

# Estimación de desplazamientos admisibles para determinar el coeficiente $k$ , en análisis pseudoestático de estabilidad de taludes de corte

Jenny Lorena Niño Sana  
Jenny.nino-s@mail.escuelaing.edu.co  
Carlos Eduardo Rodríguez Pineda  
crodriguezp@javeriana.edu.co

## Resumen

Se aplican procedimientos simplificados que estiman valores de desplazamientos sísmicos admisibles, involucrando la variación de características geométricas, altura e inclinación, aceleración crítica  $k_y$  y parámetros de resistencia para diferentes modelos teóricos de taludes de corte así como la influencia del entorno sismogénico y espectro sísmico para las diferentes zonas de amenaza sísmica de acuerdo con el Mapa de Zonificación de Amenaza Sísmica del Servicio Geológico Colombiano 2020, para determinar el coeficiente de aceleración horizontal  $k$  de un análisis de estabilidad pseudoestático alcanzando factores de seguridad  $FS \geq 1,0$ . La estimación de desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño se realiza según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray y Macedo, 2019; con la implementación de este procedimiento se logra generar un soporte técnico para la escogencia de un coeficiente de aceleración horizontal  $k$ , con el cual se reduce el  $A_m$  para emplear en un análisis de estabilidad pseudoestático según lo establecido en la AIS, 2010, por lo que, al involucrar índice de desplazamiento admisible en el cálculo del  $k$ , este se reduce de manera óptima tal que aún se garantizan los factores de seguridad mínimos y envuelve el entorno sísmológico en él está inmerso el talud de análisis.

*Palabras Clave:* coeficiente de aceleración horizontal; desplazamientos sísmicos admisibles; análisis pseudoestático

## Abstract

Simplified procedures are applied that estimate values of allowable seismic displacements, involving the variation of geometric characteristics, height and inclination, critical acceleration  $k_y$  and strength parameters for different theoretical models of shear slopes as well as the influence of the seismogenic environment (cortical and subduction seismogenic sources) and seismic spectrum (distinction of the type of earthquake, magnitude, spectrum, amplitude, return period) for different seismic hazard zones according to the different seismic hazard zones, magnitude, spectrum, amplitude, return period) for the different seismic hazard zones according to the Colombian Geological Survey Seismic Hazard Zoning Map 2020, to determine the horizontal acceleration coefficient  $k$  of a pseudostatic stability analysis reaching safety factors  $FS \geq 1.0$ . The estimation of allowable seismic displacements for different design scenarios is performed as proposed in Bray et al, 2018 and Bray and Macedo, 2019 and is applied as a concrete example to some capital cities of Colombia that have Seismic Microzonation studies such as, Manizales, Cali, Medellin and Bogota. With these simplified procedures for the determination of  $k$ , the technical support is obtained with which it is possible to reduce in a percentage either the PGA or  $A_{máx}$ , to obtain the horizontal acceleration coefficient to be used in a pseudostatic stability analysis in slopes associating an admissible seismic displacement.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se han desarrollado varios métodos para evaluar la estabilidad de taludes durante la ocurrencia de un sismo. El análisis pseudoestático fue el primero, que implicó simplemente agregar una fuerza inercial permanente que representa el efecto del sismo en el método de equilibrio límite, posteriormente se involucró el análisis por métodos numéricos como elementos y diferencias finitas que tienen en cuenta la deformación y se obtiene un resultado más realista respecto al talud; sin embargo, es más complejo y requiere una alta densidad de datos de propiedades del suelo, así como un modelo preciso del comportamiento del suelo. (Jibson, 2003) y finalmente, Newmark (1995)

desarrolló un método que cierra la brecha entre estos dos tipos de análisis, Bloque deslizante, que es fácil de aplicar y proporciona un índice útil del desempeño sísmico del talud indicado como un desplazamiento sísmico.

Con el fin de involucrar la variación en las características geométricas, parámetros de resistencia, entorno sismogénico (fuentes sismogénicas corticales y de subducción) y espectro sísmico (distinción del tipo de sismo, magnitud, espectro, amplitud, periodo de retorno) para determinar el coeficiente de aceleración horizontal  $k$  a usar en un análisis de estabilidad pseudoestático alcanzando factores de seguridad  $FS \geq 1,0$ . Como resultado adicional de estos procedimientos simplificados para la obtención de  $k$ , se añade el soporte técnico con el cual es posible reducir en un porcentaje ya sea el PGA o  $A_{máx}$ , garantizando la estabilidad pseudoestática en taludes asociando un desplazamiento sísmico admisible.

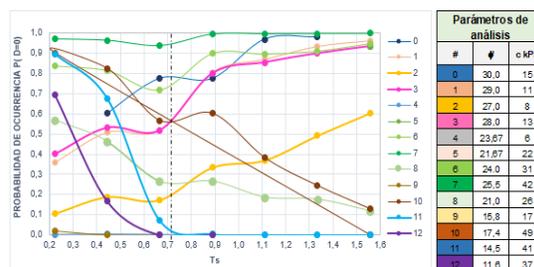
## 2. METODOLOGÍA

A partir de modelos numéricos por metodologías de Equilibrio Límite teniendo en cuenta las características sísmicas del país con el fin de determinar las deformaciones esperadas para diferentes escenarios de diseño en el análisis seudoestático para estabilidad de taludes de corte. Se desarrolló en cuatro etapas, (1) Determinación de la aceleración crítica ( $K_y$ ), definición de secciones topográficas de análisis, empleo de parámetros al corte no drenados. (2) Establecer las características del espectro sísmico de diseño de taludes para las diferentes zonas de amenaza sísmica de acuerdo con el Mapa de Zonificación de Amenaza Sísmica del Servicio Geológico Colombiano 2018. (Distinción del tipo de sismo, magnitud, Espectro, amplitud, Periodo de retorno). (3) Estimación de desplazamientos sísmicos para diferentes escenarios de diseño empleando los procedimientos enunciados en Bray et al, 2018 y Bray y Macedo, 2019 y (4) Generación de una herramienta para la determinar el coeficiente de aceleración a usar en un análisis seudoestático para estabilidad de taludes de corte que involucre los desplazamientos sísmicos admisibles.

### 3. DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS ADMISIBLES GENERADOS EN ZONAS DE FALLAS CORTICALES

Se aplicó el procedimiento para estimar desplazamientos sísmicos admisibles originados en zonas de fuentes corticales para  $T_r$  475 años se escoge la ciudad de Manizales teniendo en cuenta los análisis y resultados obtenidos en los estudios de Microzonificación sísmica de Manizales del año 2002. Con base en el primer criterio que indica un desplazamiento sísmico “Cero” que significa que es inferior a 0,5 cm.

A partir de los resultados, se observa de manera general que después de  $T_s > 0,66$  s hay un punto de inflexión en el cual cambia la curva de probabilidad  $P(D=0)$ , por ejemplo en los depósitos 0, 1, 6 y 7 genera  $P(D=0)$  cercanas a 1,0 lo cual significa que los materiales constituyentes de estos taludes en el momento de ocurrencia de un sismo con  $M_w$  6,5 desarrollaran desplazamientos inferiores a 0,5 cm, contrario a los depósitos 10, 11 y 12 que generan  $P(D=0)$  cercanas a 1,0; y conforme el período de vibración aumenta el talud se flexibiliza y disminuye probabilidad de generar desplazamientos inferiores a 0,5 cm dado que  $P(D=0)$  es cercana a 0, como se puede ver en la Figura. 1.



**Figura. 1** Variación  $T_s$  vs Probabilidad de excedencia para desplazamientos sísmicos,  $P(D=0)$  para Manizales, generados en zonas de fallas corticales

Es posible evidenciar además que, para un mismo tipo de depósito el cambio de  $T_s$  condiciona la probabilidad de  $D=0$ , esto es que no solamente depende de los parámetros de resistencia, sino que también del contenido frecuencial.

Se observar de la Figura. 1 la variación drástica entre el comportamiento generado por el depósito 7 y 11 en los cuales la variación de la cohesión es mínima, pero respecto al ángulo de fricción interna hay una diferencia de  $11^\circ$ , es decir, el talud del depósito 7 tiene mayor ángulo de fricción ( $25,5^\circ$ ) y presenta una probabilidad cercana a 1,0 lo que indica que este talud desarrollara umbrales de desplazamientos menores a 0,5 cm,  $P(D=0) = P = 1,0$ . Posiblemente, el porcentaje granular del depósito permite obtener un ángulo de fricción de  $25^\circ$  lo que denota que no se desarrollen grandes desplazamientos.

Sin embargo, cuando el talud tiene ángulo de fricción menor ( $14,5^\circ$ ) es posible que en el momento de ocurrencia de un sismo se presenten desplazamientos mayores a 0,5 cm.

Posterior, con base en el segundo criterio que indica un desplazamiento sísmico mayor a 0,5 cm.  $D > 0,5$  cm

De acuerdo con los resultados se puede que de los depósitos con características de resistencia bajas ( $\phi$   $27,0^\circ$  y C 8 kPa) permite que se genere un amplio rango de desplazamientos, contrario al talud con parámetros más altos ( $\phi$   $25,5^\circ$  y C 42 kPa) el cual no permite la generación de un intervalo de desplazamiento con valores inferiores a 0,5 cm y máximo 15,0 cm. Se puede identificar además que, son los taludes con menores valores de velocidad de onda de corte generan mayores desplazamientos opuesto a los taludes rígidos que producen desplazamientos mínimos. En la Tabla 1 se presentan los desplazamientos que podrían generar los taludes bajo un sismo originado por una fuente cortical con magnitud, Mw, de 6,5.

**Tabla 1.** Desplazamientos sísmicos originados en zonas de fallas corticales para Manizales con Tr de 475 años y sismo de Mw 6,5 (Talud con inclinación  $27^\circ$  y Vs 180 m/s)

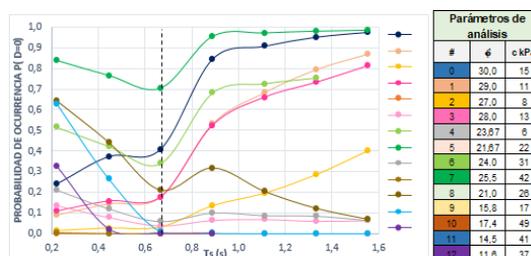
#	H	Ky	Sa (1,3 Ts)	P (D=0)	D (cm)		
					med	mín	máx
7	10	0,755	0,790	0,97	0,27	<0,5	<0,5
	20	0,471	0,410	0,96	0,28	<0,5	<0,5
	30	0,365	0,280	0,94	0,31	<0,5	<0,5
	40	0,302	0,210	1,00	0,36	<0,5	<0,5
	50	0,266	0,170	1,00	0,38	<0,5	<0,5
	70	0,242	0,140	1,00	0,36	<0,5	<0,5
	70	0,222	0,120	1,00	0,34	<0,5	<0,5
11	10	0,613	0,790	0,90	0,44	<0,5	<0,5
	20	0,304	0,410	0,68	0,76	<0,5	0,77
	30	0,139	0,280	0,07	2,61	1,01	5,16
	40	0,087	0,210	0,01	5,05	2,44	10,32
	50	0,050	0,170	0,00	11,57	5,65	23,67
	60	0,026	0,140	0,00	26,48	12,94	54,19
	70	0,008	0,120	0,00	86,61	42,33	177,23

#### 4. DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS ADMISIBLES GENERADOS EN ZONAS DE SUBDUCCIÓN

Como ejemplo de la aplicación del procedimiento para estimar desplazamientos sísmicos en zonas de subducción para Tr 475 años, se realizó para Cali con las características sísmicas según los estudios de Microzonificación sísmica de Santiago de Cali del año 2002, en el cual se indica que las fuentes sismogénicas que tienen mayor contribución a la amenaza sísmica es la fuente de subducción asociada a la Zona de Beniöff.

Con el criterio inicial que el desplazamiento sísmico “Cero” es decir inferior a 0,5 cm, se concluye de manera general que, a partir de Ts 0,66 s hay un punto

de inflexión en el cual cambia el comportamiento de la probabilidad de excedencia de P (D=0), por ejemplo en los depósitos 0, 6 y 7 generan probabilidades mayores a 0,5 lo cual significa que los materiales constituyentes de estos taludes en el momento de ocurrencia de un sismo con Mw 6,5 desarrollaran desplazamientos inferiores a 0,5 cm y para los taludes 3,4 y 10 en los cuales disminuye la probabilidad de ocurrencia de P(D=0), lo cual es posible evidenciarlas en la Figura 2.



**Figura. 2** Variación Ts vs Probabilidad de ocurrencia de desplazamientos sísmicos, P (D=0) para Cali, generados en zonas de subducción

En la Figura. 2 se identifica la variación drástica entre el comportamiento generado por el depósito 7 y 11 en los cuales la cohesión es mínima, pero en el ángulo de fricción interna hay diferencia de  $11^\circ$ , es decir, el talud del depósito 7 tiene mayor ángulo de fricción ( $25,5^\circ$ ) y presenta una probabilidad cercana a 1,0 lo que indica que este talud desarrollara umbrales de desplazamientos menores a 0,5 cm. Si el talud tiene ángulo de fricción menor ( $14,5^\circ$ ) es posible que en el momento de ocurrencia de un sismo se presenten desplazamientos mayores a 0,5 cm. La fuente sismogénica de Beniöff domina los desplazamientos generados para taludes con periodos de vibración Ts entre 0,4 y 0,9, es decir, entre 30,0 m y 40,0 m de altura con Vs de 180 m/s.

Y con el segundo criterio que, indica que el desplazamiento sísmico sea de “Diferente de Cero” lo que significa mayor a 0,5 cm es posible identificar que cuando se involucra la fuente sismogénica, por ejemplo, las zonas de subducción se obtienen valores e intervalos amplios de desplazamientos sísmicos llegando máximo hasta 580 cm, mientras que para análisis en zonas de falla de origen cortical los valores máximos son de 100 cm, tal como se puede ver en la Tabla 2

**Tabla 2.** Desplazamientos sísmicos originados en zonas de subducción para Cali con período de retorno de 475 años y sismo de Mw 7,5 (Talud con inclinación  $27^\circ$  y Vs 180 m/s)

#	H	Ky	Sa (1,5 Ts)	p (D=0)	D (cm)		
					mín	med	máx
7	10	0,755	1,10	0,84	<0,5	<0,5	0,09
	20	0,471	0,60	0,76	<0,5	<0,5	0,36
	30	0,365	0,40	0,70	<0,5	<0,5	0,52
	40	0,302	0,31	0,95	<0,5	<0,5	<0,5
	50	0,266	0,24	0,97	<0,5	<0,5	<0,5
	70	0,242	0,20	0,98	<0,5	<0,5	<0,5
	70	0,222	0,17	0,98	<0,5	<0,5	<0,5
11	10	0,613	1,10	0,63	<0,5	<0,5	0,84
	20	0,304	0,60	0,26	<0,5	1,28	3,17
	30	0,139	0,40	0,01	3,51	7,36	15,27
	40	0,087	0,31	0,00	8,27	17,12	35,41
	50	0,050	0,24	0,00	19,19	39,67	81,98
	70	0,026	0,20	0,00	48,35	99,92	206,51
	70	0,008	0,17	0,00	137,59	284,37	587,70

Se evidencia que las estimaciones de desplazamientos sísmicos están estrictamente ligados a  $k_y$ , para taludes con bajas características de resistencia e inclinaciones de  $27^\circ$  y con  $k_y$  máximo de 0,25; pero, cuando se tienen inclinaciones mayores los desplazamientos sísmicos son directamente proporcional alcanzando valores hasta de 345 cm, infiriendo que el talud tiene un comportamiento flexible y permite tales desplazamiento, sin embargo, en taludes con inclinación de  $45^\circ$  y altura mayor a 10,0 m en razón que el  $k_y = 0$ , no se presentan desplazamientos por que los materiales con bajas características sísmicas fallan. Es importante indicar que, aunque numéricamente se estimen desplazamientos grandes se debe tener en cuenta la afectación que generaría en los materiales, tal como fisuras, grietas y posibles fallas por desprendimientos o movimiento de la masa inestable ladera abajo.

## 5. ESTIMACIÓN COEFICIENTE DE ACCELERACIÓN, K

Dado el nivel de la práctica en la cual se obtiene un valor de coeficiente de aceleración para análisis pseudoestático que no involucra las características del entorno sísmológico ni el contenido frecuencial de este, así como tampoco se tiene en cuenta la afectación del sismo en los desplazamientos del talud, se aplican los procedimientos propuestos por Bray et al, 2018 y Bray et al, 2019 en los cuales se calcula el coeficiente de aceleración horizontal ( $k$ ) a utilizar en un análisis de estabilidad de taludes pseudoestáticos exigiéndole que proporcione una evaluación sísmica que sea consistente con los resultados del análisis de desplazamiento sísmico de taludes. La manera en la cual se emplea el procedimiento se sintetiza en los siguientes pasos:

1. Determinar la resistencia cortante no drenada del perfil de suelo involucrado en el análisis y la velocidad de onda de corte de la potencial masa deslizante

2. Establecer la configuración geométrica final del talud de corte a analizar para determinar el periodo de vibración de la potencial masa deslizante;  $T_s = 4H / V_s$

3. Calcular con los parámetros de resistencia al corte no drenados y la geometría del talud por medio del método de Equilibrio límite el valor de aceleración crítica  $K_y$ , para un factor de seguridad  $FS = 1,00$

4. Localizar el sitio de análisis y a que fuente sísmogénica está asociado la posible generación de un sismo, relacionando la magnitud máxima que se pudiese generar. Por ejemplo, la ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en la fuente cortical CC\_20 con una  $M_w$  máx de 6,8 y la ciudad de Cali se localiza en la fuente sísmogénica de intra-placa In\_Slab\_40 Benioff con  $M_w$  máx de 7,5

5. Asignar los valores de PGA,  $S_s$  (0,2 s) y  $S_1$  (1,0 s) para los diferentes periodos de retorno (475 años o 975 años), conocer el valor máximo de aceleración en terreno (incluyendo la amplificación por perfil de suelo y por topografía) del sitio de análisis

6. Escoger el procedimiento a emplear para la selección del coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  y calcular la aceleración espectral para 1,3  $T_s$  ( $S_a$  1,3  $T_s$ ) y 1,5  $T_s$  ( $S_a$  1,5  $T_s$ ), según la fuente sísmogénica que origina el sismo de análisis, fuentes corticales o fuentes de intra-placa / subducción, respectivamente

7. Estimar un valor de desplazamiento sísmico admisible de acuerdo con las características del proyecto  $D_a$  (cm), el valor para la aplicación práctica en esta tesis analítica se toma el valor más crítico, que es que tiene una probabilidad de excedencia del 16 % (con el valor más crítico de  $D_a$  se obtiene valores más grandes de  $k$ ) y con el que en un análisis de estabilidad se obtiene un factor de seguridad de  $FS$  1,00

8. Analizar por medio del método de Equilibrio Límite en condición pseudoestático se obtiene un factor de seguridad de 1,00

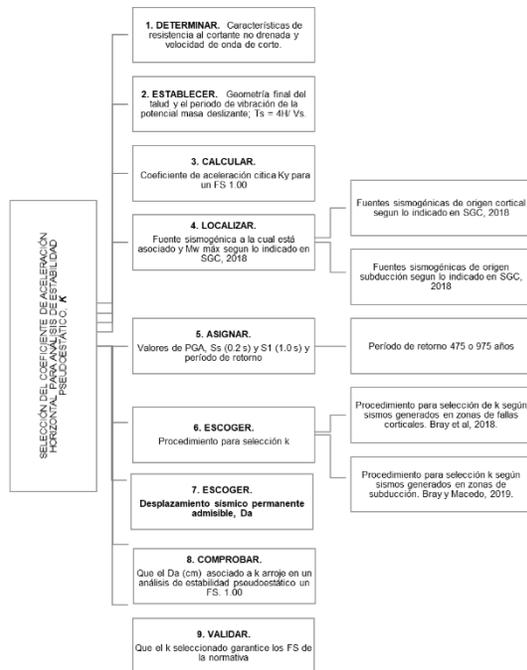


Figura. 3 Diagrama de flujo para la selección del coeficiente de aceleración horizontal para análisis pseudoestáticos

## 6. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ACCELERACIÓN K

En razón que se tomó como ejemplo de la aplicación del procedimiento para estimar desplazamientos sísmicos la ciudad de Manizales se tiene en cuenta también para los análisis y resultados obtenidos en los estudios de Microzonificación sísmica de Manizales del año 2002, en las cuales se puede ver que la mayor amenaza sísmica la aporta la Falla Romeral asociada a la fuente sísmogénica de origen cortical se obtienen aceleraciones pico de terreno para diferentes zonas de la ciudad

Con los valores de aceleración pico de terreno presentados, se toma el valor más alto de  $Am = 0,44$  postulando diferentes valores de  $Da$  para calcular a que coeficiente sísmico  $k$  está asociado y obtener un  $k$  a emplear con un análisis de estabilidad pseudoestático donde se obtenga un FS de 1,0 y se identifica a que porcentaje de  $Am$  está asociado  $k$ .

Se expone a modo de ejemplo un talud flexible, ( $V_s$  180 m/s) con parámetros de resistencia del depósito 2 (C 8 kPa  $\phi$  21°), de 10,0 m de altura que inicia con un  $Da$  de 2,52 cm y se calcula un  $k = 0,44$  para este caso, el  $k = Am$ , pero se obtiene un FS de 0,77, es decir que bajo un análisis pseudoestático este talud falla, sin embargo, si se toma un  $Da$  de 9,30 cm se obtiene un  $k$  de 0,23, que es el 52% de  $Am$  y se logra un FS de 1,05.

Se concluye que, para taludes con parámetros de resistencia Depósito 2 y con variación de altura entre 10,0 m y 70,0 m los desplazamientos sísmicos admisibles varían entre 3,35 cm y 9,30 cm y es posible reducir  $Am$  entre el 28 % y 52 %, obteniendo un coeficiente de aclaración horizontal entre 0,123 y 0,23 con los cuales en análisis de estabilidad de taludes pseudoestático se alcanzan FS = 1,05, En la

Tabla 3, se presentan los  $Da$  (cm) y los  $k$  asociados

Se aclara que el factor de seguridad no varía linealmente por lo que  $k$  no varía de forma lineal con el FS si no que, por el contrario, esta intrínsecamente relacionado con las características geométricas y de resistencia y por eso es evidente que para taludes con altura mayor a 30,0 m e inclinación  $> 37^\circ$  los  $Da$  (cm) entre 50, 0 cm a 170,0 cm, determinando  $k$  como 10%  $Am$  con FS de 1,0 y 1,05 sin embargo, por los valores estimados de  $Da$  (cm) estos taludes podrían llegar a generar falla.

Tabla 3. Coeficiente de aceleración horizontal taludes con  $V_s$  180 m/s e inclinación de  $27^\circ$  para Manizales en Depósito 2 (C 8 kPa  $\phi$  21°)

H	Ky	Sa (1,3 Ts)	Da (cm)	k	Am / % k	FS
10	0,259	0,790	2,52	0,440	1,00	0,77
			3,00	0,406	0,92	0,80
			4,00	0,354	0,80	0,86
			5,80	0,294	0,67	0,95
			7,40	0,260	0,59	1,00
			9,30	0,230	0,52	1,05
			15,00	0,176	0,40	1,16
20	0,193	0,410	0,85	0,440	1,00	0,67
			1,10	0,395	0,90	0,72
			1,40	0,356	0,81	0,76
			2,10	0,297	0,67	0,84
			3,00	0,252	0,57	0,90
			5,11	0,194	0,44	1,00
			7,00	0,169	0,38	1,05
30	0,165	0,280	0,51	0,438	1,00	0,62
			0,66	0,395	0,90	0,66
			1,00	0,333	0,76	0,73
			1,50	0,280	0,64	0,81
			2,00	0,247	0,56	0,85
			5,00	0,161	0,37	1,00
			5,50	0,139	0,32	1,05
40	0,150	0,210	0,34	0,442	1,00	0,61
			0,60	0,355	0,81	0,68
			1,00	0,288	0,66	0,77
			1,40	0,250	0,57	0,81
			1,90	0,219	0,50	0,88
			4,82	0,143	0,33	1,00
			6,50	0,124	0,28	1,05
50	0,133	0,170	0,26	0,440	1,00	0,59
			0,40	0,348	0,79	0,68
			0,60	0,296	0,67	0,73
			1,00	0,241	0,55	0,80
			1,50	0,203	0,46	0,87
			3,83	0,133	0,30	1,00
			5,50	0,111	0,25	1,05
60	0,126	0,140	0,19	0,438	1,00	0,58

	0,126	0,140	0,30	0,370	0,84	0,63
	0,126	0,140	0,50	0,305	0,69	0,71
	0,126	0,140	0,80	0,254	0,58	0,78
	0,126	0,140	1,00	0,232	0,53	0,81
	0,126	0,140	2,99	0,133	0,30	1,00
	0,126	0,140	5,00	0,104	0,24	1,05
	0,122	0,120	0,14	0,437	0,99	0,57
	0,122	0,120	0,35	0,312	0,71	0,70
	0,122	0,120	0,50	0,273	0,62	0,74
70	0,122	0,120	0,75	0,233	0,53	0,80
	0,122	0,120	1,00	0,207	0,47	0,85
	0,122	0,120	1,50	0,175	0,40	0,90
	0,122	0,120	3,35	0,123	0,28	1,00

Con el fin de comparar los coeficientes de aceleración obtenidos bajo el procedimiento que involucra los desplazamientos sísmicos admisibles vs lo establecido en la AIS, 2010 se realiza el análisis de estabilidad pseudoestático con  $A_m=k$ , con el cual se obtiene un  $FS = 0,67$  y si, se aplica el  $KST/A_{m\acute{a}x}$  de  $0,8 A_m$  se obtiene un  $k=0,352$  y se obtienen un  $FS$   $0,76$ . Al involucrar los desplazamientos sísmicos admisibles en el cálculo del  $k$ , se tiene en cuenta el comportamiento del talud posterior a la ocurrencia del sismo y aún se garantizan los factores de seguridad.

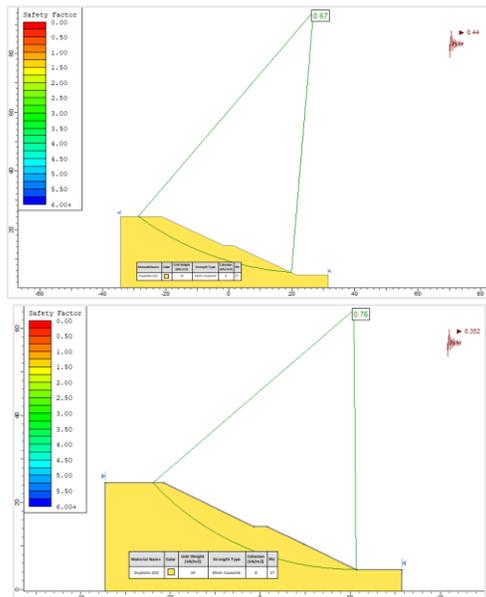


Figura. 4 Análisis de estabilidad pseudo estático bajo la AIS, 2010 en la ciudad de Manizales

En la Figura 5 se grafican los desplazamientos admisibles vs coeficiente de aceleración horizontal teniendo en cuenta los diferentes factores de seguridad, hacia la izquierda  $FS < 1,0$  y derecha  $FS > 1,0$  de la línea punteada, esta no es lineal dado que el  $k$  no varía de forma lineal con el  $FS$  si no que, por el contrario, esta intrínsecamente relacionado con las características geométricas y de resistencia y por eso es evidente que para taludes con altura mayor a  $30,0$  m e inclinación  $> 37^\circ$  los  $Da$  (cm)

entre  $50,0$  cm a  $170,0$  cm, determinando  $k$  como  $10\%$   $A_m$  con  $FS$  de  $1,0$  y  $1,05$  sin embargo, por los valores estimados de  $Da$  (cm) estos taludes podrían llegar a generar falla. En la Figura 57 se observa la validación en los análisis pseudoestáticos para taludes con altura de  $10,0$  m y  $20,0$  m y  $FS = 1,05$ .

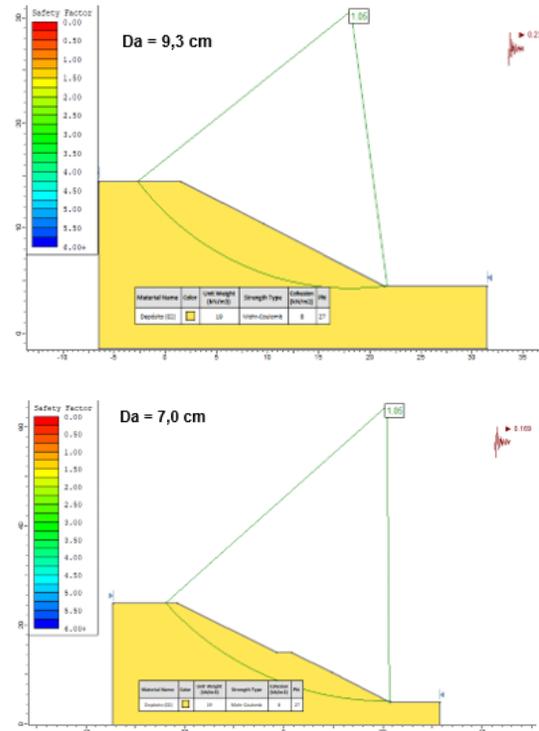


Figura. 5 Validación de  $k$ , para taludes del depósito 2 dependiendo de  $Da$  (cm) y con  $FS = 1,05$

Por otra parte, se presentan los resultados obtenidos de desplazamientos sísmicos admisibles, agrupados para cada tipo de depósito, con los cuales se determinan los coeficientes de aceleración horizontal que alcanzan los factores de seguridad  $FS = 1,00$ . Como ejemplo puntual se puede ver que, para taludes de inclinación de  $27^\circ$  con  $Da$  (cm) entre  $0,92$  entre  $2,52$  se logra reducir un  $A_m$   $0,22$  a  $0,44$  es decir disminuyo  $k$  en un  $50\%$ . Para taludes con  $37^\circ$  de inclinación y altura entre  $10,0$  m y  $70,0$  m se estiman  $Da$  entre  $4,0$  cm y  $2,0$  cm por lo que se determinan  $k$  entre  $0,35$  y  $0,15$  por lo que es posible reducir el  $A_m$  entre  $80\%$  y  $35\%$ .

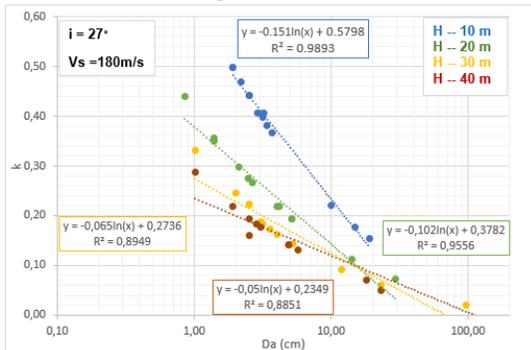
Para depósitos con parámetros de resistencia  $01, 02$  y  $03$  que tienen valores de ángulo de fricción y cohesión similares los desplazamientos sísmicos admisibles para taludes con inclinación de  $27^\circ$  son inferiores a  $4,0$  cm y se obtienen  $k$  entre  $0,12$  a  $0,37$  lo que significa que se reduce  $A_m$  entre  $28\%$  y  $83\%$ ; pero, cuando se tiene una inclinación de  $37^\circ$   $Da$  aumenta entre  $8,52$  cm a  $24,68$  cm con lo cual se reduce el  $k$  entre  $55\%$  a  $10\%$ , y si el depósito tiene

cohesión de 8 kPa se alcanza  $D_a$  hasta 167,55 cm y se determina un coeficiente de aceleración entre 0,24 y 0,04; finalmente si aumenta a  $45^\circ$  la inclinación los  $D_a$  (cm) máximos son de 90,05 y un  $k$  de 0,02.

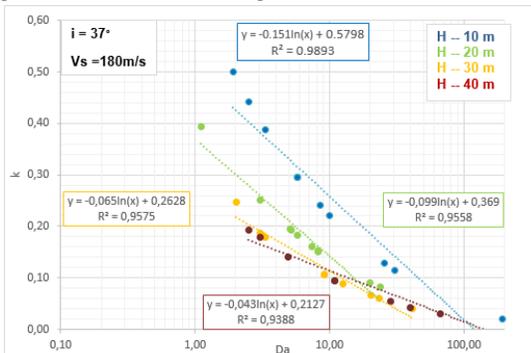
Con el fin de ver el contraste que se presenta para un talud de mayor resistencia se toma a modo de ejemplo el depósito 7 con parámetros de  $C$  42 kPa  $\phi$  25,5° y se evidencia que no se generan desplazamientos sísmicos admisibles mayores a 1,0 cm para inclinación de  $27^\circ$ , 4,0 cm para  $37^\circ$  y 10,0 cm para  $45^\circ$  sin embargo, es posible reducir entre el 17 % y 84% el  $A_m$  y obtener valores de coeficiente de aceleración horizontal  $k$ , entre 0,08 a 0,34.

Finalmente, se compilan los resultados en la Figura. 5 y Figura 7 de los valores de desplazamientos sísmicos admisibles para todos los materiales de los depósitos, con los cuales se determinan los coeficientes de aceleración horizontal,  $k$  con los que se alcanzan  $FS$  1,00; se discretiza por altura, en los cuales se puede ver la relación logarítmica entre  $D_a$  (cm) y  $k$ , sin embargo, es importante resaltar que aunque se alcancen los  $FS$ , en algunos taludes los desplazamientos sísmicos son grandes y en ese punto rigen dos criterios (1) que bajo  $D_a$  altos los materiales comienzan agrietarse y pueden generar falla y (2) las consecuencias que producen en el desempeño los valores escogidos de  $D_a$ .

**Figura. 6** Relación  $D_a$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Manizales en Tr 475 años para taludes con inclinación  $27^\circ$



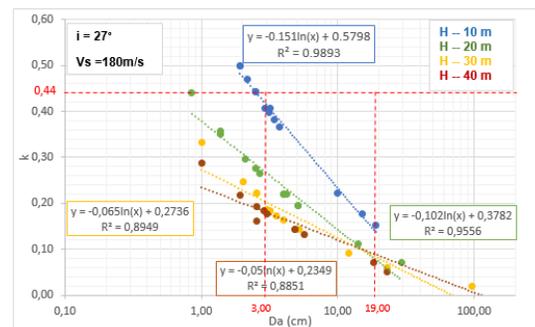
**Figura. 7** Relación  $D_a$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Manizales en Tr 475 años para taludes con inclinación  $37^\circ$



Para implementar el uso de las figuras anteriores se debe identificar la altura e inclinación del talud y limitarse el valor de  $A_m = 0,44$  como máximo  $k$ , con lo cual se puede estimar el rango de desplazamientos admisibles y determinar el rango de coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  con los cuales en un análisis de estabilidad de taludes pseudoestático se alcanzan factores de seguridad  $FS > 1,0$ . Por ejemplo, para un talud con inclinación de  $27^\circ$  y altura de 10,0 m se tiene un rango de  $D_a$  entre 3,0 a 19,0 cm con lo cual se asocia un rango de  $k$  entre 0,4 a 0,15, es decir que se reduce al 90% y 35% de  $A_m$ ; se despeja la ecuación de tendencia logarítmica asociada y se obtienen los valores, se debe iterar entre ese rango de  $D_a$  (cm), dado que depende intrínsecamente de los parámetros de resistencia de cada talud.

Por otra parte, para taludes con altura de 40,0 m e inclinación de  $27^\circ$  se puede ver que el rango de  $D_a$  (cm) está entre 1,0 a 100,0 cm con los cuales se determinan valores de  $k$  entre 0,29 a 0,0 y se logran factores de seguridad de 1,0 sin embargo, se debe tener en cuenta que, a valores grandes de  $D_a$  (cm) los materiales comienzan a agrietarse, generar fisuras e iniciar un proceso de estado de falla del talud.

**Figura. 8** Ejemplo uso relación entre  $D_a$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Manizales en Tr 475 años



Finalmente, se indica que si se presentan valores de aceleración crítica de  $k_y=0$  no se generan desplazamientos admisibles asociados a  $k$ , bajo este procedimiento por lo que se debe evaluar de otra manera, por ejemplo, Bloque deslizante de Newmark y son aquellos taludes con inclinación mayor a  $45^\circ$ , además se pudo evidenciar que, conforme se incrementa la altura del talud, el coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  se reduce en comparación del valor de  $A_m$  garantizando en el análisis de estabilidad pseudoestático un  $FS$  de 1,00.

## 7. LIMITACIONES

Es importante conocer para el sitio de análisis, cual es la fuente sismogénica que mayor amenaza sísmica aporta a la curva de probabilidad de excedencia total identificada para cada periodo de retorno. Para aquellas zonas que no cuentan con estudios de microzonificación sísmica se puede conocer esta información en el estudio de Amenaza sísmica para Colombia 2009; dado que al mismo sitio de interés el radio de cobertura del análisis le pueden afectar diferentes fuentes sismogénicas, pero es aquella, la que más aporte a la amenaza sísmica la que domina el análisis de desplazamientos sísmicos generados por sismos asociados a diferentes fuentes sismogénicas.

El rango estimado de desplazamiento sísmico esperado para un talud **no son estimaciones precisas** dado que para ser exactos se requieren conocimientos adicionales realizando análisis avanzados, sin embargo, al tener una idea del rango esperado el procedimiento propuesto es útil y también puede proporcionar estimaciones razonables para casos en los que no se justifiquen análisis avanzados.

Se resalta que los valores obtenidos como desplazamientos sísmicos admisibles deben tomarse como índices del comportamiento del talud posterior a la ocurrencia de un sismo generada por diferentes fuentes sismogénicas. Por lo tanto, para la implementación de los procedimientos tanto para la estimación de desplazamientos como como el coeficiente de aceleración horizontal, se debe contar con el criterio de análisis, las premisas expuestas a lo largo del documento y las limitaciones que están intrínsecamente en cada formulación.

Sin embargo, se precisa que no se debe generalizar los resultados obtenidos ni para las mismas características geométricas, resistencia al corte o entorno sismológico ya que, cada talud es independiente y los valores de desplazamiento y de coeficiente de aceleración horizontal están intrínsecamente ligados a las condiciones puntuales y locales del talud de estudio.

Con el fin de validar los procedimientos empleados en esta tesis analítica, pero en el contexto del entorno sismológico y geológico de Colombia de deben implementar planes de monitoreo e instrumentación en taludes tanto naturales como de corte con el fin de conocer cuales sería los desplazamientos sísmicos admisibles generados por cada fuente sismogénica.

## 8. CONCLUSIONES

Con los análisis y resultados obtenidos se presentan a continuación las siguientes conclusiones:

- Aceleración crítica ( $k_y$ ) para modelos teóricos de taludes de corte en suelo

Se identificó que los materiales involucrados presentan aceleración crítica entre  $k_y = 0$  y  $k_y = 0,85$  identificando que  $k_y$  depende, además de la configuración geometría del talud (altura e inclinación de corte), de los parámetros de resistencia al corte no drenadas. Sin embargo, para ser completamente estrictos en el análisis pseudoestático se debería contar con parámetros dinámicos de resistencia no drenados del perfil de suelo del talud.

- Características del espectro sísmico para el diseño de taludes de corte

Dado que bajo los lineamientos de las diferentes normativas que aplican en el análisis pseudoestático en Colombia no se presenta una discretización que tenga en cuenta la variación en el espectro sísmico de cada ciudad dado que no se incluye por ejemplo, el tipo de fuente sismogénica y la magnitud asociada al sismo que podría generar, por lo que ciudades localizadas geográficamente distantes se identifican con el mismo valor de PGA pero, son afectados por diferentes fuentes sismogénicas y magnitud.

Obteniendo así para las ciudades de análisis las características sísmicas relacionadas con las fuentes sismogénicas que mayor amenaza sísmica aporta y la magnitud de momento, contenido frecuencial, aceleración espectral relacionada.

- Desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray et al, 2019

Según los resultados, los depósitos con bajos parámetros de resistencia permiten que se genere un amplio rango de desplazamientos, contrario al talud con parámetros más altos en los cuales se generan máximo desplazamientos 15,0 cm. Los desplazamientos que se generan son distantes variando desde 0,5 cm hasta máximo 100 cm con valores atípicos hasta 450 cm.

Con la diferenciación de análisis de desplazamientos teniendo en cuenta la fuente sismogénica de origen cortical o de subducción, los valores que se obtienen son menores para la primera, máximo 100 cm y para la segunda máximo de 350 cm, la principal variable que determinan estos valores es la magnitud del sismo que se podría llegar a generar y aceleración espectral ( $S_a$ , contenido frecuencial). Es

importate indicar que, aunque numéricamente se estimen desplazamientos grandes, se debe tener en cuenta la afectación que generaría en los materiales, tal como fisuras, grietas y posibles fallas por desprendimientos o movimiento alterar la estabilidad global de talud.

Por otra parte, con la aplicación del análisis de Bloque para todos los 13 depósitos arroja valores de desplazamiento sísmico grandes hasta 300 cm para taludes con alturas mayores a 20,0 m e inclinación de 37°; y para taludes con inclinaciones < 37° y alturas menores que 20,0 m no genera desplazamientos o si es el caso son inferiores a 10,0 cm.

El rango estimado de desplazamiento sísmico esperado para un talud no son estimaciones precisas dado que para ser exactos se requieren conocimientos adicionales realizando análisis avanzados, sin embargo, al tener una idea del rango esperado el procedimiento propuesto es útil y también puede proporcionar estimaciones razonables para casos en los que no se justifiquen análisis avanzados.

Se resalta que los valores obtenidos como desplazamientos sísmicos admisibles deben tomarse como índices del comportamiento del talud posterior a la ocurrencia de un sismo generada por diferentes fuentes sismogénicas.

- Generar la herramienta para la determinación del coeficiente k para análisis pseudoestático en estabilidad de taludes de corte

Se calculan los coeficientes de aceleración horizontal, k con los que se alcanzan  $\geq$  FS 1,0 teniendo en cuenta los desplazamientos sísmicos admisibles, características geométricas, entorno sismogénicos y espectro sísmico, sin embargo para algunos taludes los desplazamientos sísmicos son grandes y en ese punto rigen dos criterios (1) que bajo Da (cm) altos los materiales comienzan agrietarse y pueden generar falla y (2) las consecuencias que producen en el desempeño los valores escogidos de Da (cm).

Con la implementación de este procedimiento se logra generar un soporte técnico para la escogencia de un coeficiente de aceleración horizontal k, con el cual se reduce el Am para emplear en un análisis de estabilidad pseudoestático según lo establecido en la AIS, 2010, por lo que, al involucrar los desplazamientos admisibles en el cálculo del k, este se reduce de manera óptima tal que aún se garantizan los factores de seguridad mínimos y envuelve el entorno sismológico en él está inmerso el talud de análisis, además de proporcionar un soporte técnico si se quiere reducir el Am.

Finalmente, se compilan los resultados en la figura siguiente de los valores de desplazamientos sísmicos admisibles para todos los materiales de los depósitos, con los cuales se determinan los coeficientes de aceleración horizontal, k con los que se alcanzan FS 1,00; se discretiza por altura, en los cuales se puede ver la relación logarítmica entre Da (cm) y k con las cuales se alcanzan los FS pero, es importante tener en cuenta que bajo Da altos los materiales comienzan agrietarse y pueden generar falla y (2) las consecuencias que producen en el desempeño los valores escogidos de Da.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) Código colombiano de diseño sísmico de puente (2014) Bogotá D.C.

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) Norma colombiano de diseño sismo resistente (2010) Bogotá D.C.

Ambraseys, N,N,, Menu, J,M,, 1988, Earthquake-induced ground displacements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 16, 985–1006.

Arcila, M, García, J,, Montejó, J,, Eraso, J,, Valcarcel, J,, Mora, M,, Viganò, D, Pagani, M, y Díaz, F, (2020), Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model.

Bray, J,D,, Travasarou, T, 2007, Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133, 381–392.

Bray, J,D,, Travasarou, T, 2009, Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135, 1336–1340.

Bray, J, D, and J, Macedo, 2019, “Simplified seismic slope stability excel spreadsheets,” Accessed July 18, 2019.

Bray, J, D, J, Macedo, and T, Travasarou, 2018, “Simplified procedure for estimating seismic slope displacements for subduction zone earthquakes,” *J, Geotech, Geoenv, Eng*, 144 (3): 04017124.

- Jibson, R,W,, 1993, Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis, *Transportation Research Record* 1411, 9–17.
- Jibson, R, W, and D, K, Keefer, Analysis of the Seismic Origin of Landslides: Examples from the New Madrid Seismic Zone, *Geological Society of America Bulletin*, Vol, 105, No, 4, 1993, pp, 521-536.
- Jibson, R,W, Jibson, M,W,, 2003, Java programs for using Newmark's method and simplified decoupled analysis to model slope performance during earthquakes, U,S, Geological Survey Open-File Report 03-005, version 1,1.
- Jibson, R,W, 2007, Regression models for estimating seismic landslide displacement, *Engineering Geology* 91, 209–218.
- Jibson, R.W., 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. US Geological Survey, Box 25046, MS 966, Denver Federal Center, Denver, CO 80225, USA Report 112 (2011) 43-50.
- Keefer, D, K,, and R, C, Wilson, Predicting Earthquake-Induced Landslides, With Emphasis on Arid and Semi-Arid Environments, In *Landslides in a Semi-Arid Environment*, Inland Geological Society, Riverside, Calif,, Vol, 2, 1989, pp, 118-149.
- Kramer, S, L, 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 653 pp.
- Kramer S, L, and M, W, Smith, “Modified Newmark Model for Seismic Displacements of Compliant Slopes,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol, 123, No, 7, 1997, pp, 635-644.
- Newmark, N, M, Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Geotechnique*, Vol, 15, No, 2, 1965, pp, 139-159.
- Oteo Mazo C. y Rodríguez Ortiz J. M, *Curso aplicado de Cimentaciones 4ta Edición*, 1989
- Rathje, E,M,, Bray, J,D,, 1999, An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures, *Canadian Geotechnical Journal* 36, 72–87.
- Seismosoft, *Earthquake Engineering software solutions*, 2020.
- Shahgholi, M, A, Fakher, C,J, Jones, 2001, Horizontal slice method of analysis, *Géotechnique*, 51, 881-885.
- Slide (2D). (2018). Rocscience. Rocscience
- Stewart, J, P, Blake, T, F,, and Hollingsworth, R, A, \_2003\_, “A screen analysis procedure for seismic slope stability,” *Earthquake Spectra*, 19\_3\_, 697–712.
- Sarma, S,K, D, Tan, 2006, Determination of critical slip surface in slope analysis, *Géotechnique*, 56, 539-550.
- Wieczorek, G, F, R, C, Wilson, and E, L, Harp, *Map Showing Slope Stability During Earthquakes in San Mateo County, California, Miscellaneous Investigations Map 1-1257-E*, U,S, Geological Survey, 1985.
- Wilson, R, C,, and D, K, Keefer, Dynamic Analysis of a Slope Failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, *Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol, 73, No, 3, 1983, pp, 863-877.