



# Informe mensual de actividades

Anexo WP1.3.5 Estudio sobre el manejo y control  
de deslizamientos con soluciones basadas en la  
naturaleza

Fecha de 2025



# Contrato

CCT 261 de 2025

# Contenido

|         |                                                                                                   |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| WP1.3.5 | Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos con soluciones basadas en la naturaleza (SbN) | 2  |
|         | Introducción                                                                                      | 2  |
|         | Contexto de los movimientos en masa en el trópico                                                 | 3  |
|         | Movimientos en masa más comunes en el Valle de Aburrá                                             | 3  |
|         | SbN en el contexto de los movimientos en masa                                                     | 3  |
|         | Propósito e importancia de una estrategia de manejo de deslizamientos basada en la naturaleza     | 4  |
|         | ¿Qué son los movimientos en masa?                                                                 | 5  |
|         | ¿Qué tipos de movimientos en masa existen?                                                        | 5  |
|         | ¿Qué son las soluciones basadas en la naturaleza?                                                 | 11 |
|         | Tipos de soluciones basadas en la naturaleza                                                      | 11 |
|         | Tipos de soluciones basadas en la naturaleza                                                      | 13 |
|         | Bioingeniería del suelo                                                                           | 13 |
|         | Soluciones híbridas                                                                               | 13 |
|         | Referencias                                                                                       | 15 |



## WP1

# Observatorio de amenazas y riesgos

Este WP tiene como objetivo generar conocimiento que sirva como insumo para la alerta temprana y la toma de decisiones a partir del monitoreo, análisis, modelación y generación de alarmas y alertas sobre múltiples componentes físicos, a través de actividades de investigación y operaciones que permitan avanzar en la caracterización, entendimiento, seguimiento y pronóstico de múltiples amenazas ambientales y evaluación de riesgos asociados.

Se avanzará en la consolidación del observatorio de múltiples amenazas, el cual es fundamental dada la variedad de amenazas que pueden impactar la sociedad y el territorio. Para este fin, el WP1 está constituido por tres grandes grupos de actividades: WP1.1 - Caracterización y monitoreo de variables y procesos asociados con las amenazas. El grupo WP1.2 - Modelación y pronóstico de la calidad del aire, las lluvias y otros fenómenos asociados con las amenazas. Por último, el grupo WP1.3 - Información para la gestión y herramientas operacionales que permitan la consolidación del observatorio de amenazas y riesgos en su primera fase, para el apoyo a emergencias, se enfoca en la aplicación (transferencia) de esta investigación a las operaciones para generar alertas y apoyar la gestión, a través de la consolidación de un observatorio multi-amenaza.

**WP1.3.5**

## Estudio sobre el manejo y control de deslizamientos con soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

### Introducción

El Valle de Aburrá está conformado por un relieve montañoso y escarpado, caracterizado por la presencia de laderas empinadas, suelos residuales, depósitos coluviales y formaciones rocosas fracturadas y meteorizadas. Estas condiciones geológicas y geomorfológicas, combinadas con una alta densidad poblacional y procesos acelerados de urbanización, han incrementado la exposición y vulnerabilidad ante los movimientos en masa.

En los últimos años, las entidades gubernamentales a nivel país han reforzado su compromiso con la reducción del riesgo de desastres, en consonancia con los marcos globales como el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París sobre cambio climático. Este alineamiento reconoce la necesidad de articular el desarrollo sostenible con la gestión del riesgo, en un territorio en el que los procesos naturales se ven intensificados por el cambio climático y por la presión de la ocupación humana en zonas de ladera.

El Valle de Aburrá es altamente dependiente de la dinámica climática regional y, en particular, de los regímenes de precipitación asociados al ciclo anual bimodal y a la influencia de fenómenos como La Niña (asociado a un aumento en las precipitaciones en el caso colombiano). La variabilidad en la intensidad y distribución temporal de las lluvias ocasiona tanto periodos secos prolongados como eventos de precipitación intensa en cortos intervalos de tiempo, condiciones que suelen detonar deslizamientos, avenidas torrenciales e inundaciones. Cuando estas condiciones se combinan con laderas urbanizadas, ecosistemas degradados y comunidades con baja resiliencia, los efectos se tornan severos.

Entre los distintos tipos de amenazas presentes en el Valle de Aburrá, los movimientos en masa se destacan como uno de los fenómenos más recurrentes y de mayor impacto, generando pérdidas humanas, destrucción de bienes y alteraciones significativas en la infraestructura crítica y las redes de movilidad. Estas afectaciones son especialmente graves en zonas urbanas de alta densidad y en sectores donde los procesos de expansión urbana han ocupado áreas inestables.

## Contexto de los movimientos en masa en el trópico

Las regiones montañosas tropicales se consideran zonas críticas de deslizamientos de tierra, tanto por su vulnerabilidad física como por la exposición humana creciente. Sin embargo, el conocimiento sobre los procesos de movimientos en masa en estos entornos sigue siendo limitado. Gran parte de la información disponible proviene de modelos de susceptibilidad a escala continental o global, que no capturan las particularidades locales como la litología, la dinámica climática o el uso del suelo.

En los trópicos, la combinación de fuertes pendientes, suelos meteorizados, altas tasas de precipitación y una rápida degradación ambiental causada por el ser humano genera un escenario propicio para los deslizamientos. La presión demográfica y los cambios en el uso y cobertura del suelo son factores clave en la frecuencia e intensidad creciente de estos eventos, sobre todo en áreas rurales.

La deforestación, en particular, juega un papel central: la pérdida de raíces disminuye la cohesión del regolito y altera los patrones de drenaje, lo que favorece principalmente la aparición de deslizamientos superficiales. Además, actividades como la minería artesanal y la construcción de vías agravan la inestabilidad de laderas, dependiendo de su intensidad, temporalidad y del contexto geológico y topográfico en el que se desarrollan.

## Movimientos en masa más comunes en el Valle de Aburrá

Los inventarios históricos han permitido dimensionar esta problemática: Aristizábal (2008) reporta, para el período 1880–2007, un total de 6.750 eventos en la región, de los cuales el 35 % corresponden a movimientos en masa. Aunque las inundaciones constituyen el fenómeno más recurrente, los deslizamientos han sido responsables de la mayor proporción de víctimas fatales (77 %), con eventos de gran impacto como Rosellón (1927), Media Luna (1954), Santo Domingo Savio (1974), Villatina (1987) y El Barro (2005).

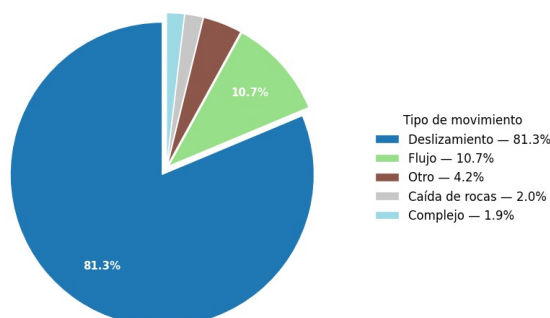
De acuerdo con el *Inventario de Movimientos en Masa de SIATA (2010–2025)*, los procesos más comunes en el Valle de Aburrá corresponden a los **deslizamientos** (81.3 %), que incluyen modalidades rotacionales y traslacionales, seguidos por los **flujos de lodos y avenidas torrenciales** (10.7 %). En menor proporción se presentan eventos clasificados como caídas de rocas, movimientos complejos y otros tipos de inestabilidad (ver Figura 9).

El modo de falla de estos fenómenos depende de factores como el tipo y grado de meteorización del material, la presencia de planos de debilidad, la inclinación de las laderas y las condiciones hidrometeorológicas. En muchos casos, los procesos se originan por la combinación de mecanismos de erosión, inestabilidad del suelo y saturación hídrica, lo que da lugar a fallas complejas.

## SbN en el contexto de los movimientos en masa

La gestión del riesgo de movimientos en masa mediante soluciones basadas en la naturaleza se fundamenta en el aprovechamiento de elementos ecosistémicos, en especial la vegetación, como mecanismo para disminuir la inestabilidad superficial de laderas. Bajo este enfoque, las SbN constituyen un concepto amplio que abarca múltiples prácticas de origen natural. Entre ellas destacan la bioingeniería del suelo, la forestación y diversas alternativas híbridas que combinan enfoques verdes e infraestructura convencional.

Distribución por tipo de movimiento en masa  
(Inventario SIATA 2010-2025)



**Figura 1.** Distribución por tipo de movimiento en masa (inventario SIATA 2010 - 2025)

## Propósito e importancia de una estrategia de manejo de deslizamientos basada en la naturaleza

La reducción del riesgo de deslizamientos no puede depender únicamente de obras costosas y de gran escala. En las últimas décadas se ha demostrado que la integración de los ecosistemas en las soluciones ofrece una alternativa sostenible y con múltiples beneficios. En este sentido, las SbN buscan aprovechar funciones propias de la vegetación y del suelo para disminuir la inestabilidad de laderas y controlar la erosión.

El empleo de plantas como elemento estructural del terreno ha dado origen a la llamada bioingeniería del suelo, entendida como la utilización de material vegetal vivo o inerte para reforzar, drenar y proteger taludes, cauces y depósitos superficiales (Lewis et al., 2001). A diferencia de una visión estética, este enfoque considera a la vegetación como parte integral de la estabilidad de la ladera y requiere la interacción de distintas disciplinas: geología, ingeniería civil, arquitectura del paisaje y mantenimiento.

Las experiencias internacionales muestran que estas prácticas se han consolidado como una opción viable, económica y ambientalmente amigable. Países como Nepal, Pakistán, India y Sri Lanka han desarrollado proyectos exitosos en los que la bioingeniería ha reducido el impacto de deslizamientos y flujos superficiales. Sin embargo, la efectividad de estas medidas depende en gran medida de las condiciones locales: las especies disponibles, el tipo de ecosistema y la dinámica hídrica. Esto significa que no siempre es posible replicar soluciones de un lugar a otro sin una adecuada adaptación.

Cabe aclarar que las SbN no sustituyen todas las formas de manejo del riesgo. En deslizamientos profundos, donde influyen factores como la presión del agua subterránea o la necesidad de estructuras de soporte en la base del talud, se hace indispensable combinar las SbN con medidas de carácter geotécnico. Estas estrategias híbridas permiten aprovechar las ventajas ecológicas de la bioingeniería, al tiempo que se refuerza la seguridad mediante obras convencionales.



## ¿Qué son los movimientos en masa?

El término movimiento en masa hace referencia al desplazamiento pendiente abajo de materiales como rocas, detritos o suelos, provocado por la fuerza de la gravedad (Cruden and Varnes, 1996). Estos procesos se manifiestan en formas diversas, como deformaciones del terreno, movimientos viscosos u otros tipos de desplazamientos de masas, y pueden ocurrir en cualquier parte del planeta.

Su análisis y monitoreo resultan fundamentales debido al alto riesgo que representan, ya que pueden causar pérdidas humanas y económicas significativas, en especial en el contexto de países como Colombia, donde las temporadas de lluvias intensas, especialmente asociadas al fenómeno de La Niña, generan o reactivan deslizamientos, desprendimientos y flujos que afectan a numerosas comunidades (Montero Olarte, 2017).

## ¿Qué tipos de movimientos en masa existen?

Según la clasificación propuesta por Cruden y Varnes en 1996, los movimientos en masa se dividen en cinco tipos básicos; caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujo, retomando y ampliando la clasificación de Varnes (1978). Esta clasificación considera no solo el tipo de desplazamiento, sino también aspectos como el contenido de agua, la velocidad del movimiento, su distribución y estilo. A continuación, se describen los movimientos definidos en este sistema de clasificación:

### Caída

La caída es un tipo de movimiento en masa que consiste en la separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, a lo largo de una superficie que puede o no presentar desplazamiento por cortante. Una vez que ocurre el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, aunque también puede rebotar o rodar. Suele estar influenciada por la geometría de las discontinuidades y puede ser extremadamente rápida.



**Figura 2.** Esquema de caída de rocas.

## Volcamiento

El volcamiento es un tipo de movimiento en masa que consiste en la rotación hacia adelante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un eje o pivote situado por debajo del centro de gravedad de dicha masa (Cruden and Varnes, 1996). Este tipo de movimiento se presenta típicamente en terrenos con pendientes empinadas, donde la masa pierde estabilidad y gira frontalmente. Se reconocen tres tipos:

- **Volcamiento de bloques de roca, delimitados por discontinuidades preexistentes:** este tipo puede ser Individual, cuando un bloque reposa sobre una base inicialmente firme que es socavada o falla por cortante. O Múltiple, cuando hay interacción entre varios bloques, generando una pérdida de estabilidad progresiva desde el extremo más expuesto. Esto puede ser causado, por ejemplo, por la erosión de una corriente de agua que socava los bloques inferiores.

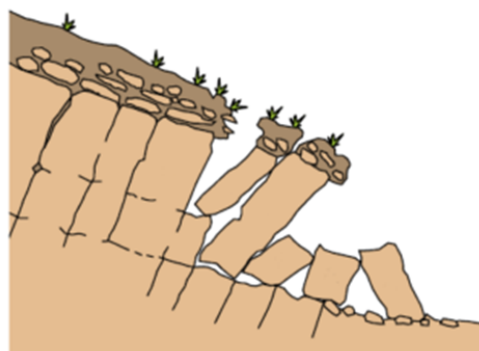


Figura 3. Esquema del volcamiento de bloques.

Se reconocen tres subtipos de volcamiento múltiple:

**Volcamiento flexural:** este tipo de volcamiento es común en masas rocosas que presentan sistemas de discontinuidad con fuerte buzamiento hacia el interior de la ladera, generando la formación de columnas en voladizo (tipo cantiléver). Estas columnas sufren flexión progresiva, lo que provoca agrietamientos por tensión que finalmente llevan al desprendimiento de fragmentos rocosos, los cuales se acumulan al pie del talud.

**Volcamiento en Chevron:** se presenta principalmente en macizos rocosos con diaclasas de inclinación pronunciada hacia el interior de la ladera, característico de formaciones de rocas metamórficas como esquistos y filitas. El movimiento inicia a partir de un plano débil que actúa como bisagra, alrededor del cual se doblan los bloques, dando lugar a una deformación flexural gradual y a un volcamiento parcial.

**Volcamiento flexural en bloque:** en este caso, se observa una flexión pseudocontinua de columnas rocosas largas dentro de un macizo, producto del movimiento acumulado a lo largo de múltiples diaclasas transversales. Esto genera un deslizamiento distribuido en la base de la masa inestable, mientras que en el resto del cuerpo se produce una combinación de deslizamiento y volcamiento.

- **Volcamiento de bloques aislados liberados por tensión:** este tipo de desprendimiento ocurre cuando bloques individuales de roca se separan del macizo rocoso principal debido a tensiones



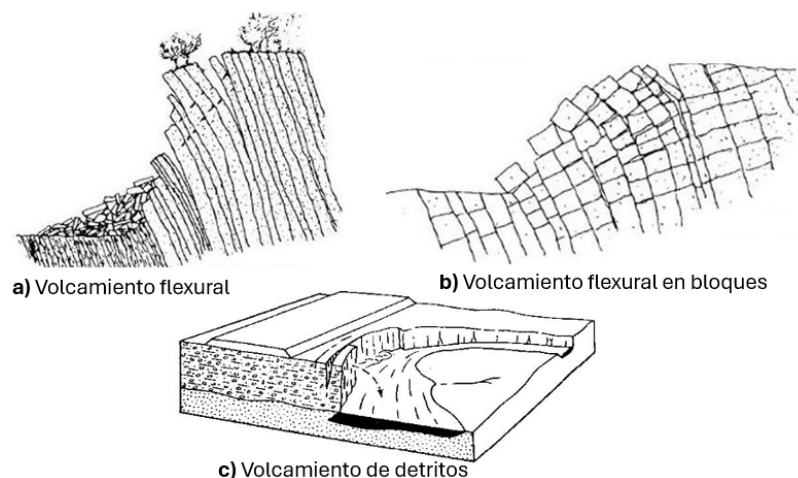


Figura 4. Tipos de volcamiento.

internas. La liberación de estos bloques está facilitada por la presencia de agrietamientos por tensión en la parte superior de la ladera, que permiten que los bloques se desestabilicen y eventualmente se volteen o caigan.

- **Volcamiento de detritos:** este proceso consiste en el desprendimiento de masas tabulares de detritos desde un punto elevado, en un mecanismo de tipo retrogresivo. Estos desprendimientos pueden originarse, por ejemplo, en la corona de un deslizamiento o en el barranco de la orilla de un cauce, donde las condiciones geomorfológicas y estructurales favorecen la pérdida de estabilidad. Un caso común de volcamiento de detritos se observa en las orillas de ríos o quebradas, donde la erosión lateral debilita la base de taludes formados por material suelto o semiconsolidado, facilitando la inclinación y posterior caída del material.

## Deslizamiento

Cruden y Varnes definen el deslizamiento como un tipo de movimiento en masa que consiste en el desplazamiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, que ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o a través de zonas relativamente delgadas sometidas a esfuerzos cortantes intensos. Según estos autores, la superficie de ruptura no se forma de manera simultánea a lo largo de toda la masa inestable, sino que se inicia con la aparición de agrietamientos en la parte superior de la ladera, los cuales más adelante definirán la corona del deslizamiento. En la parte inferior de la masa movilizada se forma la denominada pata del deslizamiento, la cual, en algunos casos, puede ser rebasada por el propio material desplazado.

- **Deslizamiento rotacional:** también conocido como hundimiento, ocurre cuando una masa de suelo o roca se desliza ladera abajo a lo largo de una superficie de rotura curva y cóncava. Este tipo de falla no está controlado estructuralmente y suele presentar poca deformación interna, ya que la masa rota como un bloque. El material en la parte superior se desplaza casi verticalmente, mientras que la superficie del terreno se inclina hacia el escarpe de la corona. Es un movimiento lento a moderadamente lento, debido a que el mecanismo de rotación es autoestabilizante: la fuerza de gravedad que impulsa el movimiento disminuye a medida que avanza el deslizamiento. Este tipo de deslizamiento es común tanto en roca como en suelos cohesivos.

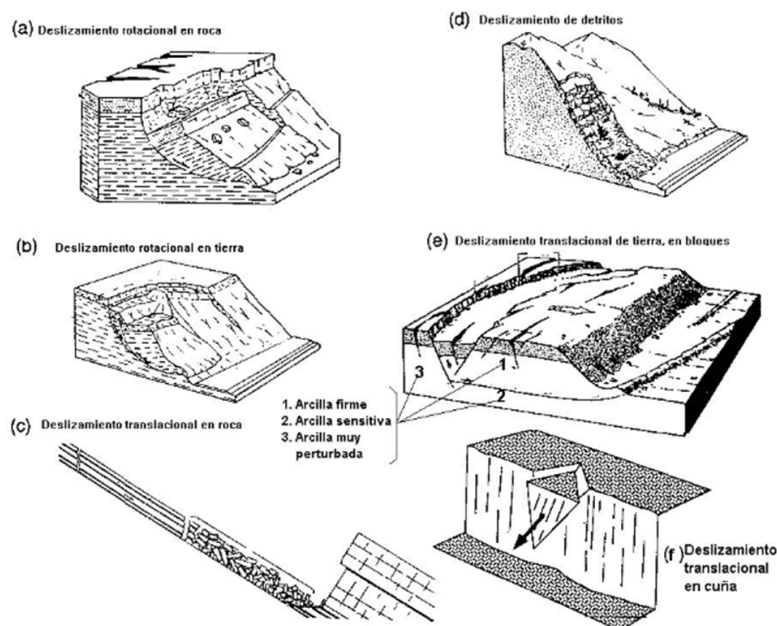


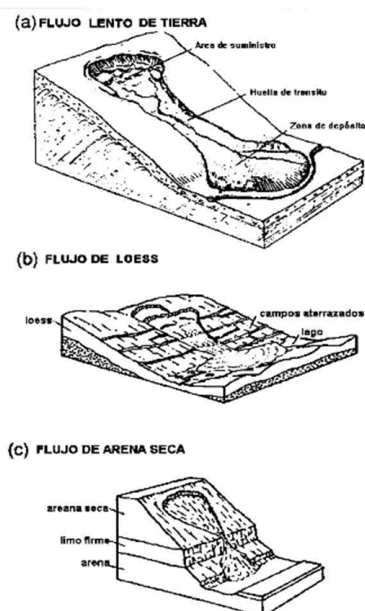
Figura 5. Deslizamientos rotacionales y traslacionales.

- **Deslizamiento rotacional retrogresivo:** ocurre cuando, tras un hundimiento inicial, el terreno inestable continúa retrocediendo hacia atrás, es decir, hacia la corona. Esto se debe a que el escarpe generado por el deslizamiento original es casi vertical y no tiene soporte, lo que favorece nuevos colapsos desde su base. Este proceso se ve intensificado por la acumulación de humedad en la zona, la cual se concentra debido a la geometría del terreno. Si esta humedad persiste, la inestabilidad continúa avanzando en sentido retrógrado, hasta que el terreno forme un talud más estable y menos inclinado.
- **Deslizamiento traslacional planar:** ocurre cuando una masa de suelo o roca se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana, que puede ser continua o presentar escalones. Este tipo de deslizamiento, especialmente en roca, suele estar controlado por estructuras geológicas, como planos de estratificación o fracturas. En la corona, es común la presencia de una grieta de tensión que separa la masa inestable del terreno estable. A diferencia del deslizamiento rotacional, no es autoestabilizante, por lo que puede alcanzar altas velocidades, especialmente si la superficie de falla es muy inclinada y extensa. En estos casos, la masa puede fragmentarse y evolucionar hacia un flujo de detritos, particularmente cuando la ruptura sigue una discontinuidad paralela a la ladera.
- **Deslizamiento traslacional en cuña:** es un caso especial de deslizamiento traslacional, en el que la masa se mueve a lo largo de la intersección de dos discontinuidades estructurales. Este tipo de falla suele estar controlado por la geometría y orientación de las fracturas o planos de debilidad que forman una cuña inestable dentro del macizo rocoso o del suelo.
- **Deslizamiento compuesto:** este combina características de los deslizamientos rotacionales y traslacionales. La superficie de ruptura comienza con un escarpe principal muy inclinado, que se va suavizando en profundidad, hasta terminar en una sección casi plana. En algunos casos, la pata del deslizamiento puede inclinarse en sentido contrario al movimiento, y en la zona de la corona pueden formarse bloques hundidos en graben.

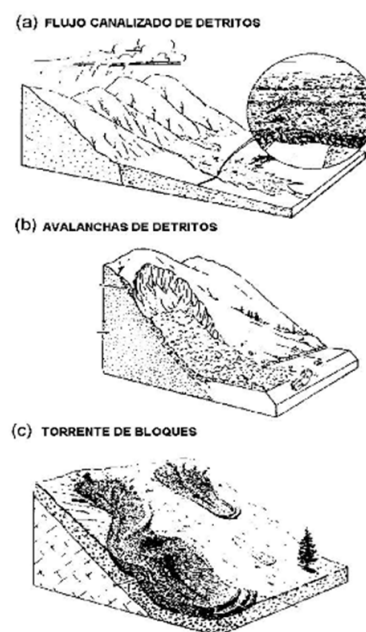
## Flujos

Según Cruden and Varnes (1996), un flujo es un movimiento en masa espacialmente continuo, con superficies de corte efímeras y poco definidas, donde el material se desplaza con un comportamiento similar al de un líquido viscoso. Su base puede corresponder a una superficie de cizallamiento o a una zona de deformación distribuida. Los flujos abarcan una variedad de tipos, desde lentos —como los flujos de tierra o de loess— hasta rápidos, como los flujos secos de arena.

Existe una transición progresiva entre deslizamiento y flujo, influida por el contenido de agua, la pendiente y la pérdida de cohesión del material. Dentro de los flujos, se distingue un subconjunto denominado flujos canalizados, caracterizados por concentrarse en cauces naturales o hondonadas, principalmente durante lluvias intensas. Estos incluyen flujos de detritos, avalanchas de detritos y torrentes de bloques. Suelen tener alta densidad (más del 80 % de sólidos), capacidad de arrastre de bloques grandes y vegetación, y pueden avanzar en pulsos intermitentes, generando eventos conocidos en Colombia como avenidas torrenciales.



**Figura 6.** Ejemplos de flujos: a) lento de tierra, b) de Loess, y c) de arena seca.



**Figura 7.** Flujos canalizados: a) de detritos, b) avalancha de detritos, y c) torrente de bloques.

## Propagación lateral

La propagación lateral es un proceso en el que una masa de suelo cohesivo o roca blanda experimenta una extensión o dilatación lateral, acompañada de una subsidencia general del material fracturado que se encuentra sobre ella. A diferencia de otros movimientos en masa, en este caso no se forma una superficie de falla bien definida. El material blando puede extruirse lateralmente, especialmente si es susceptible a procesos como la licuación o el flujo plástico. Se reconocen dos formas principales:



- **Propagación lateral en bloque:** ocurre cuando una masa rocosa subhorizontal cubre un material más blando. La roca se fragmenta en bloques grandes, y el material blando es expulsado a presión a través de las fracturas. Es un movimiento generalmente muy lento.
- **Propagación lateral por licuación:** se da en suelos blandos y húmedos (como arcillas sensitivas o limos), cubiertos por materiales más firmes. Ante una perturbación que destruye la estructura del suelo (como un sismo), el material pierde resistencia, se licúa o fluye plásticamente, generando un movimiento más rápido que en el caso anterior.

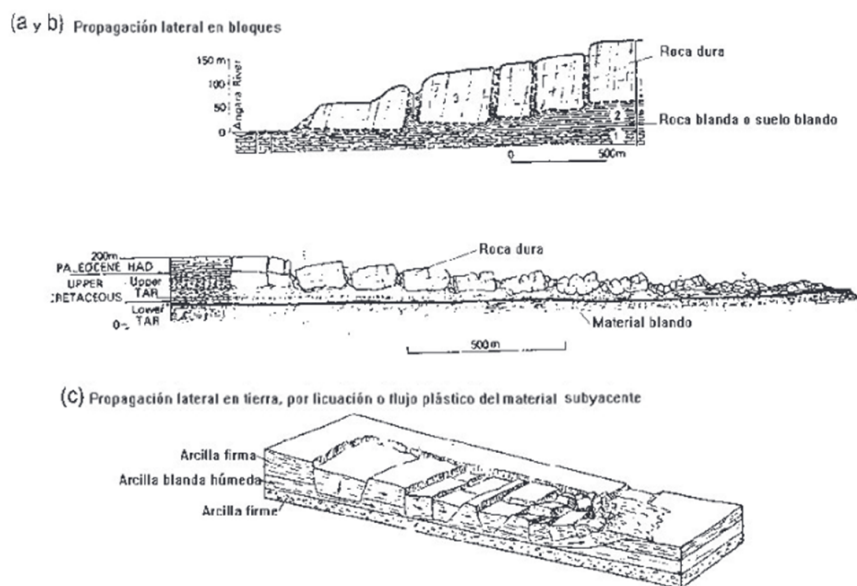


Figura 8. Casos de propagación lateral

## Creep

El creep es un tipo de movimiento extremadamente lento del terreno, que implica la deformación progresiva de materiales inconsolidados (como suelos y regolito) bajo esfuerzo constante, sin una superficie de falla definida. Este fenómeno afecta principalmente la parte superficial de las laderas, especialmente en materiales como saprolitos, suelos residuales, suelos volcánicos, coluviones arcillosos y rocas lodosas degradadas. En Colombia, es frecuente en terrenos intervenidos o deforestados, donde se han perdido las raíces que estabilizaban la capa superior del suelo. Se reconocen tres tipos principales de creep:

- **Creep estacional de suelos:** ocurre en zonas sometidas a ciclos de humedecimiento-secado o congelamiento-deshielo, donde las partículas del suelo se expanden y contraen repetidamente. Este proceso genera un movimiento progresivo y superficial hacia la pendiente, sin que se formen superficies de falla.
- **Creep continuo de suelos:** según Terzaghi (1950), el creep continuo es un movimiento muy lento y sostenido del terreno que ocurre por debajo de la capa superficial donde se presenta el creep estacional. Aunque tampoco tiene una superficie de falla definida, se genera una zona de desgarre por cortante que separa el material en movimiento del material estacionario a mayor profundidad.

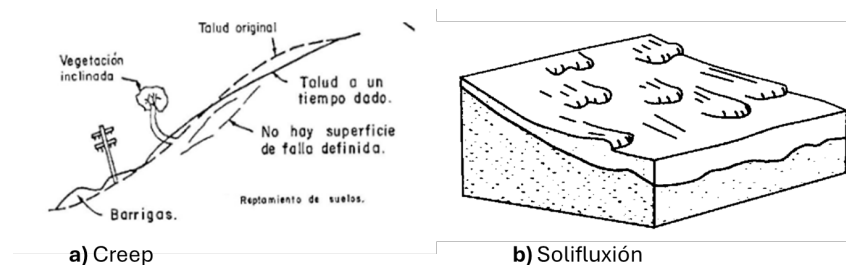


Figura 9. Esquema de creep y solifluxión

De acuerdo con Bloom (1998), el terreno se desplaza en capas sucesivas, donde cada una es empujada por el movimiento de la capa inferior, generando un efecto acumulativo. La velocidad de desplazamiento es máxima en la superficie y disminuye exponencialmente con la profundidad.

- **Solifluxión:** es un tipo de flujo viscoso lento que afecta material saturado por deshielo en regiones frías (como páramos). Se produce cuando el suelo superficial se congela en invierno, impidiendo el drenaje, y posteriormente se satura y se moviliza durante el deshielo en primavera y verano. Se diferencia del creep por tener una velocidad ligeramente mayor y por la formación de lóbulos morfológicos en el terreno. En Colombia, ocurre principalmente en zonas de páramo.
- **Creep de roca:** este proceso implica la curvatura lenta y permanente de estratos rocosos en laderas, favorecido por patrones estructurales como el rumbo paralelo a la ladera y buzamientos inclinados. Afecta especialmente a estratos delgados en formaciones sedimentarias, donde la deformación progresiva genera una curvatura visible en los afloramientos rocosos.

## ¿Qué son las soluciones basadas en la naturaleza?

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza son enfoques sostenibles de planificación, diseño, gestión ambiental e ingeniería que integran características o procesos naturales en entornos construidos. Su objetivo es crear comunidades más resilientes al aprovechar los beneficios que ofrece la naturaleza. Aplicadas a la gestión del riesgo de desastres, las soluciones basadas en la naturaleza pueden incluir la conservación o restauración estratégica de ecosistemas naturales para complementar o apoyar la infraestructura convencional.

## Tipos de soluciones basadas en la naturaleza

De acuerdo con la definición de Eggermont et al. (2015), las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) se clasifican en tres tipos, según el grado de intervención en los ecosistemas y la cantidad de servicios ecosistémicos y grupos de interés que se busca atender:

- **Tipo 1:** Intervención nula o mínima en los ecosistemas, con el objetivo de mantener o mejorar la provisión de múltiples servicios ecosistémicos en áreas naturales conservadas.
- **Tipo 2:** Gestión activa y sostenible de ecosistemas y paisajes (de forma extensiva o intensiva), orientada a mejorar la provisión de ciertos servicios ecosistémicos en comparación con intervenciones convencionales.

- **Tipo 3:** Intervención intensiva o creación de nuevos ecosistemas, incluyendo diseños artificiales, para generar servicios ecosistémicos en entornos altamente modificados o degradados.

## Principios de las SbN en la gestión de riesgos

### Marco normativo

A nivel internacional, existen lineamientos como:

- *Words into Action: Nature-based Solutions for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2023).
- *EU Guidance on Integrating Nature-based Solutions for Disaster Risk Management* (European Commission, 2020).

En el contexto nacional, es importante considerar:

- **INVÍAS (2013–2020):** Manuales de bioingeniería y guías técnicas para estabilización de taludes en proyectos viales.
- **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021):** lineamientos de SbN para adaptación al cambio climático.
- **UNGRD (2018):** políticas de gestión del riesgo que incluyen enfoques ecosistémicos.

Este marco normativo establece la necesidad de que las SbN no solo cumplan con criterios técnicos, sino también con estándares de sostenibilidad, participación social y alineación institucional.



## Tipos de soluciones basadas en la naturaleza

### Bioingeniería del suelo

La **bioingeniería del suelo** consiste en el uso de material vegetal como recurso principal para la estabilización de laderas. Este enfoque se ha aplicado en la reducción de deslizamientos superficiales y procesos erosivos en taludes y márgenes de corrientes (Lewis et al., 2001).

En este tipo de sistemas, las plantas, especialmente especies con raíces profundas como gramíneas y arbustos, desempeñan una función estructural al disminuir la erosión y favorecer la cohesión del terreno. El objetivo es restablecer la cobertura vegetal de manera que, con el tiempo, se genere un sistema autosostenible que requiera solo intervenciones mínimas de mantenimiento.

Al imitar procesos naturales y emplear materiales locales, la bioingeniería del suelo constituye una alternativa de bajo costo y bajo impacto ambiental frente a métodos convencionales de estabilización. La selección adecuada de especies resulta fundamental, ya que la efectividad de las plantas en la protección contra la erosión y los movimientos en masa depende de sus características morfológicas y de sus propiedades mecánicas.

Entre las funciones principales de la bioingeniería se encuentran:

- **Retención de materiales:** la vegetación intercepta y detiene sedimentos o flujos superficiales.
- **Protección del suelo:** la cobertura vegetal actúa como armadura frente al impacto de la lluvia y la escorrentía.
- **Apoyo mecánico:** las plantas maduras contribuyen a reforzar la base de los taludes.
- **Refuerzo del terreno:** los sistemas radiculares incrementan la resistencia al corte de las capas superficiales.
- **Drenaje:** la vegetación ayuda a evacuar el exceso de agua, reduciendo la presión de poros.
- **Limitación de fallas:** las raíces mantienen cohesionada la capa superficial, disminuyendo la probabilidad de fallas poco profundas.

### Soluciones híbridas

Las **soluciones híbridas** representan una estrategia integrada que combina infraestructuras verdes con elementos de infraestructura convencional. Este enfoque busca reducir el riesgo de desastres y fortalecer la resiliencia climática mediante la unión de la funcionalidad ecológica con la capacidad estructural de las obras de ingeniería (Browder et al., 2019).

En estos sistemas, la vegetación y los materiales naturales contribuyen a la estabilización del terreno, el control de la erosión y la gestión hídrica, mientras que los componentes mecánicos como mallas, geoceldas o gaviones proporcionan soporte estructural adicional. De esta manera, se logra una mayor durabilidad y eficiencia frente a amenazas como deslizamientos, flujos superficiales o erosión acelerada. Este tipo de enfoques se considera una evolución de las técnicas de bioingeniería del suelo (Lewis et al., 2001), ya que amplían su aplicación al incorporar materiales sintéticos o rígidos sin perder la función ecológica.

Ejemplos comunes de soluciones híbridas incluyen:

- **Mallas y vegetación:** combinación de geomallas o geoceldas rellenas de suelo vegetal y cubiertas con especies nativas, que refuerzan la estabilidad de la ladera y controlan la erosión.
- **Hidrosiembra con mallas orgánicas:** aplicación de mezclas de semillas, fertilizantes y fibras naturales sobre mantas biodegradables, que promueven el rápido establecimiento vegetal y la retención del suelo.
- **Sistemas de gaviones con cubierta vegetal:** muros o colchones de gaviones rellenos con piedras para soporte estructural, complementados con sustrato y vegetación para integración paisajística.
- **Lechos vivos:** estructuras que combinan ramas, estacas y plantas enraizadas con materiales de control de erosión, generando una matriz viva y estable.
- **Taludes reforzados con hormigón y vegetación:** aplicación de hormigón proyectado en la superficie del talud, acompañado de la siembra de especies vegetales para mejorar la cohesión y el valor estético.

## Referencias

- Aristizábal, É. (2008). Características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio el socorro (31 de mayo de 2008) en medellín. *Revista EIA*, (10):19–29.
- Bloom, A. L. (1998). *Geomorphology: A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 3rd edition.
- Browder, G., Ozment, S., Rehberger Bescos, I., Gartner, T., and Lange, G.-M. (2019). *Integrating Green and Gray: Creating Next Generation Infrastructure*. World Resources Institute and World Bank, Washington, D.C.
- Cruden, D. M. and Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In Turner, A. and Schuster, R., editors, *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Washington, D.C.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., van Ham, C., Weisser, W. W., and Le Roux, X. (2015). Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4):243–248. Open Access.
- Lewis, L., Hagen, S., and Salisbury, S. L. (2001). Soil bioengineering for upland slope stabilization. Research Report WA-RD 491.1, Washington State Department of Transportation. Soil Bioengineering for Slopes, Research Project WA-RD 491.1.
- Montero Olarte, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. Imprenta Nacional de Colombia.
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of Landslides, Application of Geology to Engineering Practice*. Geological Society of America, New York.