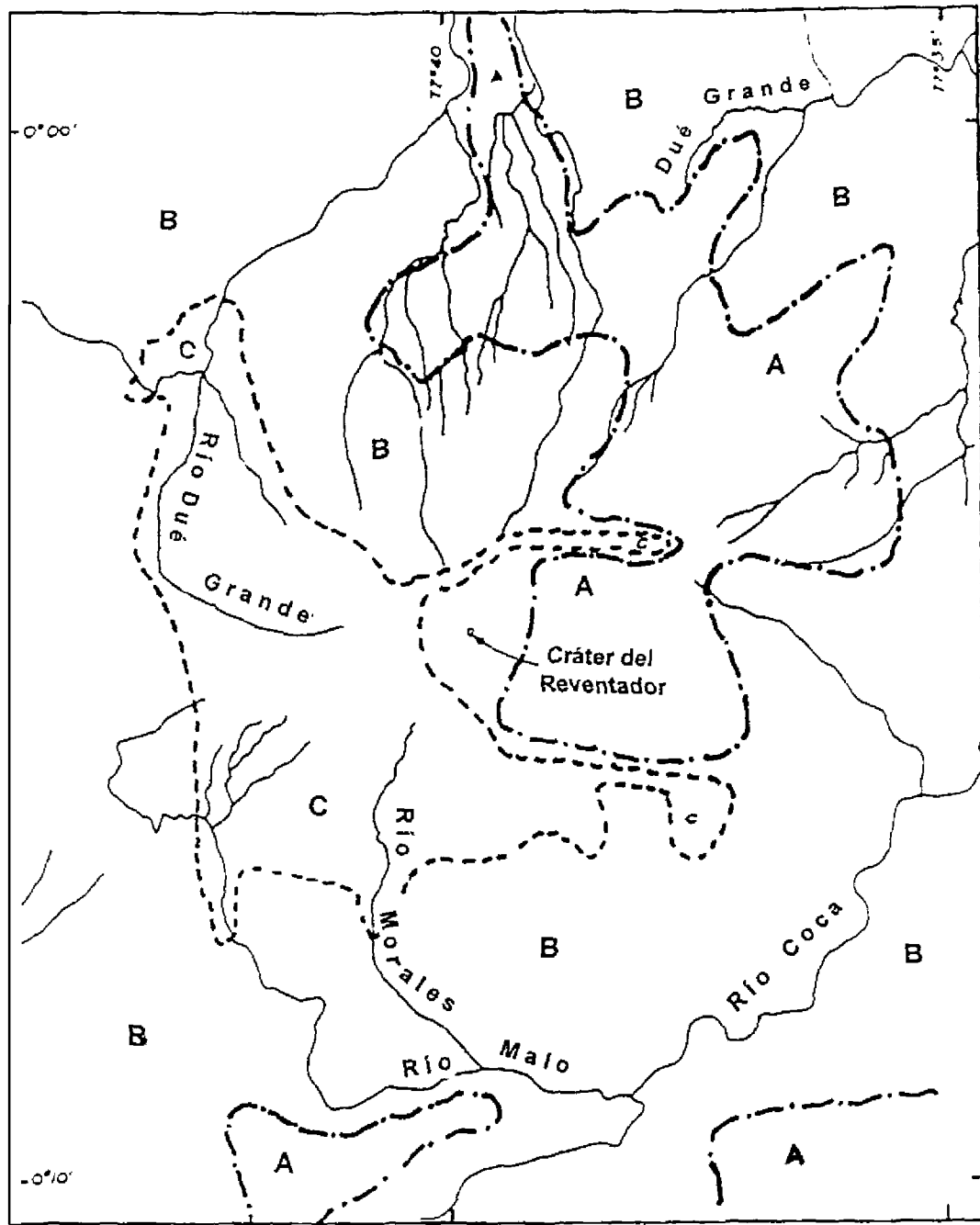




FIGURA 5.9 B Vista de Abril de 1987 de las paredes del mismo valle mostrando la gran denudación debido a los deslizamientos del 5 de Marzo.



FIGURA 5.9 C Vista en Junio de 1990 de las mismas paredes del valle mostrando un recubrimiento parcial de la vegetación en las cicatrices de los deslizamientos de 1987. Nótese el puente reconstruido de la carretera trans-ecuatorial cruzando el río Salado.



DENUDACION

- A: < 25%
- B: 25-75%
- C: 75-100%

0 10 20 30 40 KM

FIGURA 5.10 Mapa que muestra los porcentajes de denudación de la vegetación debido a los deslizamientos del 5 de Marzo de 1987 en la vecindad del volcán El Reventador.



FIGURA 5.11 Vista aguas arriba del río Salado mostrando los remanentes (al frente, al centro) de los flujos de escombros que ingresaron al río desde la pared del valle derecho (NE). Es probable que este flujo de escombros represó brevemente el río en este punto.

La evaluación de la estabilidad de los taludes en el área de El Reventador bajo cargas sísmicas provee una idea general del comportamiento de la resistencia al corte de estos suelos en particular y de suelos residuales en general. La estabilidad de los suelos residuales en taludes altos y de gran pendiente puede ser analizada por un modelo de talud infinito. Además, los efectos de un sismo pueden ser evaluados someramente introduciendo una fuerza horizontal pseudoestática que modele la máxima aceleración horizontal. El análisis fue llevado a cabo en términos de esfuerzos totales debido a que la evaluación de la presión de poros a la falla es imposible. Así, el factor de seguridad (FS) puede ser definido como:

$$FS = \frac{c / \cos \alpha + \gamma H (\cos \alpha - k \operatorname{sen} \alpha) \tan \varphi}{\gamma H (\operatorname{sen} \alpha + k \cos \alpha)}$$

donde:

- φ, c = parámetros de resistencia al corte consolidados, no drenados
- H = profundidad de la superficie de falla
- γ = peso unitario del suelo
- α = ángulo del talud
- k = factor sísmico (máxima aceleración horizontal).

Ishihara y Nakamura (1987) usaron $c=0.3 \text{ kg/cm}^2$ y $\phi=30^\circ$ para calcular el factor de seguridad estático para un talud de 45° que falló durante los sismos y destruyó parte de la estación de bombeo del oleoducto trans-ecuadoriano en El Salado. El valor de la cohesión fue obtenido por ensayos de cono y asumiendo un factor de reducción. El valor de ϕ_{cu} (ángulo de fricción interna en condiciones consolidadas - no drenadas) podría parecer a primera vista demasiado alto para condiciones de falla no drenada (que se presumió fue considerada por Ishihara y Nakamura), pero como se indica luego, puede ser adecuado para estas fallas en particular. Landívar et al. (1986), en su estudio general de suelos lateríticos del Ecuador, realizó ensayos triaxiales isotrópicos consolidados y no drenados en suelos fuera de la zona de El Reventador. Ellos obtuvieron parámetros de resistencia al corte en esfuerzos efectivos desde 0.05 a 0.08 kg/cm^2 para c' (cohesión en esfuerzos efectivos en ensayo drenado) y 32 a 34° para ϕ' (ángulo de rozamiento interno en esfuerzos efectivos en ensayo drenado). Se han dibujado las envolventes en esfuerzos totales para estos materiales y, como se esperaba, los valores de ϕ_{cu} promedios para los niveles de esfuerzos ensayados están en el rango de 5 a 10° . Los niveles de esfuerzos normales para 2 m de profundidad de deslizamiento no exceden los 0.5 kg/cm^2 ; así, estos suelos fueron ensayados a niveles de esfuerzos varias veces mayores que las condiciones de campo en El Reventador.

Una revisión de la literatura en suelos cohesivos (loess, suelos residuales, arcillas sensibles) en general y casos históricos de suelos residuales en particular muestra que a muy bajos niveles de esfuerzos la presión de poros a la falla es cercana a cero o ligeramente negativa (Vargas, 1974; Quigley, 1980; Lum, 1982). Como consecuencia, los valores de ϕ_{cu} y ϕ' son muy cercanos, implicando que la envolvente en esfuerzos totales posee una fuerte curvatura a bajos niveles de esfuerzos. Para nuestro rango de interés, 0 a 0.5 kg/cm^2 , los valores de ϕ típicos varían de 0 a 35° , y los valores de c son generalmente menores a 0.1 kg/cm^2 . Por eso, se han ajustado las envolventes de las curvas de los datos de Landívar y se obtuvieron valores de ϕ_{cu} entre 30 y 38° y valores de c entre 0.1 y 0.2 kg/cm^2 . Estos valores son en verdad muy similares a los parámetros en esfuerzos efectivos para otras localidades mencionadas anteriormente.

La Figura 5.12 muestra la variación del factor de seguridad como una función del ángulo del talud para condiciones estáticas y aceleraciones máximas horizontales de 150 , 250 y 350 gales. Se utilizó un valor de $\alpha=30^\circ$ ($\phi_{cu}=30^\circ$), y el valor de $c=0.14 \text{ kg/cm}^2$ concuerda bien con los valores de c obtenidos por Landívar et al. (1986). Parece ser que el rango de validez de la ecuación (1), o valores entre 30 y 60° (que también puede ser el rango de los ángulos de los taludes en el campo), si la inestabilidad se asume a $\phi_{cu}=30^\circ$ y $k=0.35$, la inestabilidad empezará a $\alpha=40^\circ$ para $k=0.25$ y a $\alpha=45^\circ$ para $k=0.15$. De las observaciones de campo, estos valores parecen ser razonables para toda el área de El Reventador, donde el rango de k probablemente cae dentro de esos límites. En comparación, la Figura 5.13 muestra una familia de curvas similares, donde ϕ_{cu} se asumió ser muy bajo (5°), como se comparó con hipótesis comunes para condiciones no drenadas y análisis de esfuerzos totales. Otra vez, se obtuvo un $c=0.26 \text{ kg/cm}^2$ para un cálculo regresivo asumiendo un $FS = 1$ y $k = 0.35$. El uso de estos parámetros de resistencia no explica las fallas para ángulos mayores a 45° para $k=0.35$ y, más significativamente, no predice deslizamiento alguno con aceleraciones más bajas.

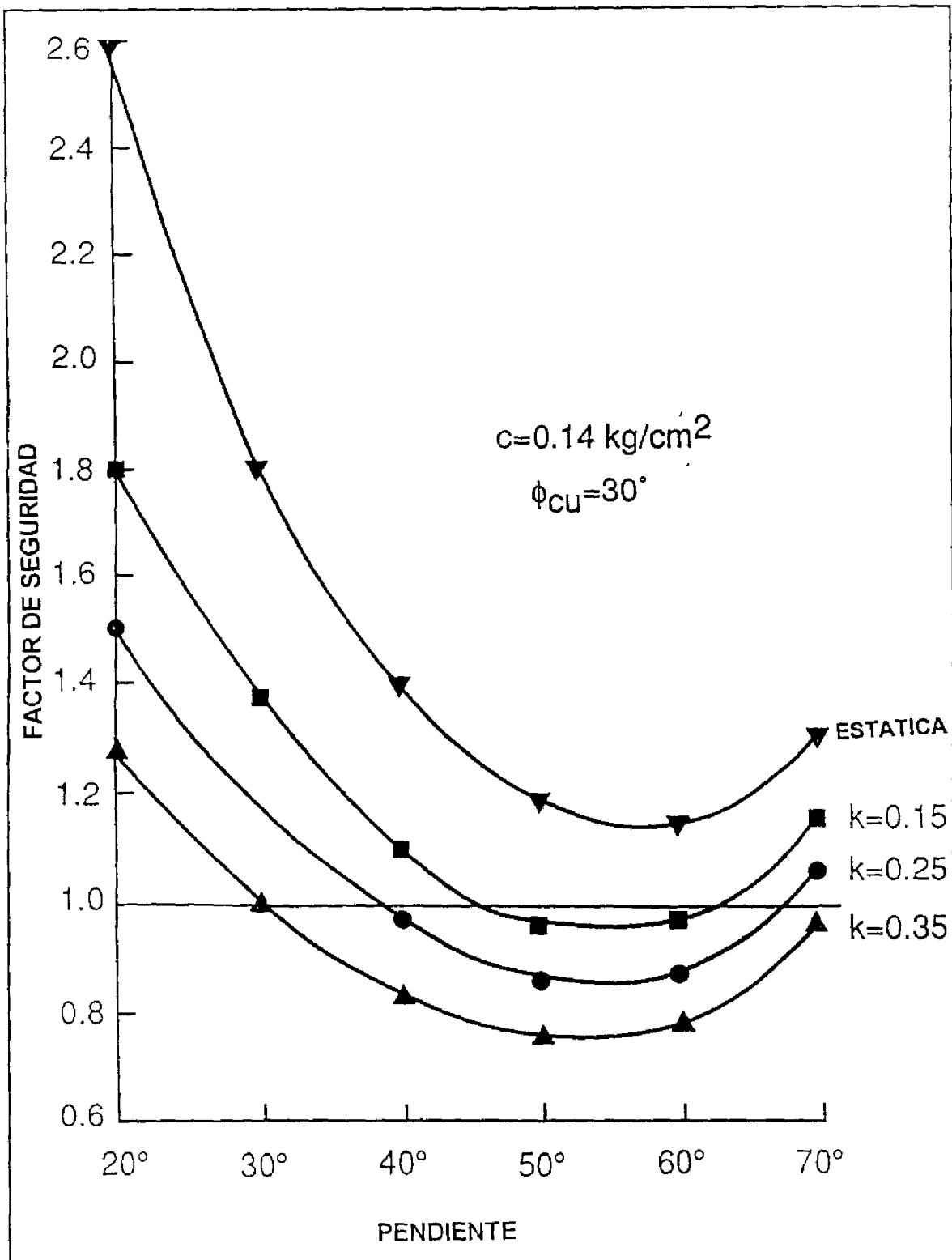


FIGURA 5.12 Factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos vs. ángulo del talud para $\phi_{cu} = 30^\circ$ y $c = 0.14 \text{ kg/cm}^2$.

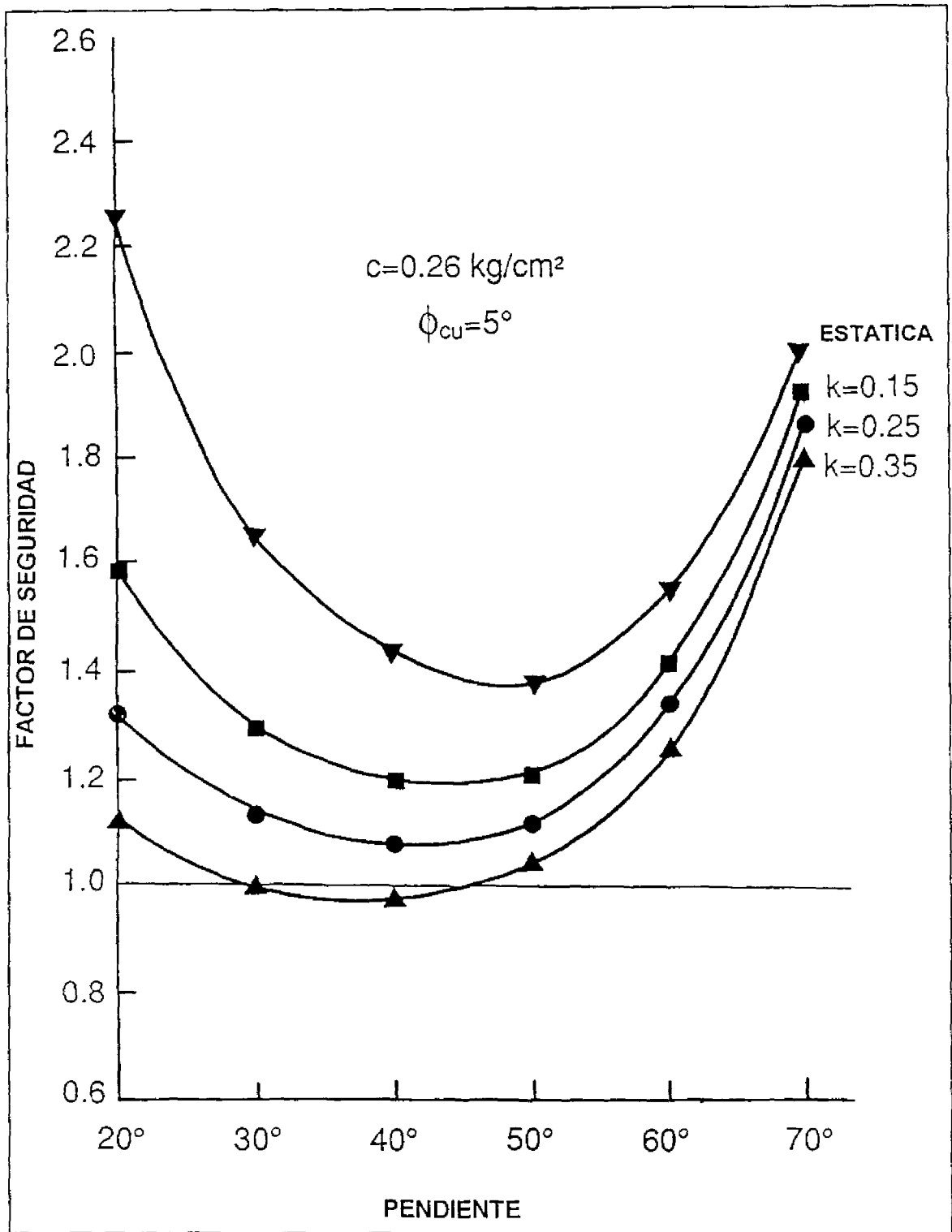


FIGURA 5.13 Factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos vs. ángulo del talud para $\phi_{cu} = 5^\circ$ y $c = 0.26 \text{ kg/cm}^2$.

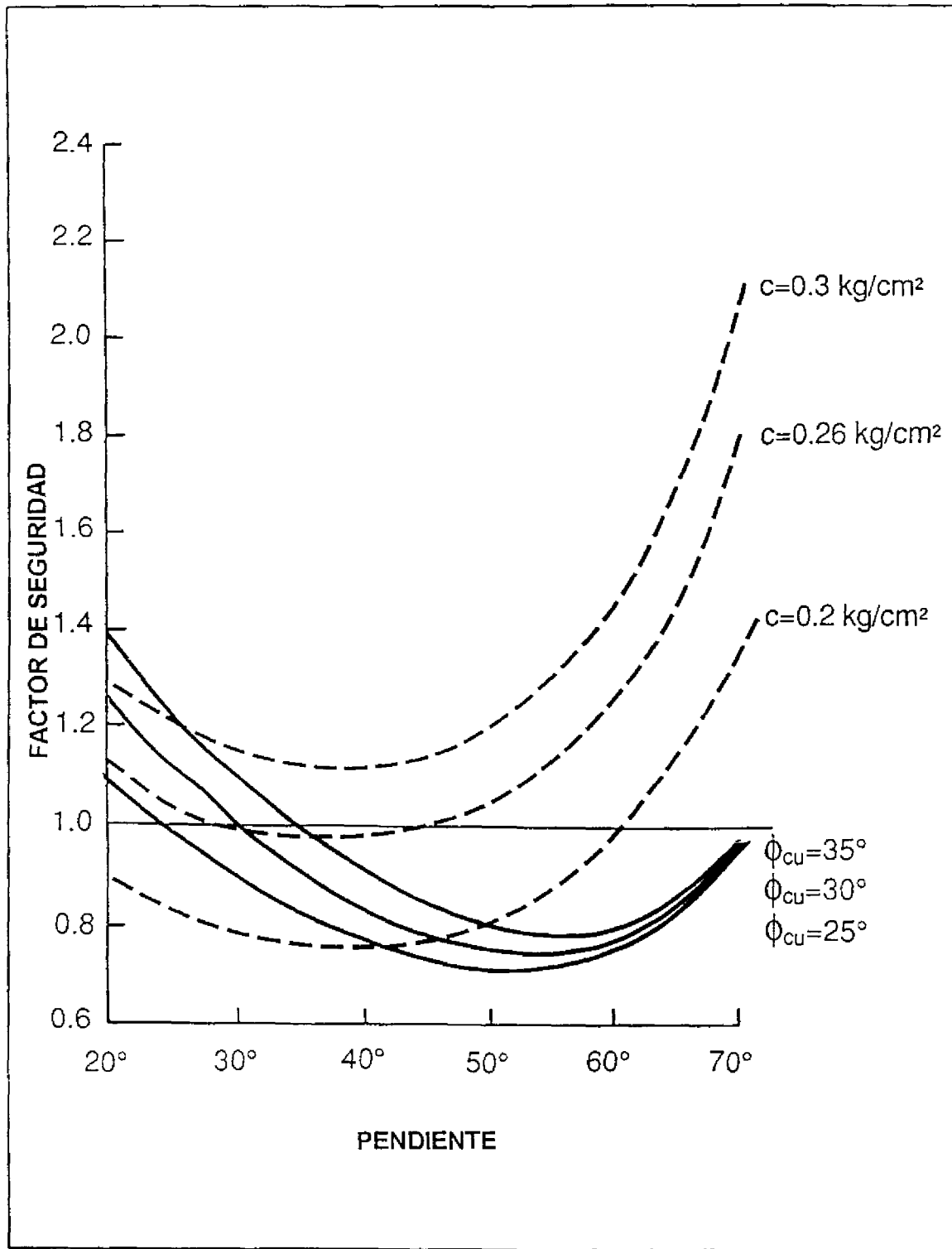


FIGURA 5.14 Dibujo comparativo mostrando la influencia de la variación en ϕ_{cu} y c sobre el factor de seguridad para $k = 0.35$.

Además, asumiendo variaciones naturales en los parámetros de resistencia, φ_{cu} bajo y c alto no explican las observaciones de campo. La Figura 5.14 es un dibujo comparativo en que el FS (factor de seguridad) fue calculado para $k=0.35$ y variando los parámetros de resistencia. Cuando se asume un $\varphi_{cu}=5^\circ$, una variación de cerca del ± 0.05 kg/cm², o del 20% del valor original de 0.14 kg/cm², da las curvas punteadas mostradas en la Figura 5.14. En un caso, sin importar el ángulo del talud, ninguno de los taludes fallarían, mientras en el otro caso todos los taludes lo harían. Sin embargo, aún en las áreas de máxima denudación, existe una buena correlación entre el ángulo del talud y la falla. En cambio, cuando se asume un $\varphi_{cu}=30^\circ$, una variación en el ángulo del talud de $\pm 5^\circ$, o cerca del 20% del valor original de 30° , los resultados se muestran con líneas continuas en la Figura 5.14. Estas líneas indican que la inestabilidad para $k=0.35$ empieza en taludes de 35° y 25° respectivamente; estos ángulos de los taludes todavía parecen ser razonables en vista de las observaciones de campo.

Debido a que estos son deslizamientos superficiales, el valor de la cohesión que se ha asumido influye grandemente sobre el factor de seguridad aún en el caso de un alto φ_{cu} . Por ejemplo, el valor de $c=0.3$ kg/cm² usado por Ishihara y Nakamura (1987) puede explicar los 5 m de profundidad del plano de falla en la estación de bombeo de El Salado con un valor de $k=0.35$, pero no puede explicar los frecuentes movimientos superficiales (comúnmente entre 1 y 2 m) observados en los alrededores.

Relación entre la Intensidad de Denudación y el Epicentro

Hakuno et al. (1988) cuestionaron la precisión de las localizaciones de los epicentros estimados por los sismólogos debido a que los mayores deslizamientos ocurrieron unos 30 km de los epicentros reportados. Ishihara y Nakamura (1987) colocaron los epicentros entre 5 y 10 km de la cabecera del río Malo y entre 10 y 15 km de la parte superior del río Salado, presumiblemente en base a la intensidad de denudación.

Mientras que la posición de los epicentros puede estar abierta a un cuestionamiento, nosotros sugerimos que el incremento en la denudación cerca al volcán El Reventador puede también ser causada por otros factores como el relieve, condiciones de humedad, altura y composición del suelo. Las áreas de denudación casi total en el talud SO del cono antiguo corresponden a una zona con una densa y profunda disección por parte de arroyos paralelos. Aquí, casi todas las superficies tienen pendientes mayores a 35° y 40° . Una denudación casi total en áreas disectadas por arroyos también tuvo lugar a lo largo de las paredes en los profundos cañones de los ríos Malo (Figura 5.15), Morales, Dué Grande y tributarios al N del Dué Grande. En contraste, los taludes en la parte N del cono antiguo, los mismos que no son disectados profundamente, fueron los menos afectados por los deslizamientos, aún estando más cerca a los epicentros y a menos de dos kilómetros del área de denudación casi total. A lo largo de las paredes del río Coca, los taludes son cóncavos y por eso tienen pendientes muy pronunciadas en su parte superior y una mayor densidad de arroyos con fuertes pendientes que aquellos taludes convexos, por todo ello tienen la mayor concentración de deslizamientos. Las mismas consideraciones se aplican a las paredes del valle del río Salado. Así, parecería que la intensidad de la denudación está fuertemente controlada por la densidad y profundidad de la disección, debido a que estos factores determinan el porcentaje de superficie de talud mayor que los valores límites.

Otro factor que está controlando la denudación puede ser las diferencias locales en el grado de saturación de los materiales residuales. El grado de saturación influye grandemente

en la cohesión (Brand, 1982; Ho y Fredlund, 1982), que, como se indicó anteriormente, afecta el factor de estabilidad pseudoestático. El área alrededor del cono de El Reventador tiene un microclima más húmedo que el resto de la zona (E. Aguilera, com. pers., 1987); la estación de INECCEL cerca al volcán El Reventador tiene una precipitación media anual de 6.868 mm.

Finalmente, pero no menos importante, los materiales alrededor del volcán El Reventador, siendo principalmente suelos residuales formados sobre material piroclástico, pueden simplemente ser más susceptible a la falla.

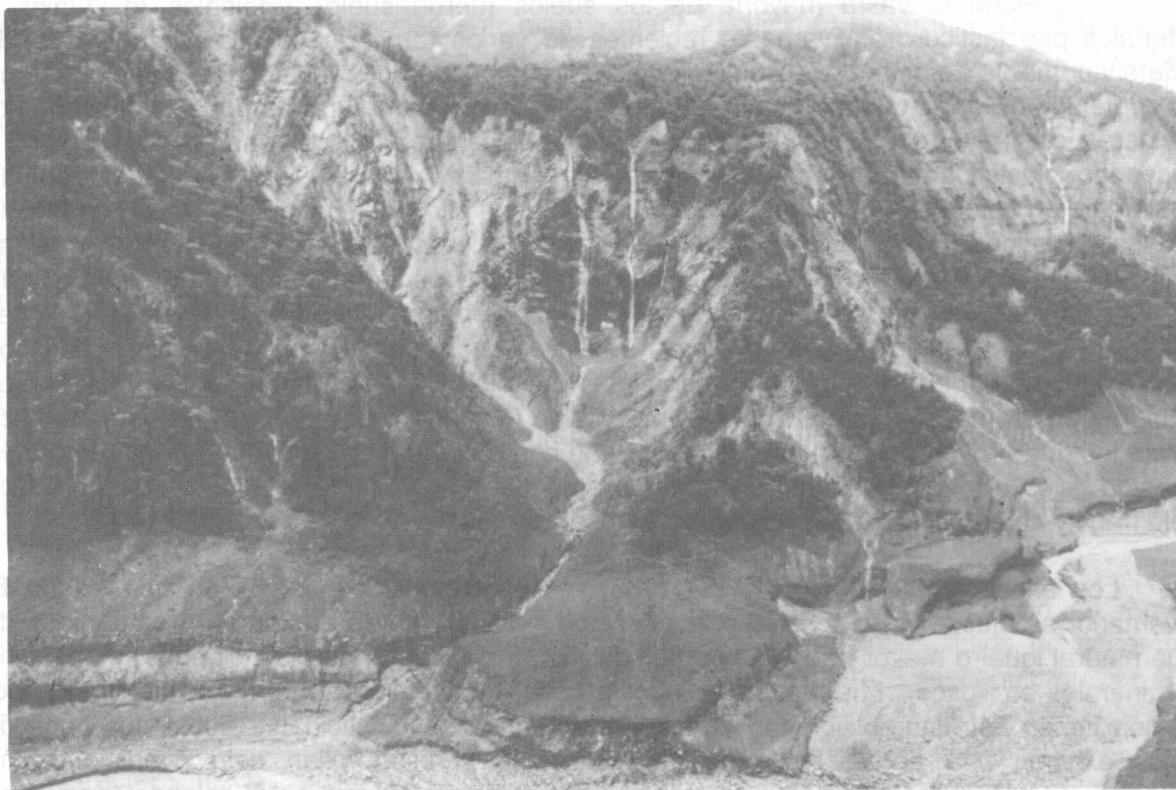


FIGURA 5.15 Vista aérea de la pared del valle NE del río Malo mostrando la denudación extrema de los taludes debido a los deslizamientos/avalanchas/flujos y del fondo del valle debido a flujos de escombros e inundaciones. Nótese que la línea de vegetación que indica la máxima altura del flujo/inundación de escombros, alcanzó cerca de 25 m sobre el nivel normal del río.

EVOLUCION DE LOS PROCESOS DEL DESLIZAMIENTO

Una de las más sorprendentes características de los deslizamientos causados por los sismos del 5 de Marzo de 1987 fue la efectividad del transporte de materiales desde los taludes de los tributarios de menor orden a las llanuras de inundación de los ríos mayores. Como se mencionó anteriormente, algunos llegaron a los ríos principales alcanzando 20 m de sedimentos (medidos en el centro de las llanuras de inundación), siendo la mayoría producidos por los deslizamientos generados. Si asumimos una sección triangular para los sedimentos en el fondo del valle, un ancho promedio de 600 m para la planicie de inundación del río Coca, y un valle con una longitud de 20 km entre la boca del río Salado y la cascada de San Rafael, nosotros calculamos un volumen total de $120 \times 10^6 \text{ m}^3$. Si asumimos una profundidad

promedio de deslizamiento de 2 m (un valor razonable basado en las observaciones de campo), el área denudada fue cerca de 60 km². El volumen calculado concuerda bien con el volumen total ($100 \times 10^6 \text{ m}^3$) de movimiento de masas obtenido por Hakuno et al. (1988). Este volumen demuestra la fluidez del flujo de avalanchas y la efectividad de los tributarios en el transporte de dichos materiales. Nosotros sugerimos la existencia de dos factores que pudieron haber contribuido a este gran volumen. El primero es la naturaleza de los suelos envueltos en la falla de los taludes, y el segundo es la morfología general del área de El Reventador.

En general la vasta mayoría de los suelos fueron suelos tropicales residuales y materiales piroclásticos relativamente recientes de varios tamaños de grano (ceniza, lapilli, cinders y pómez). Estos tipos de suelos tienen estructuras característicamente abiertas con un alto contenido de agua cuando están saturados. El contenido natural de agua es típicamente muy cercano o mayor que el límite líquido. Los materiales piroclásticos tienen límites líquidos e índices de plasticidad relativamente bajos. Sin embargo, los suelos residuales, estando usualmente en estados avanzados de laterización, tienen altos límites líquidos (hasta de 300%) e índices plásticos (hasta 150%). La plasticidad de tales suelos es el resultado no de las arcillas de alta actividad, sino de la presencia de sesquióxidos hidratados de Al y Fe en estado de gel. En efecto, las lateritas residuales tienen un contenido muy pequeño de arcilla (Mitchell y Sitar, 1982). Si están presentes, las arcillas tienden a ser de tipo halloisita. Tanto los sesquióxidos como la halloisita sufren cambios irreversibles cuando están secas, y los suelos adquieren un dramático decrecimiento en plasticidad (Mitchell y Sitar, 1982). Estos materiales hidratados que proveen plasticidad, se comportan como elementos cementantes que imparten cohesión física a los suelos. Las estructuras abiertas son preservadas y el resultado es un suelo frágil y abierto con alta capacidad para absorber agua.

Los ensayos de Hakuno et al. (1988) mostraron que los suelos en el área de El Reventador se ajustan bien a esta caracterización. Estos autores encontraron contenidos de agua natural igual o mayor que el límite líquido, un amplio rango de plasticidades, y ausencia de minerales arcillosos. Los materiales piroclásticos, particularmente aquellos de grano fino, también tienen estructuras abiertas y de relativamente baja plasticidad. Estos dos tipos de suelos exhiben una pérdida extrema de resistencia si ellos fallan bajo condiciones no drenadas. El primer factor en esta dramática pérdida de resistencia es el colapso (en suelos residuales deshidratados); el segundo factor es el incremento en la presión de poros y el consecuente decaimiento del esfuerzo efectivo.

El escenario postulado para el transporte de los materiales deslizados es el siguiente. (1) Falla por corte en la superficie basal con una profundidad promedio de 2 m, probablemente al fondo del perfil del suelo residual y el tope de la roca meteorizada. (2) Comportamiento contractante del suelo fallado. Esta contracción disminuye los esfuerzos efectivos hasta que una resistencia estable es alcanzada (Poulos et al., 1985; Ellen y Fleming, 1987; Fleming et al., 1989). Dado el comportamiento altamente contractante de los suelos en esta área, podemos suponer que la resistencia final de estos suelos es muy baja. (3) Flujos de alta velocidad bajaron los taludes de mayor pendiente recorriendo varias decenas hasta algunos cientos de m. (4) Movimiento de flujos de escombros a los cauces de los tributarios que no tienen planicies de inundación. El flujo entonces fue canalizado y conducido efectivamente a canales de corrientes de mayor orden.