INGENIERÍA GEOTÉCNICA
Y GEOLÓGICA

Riesgo geológico, sísmico y de deslizamientos

De los procesos naturales a las decisiones de ingeniería

Dr. Ing. Civil Gustavo Bogado
Mgter. Ing. Reinert Hugo Orlando · Ing. Gross Marcelo

Facultad de Ingeniería Oberá

2026

La amenaza no basta para explicar el riesgo

AMENAZA

Probabilidad e intensidad del proceso

×

EXPOSICIÓN

Personas, obras y servicios en el área afectable

×

VULNERABILIDAD

Grado de daño esperado frente a esa intensidad

×

RIESGO

Daños y pérdidas esperables

Riesgo = f (amenaza, exposición, vulnerabilidad)

Reducir el riesgo no siempre exige eliminar la amenaza: también puede reducirse la exposición o la vulnerabilidad.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Bell (1983)

Al finalizar, el estudiante podrá...???

1. Diferenciar susceptibilidad, peligrosidad, exposición, vulnerabilidad y riesgo.
2. Explicar cómo el terreno modifica la demanda sísmica y los daños potenciales.
3. Reconocer mecanismos, condicionantes e indicios de movimientos de ladera.
4. Proponer una secuencia de investigación, mitigación y monitoreo para un caso real.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Price y de Freitas (2008)

Cinco conceptos que no son sinónimos

SUSCEPTIBILIDAD	**¿Dónde es más probable que ocurra?**	Condiciones del terreno favorables al proceso.
PELIGROSIDAD	**¿Con qué probabilidad e intensidad?**	Incluye dimensión temporal e intensidad esperada.
EXPOSICIÓN	**¿Qué se encuentra allí?**	Población, edificios, infraestructura y actividades.
VULNERABILIDAD	**¿Cuánto daño puede sufrir?**	Fragilidad física, social, funcional y económica.
RIESGO	**¿Qué pérdidas pueden producirse?**	Integra proceso y consecuencias.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), caps. 7 y 13

Los riesgos geológicos tienen múltiples orígenes

GEODINÁMICA INTERNA

Sismos
Vulcanismo
Deformación tectónica

GEODINÁMICA EXTERNA

Deslizamientos
Erosión e inundación
Hundimientos

INDUCIDOS O AGRAVADOS

Excavaciones y rellenos
Extracción de fluidos
Drenaje deficiente

La cadena causal puede combinar procesos: lluvia + erosión al pie + suelo meteorizado + ocupación.

Fuente: Price y de Freitas (2008); Bell (1983); Tarbuck y Lutgens (2005)

La gestión del riesgo es un ciclo técnico

1
IDENTIFICAR
Procesos y evidencias

2
INVESTIGAR
Geometría, materiales y agua

3
ZONIFICAR
Susceptibilidad y riesgo

4
MITIGAR
Medidas y prioridades

5
MONITOREAR
Indicadores y umbrales

COMUNICAR Y ACTUALIZAR

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Price y de Freitas (2008)

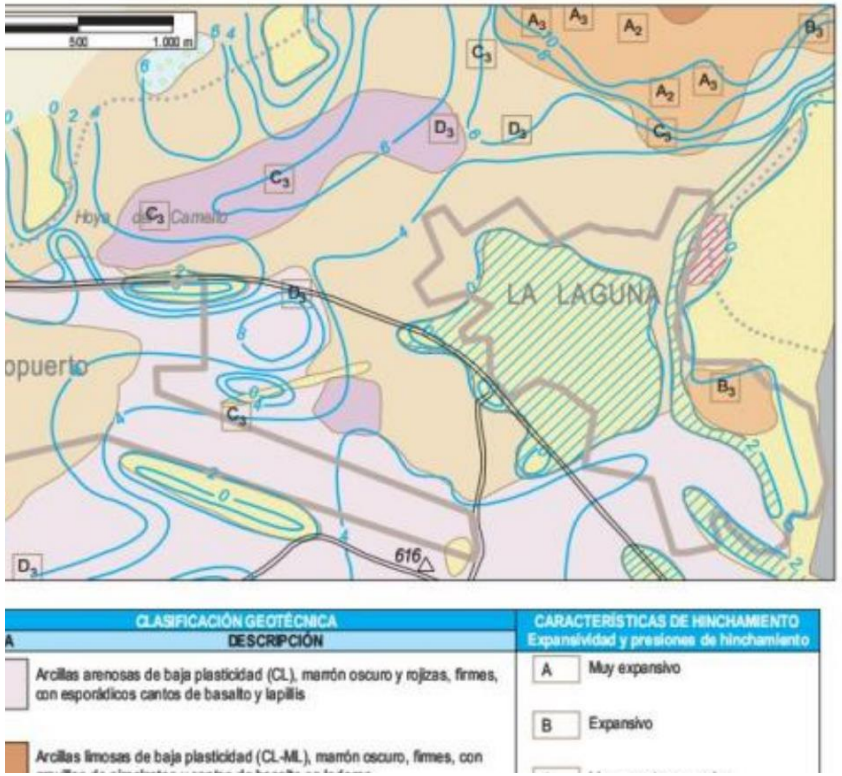
Cada mapa responde una pregunta diferente

INVENTARIO
¿Qué ocurrió y dónde?

SUSCEPTIBILIDAD
¿Dónde podría ocurrir?

PELIGROSIDAD
¿Con qué intensidad y frecuencia?

RIESGO
¿Qué consecuencias serían esperables?



La cartografía traduce observaciones dispersas en una decisión espacial.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), cap. 7; Price y de Freitas (2008)

La incertidumbre se reduce investigando el terreno

1

CAMPO

Geomorfología, afloramientos, grietas, drenaje, inventario.

2

SUBSUELO

Sondeos, calicatas, SPT y geofísica.

3

LABORATORIO

Identificación, resistencia, deformación y permeabilidad.

4

MONITOREO

Piezometría, inclinometría, topografía y lluvia.

Producto final: modelo del terreno + escenarios + incertidumbres explícitas.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Blyth y de Freitas (1974)

Riesgo sísmico

La fuente libera energía; la trayectoria y el terreno local transforman esa energía en demanda sobre las obras.

El daño sísmico empieza en superficie

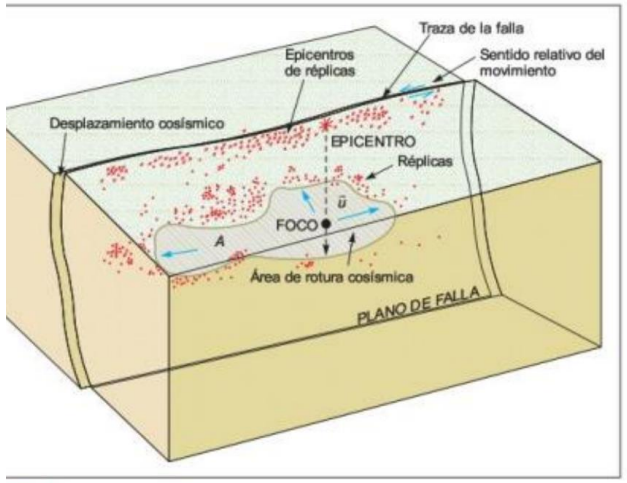
- La ruptura comienza en el foco y se propaga sobre una falla.
- Las ondas P, S y superficiales transportan energía hasta el sitio.
- Distancia, profundidad, mecanismo focal y trayectoria modifican la sacudida.
- El suelo local y la estructura determinan la respuesta final.



ura 15.1 Falla normal en Cape Kidnappers, Nueva Zelanda (foto R. Capote).

El régimen de *stick-slip* y el ciclo sísmico

Para comprender qué parámetros de la fuente son significativos en los estudios de peligrosidad sísmica, es importante tener un modelo de cómo funcionan las fallas sísmicas. En las fallas activas los dos labios se desplazan relativamente por efecto de la acción de un campo de esfuerzos regional. Al producirse el desplazamiento las rocas y materiales en la zona de falla sufren deformación y fragmentación, generando un material de falla.



a 15.2 Esquema de una falla sísmica durante y después de un terremoto. La falla de desgarre rompe primero en el foco y luego la zona de rotura se propaga con una velocidad $\vec{u}$ hasta afectar a un área A que es una fracción de la superficie total del plano de falla. La proyección del foco sobre la superficie del terreno es el epicentro. La magnitud del terremoto es proporcional al área de rotura y al desplazamiento cosísmico. Tras el terremoto, durante un tiempo se producen reajustes en un

Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005); Kramer (1996); González de Vallejo et al. (2002)

Magnitud e intensidad miden cosas diferentes

MAGNITUD

Una medida del tamaño del evento

- Se estima con registros instrumentales
- Un valor principal por terremoto
- Escala logarítmica
- Relacionada con energía liberada

INTENSIDAD

Efectos observados en cada lugar

- Varía de un sitio a otro
- Depende del suelo y las construcciones
- Se expresa con escalas macrosísmicas
- Permite trazar isosistas

+1 de magnitud ≈ 10× amplitud y 32× energía

Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005), cap. 11

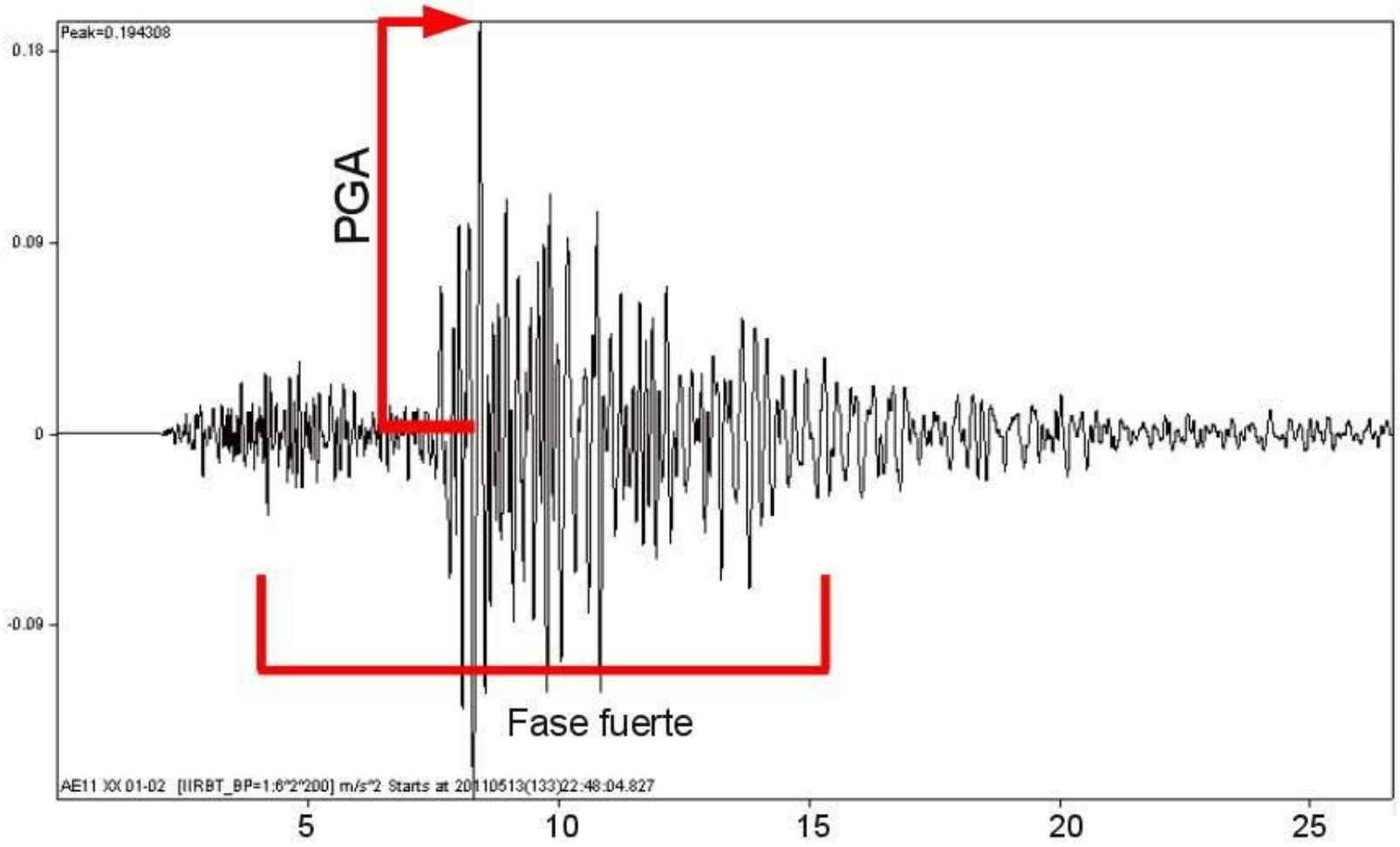
Peligrosidad sísmica: demanda y probabilidad

PGA	ESPECTRO	DURACIÓN	PROBABILIDAD
Aceleración máxima del terreno	Respuesta según período	Tiempo de sacudida intensa	Excedencia en un período
Demanda pico	Contenido frecuencial	Acumulación de daño	Frecuencia esperada

La demanda de proyecto debe corresponder al período, importancia y desempeño esperado de la obra.

Fuente: Kramer (1996); González de Vallejo et al. (2002), cap. 15

Peligrosidad sísmica: demanda y probabilidad



Análisis y acelerograma- cursos de estructuras

Fuente: Kramer (1996); González de Vallejo et al. (2002), cap. 15

El riesgo sísmico integra tres dimensiones

PELIGROSIDAD	Sacudida y efectos inducidos con determinada probabilidad
EXPOSICIÓN	Personas, edificios, redes y actividades esenciales
VULNERABILIDAD	Fragilidad estructural, no estructural, funcional y social

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Kramer (1996)

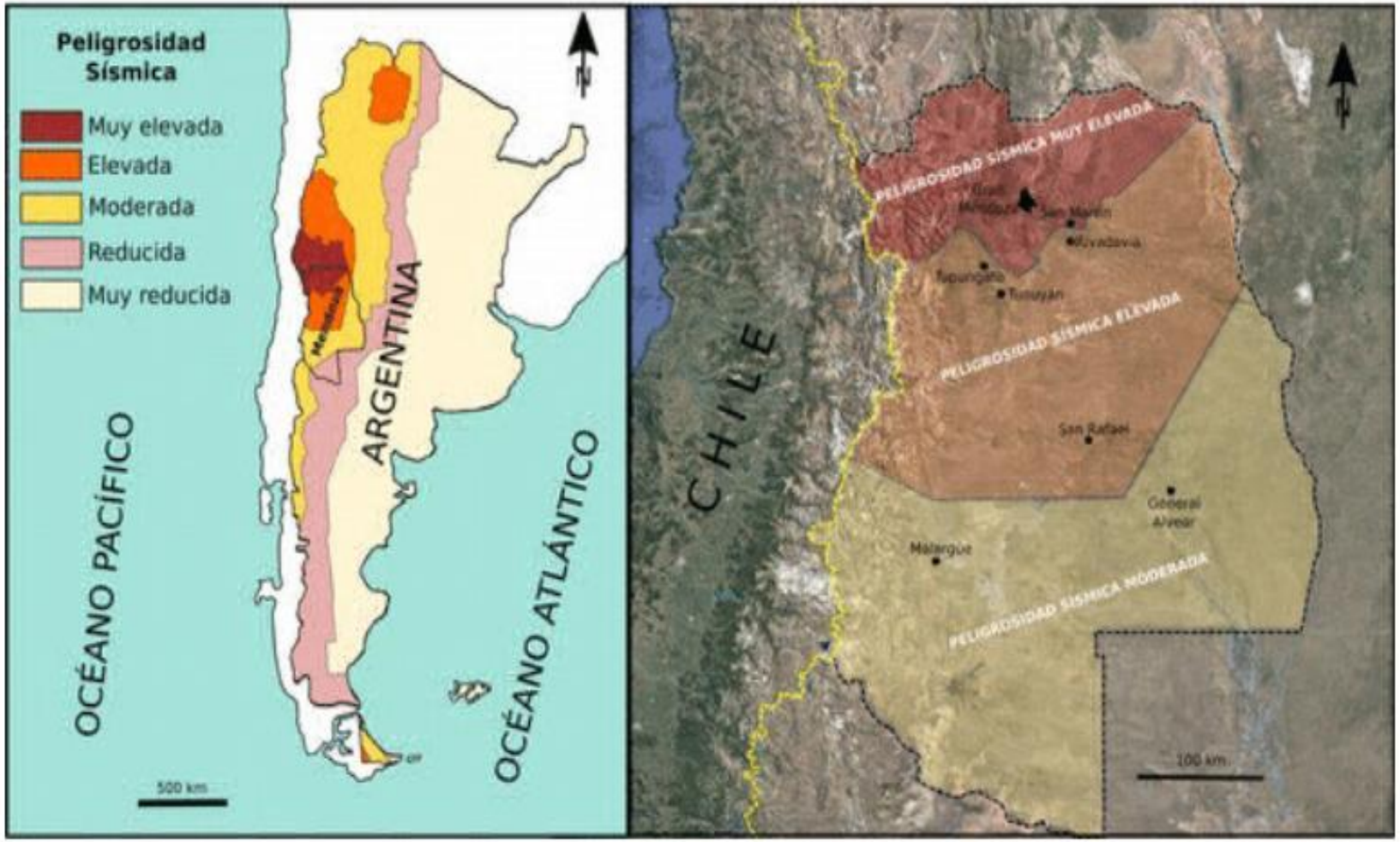
El terreno modifica amplitud y frecuencia



La microzonificación identifica dónde la misma fuente sísmica puede producir demandas diferentes.

Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005); Kramer (1996)

Peligrosidad sísmica: zonificación



Microzonificación.

La licuación elimina capacidad de soporte

CONDICIÓN	ACCIÓN	MECANISMO	EFECTO
Arena o limo no plástico suelto y saturado	Carga cíclica por vibración sísmica	Aumenta u y disminuye la tensión efectiva	Pérdida de rigidez, asentamientos y flujo

$\sigma' = \sigma - u \rightarrow$ si u aumenta, la resistencia disponible disminuye

Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005); Kramer (1996)

Peligrosidad sísmica: licuación



https://www.youtube.com/watch?v=t05xXo7o2Kw

Los sismos también desestabilizan laderas

FUERZAS INERCIALES	Aumentan temporalmente las acciones desestabilizantes.
PRESIÓN DE POROS	Puede crecer durante la carga cíclica y reducir σ′.
DAÑO Y DEGRADACIÓN	Se abren discontinuidades y puede caer la resistencia.

El efecto sísmico debe evaluarse junto con geometría, discontinuidades, agua y resistencia residual.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Kramer (1996); Price y de Freitas (2008)

Microzonificar convierte geología en decisiones

1

MODELO DEL TERRENO

Estratigrafía, Vs, nivel freático, relieve.

2

EFECTOS DE SITIO

Amplificación, licuación, inestabilidad.

3

ZONAS HOMOGÉNEAS

Demanda y restricciones comparables.

4

DECISIONES

Uso del suelo, estudios y criterios de diseño.

Resultado: el mismo reglamento se apoya en un conocimiento más preciso del sitio.

Fuente: Kramer (1996); González de Vallejo et al. (2002)



MOVIMIENTO DE LADERA

Mecanismo
Velocidad
Consecuencias

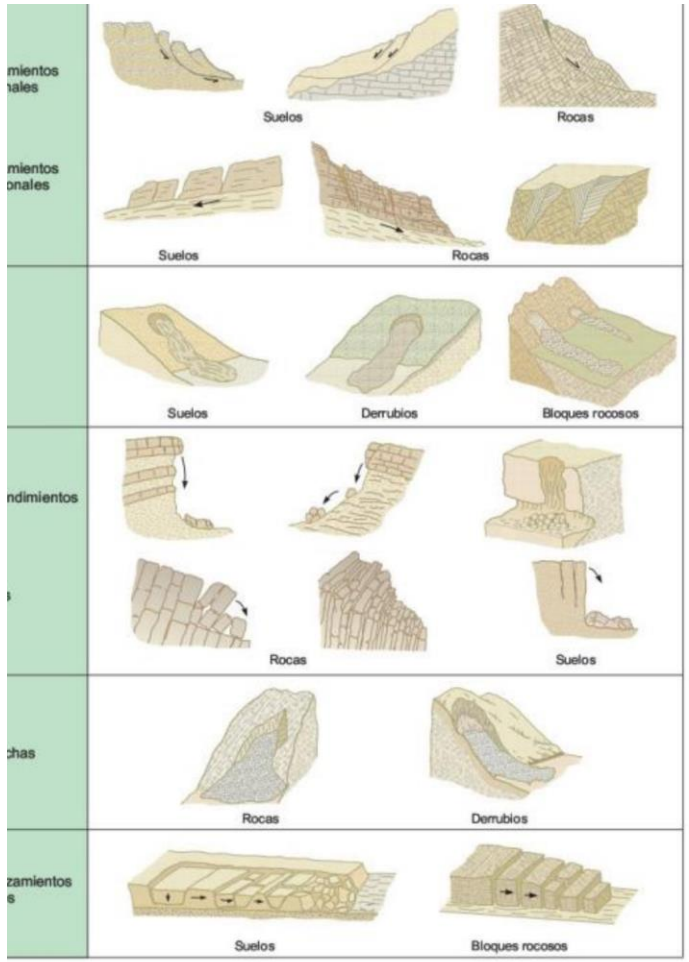
BLOQUE 2

Riesgo de deslizamiento

Una ladera falla cuando las acciones superan la resistencia disponible sobre una superficie o zona de deformación.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), cap. 14; Price y de Freitas (2008)

El tipo de movimiento anticipa la solución



CAÍDA — Desprendimiento y movimiento aéreo.

VUELCO — Rotación hacia fuera de la ladera.

DESLIZAMIENTO — Movimiento sobre una superficie definida.

EXPANSIÓN — Extensión lateral y deformación interna.

FLUJO — Deformación continua con alta movilidad.

COMPLEJO — Combinación o evolución de mecanismos.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), cap. 14; Price y de Freitas (2008)

Deslizamiento



https://www.youtube.com/shorts/WThOGrjPQv0



https://www.youtube.com/shorts/fAdhHIrp92E

Condicionantes preparan; desencadenantes activan

CONDICIONANTES

- Pendiente y geometría
- Litología y meteorización
- Discontinuidades y estructura
- Propiedades resistentes
- Nivel freático y drenaje
- Uso del suelo
- Mal uso de la zonificación

DESENCADENANTES

- Lluvia intensa o prolongada
- Sismo o vibraciones
- Corte o erosión al pie
- Sobrecarga en coronamiento
- Rotura de conducciones
- Cambio rápido del nivel de agua

Susceptibilidad = condiciones favorables | Activación = cambio que rompe el equilibrio

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Tarbuck y Lutgens (2005)

La presión de poros reduce la resistencia

$$\tau f = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \varphi'$$

c'	φ'	σ	u
cohesión efectiva	ángulo de fricción efectivo	tensión normal total	presión de poros

Si u aumenta → σ′ disminuye → baja la resistencia al corte

Fuente: Price y de Freitas (2008); González de Vallejo et al. (2002)

El agua conecta lluvia, infiltración y falla



- Capas menos permeables pueden generar niveles colgados.
- Grietas y contactos concentran flujo hacia la superficie de falla.
- Drenajes obstruidos convierten un evento meteorológico en una carga geotécnica.

Fuente: Price y de Freitas (2008), cap. 9; González de Vallejo et al. (2002)

La obra cambia geometría, cargas y drenaje

CORTE AL PIE	Reduce soporte y aumenta altura efectiva.
RELLENO / CARGA	Incrementa esfuerzos desestabilizantes.
CAMBIO DE DRENAJE	Concentra infiltración o eleva el nivel de agua.
PÉRDIDA DE VEGETACIÓN	Aumenta erosión y cambia balance hídrico.

La estabilidad del estado final no garantiza estabilidad durante la construcción.

Fuente: Price y de Freitas (2008); Bell (1983)

La ladera suele avisar antes de fallar

CORONAMIENTO	Grietas de tracción, escarpes, asentamientos.
CUERPO	Abultamientos, terrazas, inclinación de árboles y postes.
PIE	Empujes, levantamientos, erosión y material desplazado.
AGUA	Nuevos manantiales, turbidez, encharcamiento, drenajes activos.
OBRAS	Fisuras, puertas trabadas, roturas de cañerías y muros deformados.

Registrar posición + apertura + dirección + fecha + condiciones hídricas.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002); Price y de Freitas (2008)

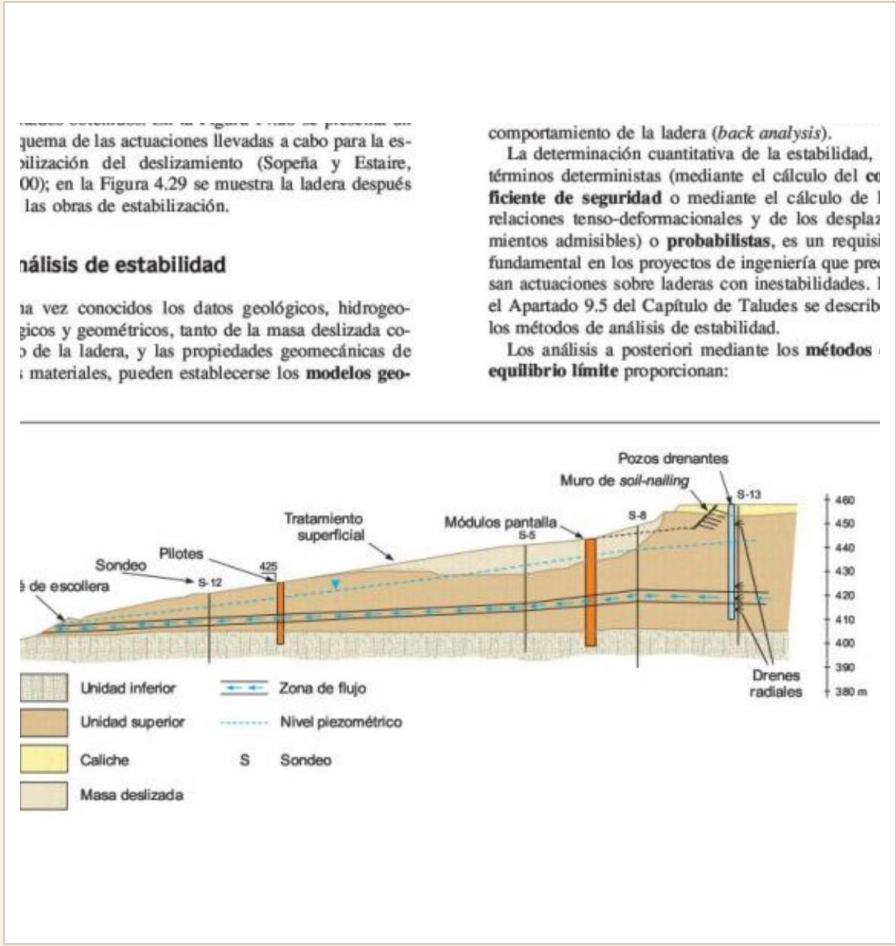
Una investigación debe capturar cuatro variables

GEOMETRÍA — Topografía, escarpes, espesor y superficie probable.

MATERIALES — Estratigrafía, discontinuidades y parámetros.

AGUA — Nivel, presión de poros, drenaje y respuesta a lluvia.

MOVIMIENTO — Dirección, velocidad, profundidad y evolución.



quema de las actuaciones llevadas a cabo para la es-
ilización del deslizamiento (Sopeña y Estaire,
00); en la Figura 4.29 se muestra la ladera después
las obras de estabilización.

nálisis de estabilidad

a vez conocidos los datos geológicos, hidrogeo-
gicos y geométricos, tanto de la masa deslizada co-
de la ladera, y las propiedades geomecánicas de
materiales, pueden establecerse los **modelos geo-**

comportamiento de la ladera (*back analysis*).

La determinación cuantitativa de la estabilidad,
términos deterministas (mediante el cálculo del **co**
ficiente de seguridad o mediante el cálculo de l
relaciones tenso-deformacionales y de los despla
mientos admisibles) o **probabilistas**, es un requisi
fundamental en los proyectos de ingeniería que pre
san actuaciones sobre laderas con inestabilidades.
el Apartado 9.5 del Capítulo de Taludes se describ
los métodos de análisis de estabilidad.

Los análisis a posteriori mediante los **métodos**
equilibrio límite proporcionan:

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), cap. 14

La mitigación sigue una jerarquía técnica

1. EVITAR: modificar traza, ubicación o uso del suelo.
2. DRENAR: reducir infiltración y presión de poros.
3. REPERFILAR: disminuir pendiente, altura o sobrecarga.
4. CONTENER / REFORZAR: aportar resistencia donde sea necesario.
5. MONITOREAR: verificar desempeño y activar umbrales de respuesta.



de medida está en función de las características del proceso y de la fase o estado de inestabilidad. Debe prestarse atención también al correcto funcionamiento y mantenimiento de los sistemas.

En base a las medidas de los niveles piezométricos pueden establecerse correlaciones con las precipita-

Las vallas o cables para detectar la caída de blo ques mediante señales eléctricas o de otro tipo (a golpear los bloques desprendidos) generalmente s instalan en laderas rocosas con vías de ferrocarril carreteras a su pie. El sistema puede estar conectad con señales que avisen del peligro inminente.

14.4 Medidas de corrección

Las medidas de corrección o estabilización de laderas están encaminadas a prevenir los procesos y mitigar los daños. Su aplicación depende principalmente de la tipología, magnitud y velocidad de los movimientos, y pueden realizarse antes (en casos de laderas potencialmente inestables) o durante el movimiento, siempre que su velocidad lo permita. Los deslizamientos o flujos de dimensiones importantes, incluso con velocidades muy bajas, son muy difíciles o imposibles de detener. Las medidas de estabilización se describen en el Apartado 9.6 del Capítulo de Taludes.

Las actuaciones, una vez que el movimiento ha comenzado, se deciden en función de:

- El volumen de la masa inestable.
- Las pautas del movimiento, velocidad del proceso y comportamiento de la masa inestable.
- La profundidad de los planos de rotura.
- La pendiente y altura de la ladera.
- El tipo de materiales presentes.
- La accesibilidad a la ladera.

Las actuaciones más efectivas, y muchas veces las menos costosas, son las que intervienen directamente sobre las causas que desencadenan las inestabilidades. En el caso de los deslizamientos son recomendables, sobre todo cuando presentan cierta magnitud o profundidad, las **obras de drenaje** y la **modificación de la geometría**, al actuar sobre dos de los factores principales que condicionan las inestabilidades: las presiones intersticiales y la distribución de las fuerzas debidas al peso del terreno.

El drenaje y las medidas para evitar la entrada de agua son siempre beneficiosas para la estabilidad de la ladera, pero deben ser diseñadas según las características hidrogeológicas y en base a estudios de deta-

En el caso de deslizamientos y movimientos tip flujo no muy rápidos y poco profundos, las medida más recomendables son las de drenaje superficial me diante excavación de zanjas perimetrales que eviten l llegada de agua a la masa en movimiento (Figu 14.30). Los drenajes superficiales sobre masas desl zadas deben realizarse una vez que éstas se han esta bilizado (Figura 14.31).

Otras medidas, como la instalación de anclajes bulones, son recomendables en caso de inestabilida des en macizos rocosos para evitar los deslizamiento y desprendimientos de bloques, no siendo efectivas e

Figura 14.30 Excavación de una zanja de drenaje perimetr para estabilización de un deslizamiento (foto M Ferrer)

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), cap. 14; Price y de Freitas (2008)

Aplicación a Misiones

En clima húmedo subtropical, el perfil residual, el agua y las modificaciones del relieve deben analizarse como un sistema.

El perfil residual es una secuencia



Orgánico, raíces, estructura perturbada

Óxidos de Fe-Al, estructura y cementación variables

Moteados, concreciones y contrastes de drenaje

Conserva rasgos de roca; resistencia muy sensible al agua

Discontinuidades, bloques y contactos hidráulicos

Cada contacto puede cambiar resistencia, permeabilidad y posición del agua.

https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19386362.2017.1326682

Misiones concentra factores hidrogeotécnicos

LLUVIAS INTENSAS	Infiltración rápida, saturación local y erosión concentrada.
CORTES VIALES	Pérdida de soporte, exposición de contactos y drenaje insuficiente.
LADERAS URBANAS	Sobrecargas, rellenos, fugas y mayor consecuencia potencial.
CAUCES Y MÁRGENES	Socavación del pie y fluctuaciones del nivel de agua.

Prioridad: reconocer agua, geometría y cambios del perfil antes de asignar parámetros.

Fuente: Material docente Geología de Misiones; Price y de Freitas (2008); González de Vallejo et al. (2002)

Caso integrador: ladera urbanizada

ESCENARIO

- Viviendas sobre el coronamiento
- Corte vial reciente al pie
- Lluvia acumulada elevada
- Grieta nueva y surgencia
- Perfil residual heterogéneo



Pregunta clave: ¿qué dato podría cambiar por completo la decisión?

Caso Misiones

Misterio en Colonia Aurora por el hundimiento de dos hectáreas de tierra



Afirman que el derrumbe de tierra es un fenómeno natural y común

Estudiosos del suelo dieron sus conclusiones sobre el caso que conmovió a Colonia El Yerbal; indicaron que se da en pendientes saturadas de agua, lo que ocasiona el desplazamiento; el desmonte puede acelerar el proceso.

Viernes 09 de mayo de 2014 | 0:00hs.



Pozo de seis metros.

https://www.treslineas.com.ar/misterio-colonia-aurora-hundimiento-hectreas-tierra-n-460689.html
https://www.elterritorio.com.ar/noticias/2014/05/09/388552-afirman-que-el-derrumbe-de-tierra-es-un-fenomeno-natural-y-comun

La decisión combina probabilidad y consecuencias

PROBABILIDAD	CONSECUENCIA → MENOR	MODERADA	MAYOR	CRÍTICA
ALTA	M	A	A	A
MEDIA	B	M	A	A
BAJA	B	B	M	A
MUY BAJA	B	B	B	M

B = bajo · M = moderado · A = alto

La categoría define prioridad, estudios adicionales, medidas y monitoreo.

Fuente: González de Vallejo et al. (2002), cap. 13; Bell (1983)

Cinco ideas para llevar a la práctica

1. El riesgo no es sinónimo de amenaza ni de susceptibilidad.
2. El terreno local puede controlar el daño sísmico.
3. En laderas, agua y geometría suelen dominar el cambio de estabilidad.
4. La calidad del modelo depende de campo, subsuelo, laboratorio y monitoreo.
5. La mejor medida es la que actúa sobre el mecanismo y puede mantenerse.

Fuente: Síntesis de las fuentes aportadas

Bibliografía principal I

- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.
- González de Vallejo et al. Introducción a la ingeniería geológica. Extracto aportado.
- González de Vallejo et al. Mapas geotécnicos. Capítulo 7, extracto aportado.
- González de Vallejo et al. Los riesgos geológicos. Capítulo 13, extracto aportado.
- González de Vallejo et al. Deslizamientos y otros movimientos del terreno. Capítulo 14, extracto aportado.
- González de Vallejo et al. Riesgo sísmico. Capítulo 15, extracto aportado.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.

Fuente: Materiales proporcionados por el usuario

Bibliografía principal II

- Tarbuck, E. J. y Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física (8.ª ed.). Pearson.
- Price, D. G. y de Freitas, M. H. (2008). Engineering Geology: Principles and Practice. Springer.
- Bell, F. G. (1983). Fundamentals of Engineering Geology. Butterworth-Heinemann.
- Blyth, F. G. H. y de Freitas, M. H. (1974). A Geology for Engineers. Edward Arnold.
- Geología para ingenieros - de Freitas, capítulos 1-5. Extracto aportado.
- Engineering Geology for Civil Engineers (2019). Material aportado.
- Geology and Engineering Properties of Laterites from Ilorin, Nigeria. Artículo aportado.

Los antecedentes históricos deben complementarse con cartografía, reglamentación y datos de campo vigentes.