



# EL DETERIORO GEOTÉCNICO ACUMULADO (DGA) COMO ELEMENTO CLAVE EN LA EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Carlos. Buenahora<sup>1</sup>, Jorge. Jiménez<sup>2</sup> & Pablo. Salamanca<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Filiación, Floridablanca, Colombia, INGEOTECNIA ED SAS, Director Técnico General

<sup>2</sup> Filiación, Floridablanca, Colombia, INGEOTECNIA ED SAS, Asesor Metodológico

<sup>3</sup> Filiación, Floridablanca, Colombia, INGEOTECNIA ED SAS, Líder de Proyectos

**Resumen:** *Si bien, el tema del riesgo propuesto por el sistema geológico colombiano proporciona una metodología que en términos generales está aceptada en el ámbito de la academia, el cual se resume en la confluencia de los factores condicionantes, detonantes y de vulnerabilidad, como producto de estudios que hemos venido realizando y a los que le hemos hecho seguimiento, hemos observado que las propiedades mecánicas del terreno tienen, en algunas circunstancias, pérdidas de resistencia que adquirirían relevancia si con suficiente anticipación se estableciera la variación de su susceptibilidad. Por ejemplo, habrá suelos que por su capacidad drenante se recuperan en determinado lapso ante un evento pluvial y, por el contrario, habrá otros que no lo logran en ese tiempo; es precisamente en éstos últimos, en donde el Deterioro Geotécnico acumulado cobra su importancia pues se podría decir que se ha presentado un daño o una pérdida de resistencia acelerada que puede contribuir significativamente en el incremento de la probabilidad de que se desarrolle un Fenómeno de Remoción en Masa. Tal condición es lo que hemos denominado Deterioro Geotécnico Acumulado, así: Deterioro, porque tiene que ver con la pérdida de resistencia; geotécnico, porque tiene que ver con la disciplina de geotecnia, y acumulado, porque este el deterioro implica que la resistencia del suelo no se recupera, sino que se sigue acumulando hasta disponerse para llegar a la falla.*

*Conocer ese deterioro permitiría entender, por qué, ante eventos de sismo y lluvias de gran magnitud, no necesariamente se dan los deslizamientos pero que luego si se dan en eventos de magnitudes menores y por tanto hace tan difícil definir los umbrales de daño que los detona, así como su predicción temprana, en especial, ante los inminentes cambios climáticos. El Deterioro Geotécnico Acumulado es un nuevo y complementario elemento de estudio clave en la precisión que requiere el monitoreo de eventos geotécnicos en la predicción de su desarrollo.*

## 1 Introducción

El territorio nacional colombiano presenta una muy significativa variación geológica y geomorfológica debido a la existencia de las cordilleras de los Andes. Tales cambios generan una alta afectación geotécnica al considerar las condiciones climáticas tropicales y los constantes movimientos sísmicos presentes en el país, dando origen a procesos como Fenómenos de Remoción en Masa (FRM), inundaciones, avenidas torrenciales y licuefacción,

entre otros. Esto ha permitido que el estudio de tales fenómenos, ante una combinación de los factores detonantes como concentraciones pluviométricas y sismos, y de factores condicionantes como propiedades del suelo/roca, pendiente, entre otros (Körner & Ohsawa, 2005; Slaymaker & Embleton-Hamann, 2018), a través de los años, haya permitido sentar las bases para incluir y tener en cuenta el concepto del Deterioro Geotécnico Acumulado (DGA) como un elemento relevante que debe ser considerado a la hora de realizar los estudios de amenaza de origen geotécnico.

## 2 Marco de referencia

Antes de enunciar la definición de lo que constituye el concepto de Deterioro Geotécnico Acumulado, en adelante DGA, se considera oportuno enmarcar, ubicar y establecer las correlaciones necesarias para su aplicación partiendo de definiciones aceptadas por todos y que se encuentran contenidas en la Ley 1523 del 24 de abril del año 2012, donde “se adopta la política nacional de gestión del riesgo” que, en particular, para los efectos del presente trabajo, son las siguientes:



IMAGEN TOMADA DE ALAMY Y ADAPTADA PARA USO ACADÉMICO

Figura 1. Descripción gráfica conceptual de lo que se debe entender por Riesgo de Desastres el cual se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad, tal como lo señala la Ley 1523/2012.

### 2.1 Gestión del Riesgo

Dentro de la definición de gestión del riesgo, el DGA está orientado primordialmente a coadyuvar para impedir o evitar que se genere el desastre. No intenta solucionar la problemática que se deriva de las situaciones técnicas y sociales que se dan cuando el desastre ya existe.

### 2.2 Vulnerabilidad

Dentro del contexto de lo que se entiende por Riesgo de Desastres, el DGA no interviene como elemento componente, de estudio ni de medición de la vulnerabilidad.

### 2.3 Amenaza

La calidad de “peligro latente”, en este caso relacionado con la Amenaza geotécnica, la misma que se deriva de eventos naturales relacionados con la tierra, constituye el ambiente en el que se desarrolla el concepto del DGA el cual, se aplicará en función de la correlación que existe entre los dos componentes de la amenaza, los “factores detonantes” y los “factores condicionantes”.

#### *Factores condicionantes*

De entre las categorías que incluyen los Factores condicionantes, el DGA se asocia a dos de ellos: a) Las unidades de geología para ingeniería y b) Exploración básica del suelo. Dentro de las Unidades de geología para ingeniería, el DGA se interrelaciona con las propiedades de los Suelos y las Rocas. Y, dentro de la Exploración básica del suelo, el DGA se interrelaciona con las Escalas de Estudio 1:500 y 1:2000.

*Factores detonantes*

Considerando que el DGA se asocia a las propiedades de los suelos y de las rocas y que algunas de esas propiedades son afectadas por los factores detonantes ya sea la lluvia, el sismo o de origen antrópico, se concluye entonces que la correlación entre algunos de los factores condicionantes con los factores detonantes constituye la esencia del concepto de DGA tal como se sintetiza en la Figura 2 y como lo señala su definición.

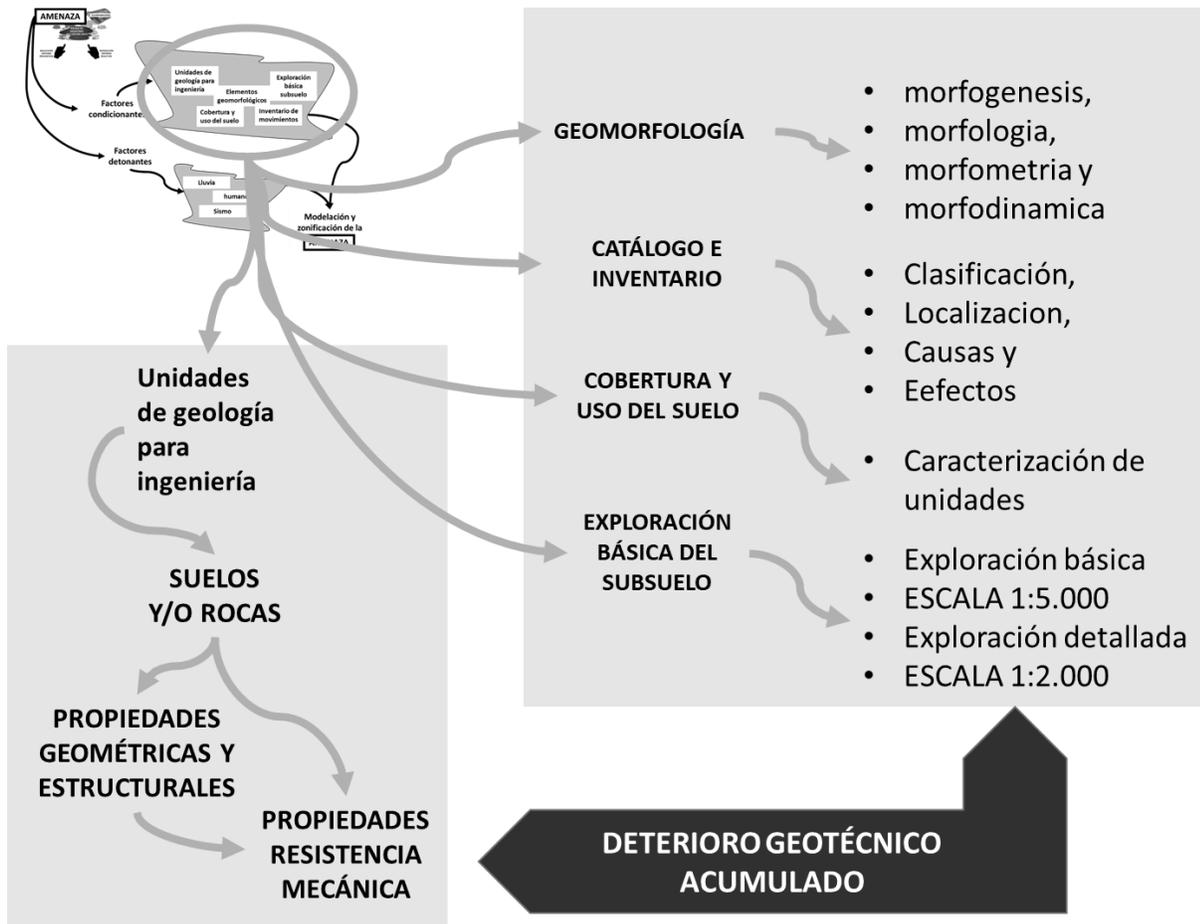


Figura 2. Marco de referencia en el cual se ubica el Deterioro Geotécnico Acumulado en el cual las propiedades de resistencia mecánica se interrelacionan con las escalas de exploración.

### 3 Concepto de deterioro geotécnico acumulado (DGA)

#### 3.1 Definición

Es el grado en el que las propiedades de un suelo o roca, componente contemplado dentro de los **factores condicionantes**, tienden a disminuirse o reducirse, por efecto de los **factores detonantes**, constituyéndose en un factor proclive o facilitador para que se dé un evento relacionado con un movimiento de remoción en masa en un momento dado.

Se dice DETERIORO Porque mide el ritmo, gradiente o nivel de disminución de varios de los parámetros que determinan la resistencia de los materiales.

Se dice GEOTÉCNICO Porque se refiere específicamente a los suelos y rocas.

Se dice ACUMULADO Porque, a través de la medición y modelación, se identifican las probables magnitudes del deterioro que se deberían dar para que se active un evento de remoción en masa.

### 3.2 Objetivo

La medición y el control del DGA se orienta a determinar, MEDIANTE MODELAMIENTO ANTICIPADO, el conjunto de valores que pueden adquirir los parámetros de resistencia de los materiales antes de que se produzca una falla en el terreno.

### 3.3 Sobre los elementos de control del DGA

A diferencia de la mayoría de las técnicas de monitoreo que se orientan a identificar signos de fallamiento del terreno tales como agrietamientos, deformaciones, volcamientos de árboles o estructuras, etc, los elementos de control en los que se enfoca el DGA se encuentran en la intimidad del terreno, se enfocan en sus propiedades y su potencial reacción ante las variaciones de los factores detonantes.

#### *Selección de las propiedades de los suelos o rocas asociadas al DGA*

Por su definición, sólo las propiedades de los suelos o de las rocas que por su naturaleza pueden ser recuperables serán los que se asocien al DGA. Así pues, propiedades tales como la génesis, la textura, el color, la forma, la composición granulométrica son propiedades del suelo que, aunque varían con el tiempo y varían en función del entorno, de todas maneras, no se pueden modificar en su estado natural. En cambio, propiedades tales como la humedad natural, la permeabilidad cualitativa, la plasticidad, la compacidad se modifican en función de las variaciones de los factores detonantes y cuya variación se podría comprobar.

*Tabla 1. Propiedades de suelo recuperables y no recuperables asociadas al DGA.*

<b>Material geológico</b>		<b>Tipo de UGI</b>	
Masa de suelo		Génesis	No recuperable
		Textura y composición	No recuperable
		Perfil del suelo	No recuperable
		Humedad natural	Recuperable
		Permeabilidad cualitativa	Recuperable
		Estructuras	No recuperable
Material de suelo	Clastos	Tipo	No recuperable
		Color	Indiferente
		Forma	No recuperable
		Redondez	No recuperable
		Orientación	No recuperable
		Grado de meteorización	No recuperable
	Matriz	Color	Indiferente
		Granulometría	No recuperable
		Plasticidad	Recuperable
		Resistencia	Recuperable
	Suelos Finos	Resistencia no drenada (consistencia)	Recuperable
	Suelos Gruesos	Densidad relativa (compacidad)	Recuperable
		Forma de los granos	No recuperable
		Redondez de los granos	No recuperable
		Orientación de los granos	No recuperable

#### *Parámetros de resistencia mecánica asociadas al DGA*

Teniendo en cuenta que, al final, la resistencia que opone un suelo o una roca ante un potencial movimiento de remoción en masa es directamente proporcional a su resistencia al corte, los parámetros específicos en los cuales se aplica el DGA son precisamente aquellos que determinan esa propiedad los cuales se reducen a la Cohesión, los esfuerzos normales, la presión de poros y el ángulo de fricción, tal como se sintetiza en la Figura 3.

**Resistencia al deslizamiento**

$$\propto$$

**Resistencia al corte.**

$$\text{Resistencia al corte} = f(c, \sigma, \mu, \Phi)$$

**c** :cohesión (cuando ésta se da),

**$\sigma$**  : esfuerzos normales,

**$\mu$**  : presión de poros y

**$\Phi$**  : del ángulo de fricción

Figura 3. Los parámetros que se controlarían con a través del DGA.

A nivel gráfico, el DGA en función del conjunto de valores desfavorables influye en la resistencia del suelo como muestra la siguiente gráfica.



Figura 4. DGA, valores desfavorables vs resistencia del suelo.

#### *Diferencia entre el DGA y los conceptos de Consolidación y saprolitización*

El DGA se enfoca en parámetros que son recuperables. La consolidación y la saprolitización son fenómenos que modifican todas las propiedades de los materiales pero que una vez adquiridas no se recuperan en sus magnitudes favorables a la estabilidad del terreno.

#### **3.4 Variables determinantes**

Existen distintas variables medibles que afectan las propiedades de lo suelos e incluyen en la determinación del DGA y la ocurrencia de deslizamientos. Estas variables funcionan de manera conjunta.

- Lluvia diaria.
- Lluvia horaria.
- Intensidad.
- Frecuencia.
- Duración
- Lluvia acumulada 24h, 48h,72, 1 semana, 1 mes, etc.
- Horas de sol.
- Intervalos de tiempo y horas de sol entre eventos de lluvias.
- Evapotranspiración.
- Permeabilidad
- Ascenso del nivel freático.

#### **3.5 Monitoreo geotécnico**

Un buen plan de monitoreo implica, no solo la aplicación de instrumentación, sino una completa estrategia que comienza desde la definición del área y el tipo de fenómeno, la formulación de una hipótesis, la selección de instrumentos de medición, la temporalidad de medición y la metodología de análisis de datos. Siguiendo el siguiente algoritmo:



Figura 5. Algoritmo de la actividad de monitoreo.

#### *Instrumentos de medición del comportamiento del suelo*

Permiten medir en campo las variables determinantes que alimentarán periódicamente la base de datos para posteriormente ser analizados. Entre los principales se encuentran:

- Mojones para monitoreo topográfico.
- Inclínómetros.
- Extensómetros.
- Piezómetros.
- Piezómetros de cuerda vibrátil.
- Imágenes de dron.
- Imágenes SAR.

#### *Instrumentos de medición de las propiedades del suelo*

Así mismo, es importante conocer las propiedades del suelo que varían a través del tiempo manifestando el DGA y que a su vez contribuyen a la actualización de modelaciones (modelos de estabilidad para determinación de estabilidad del terreno o la metodología que se haya definido para el análisis de datos), tales como:

- Cohesión.
- Fricción.
- Módulo de elasticidad.
- Coeficiente de Poisson.
- Presión de poros.
- Succión.

### 3.6 Verificación de la hipótesis o predicción

Lo realmente significativo e imprescindible es la bondad del criterio que se utilice para concebir tal predicción; es decir, que para exponer la hipótesis y plantearla de manera eficaz, es necesario conocer bien, tener experiencia, contar con una buena información secundaria y cualquier otra complementaria referente al fenómeno que se va a estudiar; igualmente, se debe conocer sus mecanismos de comportamiento, los factores o parámetros que lo modifican y su determinación o medición en campo.

Una muy buena intersección entre el conjunto de datos arrojados por la instrumentación con el conjunto de resultados de las modelaciones permitirá predecir la ocurrencia de Fenómenos de Remoción en Masa.

## 4 Aplicación en el sector de cortinas

Existe un caso práctico que se desarrolló en el sector conocido como Cortinas en el municipio de Toledo, Norte de Santander, Colombia, en el que se analizó la evolución de las condiciones geoambientales entre los años 2016 y 2021 buscando evaluar la susceptibilidad y la amenaza de deslizamientos; teniendo en cuenta el concepto de "Deterioro Geotécnico Acumulado (DGA)" a lo largo del tiempo.

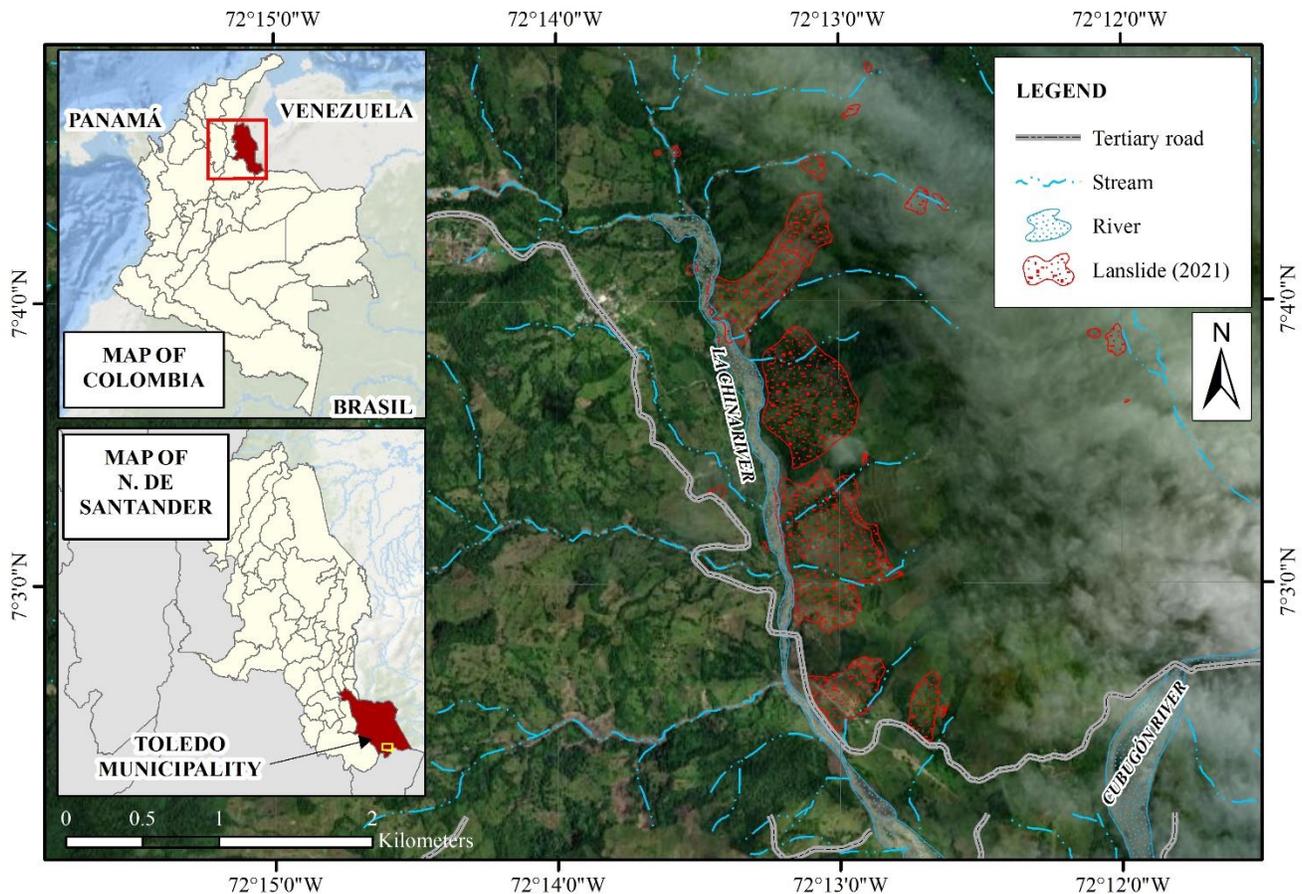


Figura 6. Localización del área de estudio, caso práctico Cortinas.

### 4.1 Metodología de análisis

La metodología utilizada en este estudio para evaluar la amenaza de deslizamientos se basa en el documento "Guía metodológica para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000", del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017). Esta metodología propone la zonificación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante el uso de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), recopilando y analizando datos a nivel local sobre procesos morfodinámicos, características geológicas y geomorfológicas,

patrones de cobertura del suelo y uso de la tierra, y datos hidrológicos y sísmicos. Basado en lo anterior, la metodología se divide en tres etapas principales para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa: i. Caracterización geoambiental, ii. Análisis de susceptibilidad, iii. Análisis de la peligrosidad.

#### 4.2 Inventario de procesos morfodinámicos

Para cada año de análisis fue cartografiado por medio de restitución fotogramétrica la presencia de deslizamientos activos en la zona de estudio representados como polígonos.

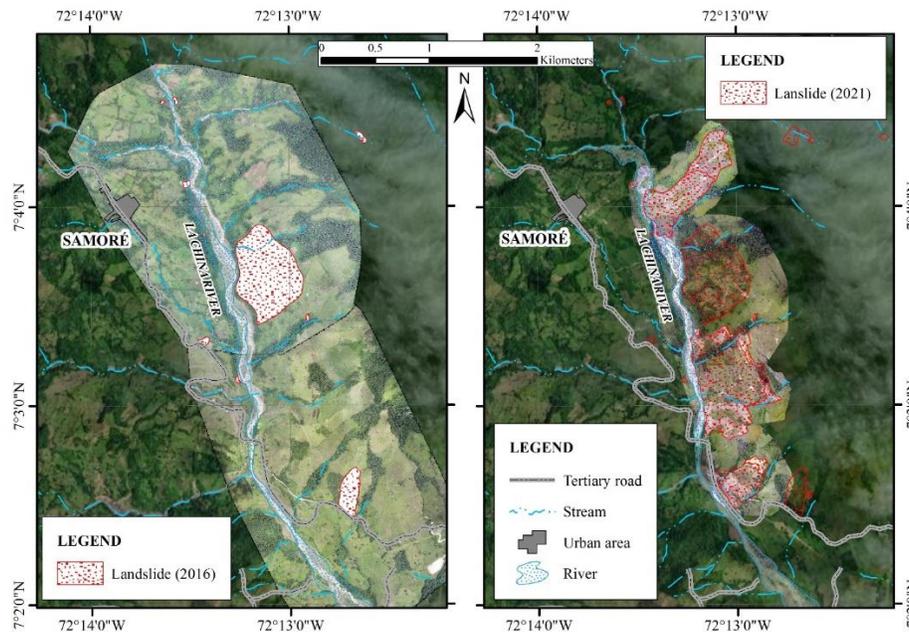


Figura 7. Inventario de procesos morfodinámicos en la zona de estudio: año 2016 (Izq.) y año 2021 (Drcha).

#### 4.3 Factores condicionantes

##### *Factor Geológico*

Dentro del área de estudio y alrededores se evidencian materiales de la Formación San Fernando (Rmmasf) y la Formación Diablo (Rmald), constituidas respectivamente por pizarras con delgadas intercalaciones de arenisca cuarzosa de grano fino, y areniscas de grano fino a medio intercaladas por lodolitas (Ulloa & Rodríguez, 1981). Los macizos rocosos de la Formación San Fernando presentan un grado de meteorización moderado (grado III – IV) de acuerdo al perfil de meteorización de Dearman (1974). Presenta superficies de discontinuidad poco definidas debido al fuerte replegamiento y fracturación. A nivel superficial, el macizo presenta una resistencia a compresión simple entre 1 – 25 MPa, clasificando como una roca muy blanda a blanda (González de Vallejo, 2002). Fueron reconocidas en campo superficies de discontinuidad (fracturas y diaclasas) en las capas de arenisca.

##### *Factor Geomorfológico*

La zona de estudio se caracteriza por presentar variedad de elevaciones del terreno, que la convierten en una zona topográficamente variable. Destacan subunidades geomorfológicas del tipo laderas erosivas (Dle), laderas erosivas abruptas (Dlea), conos de deslizamientos indiferenciados (Ddi), conos y lóbulos coluviales y de solifluxión (Dco), y conos o lóbulos de flujos de detritos (Dfd). Debido a la dinámica fluvial que presentan las quebradas La China, La Tamarana y otras adyacentes, crean zonas de deposición y erosión como cauces aluviales (Fca), planos o llanuras de inundación (Fpi), abanicos fluviotorrencales (Faft), conos de deyección (Fcdy), terrazas de acumulación (Fta) y terrazas fluviotorrencales (Fttf).

##### *Factor Pendiente*

La pendiente fue calculada mediante análisis espaciales utilizando el DEM Alos Palsar de Alaska Satellite Facility, con una resolución espacial de 12.5 m. Posteriormente fue realizada la clasificación de acuerdo a las nueve categorías planteadas por el manual del Servicio Geológico Colombiano.

#### *Factor Cobertura Vegetal*

La variable de cobertura fue obtenida a partir de información suministrada por el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) el cual se basa en la metodología de Corine Land Cover (IDEAM *et al.*, 2008).

#### 4.4 Susceptibilidad

El análisis de la susceptibilidad fue realizado mediante el cruce de mapas de cada condicionante por medio de herramientas SIG, llevando la información en términos de píxeles. Cada categoría de los condicionantes fue definida como unidad de modelación (UM) junto al inventario de movimientos, estableciendo así los valores de pesos de evidencia.

Una vez obtenidos los pesos de evidencia finales es posible calcular el valor de LSI para cada píxel y posteriormente clasificar por percentiles. Los rangos de susceptibilidad fueron definidos con base las curvas de éxito para cada año, definiendo las áreas de zonificación alta, media y baja.

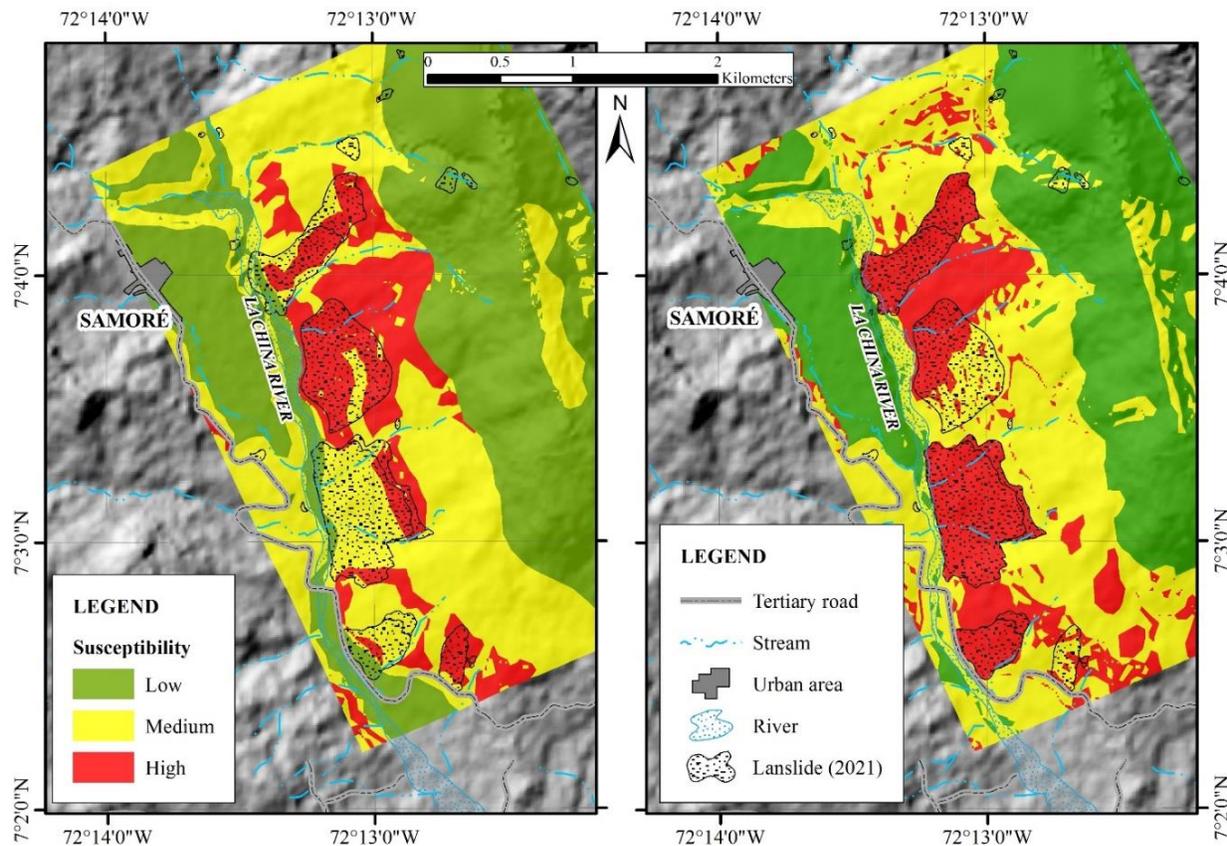


Figura 8. Mapa susceptibilidad por deslizamiento en la zona de estudio, Izq: año 2016, Der: año 2021.

#### 4.5 Factores desencadenantes

##### *Factor Precipitaciones*

De acuerdo con el SGC (2017), en Colombia se han establecido umbrales de lluvia según los cálculos realizados por Castellanos (1996), Moreno *et al.* (2006), Echeverri y Valencia (2004) y Ortiz *et al.* (1992). Sin embargo, estos umbrales no han sido determinantes debido a la deficiencia en la información disponible y la falta de evidencias

claras que relacionen las lluvias con los deslizamientos. Esto es suficiente razón para que, a nivel de la escala 1:25.000, se determine la influencia en la amenaza de manera cualitativa. Otro criterio importante a tener en cuenta es el DGA, ya que se ha observado que ciertas condiciones de lluvia, que están dentro de los umbrales establecidos, no han generado deslizamientos en ciertos momentos. Esto posiblemente se debe a que el deterioro del terreno no ha sido suficiente para causarlos, a pesar de la presencia de valores extremos de lluvia. Esto posiblemente se debe a que el deterioro del terreno no ha sido suficiente para causarlos, a pesar de la presencia de valores extremos de lluvia y para que esto ocurra deben tenerse en cuenta eventos de múltiples variables que son muy difíciles de determinar. Esto no depende solo de un valor específico de lluvia, si no a las lluvias precedentes considerando su intensidad, frecuencia y duración, así como, el grado de porosidad del suelo, las horas de sol, valor de temperatura y evapotranspiración, entre otros, que a su vez deben medirse periódicamente su interacción con el suelo en su deterioro. Estas variables que afectan el deterioro de los suelos deberán ser considerados en análisis de escalas más detalladas, En el que se tengan en cuenta la variación de los parámetros geotécnicos y la resistencia mecánica del suelo.

Para esta investigación, la información de la precipitación fue obtenida de la estación pluviométrica más cercana correspondiente a la estación Santa María – Abastos del IDEAM, con un periodo de análisis comprendido desde el 01/01/1993 hasta el 31/12/2022. Para la caracterización del detonante lluvia se tuvieron en cuenta los números de días con lluvia al mes, donde se cuenta con un valor mínimo de 16 días en el mes de enero y un valor máximo de 31 días en el mes de julio, y en algunos casos, los días de lluvia representan el 80% de los días totales del año, dentro del gráfico se muestra la línea de valores medios de cada mes. Otro de los criterios importantes es la precipitación media mensual multianual los cuales varían entre 349 mm y 1078 mm en enero y junio respectivamente. Los valores totales anuales generalmente superan los 5000 mm. Finalmente, las lluvias máximas en 24 horas mostraron valores extremos cercanos de hasta 200 mm para el mes de agosto.

#### *Factor Sismo*

Tal como menciona la metodología del SGC (2017), el análisis de los sismos que desencadenan deslizamientos aún no está suficientemente desarrollado y constituye un campo de investigación en construcción, debido a la dificultad inherente para definir posibles escenarios de sismos, como, por ejemplo, las condiciones de humedad previa y su relación con las distribuciones de movimientos en masa co-sísmicos (Corominas et al., 2013). A pesar de que el valor de aceleración pico efectiva ( $A_a$ ) para esta zona corresponde a uno de los más altos del país, es decir, 0.35G, los eventos sísmicos reportados por el SGC en el municipio de Toledo durante los años 2016 a 2021 no coinciden con las fechas de los deslizamientos mostrados. Sin embargo, se podría correlacionar que cada vez que ocurre un sismo existe un aporte en el deterioro del material que sumado a eventos de lluvia (sin ser el máximo) contribuye a la ocurrencia de nuevos movimientos en masa.

#### **4.6 Peligrosidad**

Los detonantes a nivel de la escala 1:25000 se consideran relevantes más allá que dada la criticidad de las lluvias y amenaza sísmica de la zona, las cuales inducen claramente que para una zonificación de alta susceptibilidad se relacione una amenaza alta a ocurrencia de deslizamientos. Para la metodología empleada, la amenaza del sector estaría influenciada principalmente por los efectos de la lluvia únicamente. Para la zona de estudio, no se observaron eventos sísmicos que coincidan con las fechas de los deslizamientos presentados y es de destacar que, para Colombia, generalmente los sismos ocurren a gran profundidad (hasta de 170 kilómetros) y de menor magnitud (la mayoría no superan una magnitud de 4).

#### **4.7 Deterioro geotécnico acumulado del sector**

Se realiza una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos entre cada uno de los años analizados con el fin de establecer una línea base que permita evaluar las condiciones de deterioro geotécnico acumulado en la zona de estudio.

Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) muestran que no existe una variación importante en la distribución de los materiales geológicos; sin embargo, las zonas de depósitos coluviales aumentaron en área y distribución debido a los deslizamientos ocurridos entre los años 2016 y 2021.

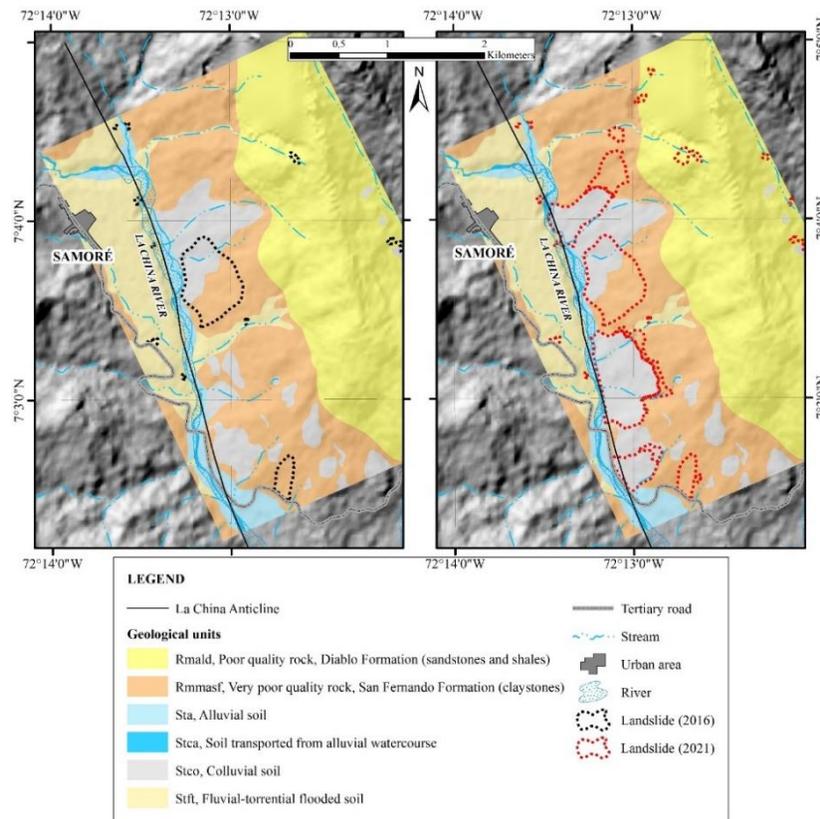


Figura 9. Mapa unidades geológicas superficiales en la zona de estudio, Izq: año 2016, Der: año 2021.

La variable geomorfológica presenta diferencias en las unidades interpretadas, principalmente la morfodinámica representada por los movimientos en masa, los cuales muestran una gran variación entre un año y otro.

Los resultados de pendiente no muestran gran variación posiblemente asociado a la escala de análisis, se espera que en la zona de los deslizamientos exista una modificación debido al acumulo de material y desprendimiento de este, ya que se evidenciaron escarpes de algunas decenas de metros.

Las unidades de cobertura revelan una gran diferencia en las áreas donde se presentaron los deslizamientos, pasando de áreas de pastos y espacios naturales a pastos limpios, posiblemente asociado a las actividades agropecuarias de la región.

Se observa una variación significativa en las zonas de susceptibilidad alta, que aumentan de 167.73 Ha a 234.03 Ha (Figura 9). Las zonas de amenaza media muestran una pequeña disminución en la parte central de la zona de estudio, posiblemente asociada a las obras de mitigación construidas antes de los eventos de deslizamiento, las cuales han mostrado una alta eficiencia. La Tabla 3 muestra los valores en área y porcentaje de los rangos de clasificación de susceptibilidad para la zona analizada en cada año

Tabla 2. Variación de los rangos de susceptibilidad entre los años 2016 y 2021.

Susceptibilidad	2016		2021	
	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%
Baja	713.57	52.3	604.68	44.3
Media	482.65	35.4	525.24	38.5
Alta	167.73	12.3	234.03	17.2

#### 4.8 Discusión

El caso de estudio examina la aplicación de la metodología de amenaza por deslizamientos en el área de Cortinas, Colombia, durante dos años diferentes. Se introduce el concepto de Deterioro Geotécnico Acumulado (DGA) como un factor determinante en la activación de los movimientos de tierra. La investigación se basa en datos de fotointerpretación de variables como geología, geomorfología y cobertura vegetal, relacionadas con factores externos como la lluvia.

Se observa que la alteración drástica de la cobertura vegetal puede ser un factor favorablemente significativo en el DGA y la ocurrencia de deslizamientos, debido a su impacto en las propiedades hidráulicas y mecánicas del suelo. Además, se señala que la dinámica ambiental natural, junto con el deterioro geotécnico acumulado, aumenta la susceptibilidad a los deslizamientos.

Se analizan los factores detonantes, encontrando una posible relación entre los periodos de lluvias prolongadas y los deslizamientos, pero no una asociación directa con valores extremos de precipitación. Se destaca que ninguno de los detonantes ha variado considerablemente en el tiempo por sí solo, lo que sugiere una convergencia con el deterioro de los factores condicionantes del área.

El estudio propone el DGA como un factor a considerar en los análisis de susceptibilidad y peligrosidad, y sugiere establecer líneas base de trayectoria en los análisis de amenaza para proyectar posibles eventos futuros y desarrollar medidas de mitigación.

Se reconoce que los resultados están limitados a una escala de análisis de 1:25.000 y se sugiere profundizar la metodología a niveles de detalle más específicos para comprender mejor el mecanismo de la falla y la influencia del DGA en las propiedades de los materiales a lo largo del tiempo

### 5 Conclusiones

Es parte de la práctica común, sobre todo en los sectores oficiales, que se inhiben en la práctica de la prevención y que, por el contrario, son proclives hacia el criterio reactivo; no porque no se tengan claros los conceptos ya que buenos ingenieros sí los hay si no porque intervienen otros elementos culturales. Por ejemplo, la facilidad de la contratación directa cuando se trata de acciones correctivas contrasta con el caso de la inversión en prevención que, aparte de que es mayor la dificultad en la contratación requiere de los procesos licitatorios regulares, genera algo de incertidumbre en su eficacia pues al final si un desastre se previene no se sabe si lo que se invirtió en su prevención fue una suma o fueron unos esfuerzos razonables o no lo cual va en contra del de la optimización de los recursos con los que se cuentan para este tipo de problemáticas naturales con impacto social. Es por ello que todos los esfuerzos que realicemos para minimizar esa incertidumbre en el proceso de mantenimiento preventivo cobran muchísima relevancia y hacia allá es que está orientada la aplicación de la del concepto del deterioro geotécnico acumulada el cual se enfoca en la actividad de la predicción como una de las mejores herramientas de la prevención de desastres.

Si bien es costumbre y una práctica productiva muy común en nuestro medio, el control estadístico de los modificaciones de los elementos que hacen parte de los factores detonantes, tales como la lluvia, el sismo o acción antrópica, se entiende que el control del DGA constituye una buena herramienta para intentar predecir los potenciales fenómenos de remoción en masa pues con el control del deterioro geotécnico acumulado intentamos profundizar en el efecto que los fenómenos detonantes surten sobre la resistencia mecánica con la finalidad de establecer cuál podría ser el comportamiento de un suelo o roca la variedad de valores que tomen los factores detonantes antes de que se produzca el evento tragedia e inclusive antes de que se den los primeros signos tales como grietas o deformaciones que anuncien su desarrollo. Y esta es la bondad del estudio y control del deterioro geotécnico acumulado, así como su finalidad; no sobra, sin embargo, señalar que el deterioro geotécnico acumulado se diferencia de la consolidación y la meteorización en que el DGA puede ser recuperable.

## 8 Referencias

- Castellanos, J. R. (1996). Lluvias críticas en la evaluación de amenazas de eventos de remoción en masa. Tesis de Magíster. Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia.
- Corominas, J., & Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102(3–4), 193–213. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.018>
- Dearman, W. R. (1974). Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purposes in British practice. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 9(1), 33–42. <https://doi.org/10.1007/BF02635301>
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2004). Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la Quebrada La Iguana de la ciudad de Medellín a partir. *Dyna*, 71(142), 33-45.
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA. (2008). Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.
- Körner, C., & Ohsawa, M. (2005). Mountain systems. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. (pp. 681–716). Island Press. <https://islandpress.org/books/ecosystems-andhuman-well-being-current-state-and-trends>
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intranual y diaria. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia*, (5), 59-69.
- Ortiz, D. P., Penagos, J. C., & Lizcano, A. (1992). Determinación de lluvias críticas que activan deslizamientos empleando redes neuronales. Bogotá: Universidad de los Andes.
- SGC. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789589952856>
- SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- Slaymaker, O., & Embleton-Hamann, C. (2018). Advances in global mountain geomorphology. *Geomorphology*, 308, 230–264. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.016>