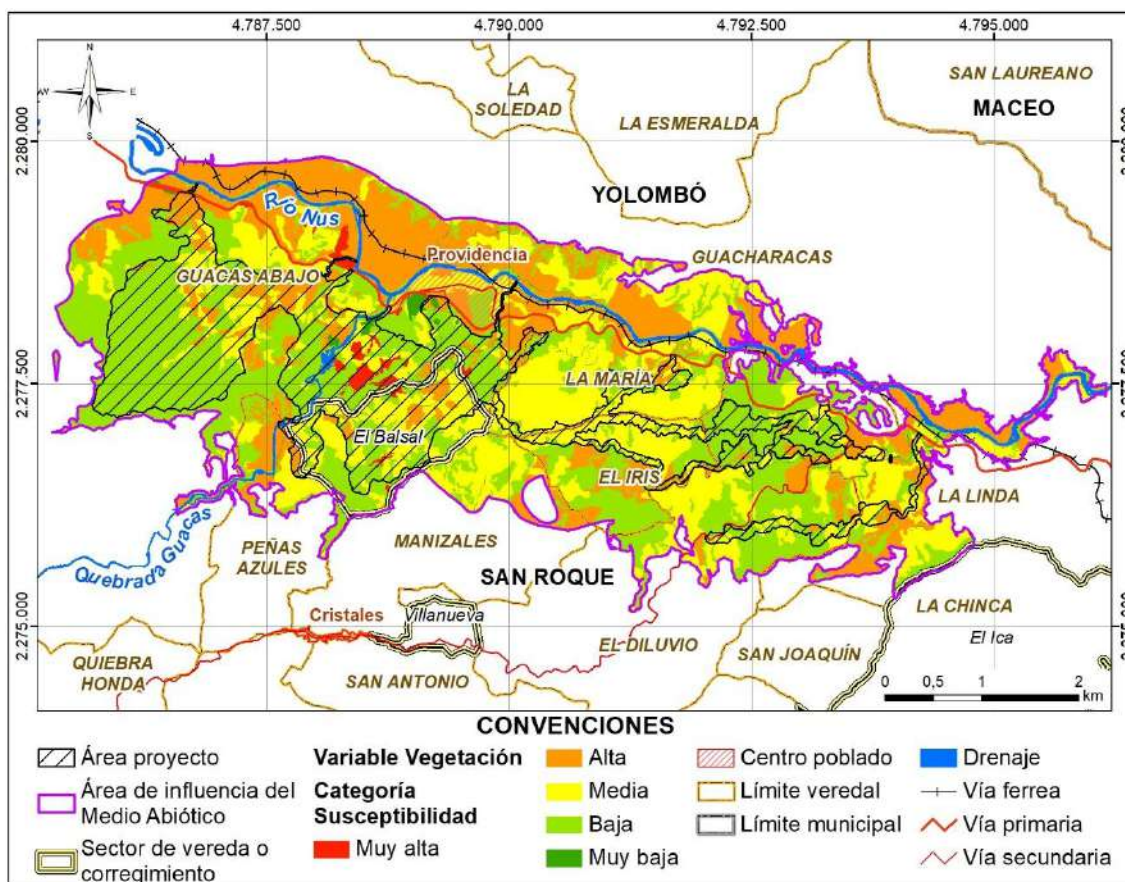


Figura 5.1.2.24 Variable vegetación (V) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2026

B. Parámetro Lluvia (Lm)

Como insumo para determinar la influencia de la precipitación, en cuanto a procesos erosivos, se utiliza un índice de precipitación calculado como la relación entre la precipitación media anual (PMA) en mm/año y el valor de la precipitación media mensual máxima. Para el primer insumo, se cuenta con la distribución de PMA obtenido a partir de las isoyetas presentadas para el área de influencia abiótica del proyecto; en segundo lugar, se tienen los valores de la precipitación media máxima mensual (mm/mes) de las estaciones San Roque, Yolombó, Granja Exp Nus que son las más cercanas al área de influencia abiótica del proyecto. En la Figura 5.1.2.25 y Figura 5.1.2.26 se muestra la distribución y susceptibilidad por lluvias, respectivamente.



Figura 5.1.2.25 Distribución de la susceptibilidad por lluvias en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

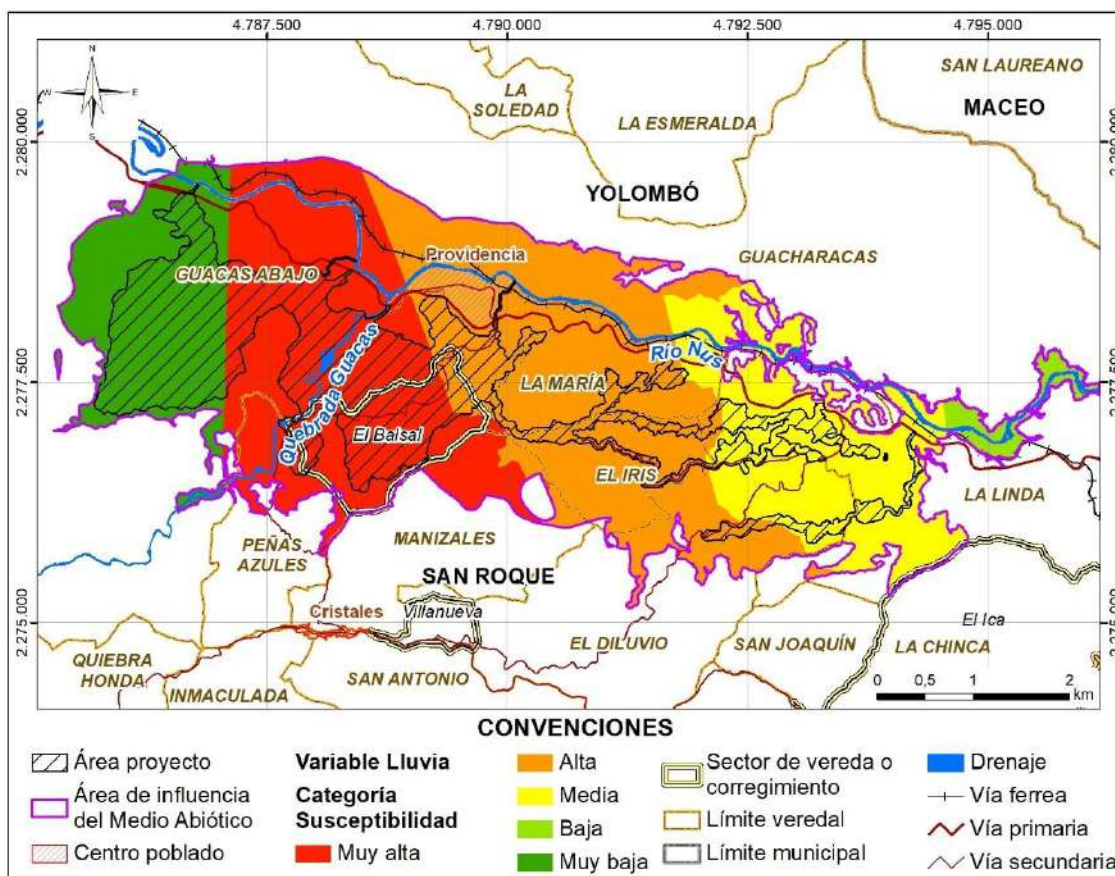


Figura 5.1.2.26 Variable lluvia – precipitación (Lm) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

C. Parámetro Escorrentía (Es)

Este parámetro evalúa el comportamiento o flujo preferencial del área de escorrentía dentro del área de influencia. Para su calificación, se utiliza la opción de: Acumulación de Flujo del conjunto de herramientas de modelamiento hidrológico bajo la plataforma del software ArcGIS (Spatial Analyst – Hydrologic Modeling). La salida ráster resultante da cuenta del volumen de flujo acumulado en cada píxel según la distribución geoespacial de todos los puntos en el área de influencia abiótica del proyecto. La Figura 5.1.2.27 y Figura 5.1.2.28 corresponden a las categorías y a la acumulación de flujo.



Figura 5.1.2.27 Distribución de la susceptibilidad por escorrentía en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

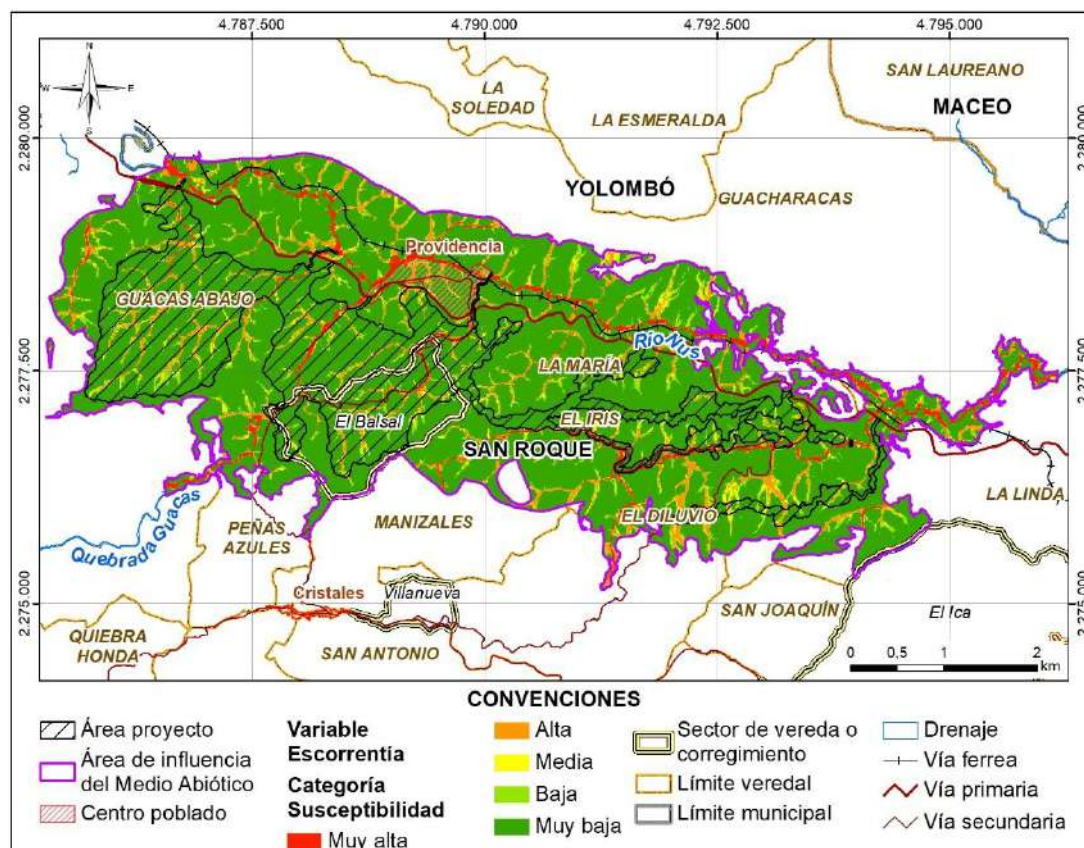


Figura 5.1.2.28 Acumulación de flujo variable escorrentía (Es) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

D. Parámetro Pendiente (s)

La definición de la pendiente con fines de evaluación de la susceptibilidad a los procesos erosivos se hace por medio de una reclasificación de los rangos de pendiente como se indica en la Tabla 5.1.2.19. Posteriormente se les asigna una calificación, siendo las zonas de mayor pendiente mucho más susceptibles y las zonas planas menos susceptibles.

Tabla 5.1.2.19 Calificación del parámetro pendiente (s)

Rango de pendiente (%)	Peso	Calificación
< 2	1	Muy baja
2 - 13	2	Baja
13 - 20	3	Media
20 - 55	4	Alta
> 55	5	Muy alta

Fuente: Ceballos & Toro, (2012)

Si siguiendo los rangos definidos anteriormente, se presenta en la Figura 5.1.2.29 y Figura 5.1.2.30 la distribución de la variable pendiente (s) en el área de influencia abiótica del proyecto para el cálculo de la susceptibilidad por procesos erosivos.

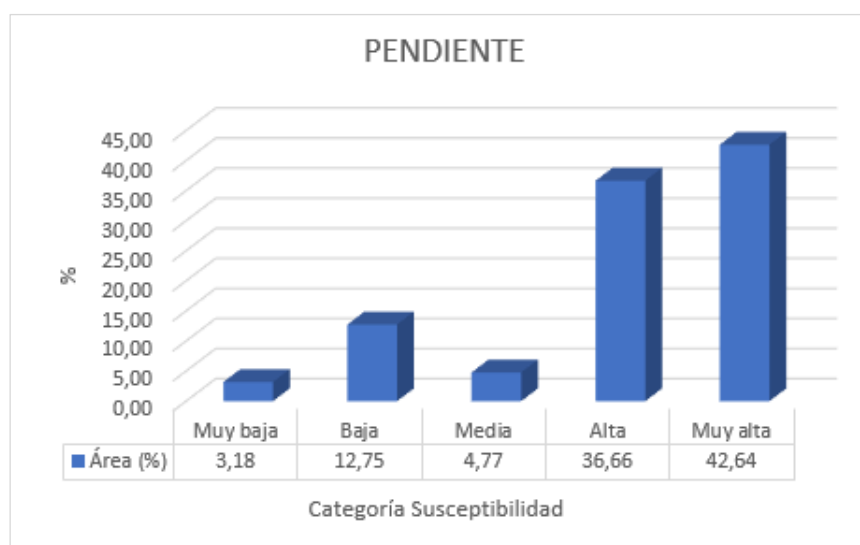


Figura 5.1.2.29 Distribución de la susceptibilidad por pendiente en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

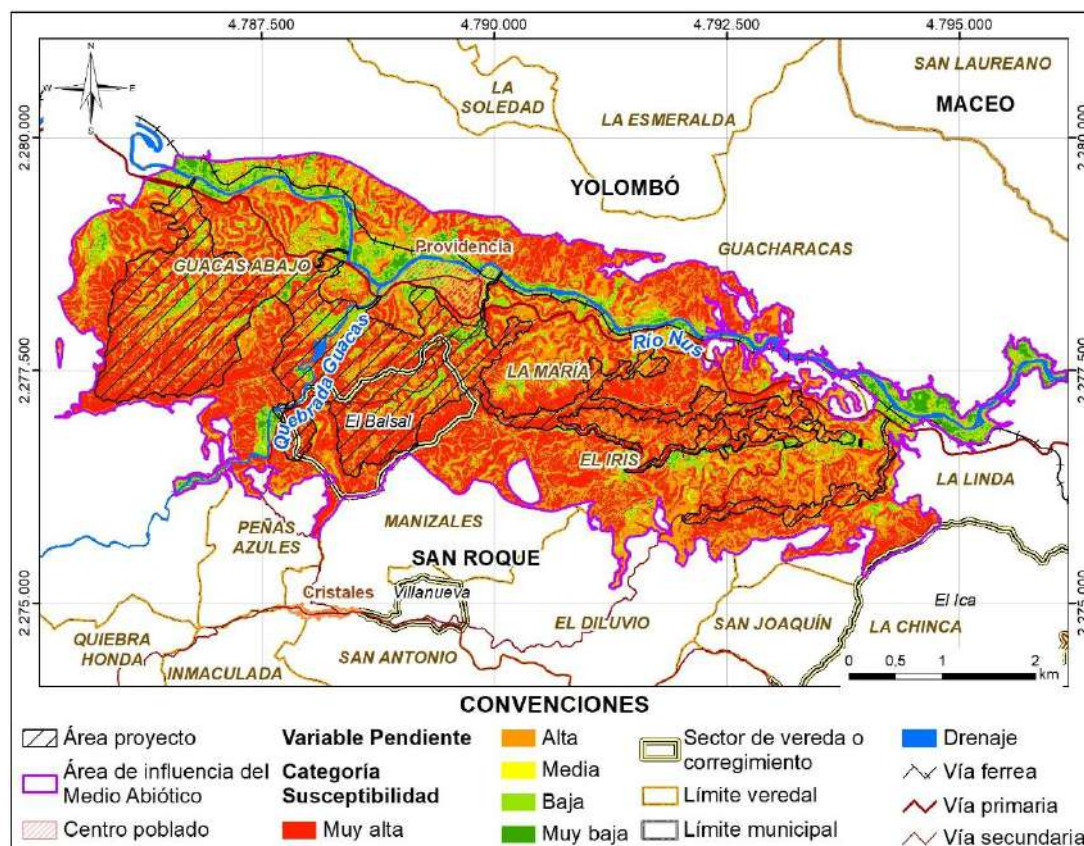


Figura 5.1.2.30 Pendientes – variable pendiente (s) para susceptibilidad a procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

E. Parámetro geología (geo)

Para la determinación de este parámetro, a cada una de las unidades geológicas aflorantes en el área de influencia se le asigna una calificación de 1 a 5 de acuerdo con el criterio de los expertos teniendo en cuenta lo establecido por (Ceballo & Toro, 2012). Los autores manifiestan que los materiales asociados a depósitos cuaternarios comprenden el tipo de unidad de susceptibilidad máxima. En la Tabla 5.1.2.20 muestra los valores tomados para cada unidad geológica superficial (UGS) descrita en el área de influencia abiótica. La distribución de la calificación para el parámetro geología (Geo) se muestra en la Figura 5.1.2.31 y Figura 5.1.2.32.

Tabla 5.1.2.20 Calificación del parámetro geología (geo)

Unidad geológica superficial - UGS	Peso	Calificación
Suelos residuales (VI) y saprolito (V) del Batolito Antioqueño	3	Media

Unidad geológica superficial - UGS	Peso	Calificación
Roca poco meteorizada del Batolito Antioqueño	1	Muy baja
Depósito aluvial	4	Alta
Depósitos coluviales	4	Alta
Depósitos de flujo	4	Alta
Llenos antrópicos	4	Alta

Fuente: Integral S.A., 2025

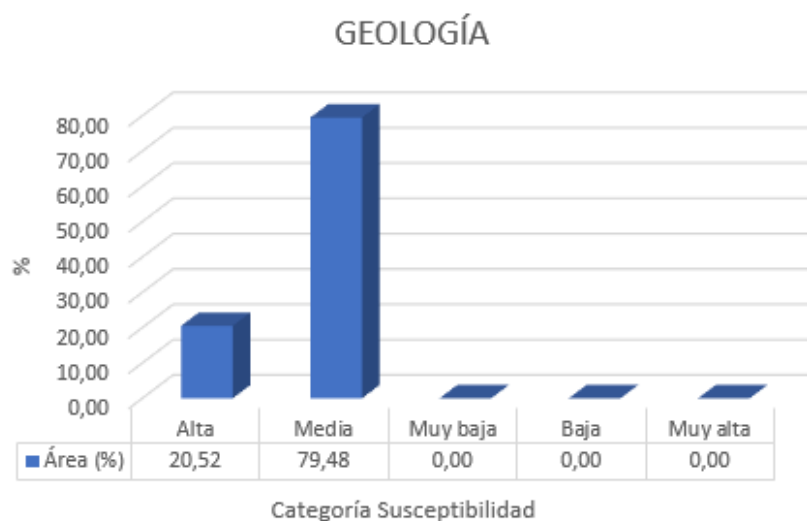


Figura 5.1.2.31 Distribución de la susceptibilidad por geología en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

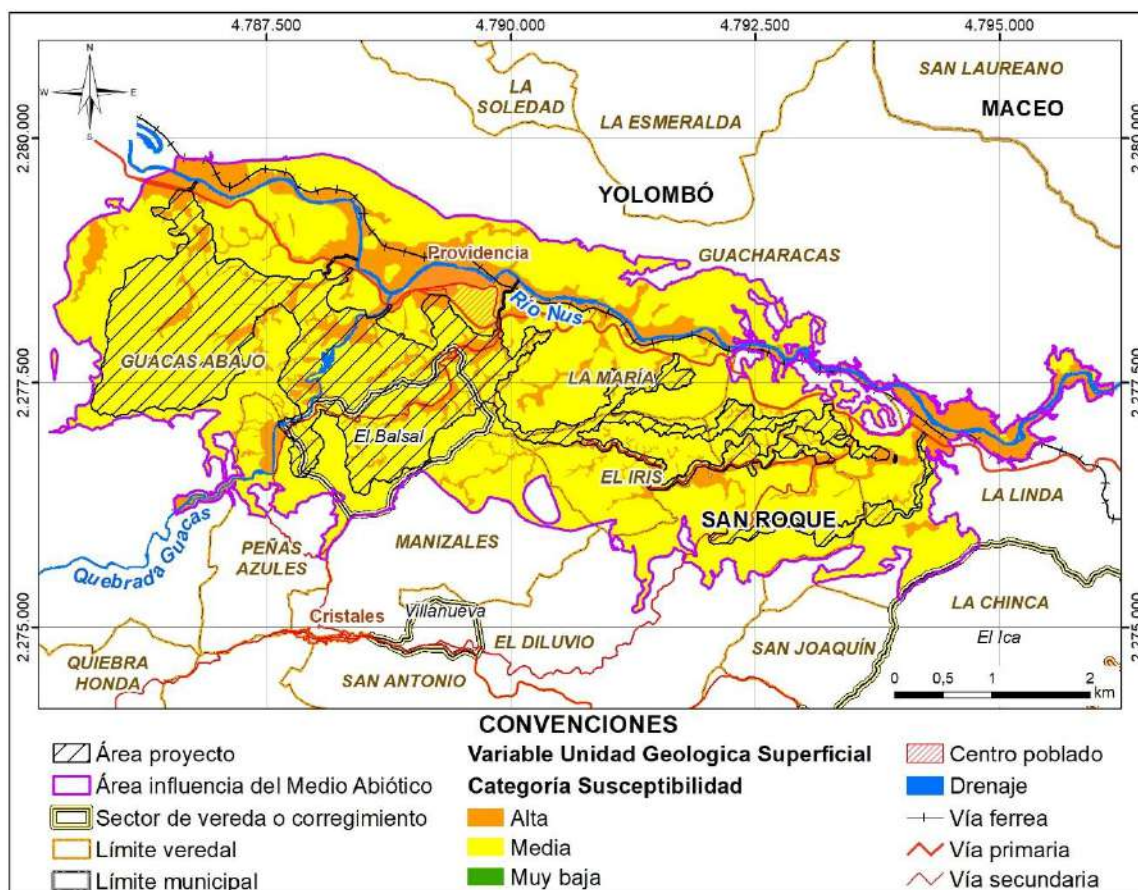


Figura 5.1.2.32 Susceptibilidad por geología (geo) en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.5.2 Resultados susceptibilidad a procesos erosivos

Finalmente, tras computar, por medio de la Ecuación 5.1 los valores asignados a cada punto para las variables definidas, se obtiene la susceptibilidad ante la ocurrencia por procesos erosivos (Figura 5.1.2.33), este, según la metodología de Ceballos & Toro, (2012), se clasifica por medio del método de los expertos bajo la plataforma del software ArcGIS. De este modo, se obtienen cinco categorías de susceptibilidad: Muy baja, baja, media, alta y muy alta (Véase mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-SUSC-PE).

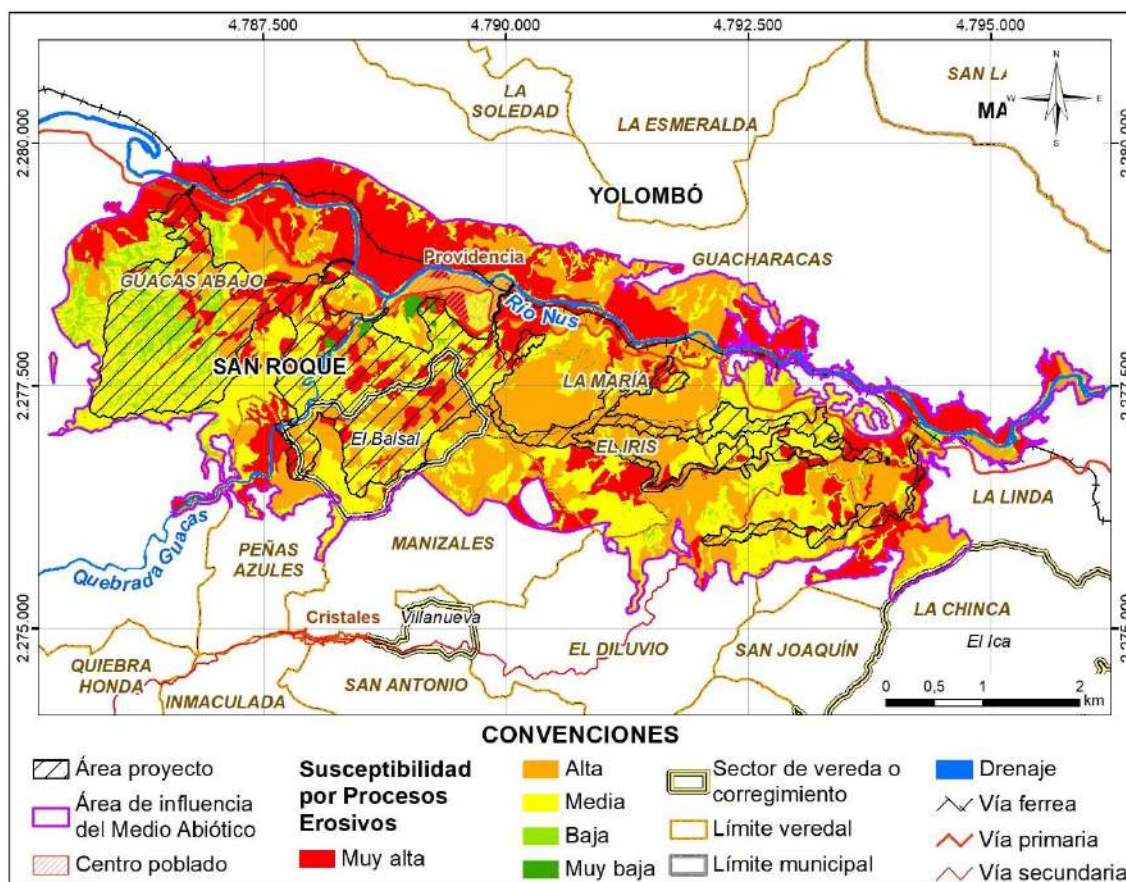


Figura 5.1.2.33 Susceptibilidad antes la ocurrencia de procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para la modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2026

En la Figura 5.1.2.34 se resumen los porcentajes de la susceptibilidad ante la ocurrencia de procesos erosivos del área de influencia abiótica del proyecto. Se observa un predominio de la categoría Media, con un 35,11%, seguida por la clase Alta (30,42%) y la clase Muy Alta (26,43%). Esta última se concentra en las zonas planas adyacentes al río Nus, donde la dinámica fluvial y la textura de los depósitos incrementan la probabilidad de erosión.

Esta distribución indica que, aunque existen condiciones relevantes en áreas específicas, la mayor proporción en la categoría Media sugiere una estabilidad relativa del terreno. No obstante, para las zonas que se clasifican como Alta y Muy Alta se deben considerar estrategias de manejo y control.

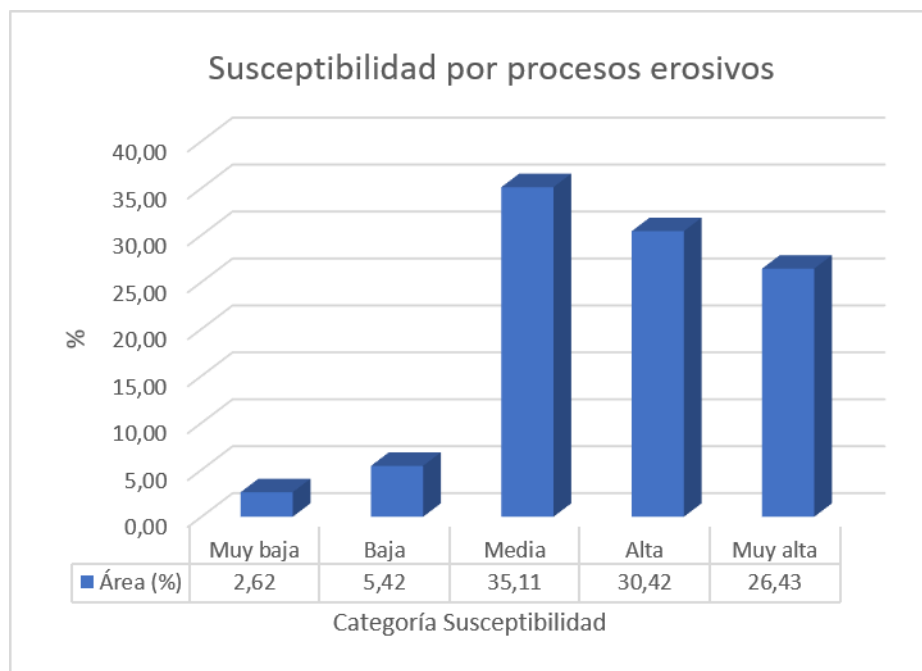


Figura 5.1.2.34 Distribución de la susceptibilidad por procesos erosivos en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote para modificación de licencia ambiental

Fuente: Integral S.A., 2026

5.1.2.6 Susceptibilidad ante procesos de remoción en masa

El análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa busca relacionar las condiciones intrínsecas del terreno con la posible ocurrencia de movimientos en masa. De esta manera un mapa de susceptibilidad contiene información sobre el tipo de movimientos morfodinámicos y las áreas más probables para su ocurrencia.

A partir de la información geológica, edafológica, geomorfológica e hidrológica, para el área del proyecto se realizó una zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, siendo estos los factores intrínsecos del terreno o de susceptibilidad (Ramírez & González, 1989).

La metodología empleada involucra la identificación previa de las unidades de terreno (zonas homogéneas). Posteriormente, se evalúan cuatro parámetros que se citan a continuación, y por último se integran todas estas variables con la ayuda de los Sistema de Información Geográfica (SIG) bajo la plataforma ArcGIS empleando la Ecuación 5.2.

$$SRM = M + R + D + V$$

Ecuación 5.2 Susceptibilidad por remoción en masa

Donde:

M: Tipo de material – Geología

MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL
PROYECTO DE MINERÍA DE ORO A CIELO ABIERTO
GRAMALOTE

08/2026

I-I-10719-GEOMORFOLOGÍA-00-V2

86

R: Relieve – Pendiente del terreno y formas del relieve

D: Drenaje

V: Vegetación – Cobertura vegetal

Posteriormente se realiza la implementación del SIG sobre el mapa base digital del área de influencia y la información temática georreferenciada. La evaluación de variables se ejecuta con base en la información obtenida y la determinación de los pesos de cada una de ellas, para determinar finalmente la susceptibilidad por remoción en masa.

Los parámetros son evaluados mediante la asignación de valores, donde los altos definen zonas estables, mientras que bajos se asocian a zonas inestables, obtenidos a partir de la suma ponderada de los índices de los factores asociados a cada parámetro, para finalmente obtener el valor de “calificación de estabilidad” (CE) del cual se pueden definir diferentes niveles de susceptibilidad.

Los valores que determinan la calificación de la susceptibilidad por remoción en masa se presentan en la Tabla 5.1.2.21; siendo el límite superior zonas de menor de estabilidad y el límite inferior aquellas áreas de mayor susceptibilidad, esta condición de susceptibilidad se presenta en tres categorías, definido a partir del criterio de expertos.

Tabla 5.1.2.21 Categorías de susceptibilidad por remoción en masa

Grado de susceptibilidad	Calificación de la susceptibilidad
≥ 62	Baja
53-62	Media
≤ 53	Alta

Fuente: Modificado de (Aguilar, 2015)

5.1.2.6.1 Parámetro material (M)

Desde el punto de vista del comportamiento geomecánico, el material que conforma las unidades de terreno se puede clasificar como roca, material intermedio o suelo. El término roca agrupa los horizontes de meteorización I y II según la Norma BS 5930 – *Code for practice for site investigations*. El material intermedio posee menos del 70% de matriz y corresponde a los horizontes de meteorización III y IV, según la Norma BS 5930. La erodabilidad de la matriz se analiza mediante un análisis comparativo con los demás materiales intermedios del área de estudio. Por último, se considera suelo aquel material que tiene más del 30% de matriz y se evalúa su origen “in situ” (V y VI) o transportado. En la Figura 5.1.2.35 se muestran las calificaciones para el parámetro Material a partir de los valores de calificación según (Ramírez & González, 1989).

SUELO									
Tipo de Suelo	RESIDUAL				TRANSPORTADO				
	SUELO		SUELO SAPROLITICO		Por acción directa de la gravedad		Por agentes naturales		
Roca							AGUA		VIENTO
Parental	G	F	G	F	G	F	G	F	HIELO
Ignea	S 2	S 3	S 3	S 4					
Metamor.	S 1	S 2	S 2	S 3					
Sedimen.	S 1	S 2	S 2	S 3					
Volcánica	S 2	S 3	S 3	S 4					

(G):	Composición predominante granular (> 65% ret. T 2000)
(F):	Composición predominante fina (> 35% pasa T 2000)

TIPO DE SUELO	CONDICION EN EL TERRENO					
	Granular (Densidad)			Fino (Consistencia)		
	Alta	Media	Baja	Dura	Media	Blanda
Tipo S 1	25	16	7	23	14	6
Tipo S 2	19	12	5	18	11	4
Tipo S 3	11	7	3	11	7	3
Tipo S 4	5	3	2	5	3	1

Figura 5.1.2.35 Valores de calificación para el parámetro M (En el recuadro rojo se presentan los pesos asignados a los materiales del área de estudio)

Fuente: Ramírez & González, (1989)

La geología de la zona de estudio la constituyen principalmente suelos residuales y saprolitos derivados de la meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño. Presentan una textura que varía entre limo arenosa a arenosa para el saprolito y generalmente limo arcilloso para el suelo residual. La consistencia en ambos también es variable, sin embargo, se asume media para este ejercicio.

También, en el área se presentan depósitos de vertiente de tipo coluviales y flujos, generalmente matriz soportados, con una textura limo arcillosa a limo arenosa y consistencia blanda.

En cuanto al lleno antrópico, teniendo en cuenta que la metodología no considera materiales antrópicos, se asume la unidad de lleno con las características entre un depósito aluvial y coluvial, constituido por materiales granulares de densidad baja, teniendo en cuenta el modo de depositación de estos. Los llenos antrópicos en el área de influencia abiótica del proyecto corresponden a los materiales sobrantes de las obras de infraestructura.

En la Tabla 5.1.2.22 se muestran los pesos asignados a los materiales que constituyen el área de influencia abiótica del proyecto para la modificación de la licencia ambiental.

Tabla 5.1.2.22 Calificaciones del parámetro M en el área de estudio

Tipo de material	Valor de M
Suelos residuales (VI) y saprolito (V) del Batolito Antioqueño	7

Tipo de material	Valor de M
Roca poco meteorizada del Batolito Antioqueño (II)	25
Depósito aluvial	12
Depósito de coluviales	3
Depósitos de flujo	3
Llenos antrópicos	5

Fuente: Integral S.A. 2025

5.1.2.6.2 Parámetro relieve ($R=A+B$)

Este parámetro evalúa dos factores fundamentales: pendiente promedio del terreno (A) y forma del relieve (B), o sea el perfil longitudinal de la unidad del terreno. En la Tabla 5.1.2.23 se muestran los valores que se determinan según el tipo de relieve que se caracteriza en los terrenos en estudio.

Tabla 5.1.2.23 Valores de R en función de la pendiente y la forma del perfil de la ladera

Terreno	Rango de pendiente (°)	Puntaje A	Perfil del terreno	Puntaje B
Interfase	0 - 5	22	Cóncavo	6
Ladera con infiltración	5 - 10	15	Rectilíneo	3
Ladera con reptación	10 - 30	9	Convexo	0
Escarpe - ladera rectilínea	30 - 45	12		
Ladera de transporte	20 - 30	6		
Ladera coluvial	10 - 20	7		
Aluviones	0 - 5	22		
Ladera cercana al cauce	> 45	6		

Fuente: Modificado de Ramírez & González, (1989)

Para el área de influencia abiótica objeto de modificación se construyó el mapa de pendientes del terreno a partir de información temática de la cartografía base bajo el Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual se reclasificó con los rangos de pendientes mostrados en la Tabla 5.1.2.23 y que definen los valores del parámetro A. Así mismo, con la ayuda de herramientas SIG, software ArcGIS, se establecen zonas del terreno de acuerdo con el perfil de las superficies (índice de curvatura: cóncavo, rectilíneo y convexo) y se asocia una calificación de acuerdo con los rangos de pendiente (parámetro B), derivando esta calificación según la Figura 5.1.2.36.

Es importante considerar que la zona de estudio corresponde a una región colinada y montañosa caracterizada por pendientes moderadamente escarpada o moderadamente empinada, donde se tiene el predominio de ambientes geomorfológicos denudacionales, con geoformas definidas por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas formas por la acumulación de sedimentos. También se presentan geoformas asociadas a ambientes estructurales, fluviales concentradas en las partes bajas de las cuencas y

antropogénicas, estas últimas asociadas a la intervención antrópica (explotación minera tradicional).

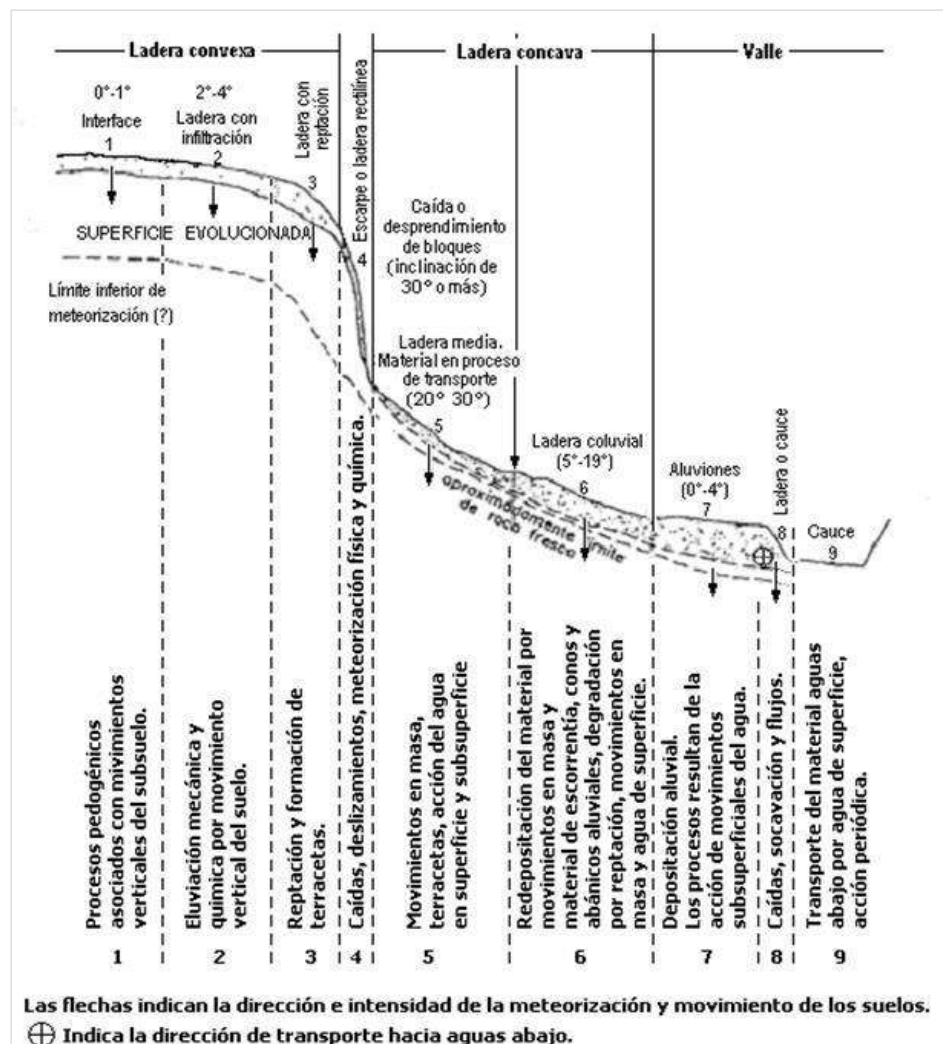


Figura 5.1.2.36 Clases del terreno de acuerdo con el perfil de las superficies (índice de curvatura: Cóncavo, rectilíneo y convexo) y las pendientes

Fuente: Ramírez & González, (1989)

5.1.2.6.3 Parámetro drenaje (D)

Este parámetro evalúa dos factores: densidad de drenaje y pendiente promedio del cauce (Tabla 5.1.2.24). Debido a que la densidad de drenaje depende de las características litológicas, climáticas y topográficas, los rangos de densidad baja, media o alta, deberán establecerse para cada ambiente geológico.

Tabla 5.1.2.24 Valores del parámetro D – Pendiente y densidad de drenaje

Pendiente del cauce (%)	Calificación parámetro D		
	Baja (0 - 25)	Media (25 - 45)	Alta (>45)
Bajo – 0 – 2,25	35	30	23
Medio – 2,26- 13,5	25	19	13
Alto - > 13,5	16	10	6

Fuente: Modificado de Ramírez & González, (1989)

La Ecuación 5.3 define como se calcula la densidad de drenaje:

$$Dd = \frac{\sum Lc_i}{A}$$

Ecuación 5.3 Densidad de drenaje

Donde:

Lc: Longitud total de los cursos de agua en metros

A: área de la cuenca (Ha)

La densidad de drenaje en la margen derecha del río Nus es mayor que la de la margen izquierda. La red de drenaje tiende a ser dendrítica y muy ramificada en la margen derecha del río Nus, mientras que a su lado izquierdo se muestra con una tendencia subparalela menos ramificada.

5.1.2.6.4 Parámetro Vegetación (V)

Se evalúan tres factores para integrar este parámetro, esto es: pendiente del terreno, tipo de vegetación y porcentaje de área cubierta por esta. Se establecen cuatro tipos de vegetaciones en los cuales se intenta asociar aquellos que bajo una misma condición tengan efectos similares en la estabilidad de las laderas. Es necesario aclarar que para efectos metodológicos los nombres de los tipos de vegetación citados en la Tabla 5.1.2.25 son genéricos, por tanto, el tipo de cobertura vegetal presente en la zona de estudio se homologa a estos nombres y se asocia una calificación de acuerdo con las pendientes del terreno que cubren sus respectivas áreas (Tabla 5.1.2.26).

Tabla 5.1.2.25 Valores del parámetro V – Vegetación

Tipo de vegetación	Pendiente	Calificación parámetro V		
		0-20°	20-45°	>45
Bosque nativo, secundario, rastrojo alto		32	25	19
Rastrojo bajo, cultivos permanentes o semipermanentes / zona urbana pavimentada		27	17	7
Pastos o vegetación herbácea / Vegetación secundaria o en transición / zona urbana sin pavimentar		25	14	6
Cultivos limpios o desmonte / canteras		20	8	3
Rasgos rurales		12	5,5	0
Rasgos urbanos		6	0	0
Ríos (50 m)		32	32	32

Fuente: Modificado de Ramírez & González, (1989)

Tabla 5.1.2.26 Homologación coberturas vegetales vs Corine Land Cover (Parámetro V)

Tipo de Vegetación	Coberturas área de interés (Corin Land Cover)
Bosque nativo, secundario, rastrojo alto	Bosque de galería y/o ripario, Bosque fragmentado con vegetación secundaria, bosque denso alto.
Rastrojo bajo, cultivos permanentes o semipermanentes	Cultivo permanente herbáceos - Caña, Mosaico de cultivos.
Pastos o vegetación herbácea/Vegetación secundaria o en transición	Vegetación secundaria alta, Vegetación secundaria baja, Pastos arbolados, Pastos enmalezados, Pastos limpios, quadua
Cultivo limpio o desmonte (canteras)	Tierras desnudas y degradadas, Zonas de extracción minera, Zona arenosa natural
Rasgos rurales	Tejido urbano discontinuo, Lagunas, lagos y ciénegas naturales.
Rasgos urbanos	Tejido urbano continuo, Red vial y terrenos asociados, Aeropuerto, Zonas industriales o comerciales.
Ríos	Ríos

Fuente: Integral S.A. 2025

Para el área de influencia las mayores áreas corresponden al tipo de coberturas vegetación secundaria baja, bosque fragmentado con vegetación secundaria y pastos limpios.

5.1.2.6.5 Resultados de susceptibilidad ante procesos de remoción en masa

Los valores que determinan la calificación de la susceptibilidad por remoción en masa se presentan en la Tabla 5.1.2.21, bajo la integración de los cuatro parámetros evaluados (M+R+D+V) con la ayuda de la plataforma ArcGis; siendo el límite superior zonas de menor estabilidad y el límite inferior aquellas áreas de mayor susceptibilidad, esta condición de susceptibilidad se presenta en tres categorías, definido a partir del criterio de expertos.

Teniendo en cuenta los pesos de importancia se grafica la susceptibilidad por movimientos en masa presentada en la [Figura 5.1.2.37](#) (Véase mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-SUSC-RM).

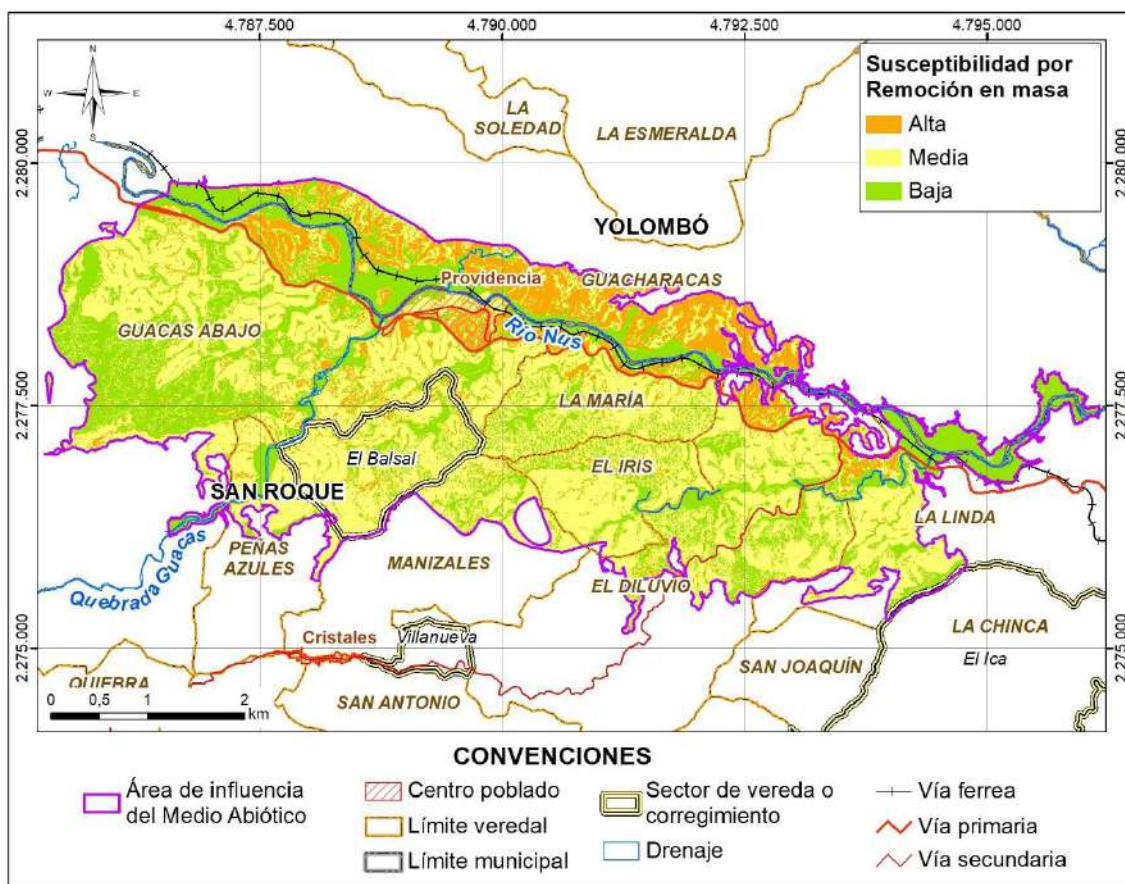


Figura 5.1.2.37 Susceptibilidad por remoción en masa

Fuente: Integral S.A., 2026

Para el área de influencia abiótica del proyecto objeto de la modificación, el 52,57% corresponde a susceptibilidad media, el 34,22% se define en la categoría baja y el

13,21% en la categoría alta a susceptibilidad por remoción en masa (Tabla 5.1.2.27). La mayoría de los procesos morfodinámicos de tipo movimientos en masa presentes en los terrenos de análisis se encuentran colonizados por la vegetación, es decir ya corresponden a un rasgo morfológico en el terreno (lo que se denomina cicatrices de deslizamiento). Esta condición contribuye a la estabilidad general del área, sin embargo, se debe tener en cuenta el manejo de las laderas en cuanto a términos de intervenciones antrópicas, para minimizar riesgos y garantizar la estabilidad a largo plazo.

Tabla 5.1.2.27 Porcentajes de ocupación de las categorías de susceptibilidad para el área de influencia abiótica del proyecto

Categoría Susceptibilidad	Área (ha)	Área (%)
Baja	853,85	34,22
Media	1.311,85	52,57
Alta	329,57	13,21
TOTAL	2.495,27	100,00

Fuente: Integral S.A. 2026

5.1.2.7 Susceptibilidad ante procesos de avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales son flujos formados por una mezcla de sedimentos y agua en diferentes proporciones, que se desplazan a lo largo de un cauce, generalmente a grandes velocidades. Son fenómenos originados por lluvias intensas, de corta duración y de naturaleza convectiva, que ocurren en cuencas normalmente pequeñas donde el proceso prevalente de escorrentía es superficial y donde prima las altas pendientes (Borga, Stoffel, Marchi, Marra, & Jakob, 2014).

5.1.2.7.1 Cuencas

Inicialmente se establecen las cuencas que están dentro del área de influencia del medio abiótico de acuerdo con la información presentada en el capítulo 5_1_5 Hidrología numeral 5.1.1.2.2 y se identifican como se muestra en la Tabla 5.1.2.28, a las cuales se les asigna un número que permita la identificación rápida a lo largo del desarrollo de la metodología y, adicionalmente, se identifican unas áreas que están catalogadas como intercuencas, las cuales no se tienen en el desarrollo de la metodología.

Tabla 5.1.2.28 Identificación de las cuencas en el área de estudio

Nombre de la cuenca	ID de la cuenca
Quebrada el Topacio	1
Quebrada el banco	2
Quebrada San Antonio	3
Quebrada la colorada	4
Quebrada La María	5
Quebrada La Palestina	6
Quebrada Guacas	7

Nombre de la cuenca	ID de la cuenca
Quebrada Torito	8
Cauce 1	9
Cauce 2	10
Cauce 3	11
Cauce 4	12
Cauce 5	13
Cauce 6	14
Cauce 7	15
Cauce 8	16
Cauce 9	17
Cauce 10	18
Cauce 11	19
Rio Nus (Lim Al)	20

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.2.7.2 Variables para obtener susceptibilidad a avenidas torrenciales

Las variables que se tienen en cuenta para determinar las zonas en las cuales el caudal y la forma puedan generar eventos torrenciales se presentan en la Figura 5.1.2.38.

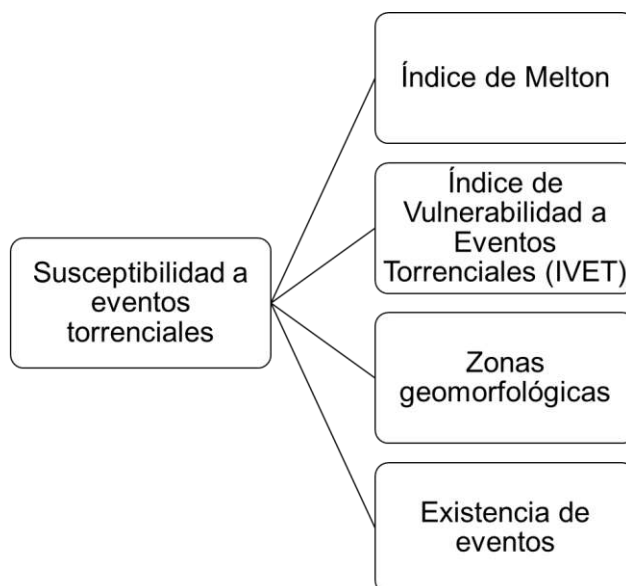


Figura 5.1.2.38 Variables que determinan la zonificación de la susceptibilidad a avenidas torrenciales

Fuente: (CORCUENCAS, 2017)

A. Índice de Melton

La zonificación de la susceptibilidad para avenidas torrenciales se realizó a través del análisis de las características morfométricas e hidrológicas de cada subcuenca. Para las microcuencas que conforman la cuenca hidrográfica se calculó además el Índice de Melton, con el propósito de clasificar la torrencialidad de cada una de ellas. En la Ecuación 5.4 se presenta la ecuación del Índice de Melton.

$$\text{Índice de Melton} = (H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}) \times S^{-0,5}$$

Ecuación 5.4 Ecuación del Índice de Melton

Dónde $H_{\text{máx}}$ y $H_{\text{mín}}$ son la cota de altura máxima y mínima de la cuenca y S , es el área de la cuenca. De esta forma, una cuenca presenta torrencialidad cuando el Índice de Melton presenta valores superiores a 0,5. De esta forma en la Tabla 5.1.2.29 se presenta el Índice de Melton para cada cuenca del área de influencia abiótica del proyecto.

Tabla 5.1.2.29 Torrencialidad según el Índice de Melton de las cuencas presentes en el área de influencia abiótica

Nombre de la cuenca	ID de la cuenca	Índice de Melton	Categoría
Quebrada el Topacio	1	0,2130	No torrencial
Quebrada el banco	2	0,2790	No torrencial
Quebrada San Antonio	3	0,1850	No torrencial
Quebrada la colorada	4	0,2200	No torrencial
Quebrada La María	5	0,1530	No torrencial
Quebrada La Palestina	6	0,1400	No torrencial
Quebrada Guacas	7	0,1230	No torrencial
Quebrada Torito	8	0,3546	No torrencial
Cauce 1	9	0,2295	No torrencial
Cauce 2	10	0,1825	No torrencial
Cauce 3	11	0,1311	No torrencial
Cauce 4	12	0,2835	No torrencial
Cauce 5	13	0,1539	No torrencial
Cauce 6	14	0,1700	No torrencial
Cauce 7	15	0,1719	No torrencial
Cauce 8	16	0,1980	No torrencial
Cauce 9	17	0,3272	No torrencial
Cauce 10	18	0,3723	No torrencial
Cauce 11	19	0,3188	No torrencial
Rio Nus (Lim AI)	20	0,0828	No torrencial

Fuente: Integral S.A., 2025

B. Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

Otra variable para evaluar es el Índice de Variabilidad a Eventos Torrenciales (IVET), el cual se calcula en este caso para las microcuencas abastecedoras y representa el grado de susceptibilidad de una cuenca a presentar eventos de carácter torrencial. Este índice varía cualitativamente desde muy bajo a muy alto y particularmente depende de dos variables: el Índice de Variabilidad (IV) y el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) como se muestra en la Figura 5.1.2.39.

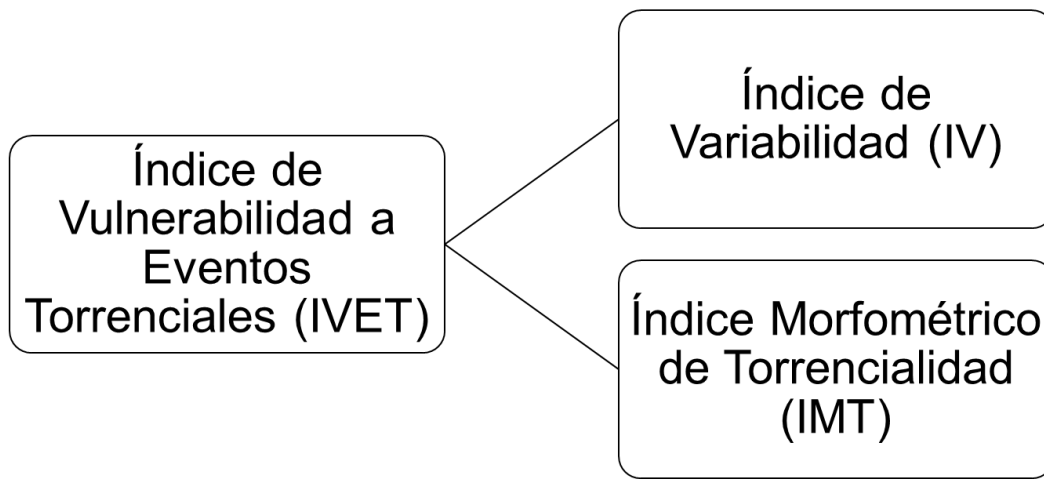


Figura 5.1.2.39 Índices implícitos en el cálculo de IVET

Fuente: (CORCUENCAS, 2017)

a. Índice de Variabilidad (IV)

Muestra el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca definiendo una cuenca torrencial como aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, donde existen diferencias grandes entre los caudales mínimos que se presentan, y los valores máximos (IDEAM, 2013). El Índice de Variabilidad (IV) se define como se expresa en la Ecuación 5.5.

$$\text{Índice de Variabilidad} = \sqrt{\frac{\sum (\text{Log} Q_i - \text{Log} Q_{\text{prom}})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 5.5 Ecuación del Índice de Variabilidad

Dónde:

Q_i : caudales tomados de la curva de duración de caudales.

Q_{prom} : caudal promedio.

n : número de datos tratados.

De esta forma, se tiene que en la Tabla 5.1.2.30 se presenta la calificación de la susceptibilidad por el Índice de Variabilidad (IV).

Tabla 5.1.2.30 Categorías de susceptibilidad del Índice de Variabilidad (IV)

Índice de Variabilidad	Peso	Categoría de susceptibilidad
< 10	1	Muy baja
10,1 – 37	2	Baja
37,1 – 47	3	Moderada
47,1 - 55	4	Alta
> 55.	5	Muy alta

Fuente: (IDEAM, 2013).

Así, para las cuencas del área de influencia, se tiene un Índices de Variabilidad (IV) presente en la Tabla 5.1.2.31.

Tabla 5.1.2.31 Índice de Variabilidad (IV) para las cuencas de la zona de estudio

Nombre de la cuenca	ID de la cuenca	Índice de variabilidad	Peso	Categoría susceptibilidad
Quebrada el Topacio	1	3,70%	1	Muy baja
Quebrada el banco	2	3,69%	1	Muy baja
Quebrada San Antonio	3	3,68%	1	Muy baja
Quebrada la colorada	4	3,67%	1	Muy baja
Quebrada La María	5	3,65%	1	Muy baja
Quebrada La Palestina	6	3,67%	1	Muy baja
Quebrada Guacas	7	3,81%	1	Muy baja
Quebrada Torito	8	3,65%	1	Muy baja
Cauce 1	9	3,66%	1	Muy baja
Cauce 2	10	3,66%	1	Muy baja
Cauce 3	11	3,66%	1	Muy baja
Cauce 4	12	3,66%	1	Muy baja
Cauce 5	13	3,66%	1	Muy baja
Cauce 6	14	3,66%	1	Muy baja
Cauce 7	15	3,66%	1	Muy baja
Cauce 8	16	3,65%	1	Muy baja
Cauce 9	17	3,64%	1	Muy baja
Cauce 10	18	3,64%	1	Muy baja
Cauce 11	19	3,64%	1	Muy baja
Rio Nus (Lim Al)	20	3,78%	1	Muy baja

Fuente: Integral S.A., 2025

b. Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT)

Este índice integra el coeficiente de compacidad o de forma de Gravelius, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje (parámetros morfométricos), los cuales son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, así como la eficiencia o rapidez de la escorrentía y los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación, con el fin de poder inferir cual podría ser el nivel de susceptibilidad de dicha cuenca a eventos torrenciales (Huertas U., 2016).

En la Tabla 5.1.2.32 se presentan las relaciones para categorizar el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) y en la Tabla 5.1.2.33 se presenta la escala de calificación.

Tabla 5.1.2.32 Relaciones para categorizar el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT)

Índice Morfométrico	Escala	Área de la cuenca de drenaje (km ²)	Categoría y calificación de la susceptibilidad				
			Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	1:10.000	< 15	< 1,50	1,51 – 2,0	2,01 – 2,5	2,51 – 3,0	> 3
	1:25.000	16 a 50	< 1,2	1,21 – 1,8	1,81 – 2,0	2,01 – 2,5	> 2,5
	1:100.000	> 50	< 1,0	1,01 – 1,5	1,51 – 2,0	2,01 – 2,5	> 2,5
Pendiente media de la cuenca (%)			Accidental	Fuerte	Muy fuerte	Escarpado	Muy escarpado
	1:10.000	< 15	< 20	21 – 35	36 – 50	51 – 75	> 75
	1:25.000	> 50	< 15	16 – 30	31 – 45	46 – 65	> 65
Coeficiente de compacidad de Gravelius			Oval – oblonga a rectangular – oblonga	Oval – redonda a oval – oblonga		Casi redonda a oval-redonda	
			> 1,51	1,376 – 1,5	1,251 – 1,375	1,126 – 1,250	1,0 – 1,125

Fuente: (IDEAM, 2013)

Tabla 5.1.2.33 Relaciones entre variables para el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT)

		Pendiente media de la cuenca						
		1	2	3	4	5		
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1	Coeficiente de compacidad de Gravelius
		112	122	132	142	152	2	
		113	123	133	143	153	3	
		114	124	134	144	154	4	
		115	125	135	145	155	5	
	2	211	221	231	241	251	1	
		212	222	232	242	252	2	
		213	223	233	243	253	3	
		214	224	234	244	254	4	
		215	225	235	245	255	5	
	3	311	321	331	341	351	1	
		312	322	332	342	352	2	
		313	323	333	343	353	3	
		314	324	334	344	354	4	
		315	325	335	345	355	5	
	4	411	421	431	441	451	1	
		412	422	432	442	452	2	
		413	423	433	443	453	3	
		414	424	434	444	454	4	
		415	425	435	445	455	5	
	5	511	521	531	541	551	1	
		512	522	532	542	552	2	
		513	523	533	543	553	3	
		514	524	534	544	554	4	
		515	525	535	545	555	5	
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta		
		1	2	3	4	5		

Fuente: (IDEAM, 2013)

De esta forma, para el cálculo de densidad de drenaje se utiliza la Ecuación 5.6 y en la Tabla 5.1.2.34, se presenta la susceptibilidad asociada a la densidad de drenaje en las cuencas del área de influencia abiótica del proyecto.

$$Densidad\ de\ drenaje = \frac{\sum Lc_i}{A}$$

Ecuación 5.6 Ecuación para el cálculo de densidad de drenaje

Donde Lc_i es la longitud total de los cursos de agua (perennes o intermitentes) de cada cuenca en km y A es el área de la cuenca en km².

Tabla 5.1.2.34 Susceptibilidad para el cálculo de densidad de drenaje para cada cuenca

Cuenca	ID de la cuenca	Densidad de drenaje (km/km ²)	Peso	Categoría de susceptibilidad
Quebrada el Topacio	1	11,736	5	Muy Alta
Quebrada el banco	2	8,988	5	Muy Alta
Quebrada San Antonio	3	9,080	5	Muy Alta
Quebrada la colorada	4	12,698	5	Muy Alta
Quebrada La María	5	11,519	5	Muy Alta
Quebrada La Palestina	6	9,655	5	Muy Alta
Quebrada Guacas	7	8,557	5	Muy Alta
Quebrada Torito	8	8,584	5	Muy Alta
Cauce 1	9	9,202	5	Muy Alta
Cauce 2	10	6,191	5	Muy Alta
Cauce 3	11	13,670	5	Muy Alta
Cauce 4	12	9,629	5	Muy Alta
Cauce 5	13	9,103	5	Muy Alta
Cauce 6	14	8,382	5	Muy Alta
Cauce 7	15	8,313	5	Muy Alta
Cauce 8	16	7,139	5	Muy Alta
Cauce 9	17	8,757	5	Muy Alta
Cauce 10	18	7,724	5	Muy Alta
Cauce 11	19	8,314	5	Muy Alta
Rio Nus (Lim Al)	20	8,101	5	Muy Alta

Fuente: Integral S.A., 2025

Para el cálculo de la pendiente media de la cuenca se utilizan las funciones correspondientes al software ArcGIS en la cual, en la Tabla 5.1.2.35, se presenta la calificación de susceptibilidad de la pendiente media de cada una de las cuencas en el área de influencia.

Tabla 5.1.2.35 Susceptibilidad para el cálculo de la pendiente media de cada una de las cuencas en el área de influencia

Cuenca	ID de la cuenca	Pendiente media (%)	Peso	Categoría de susceptibilidad
Quebrada el Topacio	1	8,16%	1	Muy Baja
Quebrada el banco	2	9,64%	1	Muy Baja
Quebrada San Antonio	3	8,08%	1	Muy Baja

Cuenca	ID de la cuenca	Pendiente media (%)	Peso	Categoría de susceptibilidad
Quebrada la colorada	4	10,34%	1	Muy Baja
Quebrada La María	5	8,66%	1	Muy Baja
Quebrada La Palestina	6	4,81%	1	Muy Baja
Quebrada Guacas	7	3,56%	1	Muy Baja
Quebrada Torito	8	17,81%	1	Muy Baja
Cauce 1	9	13,54%	1	Muy Baja
Cauce 2	10	10,75%	1	Muy Baja
Cauce 3	11	7,12%	1	Muy Baja
Cauce 4	12	13,63%	1	Muy Baja
Cauce 5	13	6,52%	1	Muy Baja
Cauce 6	14	6,95%	1	Muy Baja
Cauce 7	15	10,93%	1	Muy Baja
Cauce 8	16	8,73%	1	Muy Baja
Cauce 9	17	16,74%	1	Muy Baja
Cauce 10	18	15,81%	1	Muy Baja
Cauce 11	19	17,43%	1	Muy Baja
Rio Nus (Lim AI)	20	2,68%	1	Muy Baja

Fuente: Integral S.A., 2025

Para el cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius se emplea la Ecuación 5.7 y en la Tabla 5.1.2.36, se presenta la susceptibilidad asociada con este coeficiente para cada una de las cuencas presentes en el área de estudio.

$$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 5.7 Coeficiente de compacidad de Gravelius.

Donde P corresponde al perímetro de la cuenca en km y A al área de la cuenca en km².

Tabla 5.1.2.36 Susceptibilidad para el cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius en cada una de las cuencas del área de estudio

Cuenca	ID de la cuenca	Coeficiente de compacidad de Gravelius	Peso	Categoría de susceptibilidad
Quebrada el Topacio	1	1,365	3	Moderado
Quebrada el banco	2	1,572	1	Muy baja
Quebrada San Antonio	3	1,532	1	Muy baja

Cuenca	ID de la cuenca	Coeficiente de compacidad de Gravelius	Peso	Categoría de susceptibilidad
Quebrada la colorada	4	1,431	2	Baja
Quebrada La María	5	1,297	3	Moderado
Quebrada La Palestina	6	1,439	2	Baja
Quebrada Guacas	7	1,909	1	Muy baja
Quebrada Torito	8	1,342	3	Moderado
Cauce 1	9	1,154	4	Alta
Cauce 2	10	1,214	4	Alta
Cauce 3	11	1,166	4	Alta
Cauce 4	12	1,411	4	Alta
Cauce 5	13	1,485	4	Alta
Cauce 6	14	1,527	4	Alta
Cauce 7	15	1,345	2	Baja
Cauce 8	16	1,325	2	Baja
Cauce 9	17	1,201	4	Alta
Cauce 10	18	1,495	2	Baja
Cauce 11	19	1,171	4	Alta
Rio Nus (Lim Al)	20	1,777	1	Muy baja

Fuente: Integral S.A., 2025

Mediante la obtención de densidad de drenaje, pendiente media y coeficiente de compacidad de Gravelius, y la clasificación de la Tabla 5.1.2.33, se tiene el Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) Tabla 5.1.2.37.

Tabla 5.1.2.37 Susceptibilidad por Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT) de las cuencas del área de influencia

Cuenca	ID de la cuenca	IMT	Categoría de susceptibilidad
Quebrada el Topacio	1	513	Moderada
Quebrada el banco	2	511	Moderada
Quebrada San Antonio	3	511	Moderada
Quebrada la colorada	4	512	Moderada
Quebrada La María	5	513	Moderada
Quebrada La Palestina	6	512	Moderada
Quebrada Guacas	7	511	Moderada
Quebrada Torito	8	513	Moderada
Cauce 1	9	514	Moderada

Cuenca	ID de la cuenca	IMT	Categoría de susceptibilidad
Cauce 2	10	514	Moderada
Cauce 3	11	514	Moderada
Cauce 4	12	514	Moderada
Cauce 5	13	514	Moderada
Cauce 6	14	514	Moderada
Cauce 7	15	512	Moderada
Cauce 8	16	512	Moderada
Cauce 9	17	514	Moderada
Cauce 10	18	512	Moderada
Cauce 11	19	514	Moderada
Rio Nus (Lim Al)	20	511	Moderada

Fuente: Integral S.A., 2025

Con base en la información anterior, se procede a calificar el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales que se expresa como la relación existente entre las características de la forma de una cuenca (IMT) que son indicativos de la torrencialidad en la misma, en relación con las condiciones hidrológicas (IV) en dicha cuenca (IDEAM, 2013) y se determina a partir de la Tabla 5.1.2.38.

Tabla 5.1.2.38 Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

Índice de Variabilidad	Índice Morfométrico de Torrencialidad (IMT)				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Muy baja	Baja	Baja	Media	Media
Baja	Baja	Baja	Media	Media	Alta
Media	Baja	Media	Media	Alta	Alta
Alta	Media	Media	Alta	Alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: (IDEAM, 2013)

Así, en Tabla 5.1.2.39, se presenta la zonificación del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) del área de influencia.

Tabla 5.1.2.39 Zonificación del Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)

Cuenca	ID de la cuenca	Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)	Categoría de susceptibilidad
Quebrada el Topacio	1	2	Baja
Quebrada el banco	2	2	Baja
Quebrada San Antonio	3	2	Baja
Quebrada la colorada	4	2	Baja

Cuenca	ID de la cuenca	Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)	Categoría de susceptibilidad
Quebrada La María	5	2	Baja
Quebrada La Palestina	6	2	Baja
Quebrada Guacas	7	2	Baja
Quebrada Torito	8	2	Baja
Cauce 1	9	2	Baja
Cauce 2	10	2	Baja
Cauce 3	11	2	Baja
Cauce 4	12	2	Baja
Cauce 5	13	2	Baja
Cauce 6	14	2	Baja
Cauce 7	15	2	Baja
Cauce 8	16	2	Baja
Cauce 9	17	2	Baja
Cauce 10	18	2	Baja
Cauce 11	19	2	Baja
Rio Nus (Lim Al)	20	2	Baja

Fuente: Integral S.A., 2025

C. Zonas Geomorfológicas

Para la caracterización de las zonas geomorfológicas es necesario tener en cuenta la susceptibilidad de dos variables que se integran a este parámetro, correspondientes a las subunidades geomorfológicas y las unidades de terreno.

c. Subunidades geomorfológicas

Corresponde a las geoformas (subunidades geomorfológicas) generadas a lo largo de un sistema fluvial como resultado de los procesos erosivos y de acumulación ya sea torrencial o aluvial que varían en función de la pendiente del terreno, el caudal y la carga de sedimentos de los drenajes que interactúan en el área de influencia o los procesos denudativos, estructurales o antropogénicos actuantes en la zona (Tabla 5.1.2.40).

Las subunidades geomorfológicas presentes que generalmente son susceptibles a presentar un evento torrencial, son aquellas que presentan moderadas pendientes y están ligadas en su desarrollo a un sistema fluvial o torrencial relacionadas con la inundación de zonas con bajo índice de relieve durante la época de alta pluviosidad asociadas al desborde temporal del río sobre terrazas, abanicos aluviales o planos de inundación; estas unidades al estar asociadas a las corrientes hídricas y estar constituidas por materiales de finos a arcillosos aumentan su cota de nivel, durante las temporadas de lluvias y afectan planos anegadizos, constituyéndolos como depósitos

fluvio – lacustres (limosos y arcillosos con tendencia heterogranulométricos poco sorteada) de encharcamiento temporal, que de manera general bordean las cuencas de decantación, generados por el desbordamiento y dinámica natural del río.

Tabla 5.1.2.40 Susceptibilidad geomorfológica para zonificar avenidas torrenciales

Símbolo	Subunidad geomorfológica	Peso	Calificación
Dcr	Colina residual	2	Baja
Dcrmd	Colina residual muy disectada	2	Baja
Dco	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	3	Media
Dfl	Cono o lóbulo de flujo de lodo y tierra	4	Alta
Dlde	Lomos denudados	2	Baja
Dmo	Montículos y ondulaciones denudacionales	1	Muy baja
Deeme	Escarpe de erosión mayor	1	Muy baja
Del	Ladera erosiva	2	Baja
Dlmd	Lomeríos muy disectados	2	Baja
Dlpd	Lomeríos poco disectados	2	Baja
Dldmm	Lomo denudado moderado de longitud media	2	Baja
Slf	Lomo de falla	3	Media
Fca	Cauce aluvial	4	Alta
Fpac	Planicie aluvial confinada	3	Media
Fpi	Plano o Llanura de inundación	4	Alta
Fcdy	Cono de deyección	4	Alta
Aemc	Explotación minera	2	Baja
Ar	Planos y campos de llenos antrópicos	1	Muy baja
Asp	Superficies de explanación	1	Muy baja

Fuente: Integral S.A., 2025

d. Unidades de terreno

Las unidades de terreno son aquellas geoformas particulares del terreno consideradas dentro de un nivel del sistema jerárquico, relacionada con las formas del relieve: ambientes morfogenéticos y sistemas de terreno (Zinck, 2012). Cada geoforma se clasifica según su génesis, morfología y geometría del relieve, donde el análisis permite identificar geoformas asociadas a procesos torrenciales y subsiguientemente determinar zonas susceptibles a este fenómeno natural. Las unidades de terreno hacen referencia a las unidades de paisaje descritas por (Zinck, 2012) y en la Tabla 5.1.2.41, se presenta

la calificación de susceptibilidad para las mismas de acuerdo con las condiciones del terreno en la zona de estudio.

Tabla 5.1.2.41 Calificación de susceptibilidad de las unidades de terreno a eventos torrenciales

Unidad de paisaje	Unidad geomorfológica	Peso	Calificación
Valle	Plano o llanura de inundación (Fpi)	4	Alta
	Terraza de acumulación	4	Alta
	Cono de deyección	4	Alta
	Cauce aluvial (Fca)	4	Alta
Pidemonte	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)	3	Media
	Lomos denudados	3	Media
Lomeríos	Lomo denudado moderado de longitud media	2	Baja
	Lomeríos muy disectados	2	Baja
	Montículos y ondulaciones denudacionales	2	Baja
	Escarpe de erosión menor	2	Baja
	Escarpe de erosión Mayor	2	Baja
	Lomo denudado alto de longitud larga	2	Baja
	Lomo denudado bajo de longitud corta	2	Baja

Fuente: Integral S.A., 2025

Teniendo estos dos parámetros se califica la susceptibilidad por zonas geomorfológicas en la zona de estudio con base en la matriz de la Tabla 5.1.2.42.

Tabla 5.1.2.42 Tabla de calificación para las zonas geomorfológicas.

Unidades de terreno	Subunidades geomorfológicas				
	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Muy baja	Muy baja	Baja	Baja	Media	Media
Baja	Baja	Baja	Media	Media	Alta
Moderada	Baja	Media	Media	Alta	Alta
Alta	Media	Media	Alta	Alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: Integral S.A., 2025

Con base en lo anterior, se obtuvo la clasificación de susceptibilidad de zonas geomorfológicas que se muestra en la siguiente Tabla 5.1.2.43.

Tabla 5.1.2.43 Susceptibilidad a avenidas torrenciales en las zonas geomorfológicas en el área de estudio

Zonas Geomorfológicas	Peso	Calificación
Colina residual	3	Media
Colina residual muy disectada	3	Media
Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	3	Media
Cono o lóbulo de flujo de lodo y tierra	4	Alta
Lomos denudados	3	Media
Montículos y ondulaciones denudacionales	2	Baja
Escarpe de erosión menor	2	Baja
Ladera erosiva	3	Media
Lomeríos muy disectados	2	Baja
Lomeríos poco disectados	2	Baja
Lomo denudado moderado de longitud media	2	Baja
Lomo de falla	3	Media
Cauce aluvial	4	Alta
Planicie aluvial confinada	4	Alta
Plano o Llanura de inundación	4	Alta
Cono de deyección	4	Alta
Explotación minera	1	Muy baja
Planos y campos de llenos antrópicos	1	Muy baja
Superficies de explanación	1	Muy baja

Fuente: Integral S.A., 2025

D. Existencia de eventos torrenciales

La existencia de eventos asociados con avenidas torrenciales marca el valor de existencia de esta y describe zonas susceptibles a presentar una avenida torrencial ya que han ocurrido dentro de la cuenca. La consolidación de esta información se realiza a partir de la revisión de fuentes secundarias y primarias en las que se describe su ubicación por asociación a proximidad de puntos o zonas de referencia. Permite identificar zonas de susceptibilidad por ocurrencia de eventos como complemento a las zonas de susceptibilidad por geomorfología e índices de torrencialidad para definir la zonificación definitiva de áreas susceptibles.

Cabe destacar que en el área de influencia abiótica del proyecto Gramalote no se observaron eventos de avenidas torrenciales durante las visitas de campo. Además, no

se encontraron registros previos que indiquen la presencia de este tipo de fenómeno, por lo cual la zona presenta una calificación muy baja respecto a este parámetro.

5.1.2.7.3 Zonificación de susceptibilidad a avenidas torrenciales

Con base en los valores del índice de Melton, el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET), las zonas geomorfológicas y la presencia de eventos torrenciales, se categoriza en general a todas las cuencas presentes que componen el área de influencia, asignándole una ponderación igual a cada una de las variables equivalentes al 25% de importancia.

En la Figura 5.1.2.40 se muestra la susceptibilidad por Avenidas Torrenciales, donde se evidencia una susceptibilidad baja (Véase mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-SUSC-AT).

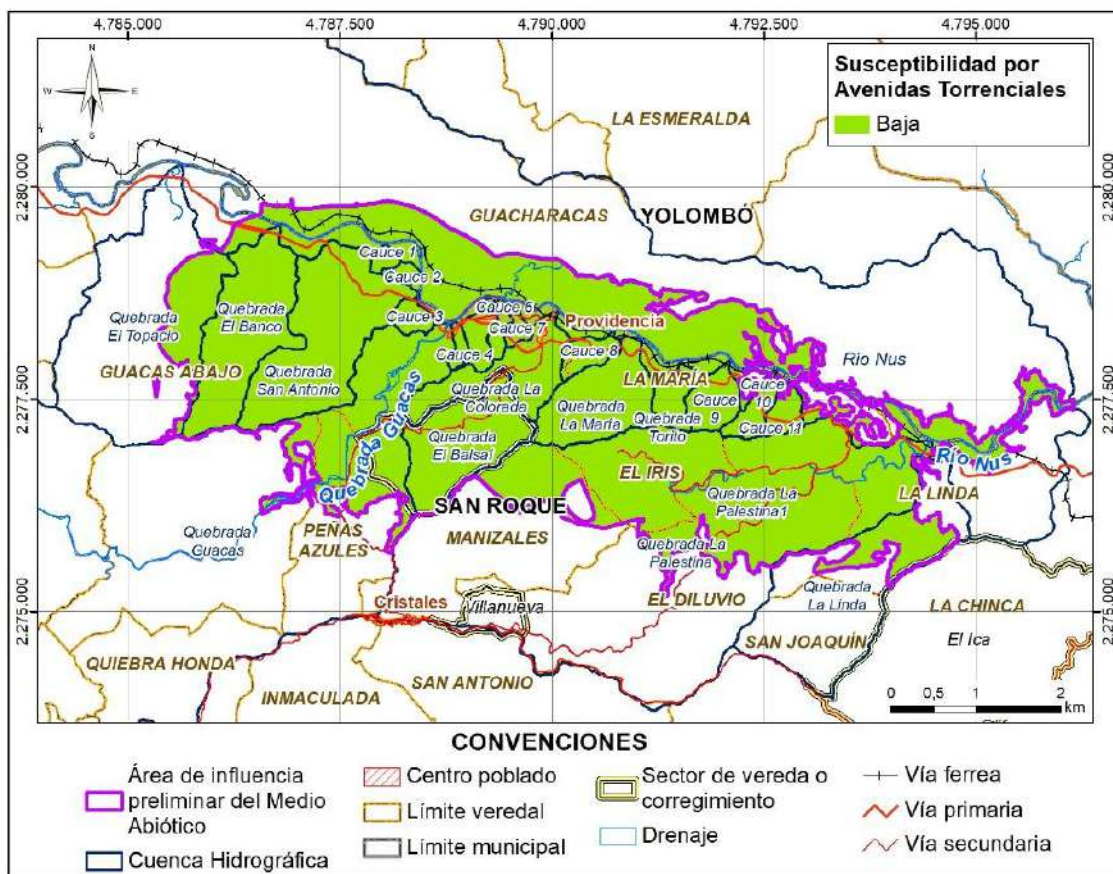


Figura 5.1.2.40 Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales

Fuente: Integral S.A., 2025

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, R. D. (2015). *Calibración de los parámetros detonantes de la Metodología SES (1989) aplicada en la generación de un escenario de amenaza por deslizamientos en la ciudad de Cartagena*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 194 - 205.
- Carvajal, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogota: Ingeominas.
- Ceballo, D., & Toro, L. J. (2012). Evaluación de la susceptibilidad a la erosión por el cambio de cobertura debido a la minería, en el municipio de Anorí, Antioquia, Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 14.
- CORCUENCAS. (2017). *Actualización POMCA río Recio y Venadillo. Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica*. Ibagué.
- Empresas Públicas de Medellín. (2006). *Evaluación de impactos ambientales acumulativos sinérgicos e indirectos en la cuenca hidrográfica del río Porce con énfasis en el proyecto Porce III*. Medellín.
- Geler, T., Ligtenberg, A., & Rolf, A. (2004). *Modelo para el pronóstico de la dinámica de erosión en los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra*. Wageningen University, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Instituto de Geografía Tropical.
- Huertas U., E. J. (2016). *Evaluación de la vulnerabilidad y amenaza de los sistemas hídricos naturales en el marco de la evaluación regional del agua para la cuenca del río Sumapáz, jurisdicción CAR*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua, ERA*. Bogotá.
- Integral S.A. (2015). *Estudio de Impacto Ambiental proyecto Gramalote. Descripción y caracterización ambiental del área de estudio*.
- Integral S.A. (2018). *Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto Gramalote. I-0010208-GA-ML-R00*. Medellín.
- Ramírez, F., & González, A. J. (1989). *Evaluación de estabilidad para zonas homogéneas. Simposio Suramericano de deslizamiento*. Paipa-Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Plancha 132 Yolombó - Versión 2*.

- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Memoria Explicativa del mapa de geomorfología para movimientos en masa de la plancha 132 Yolombó departamento de Antioquia - Versión 2*. Bogotá.
- SGC. (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Escala 1:100.000*. Bogotá.
- Zinck, J. A. (2012). *Geopedología*. Netherlands: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.