

# Capítulo 3

## Métodos de evaluación de deslizamientos

### 3.1 Introducción

Los estudios realizados a través del tiempo dan un reflejo de cómo se puede tomar en cuenta las características de las zonas y como estas serian afectadas y llegarían a afectar a la población y a la infraestructura de un país. A través del tiempo han surgido diferentes tipos de análisis de riesgo, entre ellos los métodos subjetivos y cuantitativos no han quedado afuera, pero las cualidades de los estudios no serian capaces de dar una visión exacta de lo ocurrido si no se tiene una comparación real de los resultados con otros ocurridos, como sucede naturalmente en un entorno Ingenieril, los cálculos resultantes tienen que ser vistos en comprobaciones matemáticas y físicas.

### 3.2 Métodos de evaluación de deslizamiento inducidos por Sismo

#### 3.2.1 Métodos de talud infinito

En las condiciones en las cuales se presenta una falla paralela a la superficie del talud a una determinada profundidad, la longitud de la falla es larga comparada con su espesor, por ello, se puede utilizar en forma aproximada el análisis de talud infinito (Figura 2). Es un sistema rápido y sencillo para determinar la susceptibilidad de que un talud se deslice (factor de seguridad), donde se supone un talud largo con una capa de suelo, detritos o roca, en el cual cualquier tamaño de columna de material es representativo de todo el talud.

Con la finalidad de prevenir desastres como los anteriormente mencionados, es importante conocer cuáles son las zonas más susceptibles a sufrir deslizamientos ya sea ocasionados por sismo o lluvias intensas. El método de análisis de estabilidad de talud infinito ha sido ampliamente utilizado en la literatura técnica para zonificaciones regionales de peligro y riesgo (Van Westen y Terlien, 1996; Jibson et al., 2000; Luzy et al., 2000; Alcántara-Ayala, 2004). Esto se debe a la sencillez del método, a su fácil integración en un SIG además de que a escala regional es casi imposible la utilización de métodos más precisos, debido a la falta de datos geotécnicos y al desconocimiento de los mecanismos precisos de movimiento (Luzy et al., 2000; Katz y Crouvi, 2007).

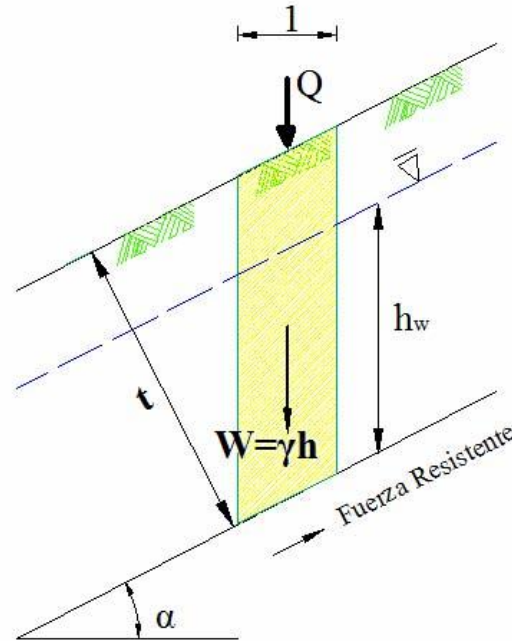


Figura 3.1 Esquema simplificado del método del talud infinito (Jibson et al., 2000)

### 3.2.2 Factor de seguridad

Existen diversas maneras de expresar el factor de seguridad de un talud, una que resuelta sencilla de manejar es la siguiente (Jibson et al., 2000).

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot t \cdot \text{sen} \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde  $\phi'$  es el ángulo de fricción efectiva,  $c'$  es la cohesión efectiva,  $\alpha$  es el ángulo del talud,  $\gamma$  es el peso específico del material,  $\gamma_w$  es el peso específico del agua,  $t$  es el espesor de material medido perpendicularmente al plano de falla y  $m$  es la proporción del espesor de material que se encuentra saturado.

Esta ecuación se divide en tres términos, el primero es la componente cohesiva de la resistencia, la segunda es la componente friccionante y el tercer término toma en cuenta la disminución de la resistencia debido a la presión de poro. El espesor,  $t$ , es medido perpendicularmente al plano de deslizamiento, a diferencia de otras expresiones donde se toma la distancia vertical.

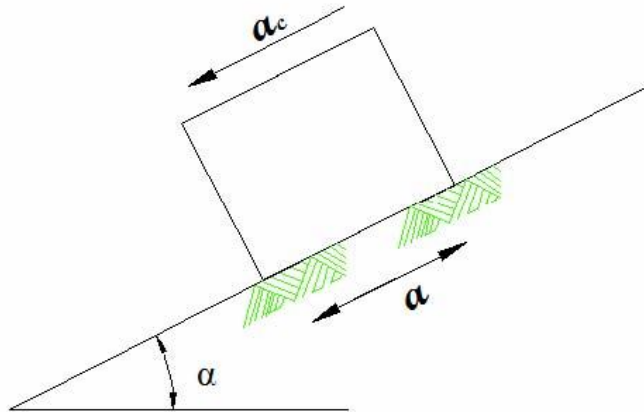
### 3.2.3 Análisis regional de Newmark para deslizamientos inducidos por sismo

Wieczorec et al. (1985) desarrollaron un criterio para evaluar la estabilidad de pendientes sísmicamente en una región combinando la estabilidad del talud en estado estático y el análisis de falla de taludes sísmico desarrollado por Newmark (1965). En general, para modelar la respuesta dinámica de los taludes, se puede utilizar el método de los desplazamientos permanentes desarrollado por Newmark (1965). Este método posteriormente fue usado para analizar la estabilidad dinámica de laderas naturales (Jibson y Keefer, 1993) y para realizar evaluaciones

regionales de peligro por deslizamientos inducidos por sismos, usando Sistemas de Información Geográfica (Jibson et al., 2000).

El trabajo de Newmark consiste en modelar un deslizamiento como un bloque rígido y friccionante sobre un plano inclinado (Figura 3). El bloque tiene una aceleración crítica,  $a_c$ , que representa el umbral de aceleración requerido para superar la resistencia cortante y promover el deslizamiento.

El análisis de desplazamientos de Newmark no necesariamente predice los desplazamientos reales de los deslizamientos en campo, pero resulta una herramienta útil para definir el comportamiento de cualquier talud ante la acción de un sismo.



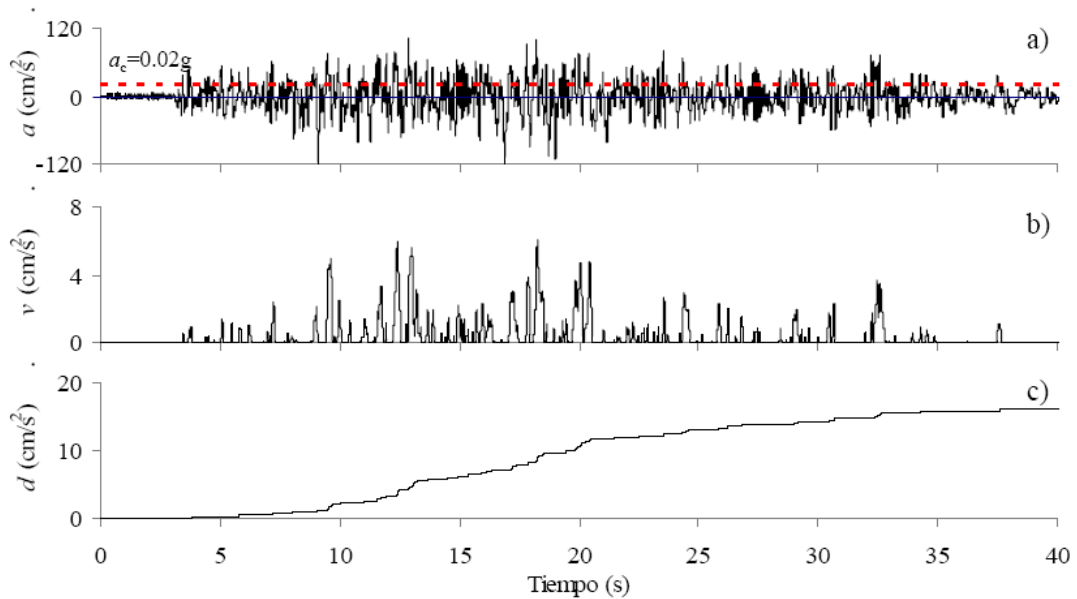
**Figura 3.2 Esquema del bloque inclinado en el análisis de Newmark (Jibson y Keefer, 1993)**

La aceleración crítica es función del factor de seguridad estático y de la geometría del deslizamiento. Puede ser expresada como:

$$a_c = (FS - 1) \text{sen } \alpha \dots\dots\dots (3.2)$$

Donde  $a_c$  es la aceleración crítica (en términos de g, la aceleración de la gravedad),  $FS$  es el factor de seguridad en condiciones estáticas y  $\alpha$  es el ángulo de la pendiente.

El ángulo  $\alpha$  en este caso, se refiere a la dirección en la cual se mueve el centro de gravedad de la masa cuando ocurre el deslizamiento. En análisis a escala regional, el valor del ángulo de empuje prácticamente es igual al ángulo de la pendiente de las laderas. La estabilidad dinámica de las laderas, en el contexto del método de Newmark, está relacionada con la estabilidad en términos estáticos. Para el caso de análisis regionales de deslizamientos, se puede usar el método estático de equilibrio límite, basado en el talud infinito, considerando un comportamiento cohesivo y friccionante para todos los taludes analizados. Este método permite hacer análisis en grandes áreas e integrarlos en un SIG, debido a su sencillez. De hecho, cuando se evalúa la estabilidad de las laderas en grandes áreas, no es posible usar métodos más exactos pues se desconocen las propiedades mecánicas de los materiales y la geometría de los deslizamientos (Luzi et al., 2000). Un análisis riguroso usando el método de Newmark, implica la integración doble de las partes de registros de aceleración tiempo de sismos específicos, que excedan la aceleración crítica de los taludes (Figura 4). Para análisis regionales que implican la creación de mallas de 25 x 25m o de 50 x 50 m, dentro de un SIG, lo anterior resulta impráctico (Jibson et a. 2000).



**Figura 3.3. Ilustración de la doble integración del método de Newmark. a) movimiento sísmico en la estación CALE del sismo del 19 de septiembre de 1985 componente EW con la aceleración crítica  $a_c=0.02g$  indicada con línea punteada, b) velocidad del bloque de deslizamiento para una  $a_c=0.02g$  y c) desplazamiento del bloque de la ladera para una  $a_c=0.02g$**

Para aplicar el método de Newmark en análisis regionales de deslizamientos en México, Jaimes *et al.* (2008) desarrollaron un procedimiento simplificado que incorpora una ecuación empírica para estimar el desplazamiento de Newmark ( $DN$ ) como una función de la intensidad del sismo y de la aceleración crítica ( $a_c$ ) para sismos de subducción en México. Quedando como:

$$\log D_N = -1.2841 + \log \left[ \left( 1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{1.9518} \left( \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-1.2786} \right] \pm 0.5882 \dots\dots\dots (3.3)$$

Y para sismos de falla normal, queda que

$$\log D_N = -0.7819 + \log \left[ \left( 1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.2627} \left( \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-1.3779} \right] \pm 0.7351 \dots\dots\dots (3.4)$$

$D_N$  es el desplazamiento en centímetros,  $a_c$  es la aceleración crítica y  $a_{max}$  es la aceleración máxima del terreno (Jibson, 2007; Ambraseys y Menu, 1988).

Jibson (2007) y Ambraseys y Menu (1988) consideran el valor de desplazamiento,  $DN$ , de 5 cm como un valor crítico, que caracteriza la falla de un talud y promueve su deslizamiento. Este valor conservador, representa taludes formados por rocas frágiles (Romeo, 2000). Jibson y Keefer (1993) definen el valor de  $DN$ , de 5-10 cm, como un valor crítico para la falla en taludes limo-arcillosos y de 10 cm para taludes formados por suelos cohesivos. En resumen, valores de  $D_N$  dentro del intervalo de 5-10 cm, incrementan la probabilidad de falla de los taludes. En la Tabla 1 se resume lo anterior.

**Tabla 3.1 Intervalo de valores de DN que incrementan la probabilidad de falla de los taludes**

Desplazamiento de Newmark	Materiales afectados
5 cm	Rocas frágiles
5-10 cm	Materiales limo-arcillosos
10 cm	Materiales arcillosos

### 3.3 Metodologías para la evaluación de deslizamientos por lluvia

A pesar de que los sismos podrían representar un porcentaje importante en la ocurrencia de los deslizamientos de taludes, las estadísticas de deslizamientos ocurridos alrededor del mundo muestran que las lluvias propician un número aún mayor de este tipo de eventos. Debido a esto, es importante tener el conocimiento sobre las zonas de mayor susceptibilidad a deslizarse debido a condiciones hidrometeorológicas extraordinarias.

Continuando con el concepto del talud infinito, investigadores como Montgomery et al. (1998) han propuesto expresiones para evaluar las condiciones del terreno bajo las cuales éste tenderá a moverse. Para ello, definen un parámetro denominado precipitación crítica de estado estacionario, que es la precipitación necesaria para que ocurra un deslizamiento en un terreno con características definidas.

$$Q_c = \frac{T \operatorname{sen} \alpha}{(a/b)} + \left[ \frac{c}{\rho_w g \cos^2 \alpha \tan \phi} + \frac{\rho}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \right) \right] \dots \dots \dots (3.5)$$

donde  $T$  es la transmisibilidad del suelo a lo largo de su espesor,  $a$  es el área tributaria pendiente arriba y  $b$  es la longitud del terreno que se desliza (Figura 5). Para el caso de terrenos donde el material no presenta cohesión, la ec. 5 se simplifica considerablemente, quedando:

$$Q_c = \frac{T \operatorname{sen} \alpha}{(a/b)} \left[ \frac{\rho}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \right) \right] \dots \dots \dots (3.6)$$

Sin embargo, se pueden presentar casos donde la precipitación no afectará el comportamiento del terreno, lo cual se conoce como pendientes incondicionalmente estables. La condición de pendientes incondicionalmente estables se puede evaluar como:

$$\tan \alpha < \frac{c}{\rho g \cos^2 \alpha} + \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_w} \right) \tan \phi \dots \dots \dots (3.7)$$

Caso contrario será aquel donde el deslizamiento del material sea inminente debido a una pendiente muy abrupta, esta condición se define como pendientes incondicionalmente inestables, la cual se evalúa como

$$\tan \alpha > \tan \phi + \frac{c}{\rho g \cos^2 \alpha} \dots \dots \dots (3.8)$$

Con las expresiones anteriores y la información geológica e hidrometeorológica necesaria, es posible evaluar la ocurrencia de deslizamientos de suelos usando sistemas de información geográfica.

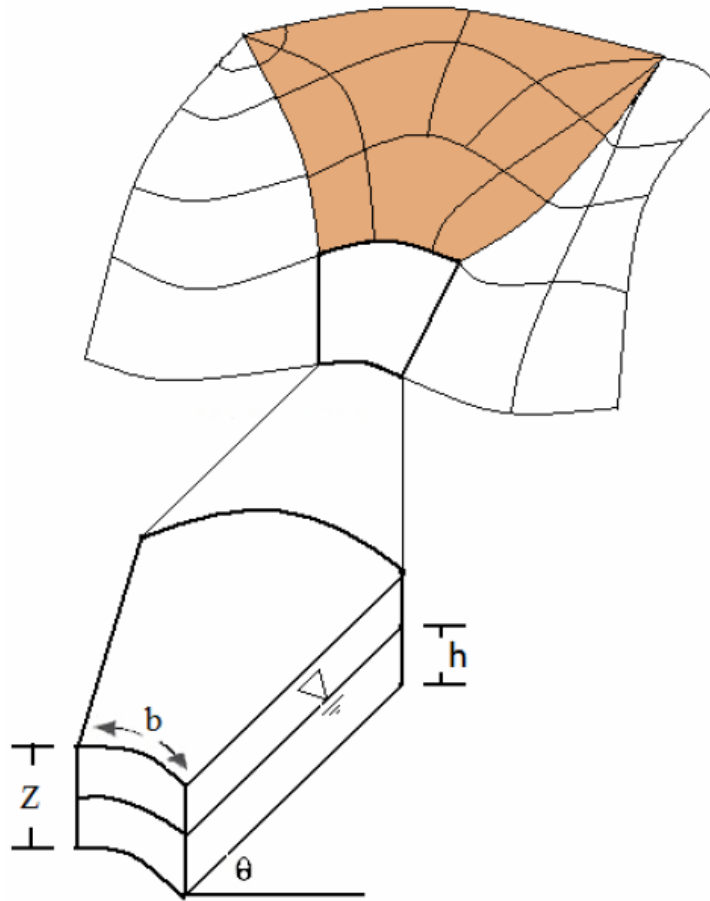


Figura 3.4 Ilustración de los parámetros usados en la ec. (5) (Montgomery et al., 1998)