

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**

**ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS ADMISIBLES PARA DETERMINAR EL  
COEFICIENTE K, EN ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES DE  
CORTE**

**JENNY LORENA NIÑO SANA**

**BOGOTÁ, D.C., 30 DE MAYO DE 2021**



**Estimación de Desplazamientos Admisibles para Determinar el Coeficiente K, en Análisis Pseudoestático en Estabilidad de Taludes de Corte**

**Tesis para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Civil con Énfasis en Geotecnia**

**PhD. Ing. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda**

**Director**

**PhD. Ing. Edgard Robert Barbosa Cruz**

**Jurado**

**Msc. Ing. Manuel García López**

**Jurado**

**Bogotá, D.C., 30 de mayo de 2021**

La tesis de maestría titulada “Estimación de desplazamientos admisibles para determinar el coeficiente k, en análisis pseudoestático en estabilidad de taludes de corte”, presentada por Jenny Lorena Niño Sana, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Jurado

Edgard Robert Barbosa Cruz

Jurado

Manuel García López

Director de la tesis

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Bogotá, D.C., 30 de mayo de 2021

## **Dedicatoria**

Gracias a mi madre, por hacerme una persona tan fuerte, perseverante y terca, todo por luchar y alcanzar mis metas.

Y agradezco inmensamente a quienes, con su colaboración, apoyo, ayuda, paciencia, palabras de ánimo y admiración hacia a mí, porque son parte del soporte de mi fuerza para cumplir esta meta, gracias infinitas.

## **Agradecimientos**

Al Ingeniero Carlos Rodríguez porque desde el principio percibí que podría contar con su voto de confianza para desarrollar mi trabajo de tesis de maestría y con esto poder aportar algo para mejorar el estado de la práctica de la ingeniería geotécnica en Colombia.

## Resumen

En esta tesis analítica se aplican procedimientos simplificados que estiman valores de desplazamientos sísmicos admisibles, involucrando la variación de características geométricas (altura entre 10,0 m y 70,0 m e inclinación de 27° hasta 90°) aceleración crítica  $k_y$  y parámetros de resistencia para diferentes modelos teóricos de taludes de corte así como la influencia del entorno sismogénico (fuentes sismogénicas corticales y de subducción) y espectro sísmico (distinción del tipo de sismo, magnitud, espectro, amplitud, periodo de retorno) 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 y se aplica como ejemplo concreto a algunas ciudades capitales de Colombia que cuentan con estudios de Microzonificación sísmica tales como, Manizales, Cali, Medellín y Bogotá.

Con estos procedimientos simplificados para la determinación de  $k$ , se obtiene el soporte técnico con el cual es posible reducir en un porcentaje ya sea el PGA o Amáx, para obtener el coeficiente de aceleración horizontal a usar en un análisis de estabilidad pseudoestático en taludes asociando un desplazamiento sísmico admisible.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	OBJETIVO GENERAL.....	19
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.2	ALCANCE.....	19
2.	MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1	MARCO TEÓRICO.....	20
2.1.1	ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICOS SIMPLIFICADOS.....	20
2.1.2	ANÁLISIS DE NEWMARK CON BLOQUE DESLIZANTE.....	21
2.1.3	ANÁLISIS SIMPLIFICADOS CON ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTO.....	24
2.2	MARCO LEGAL.....	28
2.2.1	LEY 400 DE 1997 REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE AIS, 2010, 2010.....	28
2.2.2	NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO DE PUENTES 2014.....	29
2.3	MARCO SISMO TECTÓNICO.....	30
2.3.1	FUENTES DE AMBIENTE TECTÓNICO CORTICAL.....	32
2.3.2	FUENTES EN ZONA DE BENIOFF.....	34
2.3.3	FUENTES DE INTRAPLACA DEL NIDO SÍSMICO.....	35
2.3.4	FUENTES DE SUBDUCCIÓN Y PROFUNDAS.....	36
3.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	38
3.1	ETAPA 1: DETERMINAR LA ACELERACIÓN CRÍTICA ( $k_y$ ).....	38
3.2	ETAPA 2: ESTABLECER LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESPECTRO SÍSMICO.....	40
3.3	ETAPA 3: ESTIMAR DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS ADMISIBLES.....	41
3.4	ETAPA 4: ESTIMAR EL COEFICIENTE DE ACELERACIÓN, $K$ .....	42
3.5	ETAPA 5: ANÁLISIS POR BLOQUE DESLIZANTE.....	44
3.6	SOFTWARE EMPLEADOS.....	44
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
4.1	DETERMINACIÓN DE ACELERACIÓN CRÍTICA ( $k_y$ ).....	46
4.2	DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESPECTRO SÍSMICO.....	56
4.2.1	Análisis de afectación por no diferenciación de fuente sismogénica.....	57

4.2.2	Cálculo de aceleración espectral a $S_a$ .....	60
4.3	ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS .....	66
4.3.1	Desplazamientos sísmicos admisibles generados en zonas de fuentes corticales para Tr 475 años .....	70
4.3.2	Desplazamientos sísmicos admisibles generados en zonas de fuentes de subducción para Tr 475 años .....	78
4.4	COMPARACIÓN CON EL ANÁLISIS DE BLOQUE DESLIZANTE DE NEWMARK ....	87
5.	GENERACIÓN DE HERRAMIENTA DE ANÁLISIS .....	94
5.1	ESTIMACIÓN COEFICIENTE DE ACELERACIÓN HORIZONTAL, $k$ .....	94
5.1.1	Coeficiente de aceleración horizontal, $k$ en zonas de fuentes corticales para Tr 475 años	97
5.1.2	Coeficiente de aceleración horizontal, $k$ para taludes ubicados en zonas de subducción para Tr 475 años .....	108
6.	CONCLUSIONES .....	115
7.	LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES .....	119
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Valores de KST/ amax Mínimos para Análisis Pseudoestático de Taludes.....</i>	29
<b>Tabla 2</b> <i>Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas de origen cortical.....</i>	33
<b>Tabla 3</b> <i>Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas pertenecientes al modelo .....</i>	37
<b>Tabla 4.</b> <i>Parámetros geotécnicos de referencia para la definición del modelo geológico-.....</i>	39
<b>Tabla 5</b> <i>Clasificación de Perfiles según Tabla A.2.4-1 .....</i>	42
<b>Tabla 6.</b> <i>Valores obtenidos de Aceleración crítica ky, según diferentes parámetros geotécnicos .....</i>	50
<b>Tabla 7.</b> <i>Parámetros geotécnicos de referencia para la determinación aceleración crítica, ky.</i>	53
<b>Tabla 8.</b> <i>Parámetros geotécnicos de referencia para la determinación aceleración crítica, ky. .</i>	54
<b>Tabla 9.</b> <i>Parámetros geotécnicos de referencia para la determinación aceleración crítica, ky. .</i>	55
<b>Tabla 10.</b> <i>Integración del PGA, Ss (0,2s) y S1(1,0s) con las fuentes corticales para Tr de 475 años.....</i>	57
<b>Tabla 11.</b> <i>Integración del PGA, Ss (0,2s) y S1 (S1 1,0s) con las fuentes corticales Tr de 975 años.....</i>	58
<b>Tabla 12.</b> <i>Integración PGA, Ss (0,2s) y S1 (1,0s) con las fuentes corticales para Tr 475 años</i>	59
<b>Tabla 13.</b> <i>Integración del PGA, Ss (0,2s) y S1 (1,0s) con las fuentes corticales para Tr 475 años.....</i>	59
<b>Tabla 14.</b> <i>Integración PGA, Ss (0.2s) y S1 (1.0s) con las fuentes corticales para Tr de 475 años .....</i>	59
<b>Tabla 15.</b> <i>Integración del PGA, Ss (0.2s) y S1 (1.0s) con las fuentes de intra-placa/subducción .....</i>	60
<b>Tabla 16</b> <i>Período de vibración Ts Vs &lt; 450 m/s.....</i>	61
<b>Tabla 17</b> <i>Período de vibración Ts para Perfil de Suelo D.....</i>	61
<b>Tabla 18</b> <i>Período de vibración Ts para Perfil de Suelo C.....</i>	61
<b>Tabla 19</b> <i>Cálculo de Aceleración espectral, Sa (1,3 Ts) .....</i>	63
<b>Tabla 20.</b> <i>Magnitud de momento máximo para las fuentes corticales para Tr de 475 años.....</i>	64
<b>Tabla 21</b> <i>Cálculo de Aceleración espectral, Sa (1,5 Ts) .....</i>	65
<b>Tabla 22.</b> <i>Magnitud de momento máximo para las fuentes de subducción Interfase _02 para..</i>	66
<b>Tabla 23.</b> <i>Características sísmicas para Manizales en un período de retorno 475 años .....</i>	70
<b>Tabla 24.</b> <i>Características de los depósitos 7 y 11.....</i>	72
<b>Tabla 25.</b> <i>Desplazamientos sísmicos originados en zonas de fallas corticales para Manizales con.....</i>	72
<b>Tabla 26.</b> <i>Comparación de desplazamientos para Manizales con Tr 475 años y sismo de Mw 6,5.....</i>	76
<b>Tabla 27.</b> <i>Comparación de desplazamientos para Manizales con Tr 475 años y sismo de Mw 6,5.....</i>	76

<b>Tabla 28.</b> <i>Comparación de desplazamientos para Manizales con Tr 475 años y sismo de Mw 6,5</i> .....	77
<b>Tabla 29.</b> <i>Características sísmicas para la ciudad de Cali</i> .....	79
<b>Tabla 30.</b> <i>Características de los depósitos 7 y 11</i> ,.....	81
<b>Tabla 31,</b> <i>Desplazamientos sísmicos originados en zonas de subducción para Cali con período</i> .....	81
<b>Tabla 32.</b> <i>Comparación de los desplazamientos para Cali con Tr 475 años y sismo de Mw 7,5</i> .....	85
<b>Tabla 33.</b> <i>Comparación de los desplazamientos para Cali con Tr 475 años y sismo de Mw 7,5</i> .....	86
<b>Tabla 34.</b> <i>Características de los registros sísmicos para las fuentes corticales cercanas</i> .....	88
<b>Tabla 35.</b> <i>Compilado de los resultados de los análisis de bloque deslizante para la ciudad de</i>	91
<b>Tabla 36.</b> <i>Compilado de los resultados de los análisis de bloque deslizante para la ciudad de</i>	92
<b>Tabla 37.</b> <i>Características sísmicas del área de la fuente cortical de la ciudad de Manizales</i> .....	97
<b>Tabla 38.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal taludes con Vs 180 m/s e inclinación de 27 °</i> ..	98
<b>Tabla 39.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales</i> .....	100
<b>Tabla 40.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales</i> .....	101
<b>Tabla 41.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales</i> .....	101
<b>Tabla 42.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales</i> .....	102
<b>Tabla 43.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal para Manizales en Depósito 7 (C 42 kPa <math>\phi</math> 25,5°)</i> .....	102
<b>Tabla 44.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal para taludes Vs 180 m/s e inclinación de 27 °</i> .....	103
<b>Tabla 45.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal para Manizales en Depósito 7 (C 42 kPa <math>\phi</math> 25,5°)</i> .....	104
<b>Tabla 46.</b> <i>Características sísmicas para la ciudad de Cali</i> .....	108
<b>Tabla 47.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal para taludes con Vs 180 m/s e inclinación 27 °</i> .....	109
<b>Tabla 48.</b> <i>Coeficiente de aceleración horizontal para taludes Vs 180 m/s e inclinación de 27°</i>	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura. 1</b>	<i>Masa deslizante dividida en dovelas verticales y fuerzas interdovelas.</i>	20
<b>Figura. 2</b>	<i>Configuración neotectónica de la región Caribe y el norte de los Andes.</i>	32
<b>Figura. 3</b>	<i>Modelo de fuentes corticales (tipo área) propuesto por el SGC-IGME</i>	33
<b>Figura. 4</b>	<i>Secciones transversales perpendiculares a la trinchera del Pacífico</i>	35
<b>Figura. 5</b>	<i>Parámetros de sismicidad de fuentes de Izq. Zona de Benioff Der. Nido de</i>	36
<b>Figura. 6</b>	<i>Esquema de proceso de subducción.</i>	36
<b>Figura. 7</b>	<i>Parámetros de sismicidad de fuentes de interplaca del proceso de subducción del.</i>	37
<b>Figura. 8.</b>	<i>Secciones topográficas de análisis. Altura de 10 m con inclinación de 27° y 45°.</i>	38
<b>Figura. 9.</b>	<i>Secciones topográficas de análisis. Altura de 20 m con inclinación de 27° y 45°.</i>	39
<b>Figura. 10.</b>	<i>Mapas de zonificación del PGA para períodos de retorno de 475 y 975 años.</i>	40
<b>Figura. 11.</b>	<i>Mapas de zonificación del Ss (SA 0.2s) para períodos de retorno de 475 y 975.</i>	41
<b>Figura. 12.</b>	<i>Mapas de zonificación del S1 (SI 1.0s) para períodos de retorno de 475 y 975.</i>	41
<b>Figura. 13.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (0)</i>	46
<b>Figura. 14.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (01)</i>	46
<b>Figura. 15.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (02)</i>	47
<b>Figura. 16.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (03)</i>	47
<b>Figura. 17.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (04)</i>	47
<b>Figura. 18.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (05)</i>	48
<b>Figura. 19.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (06)</i>	48
<b>Figura. 20.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (07)</i>	48
<b>Figura. 21.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (08)</i>	49
<b>Figura. 22.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (09)</i>	49
<b>Figura. 23.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (10)</i>	49
<b>Figura. 24.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (11)</i>	50
<b>Figura. 25.</b>	<i>Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (12)</i>	50
<b>Figura. 26</b>	<i>Variación del coeficiente de aceleración crítica, ky vs altura e inclinación del talud,</i>	53
<b>Figura. 27</b>	<i>Variación del coeficiente de aceleración crítica, ky vs Altura e inclinación del talud,</i>	54
<b>Figura. 28</b>	<i>Variación del coeficiente de aceleración crítica, ky vs Altura e inclinación del talud,</i>	55
<b>Figura. 29</b>	<i>Variación del coeficiente de aceleración crítica, ky vs altura y tipo de depósito según</i>	56
<b>Figura. 30.</b>	<i>Integración mapa de zonificación del PGA, Ss (0,2s) y S1(1,0s) con fuentes</i>	57
<b>Figura. 31.</b>	<i>Integración mapa de zonificación del PGA, Ss (0,2s), S1(1,0s) con las fuentes.</i>	58
<b>Figura. 32</b>	<i>Espectro de aceleraciones de diseño para 5% de amortiguamiento.</i>	62
<b>Figura. 33</b>	<i>Sa para las zonas definidas de la Integración del PGA, Ss (0.2s) y S1 (SI).</i>	64
<b>Figura. 34</b>	<i>Cálculo de Aceleración espectral, Sa para las zonas definidas de la Integración del</i>	65
<b>Figura. 35</b>	<i>Localización de ciudad de Bogotá y Cali respectivamente junto con sus fuentes.</i>	67
<b>Figura. 36</b>	<i>Diagrama de flujo implementación de procedimiento de para la estimación de</i>	69

<b>Figura. 37</b> Izq, Tasa de excedencia por fuente y total para el caso de la A máx, Der Participación.....	70
<b>Figura. 38</b> Variación $T_s$ vs Probabilidad de excedencia para desplazamientos sísmicos, $P$ ( $D=0$ ) .....	71
<b>Figura. 39</b> Variación desplazamientos sísmicos en zonas de fallas corticales para la ciudad de .....	75
<b>Figura. 40</b> Variación desplazamientos sísmicos en zonas de fallas corticales para la ciudad de .....	75
<b>Figura. 41</b> Variación de rango de desplazamientos vs la velocidad de onda de corte $V_s$ .....	77
<b>Figura. 42</b> Comparación del aporte a la amenaza sísmica para distintas fuentes sismogénicas .....	79
<b>Figura. 43</b> Variación $T_s$ vs Probabilidad de ocurrencia de desplazamientos sísmicos, $P$ ( $D=0$ )	80
<b>Figura. 44</b> Variación desplazamientos sísmicos en zonas de subducción para la ciudad de Cali .....	83
<b>Figura. 45</b> Variación desplazamientos sísmicos en zonas de subducción para la ciudad de Cali .....	83
<b>Figura. 46</b> Variación de rango de desplazamientos vs la velocidad de onda de corte $V_s$ .....	85
<b>Figura. 47</b> Variación de rango de desplazamientos vs la velocidad de onda de corte $V_s$ .....	86
<b>Figura. 48</b> Comparación del aporte a la amenaza sísmica para distintas fuentes sismogénicas .....	87
<b>Figura. 49</b> Acelerograma para fuente cortical Oroville .....	88
<b>Figura. 50</b> Acelerograma de representación de fuente cortical Mammoth.....	88
<b>Figura. 51.</b> Análisis de Bloque deslizante para el depósito 2, Altura de 20 m con inclinación de .....	89
<b>Figura. 52.</b> Análisis de Bloque deslizante para el depósito 2, Altura de 20 m con inclinación de .....	89
<b>Figura. 53.</b> Análisis de Bloque deslizante para el depósito 2 para diferentes altura e inclinaciones.....	90
<b>Figura. 54.</b> Análisis de Bloque deslizante para el depósito 7 para diferentes altura e inclinaciones.....	91
<b>Figura. 55</b> Localización de ciudad de Bogotá y Cali respectivamente junto con sus fuentes.....	95
<b>Figura. 56</b> Diagrama de flujo para la selección del coeficiente de aceleración horizontal para .	96
<b>Figura. 57</b> Determinación $k$ , para taludes del <b>depósito 2</b> y $V_s$ 180 m/s, teniendo en cuenta la	99
<b>Figura. 58</b> Validación de $k$ , para taludes del depósito 2 dependiendo de $D_a$ (cm) y con $FS = 1,05$ .....	99
<b>Figura. 59</b> Análisis de estabilidad pseudo estático bajo la AIS, 2010 en la ciudad de Manizales .....	100
<b>Figura. 60</b> Relación $D_a$ (cm) vs $k$ , dependiendo de la $V_s$ (m/s) para Manizales en Tr 475 años .....	103
<b>Figura. 61</b> Estimación del coeficiente de aceleración horizontal $k$ para taludes del <b>depósito 7</b> y .....	104
<b>Figura. 62</b> Relación $D_a$ (cm) vs $k$ , dependiendo $V_s$ (m/s) del talud para Manizales en Tr 475 años.....	105

<b>Figura. 63</b> <i>Relación <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, dependiendo altura del talud para Manizales en Tr 475 años</i>	106
<b>Figura. 64</b> <i>Relación <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, dependiendo altura del talud para Manizales en Tr 475 años</i>	106
<b>Figura. 65</b> <i>Ejemplo uso relación entre <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, dependiendo altura del talud para Manizales</i>	107
<b>Figura. 66</b> <i>Validación de <math>k</math> (Cali), para taludes del depósito 2 dependiendo de <math>D_a</math> (cm) y con <math>FS = 1,05</math></i>	110
<b>Figura. 67</b> <i>Análisis de estabilidad pseudo estático bajo la AIS, 2010 en la ciudad de Manizales</i>	111
<b>Figura. 68</b> <i>Relación <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, dependiendo altura del talud para Cali en Tr 475 años</i>	113
<b>Figura. 69</b> <i>Ejemplo uso relación entre <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, dependiendo altura del talud para</i>	114
<b>Figura. 70</b> <i>Relación <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, para Manizales en Tr 475 años; teniendo en cuenta sismos</i>	117
<b>Figura. 71</b> <i>Relación <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, para Manizales en Tr 475 años, teniendo en cuenta sismos</i>	118
<b>Figura. 72</b> <i>Relación <math>D_a</math> (cm) vs <math>k</math>, para Cali en Tr 475 años teniendo en cuenta sismos</i>	118

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

### Símbolos Griegos

$\tau_f$ : Resistencia al corte último

$\sigma'$ : Esfuerzo efectivo

$\phi'$ : Ángulo de fricción efectivo

$\gamma_t$ : Peso unitario total del suelo

$\gamma_d$ : Peso unitario seco del suelo

$\gamma$ : Peso unitario del suelo

$c'$ : Cohesión efectiva

$k_y$ : Aceleración crítica

$g$ : Aceleración gravitacional actual

ML: Magnitud Local

MW: Magnitud de Momento

PGA: Aceleración pico del terreno

PGV: Velocidad pico del terreno

PGD: Desplazamiento pico del terreno

### Abreviaturas

2D: Dos dimensiones o bidimensional

3D: Tres dimensiones o tridimensional

FE: Elementos finitos

FEM: Método de los elementos finitos

FES: Elementos finitos basado en esfuerzos

FS: Factor de Seguridad

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX, se desarrollaron 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, por lo que se obtiene un resultado más realista respecto al **comportamiento** del 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). 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.

Respecto a la normativa vigente que rige los temas relacionados con estabilidad de taludes en condición pseudoestática en Colombia, se basa en lo presentado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente AIS, 2010 en el Título A- Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente, capítulo A.2. (Zonas de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño) contiene el procedimiento para tener en cuenta el efecto del sismo en los análisis pseudoestáticos para Edificaciones. En el Título H reglamenta el uso de  $K_{ST}/a_{max}$ , el cual es un porcentaje entre 50 % y 80 % del  $A_{máx}$ , y se desconoce completamente el soporte técnico y no involucra las características del sismo de diseño, contenido frecuencial, amplitud, duración, distinción del tipo de fuente sismogénica (cortical o subducción) y magnitud, así como el periodo de retorno.

Mientras el CCP-14, en la Sección 11, indica que el coeficiente sísmico de aceleración horizontal ( $k$ ) para el cálculo de las presiones y las fuerzas sísmicas laterales del suelo debe determinarse con base en el PGA en la superficie del terreno (es decir,  $k_0 = F_{pga} \text{ PGA} = A_s$ , donde  $k_0$  es el coeficiente sísmico de aceleración horizontal suponiendo que no ocurre ningún desplazamiento del muro y  $F_{pga}$  es el coeficiente por amplificación por perfil de suelo). Y si el usuario desea reducir el  $k_0$ , debe prever que un desplazamiento del muro dentro de un talud natural de 25 mm no afecta las condiciones de estabilidad entonces, el  $k_0$  se reduce al 50%.

Adicionalmente, en el CCP-14 como soporte de la Sección 11, se presentan los mapas de amenaza sísmica con discretización de zonas a partir del PGA, mientras que en AIS, 2010 el

valor de aceleración varía respecto a *Amáx*, pero, en Arcila et al, 2020 publica oficialmente mapa de amenaza sísmica con valores de PGA diferentes respecto a los mapas de PGA del CCP-14 y de *Amáx* de la AIS, 2010.

Entonces, ¿cómo, y cual procedimiento usar?

El análisis pseudoestático todavía se usa ampliamente en la práctica, conceptualmente simple, pero el proceso de selección de un coeficiente sísmico carece de una base racional y el resultado tiende a ser demasiado conservador. La disponibilidad actual de software que facilitan la ejecución de métodos más rigurosos como el de desplazamiento permanente (Jibson y Jibson, 2003.) hace que, la justificación más poderosa para usarlo, su simplicidad, sea inválida relegando probablemente a usarse en etapas preliminares y procedimientos de detección que preceden a un estudio más sofisticado (Stewart et al., 2003).

Por otro lado, el análisis simplificado tiene dos ventajas principales (1) es fácil de implementar y (2) permite modelar grandes desplazamientos proporcionando una medida cuantitativa de lo que sucede después de que se excede la aceleración crítica,  $k_y$ . El punto en el que un análisis pseudoestático simplemente define "falla", el análisis de desplazamiento permanente comienza, por lo que se asocian los desplazamientos sísmicos admisibles con el coeficiente de aceleración horizontal garantizando  $FS \geq 1,00$  involucrando las características del entorno sismogénico y espectro sísmico para el diseño de taludes de corte.

Por lo tanto, en esta tesis analítica se aplican procedimientos simplificados que estiman valores de desplazamientos sísmicos admisibles, teniendo en cuenta 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  $k$  asociado, el cual se implementa 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 *Amáx*, garantizando la estabilidad pseudoestática en taludes asociando un desplazamiento sísmico admisible.

Inicialmente, se debe determinar la aceleración crítica  $k$  para modelos teóricos de taludes de corte que varían en altura entre 10,0 m y 70,0 m e inclinación de 27° hasta 90°, que es la aceleración que debe superarse para que un bloque deslizante comience a moverse ladera

abajo. La aceleración crítica se determina a partir del modelo geotécnico, propiedades de los materiales y utilizado el modelo constitutivo de Mohr Coulomb en el Software de Rocscience (2018) Slide 2D 2018 asociada a un factor de seguridad  $FS = 1,00$ .

Posteriormente, se establecen las características del entorno sismogénico (fuentes sismogénicas corticales y de subducción) y espectro sísmico para el diseño de taludes de corte (distinción del tipo de sismo, magnitud, periodo de retorno) para las diferentes zonas de amenaza sísmica de acuerdo con Arcilla et al, 2020.

Se continua con la estimación de desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray et al, 2019; procedimientos simplificados que involucran características sísmicas y del espectro sísmico y se aplica como ejemplo concreto a algunas ciudades capitales de Colombia que cuentan con estudios de Microzonificación sísmica tales como, Manizales, Cali, Medellín y Bogotá. Adicional, dado que la metodología base es lo propuesto por Newmark, 1965 se determinan los desplazamientos permanentes por medio del análisis de Bloque deslizando.

Finalmente, con la aplicación de los procedimientos enunciados, se determina el coeficiente de aceleración horizontal  $k$ , el cual al ser usado en un análisis de estabilidad pseudoestático alcanza factores de seguridad  $FS \geq 1,0$  y se cuenta con el soporte técnico con el cual es posible reducir el PGA o  $A_{máx}$ , garantizando la estabilidad pseudoestática en taludes asociando un desplazamiento sísmico admisible.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una herramienta para determinar el coeficiente  $K_h$  para análisis pseudoestático en estabilidad de taludes de corte.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la aceleración crítica ( $k_y$ ) para modelos teóricos de taludes de corte en suelo.
- Establecer las características del espectro sísmico para el diseño de taludes de corte. (Distinción del tipo de sismo, magnitud, espectro, amplitud, periodo de retorno).
- Estimar desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray y Macedo (2019).
- Generar la herramienta para la determinación del coeficiente  $k$  para análisis pseudoestático en estabilidad de taludes de corte.

## **1.2 ALCANCE**

Este estudio se aplican procedimientos para estimar los desplazamientos sísmicos admisibles según lo plasmado en los artículos Bray et al, 2018 “Procedure for Estimating Shear-Induced Seismic Slope Displacement for Shallow Crustal Earthquakes” y en Bray y Macedo (2019) “Simplified Procedure for Estimating Seismic Slope Displacements for Subduction Zone Earthquakes” junto con análisis por Bloque deslizante de Newmark, teniendo en cuenta las características del espectro sísmico (distinción del origen del tipo de sismo, cortical y subducción, magnitud, espectro, amplitud y periodo de retorno).

Así mismo se busca optimizar la obtención del coeficiente de aceleración horizontal  $k$ , con la aplicación de los artículos mencionados, para el análisis pseudoestático de estabilidad de taludes que involucre los desplazamientos sísmicos admisibles y las características del espectro sísmico.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

Como parte de este acápite se relaciona la información de referencia del estado del arte actual respecto a metodologías en las cuales se incluye desplazamientos sísmicos admisibles en estabilidad de taludes.

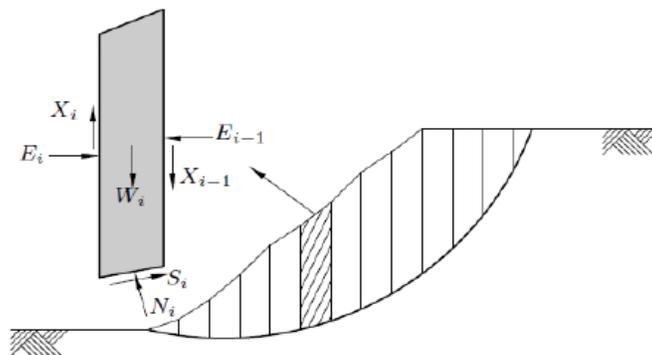
### 2.1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace descripción breve de las metodologías que se tendrán en cuenta a lo largo de esta tesis, el cual incluye los análisis pseudoestáticos simplificados, por estimación de desplazamientos y por bloque deslizando.

#### 2.1.1 ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICOS SIMPLIFICADOS

El análisis pseudoestático, se basa en agregar una fuerza horizontal al método de equilibrio límite la cual representa la aceleración del sismo, conceptualmente simple, pero el proceso de selección de un coeficiente sísmico generalmente carece de una base racional y el resultado tiende a ser demasiado conservador. El método de equilibrio límite (MEL) divide a la masa potencial de falla en un número finito de dovelas, luego, las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y/o de momentos son aplicadas a cada dovela. Generalmente, dovelas verticales son empleadas para dividir la masa de suelo; sin embargo, dovelas horizontales o inclinadas han sido usadas en algunas aplicaciones (Shahgholi y col., 2001; Sarma y Tan, 2006). En la Figura. 1 se presenta la manera tradicional de dividir la masa de falla del método de equilibrio límite.

**Figura. 1** Masa deslizante dividida en dovelas verticales y fuerzas interdovelas.



El análisis de la estabilidad sísmica de taludes se complica aún más por la necesidad de considerar los efectos de (1) las fuerzas dinámicas inducidas por los sismos y (2) los efectos de esas fuerzas en el comportamiento de la resistencia y la deformación de los materiales del talud. (Krammer, 1996). Las afectaciones sísmicas de los taludes pueden agruparse en dos categorías en función de cuál de estos efectos predomine en un talud determinado. Inestabilidades, donde la resistencia al corte del suelo permanece relativamente constante, pero las deformaciones del talud se producen por superaciones temporales de la resistencia por las fuerzas dinámicas del sismo. Y el debilitamiento del suelo lo suficiente como para que no pueda permanecer estable bajo la fuerza inducida por el sismo.

### **2.1.2 ANÁLISIS DE NEWMARK CON BLOQUE DESLIZANTE**

Newmark (1965) y modificado Krammer (1997), propuso un método para analizar el comportamiento dinámico de los taludes que salva eficazmente la distancia entre el análisis pseudoestático demasiado simplista y la modelación por elementos finitos muy sofisticada pero compleja. Aunque Newmark introdujo su método para analizar el comportamiento de terraplenes artificiales, Wilson y Keefer (1983) demostraron que el uso del método de Newmark para modelar el comportamiento dinámico de los deslizamientos en taludes naturales arroja resultados razonables y útiles.

Aunque el modelo de Newmark modificado calcula los desplazamientos permanentes rigurosamente, aproxima la masa de falla como un sistema discreto y tales aproximaciones son comunes en la dinámica de suelos y la dinámica estructural y cuando se realizan teniendo en cuenta el comportamiento de los taludes son aceptables para la estimación de desplazamientos permanentes de los taludes. Las posibles excepciones son taludes de geometría inusualmente compleja y pendientes con variaciones espaciales extremas de masa y rigidez. Estos taludes se analizan mejor mediante análisis de respuesta dinámica no lineal.

El análisis de bloque rígido trata una masa rígida (sin deformación interna) que se desliza de forma perfectamente plástica sobre un plano inclinado así, la masa no experimenta ningún desplazamiento permanente hasta que la aceleración de la base excede la aceleración crítica ( $k_y$ ), en el cual el bloque comienza a moverse ladera abajo. Los desplazamientos se estiman en dos etapas (1) las partes del registro de tiempo-aceleración que se encuentran por encima de la aceleración crítica se integran para obtener un registro de velocidad-tiempo; (2) este se integra

para obtener el desplazamiento acumulado del bloque de deslizamiento. Para deslizamientos profundos en materiales más blandos, el análisis de bloque rígido tiende a ser conservador o muy conservador. (Jibson et al, 2011). Por lo tanto, el método de Newmark se aplica mejor a los deslizamientos de bloques traslacionales que rotacionales. (Jibson et al, 2011). Las limitantes del método se enlistan a continuación:

1. La resistencia al corte estática y dinámica del suelo se consideran iguales.
2. Los efectos de la presión de poros dinámica se desprecian. Este supuesto es generalmente válido para arcillas compactadas o sobre consolidadas y arenas muy densas o secas.
3. La aceleración crítica no depende de la deformación y por lo tanto permanece constante a lo largo del análisis
4. La resistencia al deslizamiento de la ladera superior se considera infinita.

El primer paso es hallar la aceleración crítica ( $k_y$ ) que es la aceleración de la base que debe superarse para que un bloque deslizante comience a moverse con respecto a su base. Por lo tanto, la aceleración crítica es el umbral de aceleración necesario para iniciar el movimiento ladera abajo. La aceleración crítica puede determinarse realizando iterativamente análisis pseudoestáticos de equilibrio límite hasta encontrar una aceleración del terreno que produzca un factor de seguridad de 1,00.

Para los análisis de estabilidad pseudoestáticos con los cuales se halla  $k_y$ , requiere parámetros de resistencia al corte no drenados o totales. Durante los sismos, los materiales de los taludes se comportan de forma no drenada porque el exceso de presión de los poros inducido por la deformación dinámica de la columna de suelo no puede disiparse durante la breve duración del sismo. La resistencia no drenada también se denomina resistencia total porque las contribuciones de la fricción, la cohesión y la presión de poros no se diferencian, y la resistencia total se expresa como una sola cantidad. En materiales cuyos comportamientos drenados y no drenados son similares se pueden utilizar las resistencias al corte drenadas o efectivas si no se dispone de las resistencias no drenadas o son difíciles de medir, esto permite una gran flexibilidad para los usuarios.

En los análisis dinámicos de las masas deslizantes flexibles, existen análisis de bloques deslizantes desacoplados y acoplados (Rathje & Bray 1999).

- **Análisis desacoplado.** Es una modificación del análisis tradicional de Newmark que no requiere que la masa potencial de deslizamiento se comporte como un bloque rígido, sino que modela su respuesta dinámica sin tener en cuenta el desplazamiento y luego utiliza la respuesta calculada en un análisis de bloque deslizante rígido. Este enfoque se denomina análisis desacoplado porque el cálculo de la respuesta dinámica y el desplazamiento plástico se realizan de forma independiente. Por tanto, no tiene en cuenta los efectos del desplazamiento permanente de los bloques en el movimiento del suelo.
- **Análisis acoplado.** Es una extensión del análisis desacoplado. Este modela la interacción de los esfuerzos cortantes en la respuesta dinámica de la masa deslizante, la cual se define por su altura, la velocidad de la onda de corte y la relación de amortiguación (el valor por defecto es 0,05 %); también se especifica la velocidad de la onda de corte por debajo de la masa de deslizamiento (que puede tomarse de forma conservadora como roca). La respuesta dinámica puede modelarse como elástica lineal o lineal equivalente. (Jibson, 2011). El análisis acoplado se considera el más riguroso y arroja las estimaciones más precisas de desplazamiento para los deslizamientos más profundos en material más blando.

Posteriormente, se debe seleccionar el registro de aceleración del sismo, lo cual es el aspecto más difícil de realizar y se han propuesto muchas formas de hacerlo, (a) escalar los acelerogramas (registro de aceleración-tiempo) de los sismos reales a un nivel deseado de PGA y (b) el uso de simples o múltiples ciclos de aceleración artificiales con forma rectangular simple, triangulares o sinusoidales. Ambos enfoques resultados útiles, pero también tienen debilidades inherentes. El escalado de un acelerograma expandiendo o contrayendo la escala de aceleración no representa con exactitud el movimiento del suelo durante el sismo porque la magnitud y la distancia de la fuente también afectan a la duración y a los periodos predominantes de los registros. Y el uso de simples registros artificiales es una simplificación innecesaria a la luz de la disponibilidad actual de acelerogramas en diferentes bases de datos mundiales. Los criterios comunes de escogencia de un acelerograma incluyen (a) un nivel específico de aceleración del suelo, (b) magnitud, localización y ubicación del origen del sismo.

#### Cálculo del desplazamiento de Newmark

Una vez que se ha determinado la aceleración crítica del talud y se han seleccionado los acelerogramas el desplazamiento de Newmark se puede calcular con software como Slammer,

desarrollado por Jibson, 2011, o Slide 2D permiten ejecutar este análisis con los datos de entrada mencionados anteriormente. La escogencia del desplazamiento especifica un nivel de daño límite el cual consiste simplemente en analizar de forma iterativa varios registros de movimientos fuertes para encontrar que desplazamientos producen y obteniendo un posible umbral.

### Interpretación de los desplazamientos de Newmark

La importancia de los desplazamientos de Newmark debe juzgarse por la ocurrencia de un posible deslizamiento. Wieczorek et al (1985) utilizaron 5 cm como el valor crítico que conduce a agrietamiento macroscópico del suelo y la falla general de los deslizamientos de tierra en el condado de San Mateo, California. Keefer y Wilson (1989) utilizaron 10 cm como desplazamiento crítico en el sur de California y Jibson y Keefer, 1963 utilizaron entre 5 a 10 cm como el desplazamiento crítico para los deslizamientos de tierra en el valle del Mississippi. En la mayoría de materiales los desplazamientos en este rango causan grietas en el suelo, y los suelos previamente no deformados pueden perder parte de su resistencia máxima al corte y terminar debilitado o con resistencia residual.

Se puede utilizar cualquier nivel de desplazamiento crítico en función de los parámetros y las características del material del deslizamiento. Los materiales altamente dúctiles pueden ser capaces de generar más desplazamiento sin que se produzca una falla generalizada mientras que los materiales rígidos generan menos desplazamiento. (Jibson et al, 2011)

### **2.1.3 ANÁLISIS SIMPLIFICADOS CON ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTO**

A continuación, se listan algunos procedimientos simplificados que involucran análisis de desplazamientos sísmicos inducidos por sismos.

#### **2.1.3.1 Procedimiento para estimar los desplazamientos sísmicos del talud inducido por sismos corticales, Bray y Macedo (2019).**

Se estima el desplazamiento sísmico inducido para estructuras de tierra o taludes naturales debido a sismos de corteza poco profundos a lo largo de los márgenes de las placas activas. Utilizando 6711 registros de movimientos de terreno de la base de datos NGA-West2 actualizada para capturar esta fuente clave de incertidumbre al evaluar el desempeño sísmico. El modelo de análisis es totalmente acoplado no lineal y capta la influencia del desempeño del sistema, aceleración crítica,  $k_y$ , período fundamental inicial  $T_s$ , la aceleración espectral del

movimiento del suelo a un período del talud tomado como 1.3 Ts, la magnitud del sismo como un indicador de la duración, PGV y efectos de falla normal para movimientos del suelo cercanos a la falla. El procedimiento proporciona estimaciones consistentes con observaciones de casos de campo y proponen un método para seleccionar el coeficiente sísmico utilizado en los análisis de estabilidad de taludes pseudoestáticos, que sea consistente con un umbral de desplazamiento sísmico permitido.

El método desarrollado originalmente por Bray et al, 2007 *se actualiza* para los sismos de la corteza terrestre poco profundos a lo largo de los márgenes de las placas activas. El rango estimado de desplazamiento sísmico esperado para un sistema de tierra/residuos, no son estimaciones precisas para un talud, 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.

El desplazamiento sísmico del talud (D) se estima en dos pasos (1) la probabilidad “cero” (es decir,  $D \leq 0,50$  cm) y (2) distinto de cero y combina a través de la formulación de una variable aleatoria ( $\emptyset$ ). El modelo para calcular la P (D=0) es:

$$P(D = 0) = 1 - \emptyset(-2.48 - 2.97 \ln(ky) - 0.12(\ln(ky))^2 - 0.72Ts \ln(ky) + 1.70Ts + 2.78\ln(Sa(1.3Ts))) \text{ para casos donde } Ts \leq 0.7s \quad (1)$$

$$P(D = 0) = 1 - \emptyset(-3.42 - 4.93 \ln(ky) - 0.30(\ln(ky))^2 - 0.35Ts \ln(ky) - 0.62Ts + 2.86\ln(Sa(1.3Ts))) \text{ para casos donde } Ts \geq 0.7s \quad (2)$$

Sa= coeficiente de aceleración espectral (con 5% de amortiguamiento) a partir del espectro de respuesta del sitio, Ts = periodo fundamental del talud/muro y P (D≠0) (D, cm) se estima como:

$$\ln(D) = a1 - 2.482 \ln(ky) - 0.244(\ln(ky))^2 + 0.344 \ln(ky) \ln(Sa(1.3Ts)) + 2.649 \ln(Sa(1.3Ts)) - 0.090(\ln(Sa(1.3Ts)))^2 + a2Ts + a3Ts^2 + 0.603Mw \pm \epsilon \quad (3)$$

Sa= coeficiente de aceleración espectral

Mw = magnitud de momento del sismo de diseño

Ts = periodo fundamental del talud/muro

$\varepsilon$  = variable aleatoria de distribución normal con media igual a cero y una desviación estándar de 0,72.

En la anterior para sistemas con  $T_s \geq 0,10$  s,  $a_1 = -5,981$ ,  $a_2 = 3,223$  y  $a_3 = -0,945$  y para  $T < 0,10$ s,  $a_1 = -4,684$ ,  $a_2 = -9,471$  y  $a_3 = 0,0$ , solo hay un ligero cambio en el desplazamiento sísmico calculado a través del valor de  $T_s = 0,10$  s, Para el caso especial del bloque deslizante rígido de Newmark donde  $T_s = 0,0$  s el valor de D en cm, se estima como:

$$\ln(D) = -4.684 - 2.482 \ln(ky) - 0.244(\ln(ky))^2 + 0.344 \ln(ky) \ln(PGA) + 2.649 \ln(PGA) - 0.090(\ln(PGA))^2 + 0.603M_w \pm \varepsilon \quad (4)$$

Donde PGA es la aceleración máxima (g) del movimiento de suelo, Si hay efectos topográficos importantes debe ajustarse con 1,3 PGA para taludes moderadamente empinados o 1,5 PGA para taludes empinados, Las ecuaciones predictivas propuestas también se pueden usar para calcular la probabilidad de que el desplazamiento sísmico exceda un umbral seleccionado (d) para un escenario de sismo específico [es decir,  $S_a$ , 1,3  $T_s$ , y  $M_w$ ] y propiedades del talud de suelo (es decir,  $k_y$ ,  $T_s$ ), La probabilidad de que (D) exceda el umbral especificado (d) se calcula como:

$$P(D > d) = [1 - P(D = 0)]P(D > d|D > 0) \quad (5)$$

Donde,  $P(D = 0)$  se calcula mediante por las ecuaciones (7) y (8), y el término  $P(D > d | D > 0)$  se calcula suponiendo que los desplazamientos se distribuyen log normalmente como:

$$P(D > d|D > 0) = 1 - P(D \leq d|D > 0) \quad (6)$$

$$P(D > d|D > 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(D)}{\sigma}\right) \quad (7)$$

### **2.1.3.2 Procedimiento simplificado para estimar los desplazamientos sísmicos de los taludes inducidos por sismos en zonas de subducción, Bray et al, 2018.**

Los desplazamientos de taludes sísmicos se estiman para estructuras de tierra o taludes naturales sujetos a sismos de interfase en zonas de subducción. Se tiene en cuenta una base de

datos integral que contiene 810 registros de movimiento de terreno de dos componentes de la zona de subducción. El modelo no lineal totalmente acoplado involucra la influencia del coeficiente de desempeño  $k_y$  del sistema, período fundamental inicial  $T_s$ , y la aceleración espectral en período del talud tomado como  $1,5T_s$ . Esta propuesta capta mejor la configuración sísmica única de sismos en zonas de subducción en la interfaz de la zona, por lo que se debe utilizar para estimar desplazamientos sísmicos en taludes para este tipo de eventos.

El modelo separa la probabilidad cero,  $D = 0$  (es decir,  $D < 0,5$  cm) de la distribución de  $D$  distinto de cero, de modo que los valores bajos de desplazamiento sísmico calculado no sesgan los resultados y se combina a través de la formulación de variable aleatoria ( $\phi$ ), para calcular la  $P(D=0)$  es:

$$P(D = 0) = 1 - \phi(-2.64 - 3.20 \ln(ky) - 0.17(\ln(ky))^2 - 0.49T_s \ln(ky) + 2.09T_s + 2.91 \ln(Sa(1.5T_s))) \text{ para casos donde } T_s \leq 0.7s \quad (8)$$

$$P(D = 0) = 1 - \phi(-3.53 - 4.78 \ln(ky) - 0.34(\ln(ky))^2 - 0.30T_s \ln(ky) - 0.67T_s + 2.66 \ln(Sa(1.5T_s))) \text{ para casos donde } T_s \geq 0.7s \quad (9)$$

$D$ = Desplazamiento sísmico del talud,  $Sa(1,5T_s)$  = coeficiente de aceleración espectral (con 5% de amortiguamiento) a partir del espectro de respuesta del sitio,  $T_s$  = período fundamental del talud y para calcular el valor de ( $D$ ) distinto de cero, en centímetros se estima como:

$$\ln(D) = a_1 - 3.353 \ln(ky) - 0.390(\ln(ky))^2 + 0.538 \ln(ky) \ln(Sa(1.5T_s)) + 3.060 \ln(Sa(1.5T_s)) - 0.225(\ln(Sa(1.3T_s)))^2 + a_2T_s + a_3T_s^2 + 0.550M_w \pm \varepsilon \quad (10)$$

$Sa$ = coeficiente de aceleración espectral

$M$  = magnitud de momento del sismo de diseño

$T_s$  = período fundamental del talud/muro

$\varepsilon$  = variable aleatoria de distribución normal con media igual a cero y una desviación estándar de 0,73. Para sistemas con  $T_s \geq 0,10$  s,  $a_1 = -6,896$ ,  $a_2 = 3,081$  y  $a_3 = -0,803$ , y para  $T < 0,10$  s,  $a_1 = -5,864$ ,  $a_2 = -9,421$  y  $a_3 = 0,0$ , solo hay un ligero cambio calculado a través del valor de  $T_s = 0,10$  s, Para el caso especial del bloque deslizante rígido de Newmark donde  $T_s = 0,0$  s, y el valor de ( $D$  en cm) se estima como:

$$\ln(D) = -5.864 - 3.353 \ln(ky) - 0.390(\ln(ky))^2 + 0.538 \ln(ky) \ln(PGA) + 3.060 \ln(PGA) - 0.225(\ln(PGA))^2 + 0.550M \pm \varepsilon \quad (11)$$

Donde PGA es aceleración máxima en las unidades de g, Si hay efectos topográficos importantes el valor de PGA debe ajustarse, es decir, 1,3 PGA para taludes moderadamente empinadas, o 1,5 PGA para taludes empinadas, Las ecuaciones predictivas propuestas también se pueden usar para calcular que se exceda un umbral seleccionado ( $d$ ) para un escenario de sismo específico [es decir,  $S_a$ , 1,5  $T_s$ , y  $M$ ] y propiedades del talud de suelo (es decir,  $k_y$ ,  $T_s$ ). La probabilidad que ( $D$ ) exceda un umbral especificado ( $d$ ) se calcula como:

$$P(D > d) = [1 - P(D = 0)]P(D > d|D > 0) \quad (12)$$

Donde,  $P(D = 0)$  involucra el término  $P(D > d) | D > 0$ , se calcula suponiendo que los desplazamientos estimados se distribuyen log normalmente como:

$$P(D > d|D > 0) = 1 - P(D \leq d|D > 0) \quad (13)$$

$$P(D > d|D > 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(\hat{d})}{\sigma}\right) \quad (14)$$

## 2.2 MARCO LEGAL

A continuación, se relacionan los documentos técnicos bajo los cuales se rigen los análisis de estabilidad de taludes de corte en Colombia, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente AIS, 2010 y el Código Colombiano de Puentes CCP-14.

### 2.2.1 LEY 400 DE 1997 REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE AIS, 2010

En el Título A- Capítulo A.1.3 Procedimiento de diseño y construcción de edificaciones, de acuerdo con el reglamento, en su Tabla A.1.3-1 Procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas y existentes, se cita:

Paso 3 – Obtención del nivel de amenaza sísmica y valores de  $A_a$  y  $A_v$ . Este paso consiste en localizar el lugar donde se construirá la edificación dentro de los mapas de zonificación sísmica dados en el Capítulo A.2 del Reglamento y en determinar el nivel de amenaza sísmica del lugar, de acuerdo con los valores de  $A_a$  y  $A_v$  obtenidos en los mapas de zonificación sísmica del capítulo A.2. En el Capítulo H.5 – Excavaciones y Estabilidad de Taludes indica la metodología para tener en cuenta el efecto del sismo en los análisis pseudoestáticos para edificaciones:

SISMO DE DISEÑO — Para efectos del análisis y diseño de taludes se debe emplear la aceleración máxima del terreno  $a_{max}$  obtenida bien sea de un espectro (aceleración del espectro de diseño para periodo cero) o por medio de análisis de amplificación de onda unidimensionales o bidimensionales, correspondiente a los movimientos sísmicos definidos en el Capítulo A.2. El coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes  $K_{ST}$  tiene valor inferior o igual al de  $a_{max}$  y se admiten los siguientes valores mínimos de  $K_{ST} / a_{max}$  (Tabla H.5.2-1), dependiendo del tipo de material térreo y del tipo de análisis.

**Tabla 1** Valores de  $K_{ST} / a_{max}$  Mínimos para Análisis Pseudoestático de Taludes

Material	$K_{ST} / a_{max}$ Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

## 2.2.2 NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO DE PUENTES 2014

En la Sección 11- Muros, Estribos y Pilas para análisis de estabilidad de taludes se cita en algunos apartes:

11.5.4 — Estado límite de evento extremo: La aceleración pico del terreno ajustada para el sitio usada para diseño sísmico de muros de contención debe determinarse de acuerdo con el Artículo 3.10, donde  $A_s = p_g a F PGA$ .

11.5.4.2 — Evento extremo I, sin análisis sísmico: para muros localizados en las Zonas Sísmicas 1 a 3, o para muros ubicados en lugares donde la aceleración pico del terreno ajustada para el sitio,  $A_s$ , sea menor o igual a 0.4 g, no debe considerarse obligatorio el diseño sísmico.

1.6.5.2.1 — Caracterización de la aceleración en la base del muro — El coeficiente sísmico de aceleración horizontal ( $k$ ) para el cálculo de las presiones y las fuerzas sísmicas laterales del suelo debe determinarse con base en el PGA en la superficie del terreno (es decir,  $k_0 = F p_g a PGA = A_s$ , donde  $k_0$  es el coeficiente sísmico de aceleración horizontal suponiendo que no ocurre ningún desplazamiento del muro).

11.6.5.2.2 — Estimación de la aceleración que actúa sobre la masa del muro — El coeficiente sísmico de aceleración lateral del muro,  $k$  debe determinarse considerando

los efectos de dispersión de onda o la amplificación del movimiento del terreno dentro del muro y la capacidad del muro de desplazarse lateralmente. Para muros con altura menor que 18000 mm, puede considerarse aceptable el análisis pseudoestático para determinar la aceleración de diseño de la masa del muro.

Para muros con altura mayor que 18000 mm, deben realizarse análisis dinámicos de interacción suelo-estructura para evaluar las deformaciones laterales del muro. Si el muro es libre de moverse lateralmente bajo la influencia de la carga sísmica y es aceptable para el propietario,  $k_0$  debe reducirse y tener en cuenta el efecto que tiene sobre la estabilidad del muro bajo consideración. Donde el muro sea capaz de desplazarse de 25 mm a 50 mm o más  $k$  puede reducirse hasta  $0.5k_0$  sin llevar a cabo un análisis de deformaciones usando el método de Newmark (Newmark, 1965) o una de sus versiones simplificadas.

Trabajos recientes completados como parte del reporte 611 del NCHRP (Anderson et al, 2008) concluyeron que, cuando se usa el método de Newmark el desplazamiento permanente del terreno asociado a  $0,5 k_0=k$  es en la mayoría de los casos menor que 0,025 m a 0,05 m (es decir, el uso de  $0,5 k_0=k$  proporciona resultados conservadores). Detalles de procedimientos simplificados específicos que pueden usarse para estimar los efectos de dispersión de onda y deformación lateral del muro para determinar  $k$  se proporcionan en el Apéndice A11. Estos procedimientos simplificados incluyen Kavazanjian et al, 2003, Anderson et al, 2008 y Bray et al, 2009,2010.

### **2.3 MARCO SISMO TECTÓNICO**

En este acápite se resumen las características generales del ambiente sísmico tectónico referente a las fuentes sismogénicas en las cuales está dividido la amenaza sísmica en Colombia.

El Servicio Geológico Colombiano como entidad responsable del ámbito nacional (Ley 4131 de 2011, Ley 1523 de 2012, Decreto 2703 de 2013) de evaluar y monitorear los procesos geológicos que pueden constituir amenaza, establece el grupo interno de trabajo (Resoluciones D-335 del 18 de agosto de 2017) Evaluación y monitoreo de la actividad sísmica bajo la dirección de Geoamenazas según lo plasmado en Arcila, M. et al., 2020 Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model.

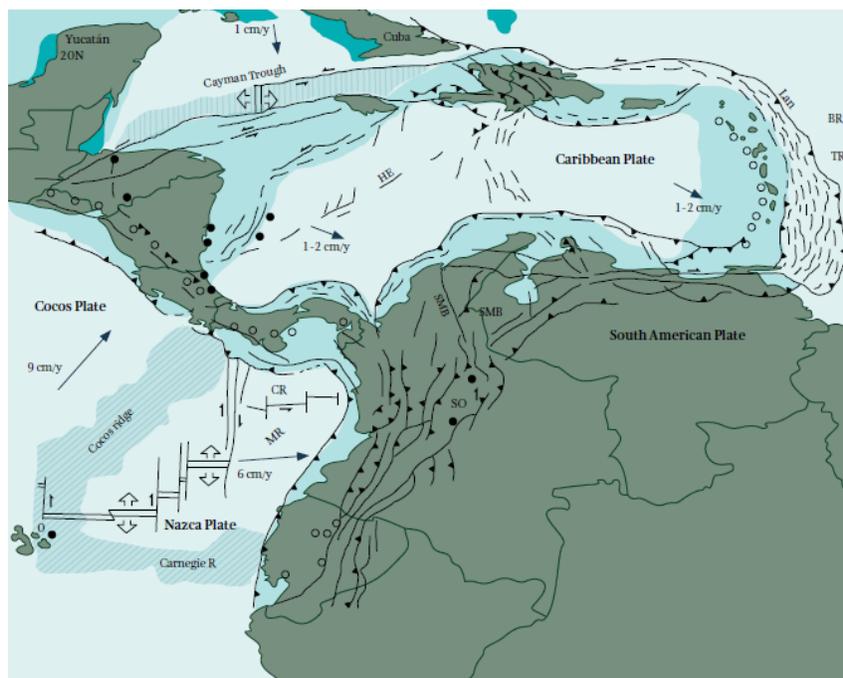
Entre los componentes del análisis de amenaza sísmica, un modelo de fuentes es una herramienta para caracterizar una zona de estudio según la magnitud y recurrencia de los sismos que puede generar. Para este fin, fue necesario identificar y definir las fuentes presentes en dicha zona. En geología, una fuente sísmica es un volumen de la litósfera en el que, se presume, pueden ocurrir sismos con origen tectónico similar. Para definir estas fuentes es relevante conocer su ubicación, su actividad (descrita en términos de la recurrencia de magnitudes de sismos asociados a dicha fuente), así como la magnitud máxima de los sismos que pueden producir (Arcila et al, 2020).

En Colombia se han propuesto diferentes modelos de fuentes sísmicas. Entre los más recientes se encuentran los elaborados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 2009), que han servido de soporte para la definición de coeficientes sísmicos de diseño del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente AIS, 2010.

Mediante dicho convenio se buscó tener un control de calidad de los estudios de amenaza existentes como resultado de esa revisión las fuentes sismogénicas propuestas por el Ingeominas reflejaban un buen conocimiento de los procesos tectónicos del país, y merece ser valorado como un modelo de fuentes más avanzado que el utilizado en los cálculos del mapa de amenaza de la Norma Sismo Resistente NSR-98 (Ordaz, 2009), (Arcila et al, 2020). En el estudio de la tectónica del territorio colombiano se han propuesto diferentes modelos consideran, entre otras, las siguientes dinámicas:

- La convergencia de las placas de Nazca y del Caribe hacia la placa de Suramérica
- El desplazamiento del bloque de Panamá en sentido W-E hacia la placa de Suramérica
- El desplazamiento del bloque de los Andes en dirección SSW-NNE

**Figura. 2** Configuración neotectónica de la región Caribe y el norte de los Andes



*Nota:* Tomado y modificado de Arcila et al (2020)

De acuerdo con Figura 2, en Colombia se presentan principalmente los siguientes ambientes tectónicos: i) sísmos de corteza asociados a los principales sistemas de fallas (sismicidad andina); ii) sismicidad de subducción del Pacífico; iii) sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y Nido de Bucaramanga; iv) sismicidad de corteza difusa.

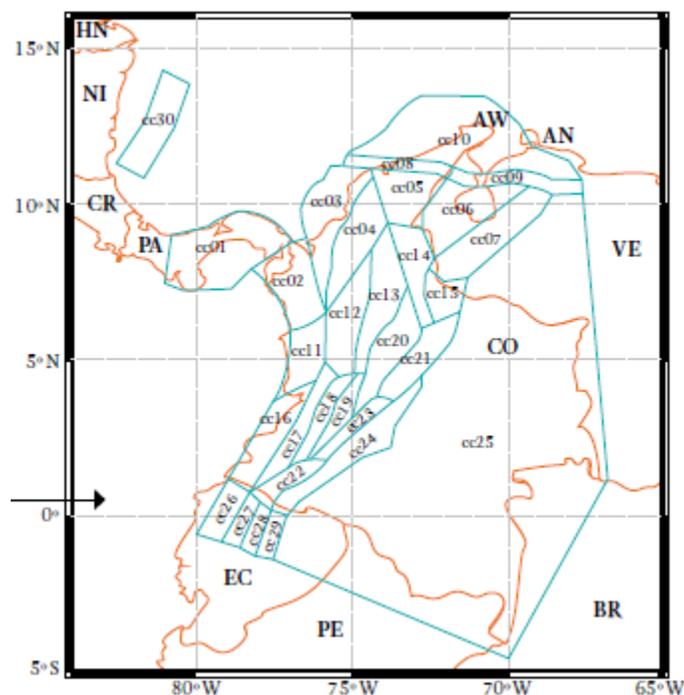
A partir del conocimiento tectónico existente (relevante para la modelación de la amenaza sísmica), en el presente estudio se han considerado los siguientes ambientes tectónicos: (i) superficial (cortical); (ii) zona interplaca del proceso de subducción del pacífico; (iii) zona intra-placa (profunda) del proceso de subducción del pacífico (Benioff); (iv) zona de subducción profunda del nido de Bucaramanga. A continuación, se ilustra una breve descripción de estos ambientes.

### **2.3.1 FUENTES DE AMBIENTE TECTÓNICO CORTICAL**

La actividad sísmica cortical (superficial) está acotada por el límite corteza-manto superior o discontinuidad de Mohorovičić (“moho”). Generalmente, este límite se asocia a profundidades menores a 70 km. No obstante, este límite es variable y debe ser bien establecido en regiones como Colombia, en donde diversos tipos de ambientes tectónicos están intrínsecamente

relacionados. La geometría de tales fuentes se definió mediante polígonos delineando regiones con un comportamiento homogéneo de la sismicidad desde un punto de vista espaciotemporal como se ve en la Figura. 3.

**Figura. 3** Modelo de fuentes corticales (tipo área) propuesto por el SGC-IGME



*Nota:* Tomado del Servicio Geológico Colombiano – Fundación Global Earthquake Model

La Tabla 2 contiene un resumen de los parámetros principales para cada una de las fuentes sísmicas. En esta tabla, *Id* es un identificador de la fuente sísmica; el campo *Nombre* corresponde al nombre de la fuente sísmica. Por su parte, los campos *a* y *b* son los parámetros de la distribución magnitud frecuencia. Por último, los campos *Mmin* y *Mmax* representan la magnitud (*Mw*) mínima y máxima, respectivamente.

**Tabla 2** Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas de origen cortical

Fuentes sismogénicas corticales					
Id	Nombre	a	b	Mmín	Mmáx
cc01	Oriente Panamá	3,82	1,00	5	7,2
cc02	Pacífico Norte (Darién)	4,62	1,00	5	7,4
cc03	Sábanas costeñas	3,61	0,94	5	6,8
cc04	Ciénagas de Caribe	3,45	0,83	5	6,5
cc05	Perijá-Sierra Nevada	3,48	0,92	5	6,5
cc06	Depresión del Maracaibo	1,59	0,43	5	6,5
cc07	Andes de Mérida	4,15	0,90	5	7,9
cc08	Transversal del Caribe (Oca)	2,75	0,80	5	6,7
cc09	Transversal de Falcón	3,12	0,79	5	6,7

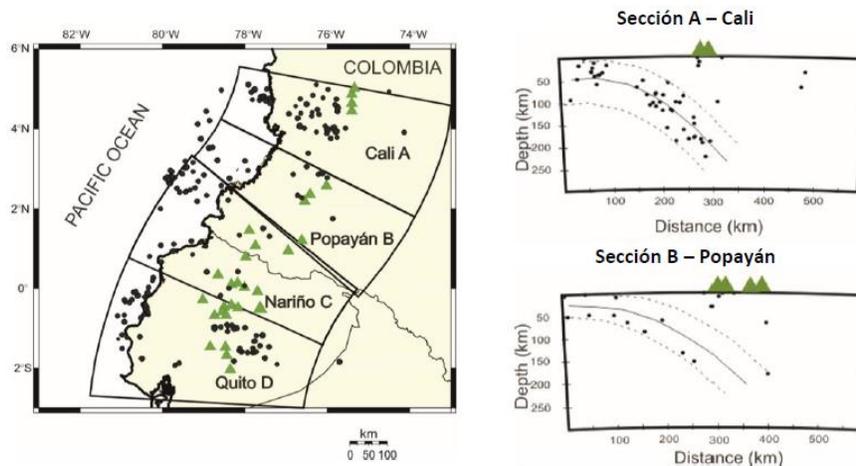
Fuentes sismogénicas corticales					
Id	Nombre	a	b	Mmín	Mmáx
cc10	Guajira-Paraguaná	4,78	1,10	5	6,7
cc11	Pacífico Central	4,23	1,02	5	6,5
cc12	Norte Cordillera Central	3,66	0,92	5	6,5
cc13	Magdalena Medio	3,35	0,78	5	6,5
cc14	Norte Santander	4,18	1,06	5	6,5
cc15	Cocuy	3,72	0,86	5	7,5
cc16	Pacífico Sur	2,82	0,74	5	6,8
cc17	Cauca-Patía	2,05	0,61	5	6,8
cc18	Central Cordillera Central	2,55	0,70	5	7,1
cc19	Valle Alto del Magdalena	3,65	1,09	5	6,5
cc20	Antiplano Cundiboyacense	3,14	0,83	5	6,8
cc21	Piedemonte Orinoquía	4,16	0,97	5	6,8
cc22	Zona Andina Nariñense	2,63	0,69	5	7,0
cc23	Sur Cordillera Oriental	4,75	1,17	5	7,0
cc24	Piedemonte Amazonía	3,76	1,03	5	7,4
cc25	Cratón	3,55	0,93	5	6,6
cc26	Pacífico Ecuatoriano	5,13	1,27	5	7,5
cc27	Sierra Occidental ecuatoriana	5,66	1,34	5	7,6
cc28	Sierra Oriental ecuatoriana	5,22	1,22	5	7,4
cc29	Piedemonte Ecuatoriano	4,91	1,23	5	6,7
cc30	Insular San Andrés	1,74	0,54	5	6,5

Fuente: Tomado del Servicio Geológico Colombiano, 2018.

### 2.3.2 FUENTES EN ZONA DE BENIOFF

La zona de Benioff es un ambiente tectónico que hace parte del proceso de subducción. Corresponde a la parte de la placa que penetra (subduce) bajo la otra, con una inclinación gobernada por condiciones regionales, con ángulos variables. Los sismos que ocurren dentro del volumen subducido se les denomina intra-placa y se asocian a la zona de Benioff. En la Figura. 4 muestra un esquema de dicha zona. En particular, la zona de subducción del pacífico se desarrolla desde el pacífico, hacia el interior del continente, en un rango de 300 km. En términos generales, para diferenciar los eventos interplaca de los intraplaca (de la zona de Benioff), se consideran, entre otros, los siguientes criterios: la profundidad de los sismos (son más profundos los intraplaca); la localización del arco volcánico, que está relacionada con la zona de Benioff; el tipo de mecanismos focales, que en su mayoría son de tipo inverso (reverse) en sismos interplaca, mientras que mecanismos compuestos o normales se observan en eventos intraplaca.

**Figura. 4** Secciones transversales perpendiculares a la trinchera del Pacífico



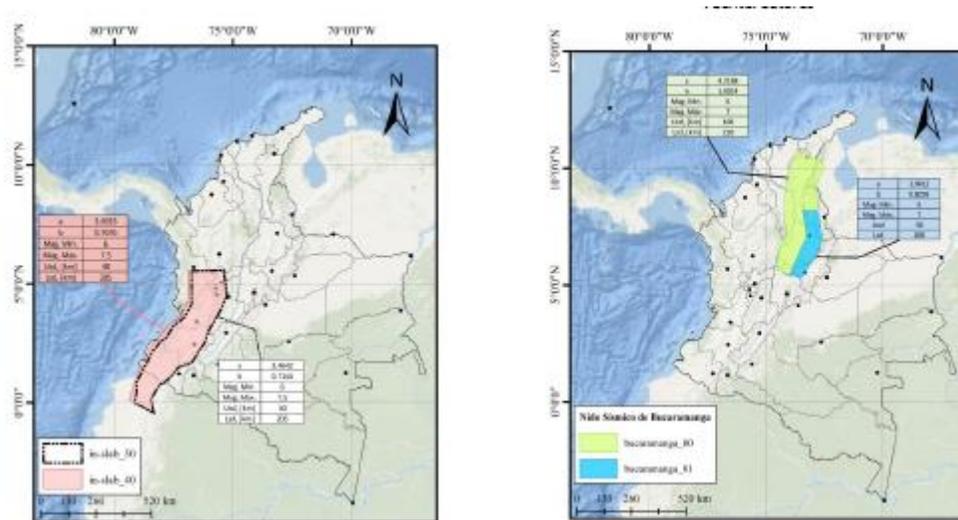
Fuente: Arcilla et al, 2020.

Los sismos (intra-placa) de la zona de Benioff pueden contribuir notablemente a la amenaza de una región, ejemplos de este tipo de eventos corresponden a los siguientes sismos ocurridos en México de 1858 ( $M \sim 7,7$ ), el cual tuvo efectos en la ciudad de México; el sismo de 1931 ( $M_w 7,8$ ) el cual causó gran destrucción en la ciudad de Oaxaca (García, 2005); el evento de 2017 en Puebla y Morelos ( $M_w 7,1$ ), el cual causó numerosos colapsos y daños severos en construcciones.

### 2.3.3 FUENTES DE INTRAPLACA DEL NIDO SÍSMICO

Un nido sísmico es un volumen de actividad sísmica intensa, persistente en el tiempo y aislado de la actividad de sus alrededores. El nido sísmico de Bucaramanga corresponde a una zona en la que frecuentemente se generan sismos de magnitudes  $M_w$  entre 4 y 5, a profundidades de 140 a 200 km. Por otro lado, el reducido tamaño del nido sísmico de Bucaramanga, la variabilidad de los mecanismos focales identificados y la escasez de sismicidad en los alrededores hacen difícil que se presente una explicación coherente del origen de tal nido (Arcilla et al 2020). En la Figura. 5 se resumen los parámetros de sismicidad de las fuentes sismogénicas de la zona de Benioff y Nido de Bucaramanga.

**Figura. 5** Parámetros de sismicidad de fuentes de Izq. Zona de Benioff Der. Nido de Bucaramanga

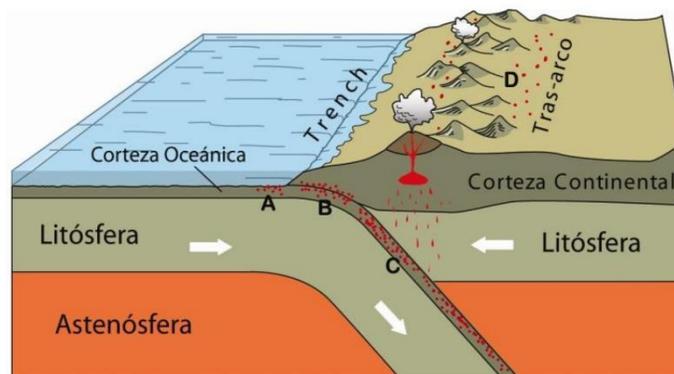


Fuente: Arcilla et al, 2020

### 2.3.4 FUENTES DE SUBDUCCIÓN Y PROFUNDAS

En términos generales, un proceso de subducción corresponde al choque entre placas litosfericas, en el cual, una de las placas se desliza por debajo de la otra. A los sismos que ocurren entre los límites de convergencia de dos placas se les denomina interplaca. En particular, la subducción del pacífico colombiano corresponde a la zona de contacto entre la placa de Nazca con la placa Sur América. En esta zona se han originado sismos de magnitudes considerables, tales como los ocurridos cerca de Tumaco en enero de 1906 (magnitud 8,8 Mw) y el de diciembre de 1979 (magnitud 8,1 Mw). En la Figura. 6 se resumen los parámetros de sismicidad de las fuentes sismogénicas de la zona de Benioff y Nido de Bucaramanga.

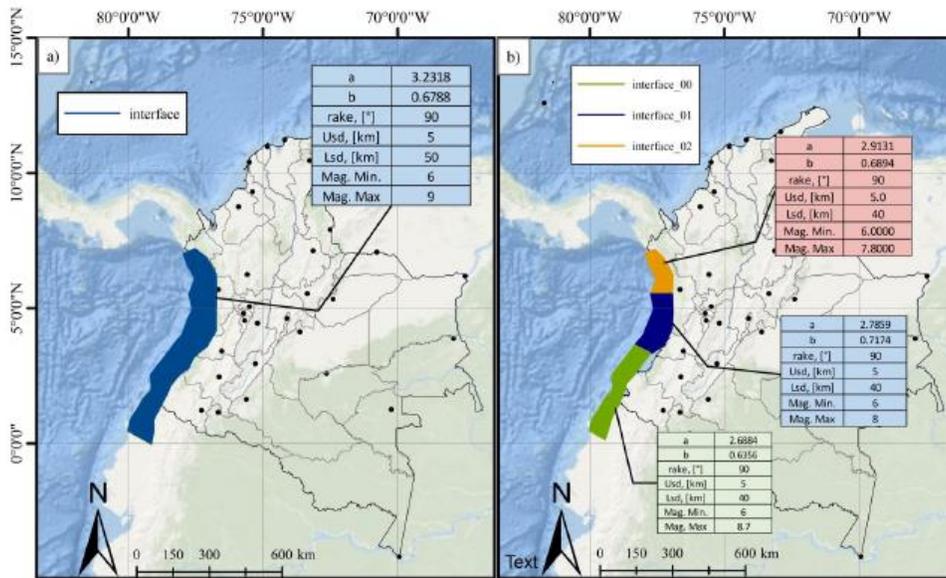
**Figura. 6** Esquema de proceso de subducción.



Fuente: Arcilla et al, 2020

Con el fin de considerar incertidumbres (epistémicas) asociadas a las limitaciones en el conocimiento del proceso de subducción y de las fuentes interplaca, hay dos modelos alternativos, delimitados como se puede ver en la Figura 7:

**Figura. 7** *Parámetros de sismicidad de fuentes de interplaca del proceso de subducción del pacífico a) modelo no segmentado; b) modelo segmentado*



Fuente: Arcilla et al, 2020

A continuación, se presenta los principales parámetros de sismicidad de las fuentes de la zona Benioff y de las fuentes del nido sísmico de Bucaramanga.

**Tabla 3** *Principales parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas pertenecientes al modelo zonificado de fuentes de intra-placa y subducción*

Fuentes sismogénicas de intra-placa y subducción					
Id	Nombre	a	b	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>
int-col	Interfase	3,231823	0,67883	6,0	9,0
int-col0	Interfase_00	2,785948	0,71739	6,0	8,0
int-col1	Interfase_01	2,688350	0,635628	6,0	8,7
int-col2	Interfase_02	2,913057	0,689399	6,0	7,8
in_slab_40	Benief-40Km	3,69331	0,767608	6,0	7,5
in_slab_50	Benief-40Km	3,69331	0,767608	6,0	7,5
0	bucaramanga_00	4,216761	1,001447	6,0	7,0
1	bucaramanga_01	3,941344	0,829326	6,0	7,0

Fuente: Arcilla et al, 2020 (Adaptado)

### 3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

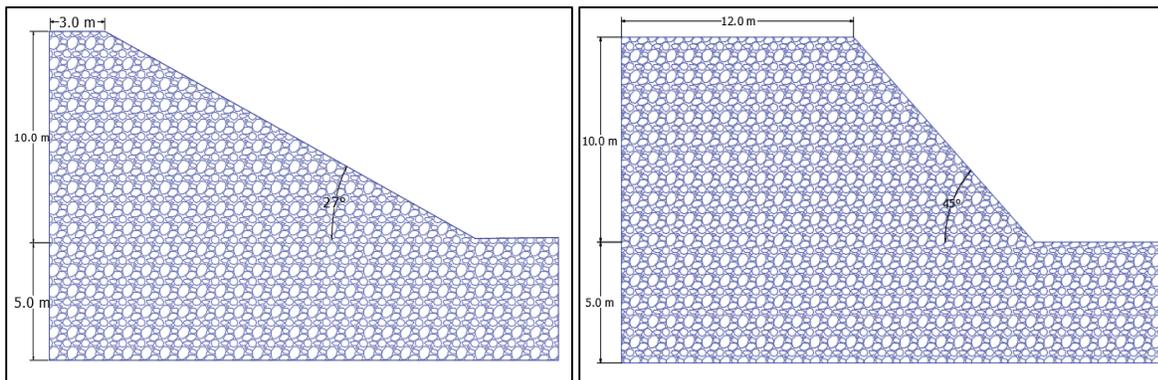
Esta tesis analítica se aplican los procedimientos simplificados teniendo en cuenta las características del entorno sísmológico del país, con el fin de determinar los desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño en el análisis pseudoestático para estabilidad de taludes de corte. Esta tesis se desarrolló en cuatro etapas:

#### 3.1 ETAPA 1: DETERMINAR LA ACELERACIÓN CRÍTICA ( $k_y$ )

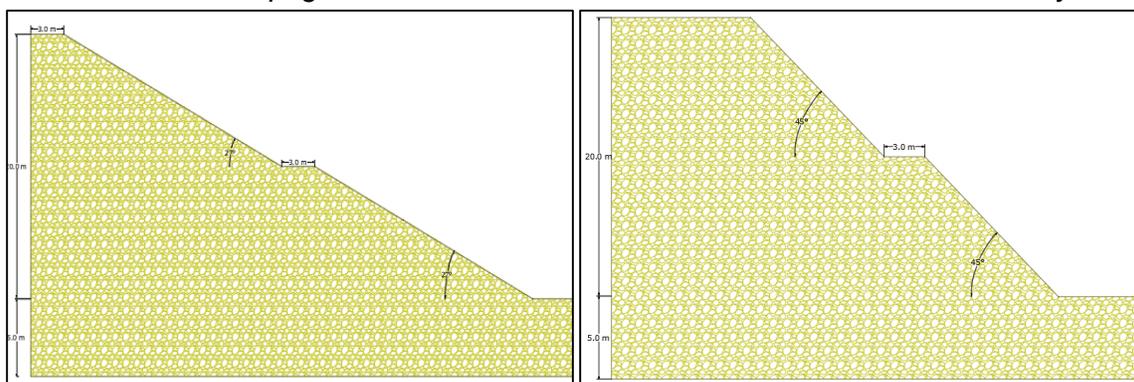
Recopilación de información de referencia: Compilación del estado del arte actual respecto a análisis pseudoestáticos en los cuales se incluya el desplazamiento sísmico admisible en taludes teniendo en cuenta la inclusión de las características espectrales del sitio de interés; en esta búsqueda se logran identificar dos metodologías que abarcan la diferenciación del origen de las fuentes sismogénicas, fuentes corticales y fuentes de interfase y subducción.

Definición de las secciones topográficas de análisis: Se utilizó para los análisis de estabilidad combinaciones geométricas entre taludes de corte con alturas variables entre 10 m hasta 70 m en intervalos de 10 m e inclusión de bermas de 3 m con inclinación en la cara del talud variable de  $27^\circ$ ,  $37^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $53^\circ$ ,  $63^\circ$ ,  $72^\circ$  y  $90^\circ$  para 728 secciones topográficas de análisis. A continuación, se presentan algunas salidas graficas de las secciones topográficas empleadas para el análisis:

**Figura. 8.** Secciones topográficas de análisis. Altura de 10 m con inclinación de  $27^\circ$  y  $45^\circ$ .



**Figura 9.** Secciones topográficas de análisis. Altura de 20 m con inclinación de 27° y 45°.



Plasmar el modelo geotécnico: Con base en las secciones de análisis escogidas se realizó la definición de los modelos geológico-geotécnicos para perfiles homogéneos con características de resistencia no drenados según lo presentado en el Ortiz & Oteo 1989. Se aclara que los valores de parámetros de resistencia son tomados como referencia para los análisis de estabilidad, pero para la implementación de estos procedimientos se deben obtener de manera adecuada los parámetros de resistencia propios del talud. A continuación se presenta en la Tabla 4 los trece (13) diferentes parejas de parámetros de resistencia.

**Tabla 4.** Parámetros geotécnicos de referencia para la definición del modelo geológico-geotécnico

PARÁMETROS DE ANÁLISIS		
#	$\phi$	C Kpa
0	30,0	15
1	29,0	11
2	27,0	8
3	28,0	13
4	23,67	6
5	21,67	22
6	24,0	31
7	25,5	42
8	21,0	26
9	15,8	17
10	17,4	49
11	14,5	41
12	11,6	37

Nota: Los colores son distintivos de cada talud

Ejecución de la modelación numérica: Teniendo en cuenta las características geométricas, propiedades de resistencia al corte no drenado de los materiales y por medio del software Slide 2D 2018 se determina  $k_y$  con el cual se obtiene un factor de seguridad = 1,00.

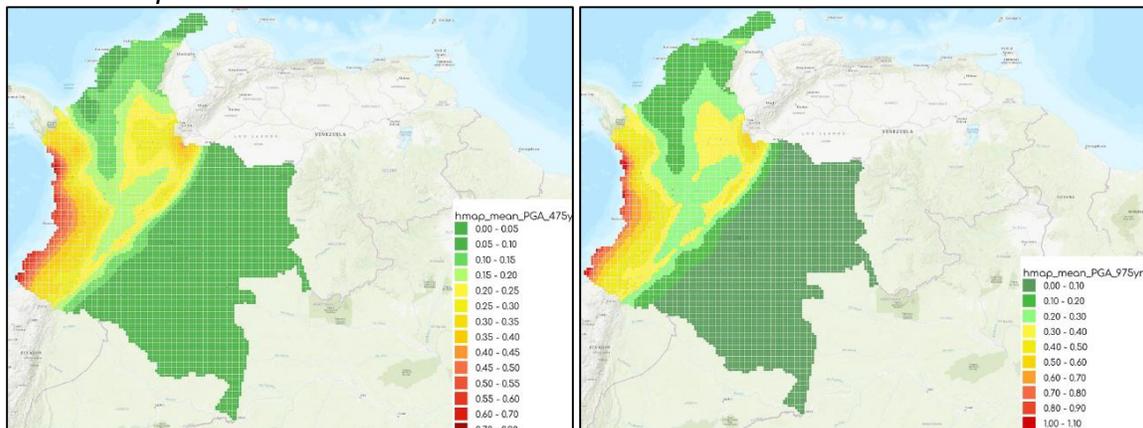
### 3.2 ETAPA 2: ESTABLECER LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESPECTRO SÍSMICO

Establecer las características de los espectros de diseño de taludes para las diferentes zonas de amenaza sísmica de acuerdo con el Mapa de Zonificación de Amenaza Sísmica del Arcilla et al 2020, haciendo énfasis en la diferenciación del tipo de fuente sismogénicas que afectan el país:

1. Fuentes sismogénicas corticales: De acuerdo con la metodología del Servicio Geológico Colombiano, se tienen 30 áreas sismogénicas (independientes) que cubren todo el territorio, según lo presentado en el Capítulo 2.3.
2. Fuentes de subducción y profundas: Generalmente la modelación de la actividad sísmica en zonas de subducción involucra dos tipologías, fuentes en la zona de contacto entre las placas (denominados interplaca) y fuentes intra-placa en la zona de Benioff (denominados intra-placa “intra-slab” o “inslab”).

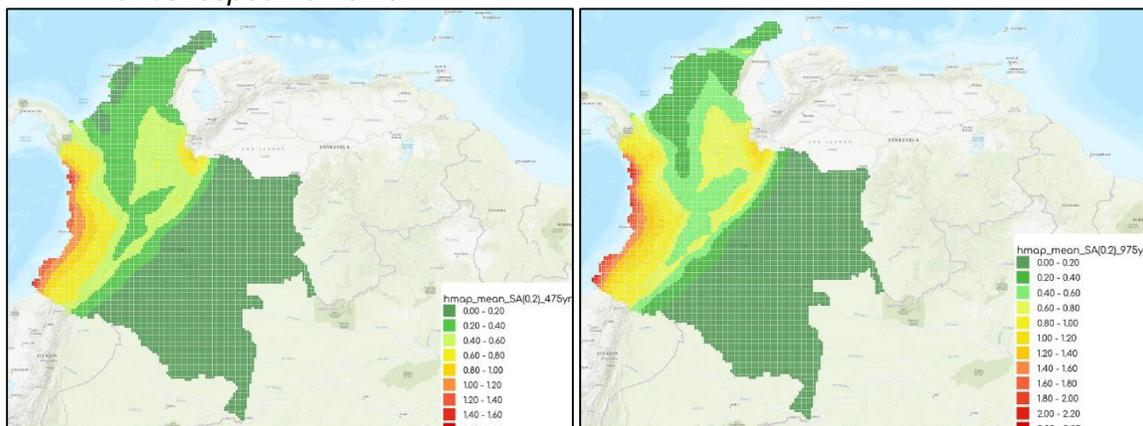
Posterior a la identificación del tipo de fuentes sismogénicas definidas por el Arcilla et al 2020 se procedió con la zonificación con las características de PGA, Ss y S1, presentadas en las Figura 12 a Figura 14, por medio del software ARCGIS 10.2 para periodos de retorno de 475 años y 975 años, se realizó adicionalmente la intersección con las geometrías de cada una las fuentes sismogénicas obteniendo nuevos mapas en los cuales para cada fuente sismogénica está asignado un respectivo valor de PGA, Ss (0.2s) y S1(1.0s).

**Figura. 10.** Mapas de zonificación del PGA para períodos de retorno de 475 y 975 años respectivamente.



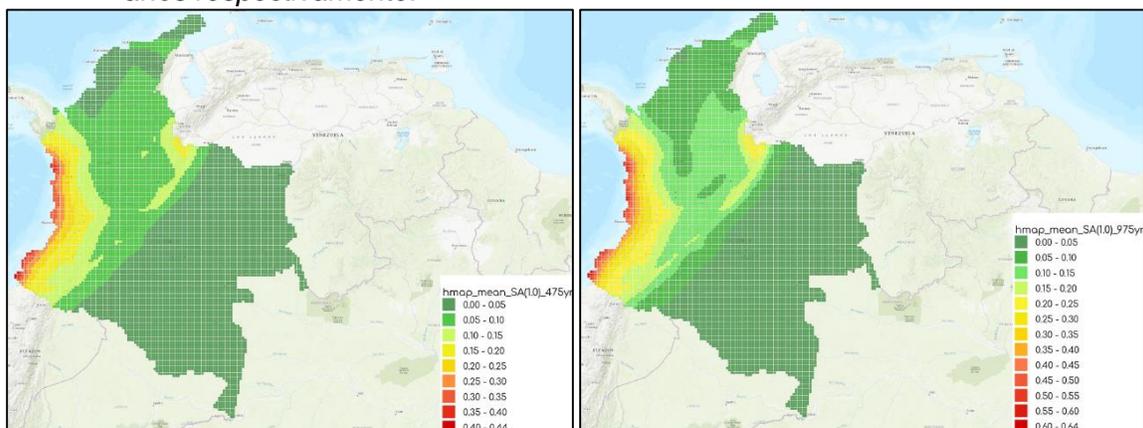
Fuente: Arcilla et al, 2020.

**Figura. 11.** Mapas de zonificación del Ss (SA 0.2s) para períodos de retorno de 475 y 975 años respectivamente.



Fuente: Arcilla et al, 2020.

**Figura. 12.** Mapas de zonificación del S1 (SI 1.0s) para períodos de retorno de 475 y 975 años respectivamente.



Fuente: Arcilla et al, 2020.

### 3.3 ETAPA 3: ESTIMAR DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS ADMISIBLES

Se estiman los desplazamientos sísmicos admisibles según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray y Macedo (2019), teniendo en cuenta las características geométricas del talud y entorno sísmológico. El cálculo del desplazamiento sísmico del talud (D) está en función de  $k_y$ ,  $T_s$ ,  $S_a$  y  $M_w$  y proporciona estimaciones que generalmente son consistentes con casos documentados de presas de tierra y vertederos de residuos sólidos y similitudes con otros métodos simplificados. Es crucial indicar que los análisis que se presentan en este documento corresponden a materiales que registran velocidades de onda de corte entre 180 m/s y 760 m/s lo cual diferentes referencias de normativas, Norma Colombiana Sismo Resistente AIS, 2010 y el Código de Puentes CCP-14, encasilla según la Tabla 5 de perfiles de suelo tipo C y D.

**Tabla 5** Clasificación de Perfiles según Tabla A.2.4-1

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$V_s > 1500$ m/s
<b>B</b>	perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s $> V_s > 760$ m/s
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de onda de corte o,	$760$ m/s $> V_s > 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N > 50$ o $S_u > 100$ KPa (1 Kg/cm <sup>2</sup> )
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de onda de corte o,	$360$ m/s $> V_s > 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las dos condiciones	$50 > N > 15$ o $100$ KPa (1 Kg/cm <sup>2</sup> ) $> S_u > 50$ KPa (0.5 Kg/cm <sup>2</sup> )
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante o,	$180$ m/s $> V_s$
	Perfil que contiene un espesor total H, mayor que 3 m en arcillas blandas	$IP > 20$ $W > 40$ o $50$ Kpa $> S_u$

Fuente: Norma Colombiana Sismo Resistente AIS, 2010 Tabla A.2.4-1

### 3.4 ETAPA 4: ESTIMAR EL COEFICIENTE DE ACELERACIÓN, K

El procedimiento para estimar el coeficiente de aceleración horizontal (k) para análisis pseudoestáticos en taludes, localizados en fallas corticales o de subducción, que involucra los valores de  $T_s$ ,  $K_y$ ,  $S_a$  ( $1,3 T_s$ ) y la magnitud máxima esperada para el sismo, los resultados pueden utilizarse para elaborar un modelo que calcule un (k) que proporcione una evaluación sísmica coherente con el análisis de desplazamiento sísmico del talud. Se considera que el método funciona satisfactoriamente si el resultado en un análisis de estabilidad pseudoestática arroja un  $FS \geq 1,0$ .

A continuación, se enlistan los procedimientos mediante los cuales se estiman los coeficientes de aceleración horizontal empleados en análisis pseudoestáticos teniendo en cuenta los valores de desplazamientos sísmicos generados por sismos ocurridos en diferentes zonas de fuentes sismogénicas, de fallas corticales y de subducción.

### 3.4.1.1 Coeficiente de aceleración horizontal estimado en zonas de sismos inducidos por fallas corticales. (Bray et al, 2018).

Para estimar el coeficiente de aceleración horizontal (k) para zonas de fallas corticales, es con la siguiente formula:

$$k = \exp\left(\frac{-a+\sqrt{b}}{0,49}\right) \quad (15)$$

Donde,

$$a = 2,491 - 0,344\text{Ln}(Sa(1,3Ts)) \quad (16)$$

$$b = a^2 - 0,98(\text{Ln}(Da) - a1 - 2,703\text{Ln}(Sa(1,3Ts)) + 0,089\text{Ln}(Sa(1,3Ts))^2 - a2Ts - a3(Ts)^2 - 0,6070M - \varepsilon \quad (17)$$

Siendo, Da el valor del desplazamiento sísmico admisible, Para las ecuaciones anteriores, si  $Ts \geq 0,10$  s,  $a1 = -5,894$ ,  $a2 = 3,152$  y  $a3 = -0,910$  y para  $T < 0,10$  s,  $a1 = -4,551$ ,  $a2 = -9,688$  y  $a3 = 0,0$ .

### 3.4.1.2 Coeficiente de aceleración horizontal en zonas de sismos inducidos por fallas de subducción (Bray y Macedo, 2019).

Análogamente, los resultados del procedimiento de propuesto para sismos de zonas de subducción se estima el valor del coeficiente de aceleración horizontal (k) para análisis pseudoestáticos en estabilidad de taludes a partir de la siguiente formula:

$$k = \exp\left(\frac{-a+\sqrt{b}}{0,780}\right) \quad (18)$$

Donde,

$$a = 3,353 - 0,538\text{Ln}(Sa(1,5Ts)) \quad (19)$$

$$b = a^2 - 1,560(\text{Ln}(Da) - a1 - 3,060\text{Ln}(Sa(1,5Ts)) + 0,225\text{Ln}(Sa(1,5Ts))^2 - a2Ts - a3(Ts) - 0,550M - \varepsilon \quad (20)$$

Da, desplazamiento sísmico admisible. Para las ecuaciones anteriores, si  $Ts \geq 0,10$  s,  $a1 = -6,896$ ,  $a2 = 3,081$  y  $a3 = -0,803$  y para  $T < 0,10$  s,  $a1 = -5,864$   $a2 = -9,421$  y  $a3 = 0,0$ .

Si se utiliza este valor de  $k_y$  (aceleración crítica) en un análisis de estabilidad de taludes pseudoestático como el coeficiente sísmico,  $k$  y el factor de seguridad  $FS \geq 1$ ; se debe estimar el percentil del desplazamiento sísmico admisible que será menor o igual a ( $D_a$ , cm) este valor, se debe coordinar con el dueño del proyecto y el porcentaje de excedencia de este umbral (por ejemplo, el valor medio  $\varepsilon = 0\%$  o  $16\%$  de excedencia  $\varepsilon = \sigma = 0,73$ ) considerando las consecuencias de rendimiento insatisfactorio a niveles de desplazamiento superiores a este umbral. Se debe conocer el período inicial de la masa potencial deslizante ( $T_s$ ), la demanda sísmica del sitio que se define en términos de la aceleración espectral por debajo de la masa deslizante (que puede incluir la amplificación topográfica) en la zona del periodo, es decir,  $S_a(1,5 T_s)$  y la magnitud de momento del sismo de diseño ( $M_w$ ). Se considera que el método funciona satisfactoriamente si el resultado de  $k$  en un análisis de pseudoestático arroja un  $FS \geq 1,0$ .

### **3.5 ETAPA 5: ANÁLISIS POR BLOQUE DESLIZANTE**

Una vez que se ha determinado la aceleración crítica del talud ( $k_y$ ) y se han seleccionado los acelerogramas que representan el sismo de análisis se estiman los desplazamientos bajo unos escenarios sísmicos, con el fin de comparar los resultados vs los procedimientos de análisis pseudoestáticos simplificados, así como los que involucran un desplazamiento sísmico admisible y posibles limitaciones que se puedan observar para la implementación de este método.

### **3.6 SOFTWARE EMPLEADOS**

Como parte del desarrollo del presente trabajo, se utilizaron algunos programas de computador que representan una herramienta poderosa, la cual se debe utilizar con una comprensión minuciosa de los principios de la mecánica de suelos, un juicio cuidadoso y un alto nivel de control de calidad para garantizar que los resultados sean correctos, toda vez que la validez de los resultados de un análisis es responsabilidad neta del usuario, no del programa. A continuación, se explica en forma breve las características de los programas de computador que se emplean en el presente documento.

- SLIDE 2D

El programa de computador SLIDE fue desarrollado por Rocscience Inc en Toronto, Canadá y es comúnmente utilizado para el análisis de estabilidad de taludes en suelo y roca. Este programa se basa en la teoría de equilibrio límite, permite evaluar superficies de falla circular

y no circular y aquellas que contengan ambos componentes. Adicionalmente, se puede usar para diseñar o analizar taludes naturales o intervenidos antrópicamente como taludes de corte (Rocscience Inc., 2010). La modelación mediante este programa permite incluir las características geométricas de los taludes, estratigrafía del perfil de suelo, parámetros de resistencia, entre otros. Así mismo el software Slide 2D, 2018 facilita el análisis bajo una condición pseudo estática para la obtención de la aceleración crítica  $K_y$ , con un factor de seguridad  $FS = 1,00$ .

- ARCGIS

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica, permite crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG). Los mapas constituyen una forma muy efectiva de organizar, comprender y proporcionar grandes cantidades de información de un modo comprensible universalmente. ArcGIS permite crear una amplia variedad de mapas, entre ellos, mapas Web accesibles en navegadores y dispositivos móviles, diseños de mapa impresos de gran formato, mapas integrados en aplicaciones, etc. Independientemente de cómo se publica, un mapa de ArcGIS es un mapa inteligente que muestra, integra y sintetiza completas capas de información geográfica, ESRI –ARCGIS Resources, 2020.

- SEISMOSIGNAL

Constituye una forma fácil y eficiente de procesar datos del sismo, con una interfaz visual fácil de usar y la capacidad de derivar una serie de parámetros sismo y permite realizar los espectros de respuesta elástica. El programa es capaz de leer los acelerogramas guardados en diferentes formatos de archivos de texto, que luego pueden ser filtrados y corregidos en la línea de base. Para esto último se pueden emplear polinomios de hasta el 3er orden, mientras que se dispone de tres tipos diferentes de filtros digitales, todos ellos capaces de realizar filtrado causal o a causal, paso alto, paso bajo, paso de banda y de tope de banda. Por último, y debido a su plena integración con el entorno Windows, SeismoSignal permite copiar los resultados numéricos y gráficos a cualquier aplicación de Windows (por ejemplo, MS Excel, MS Word, etc.), teniendo en cuenta que las gráficas de características pueden ser totalmente personalizadas desde el propio programa. Seismosoft, 2020.

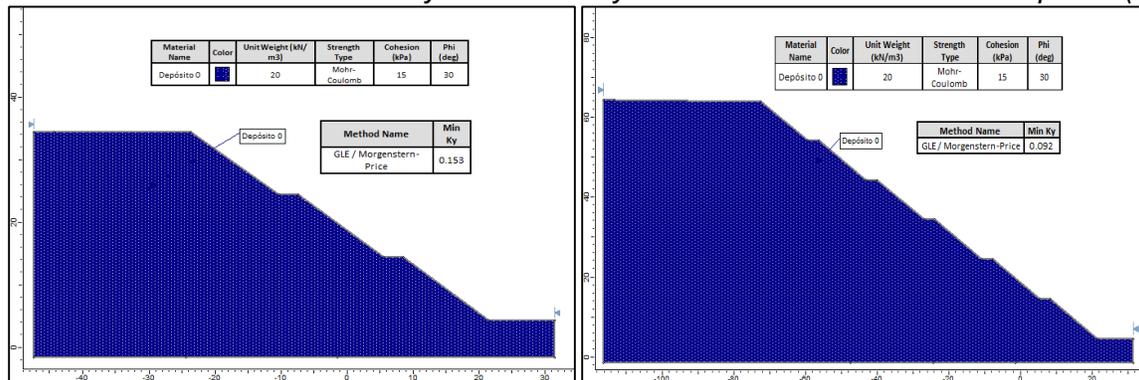
## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta tesis analítica se realizó a partir de modelos numéricos por medio del método de Equilibrio Límite teniendo en cuenta las características sísmicas del país, con el fin de determinar los desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes tipos de taludes de corte. A continuación, se presenta el desarrollo y resultados de la metodología empleada:

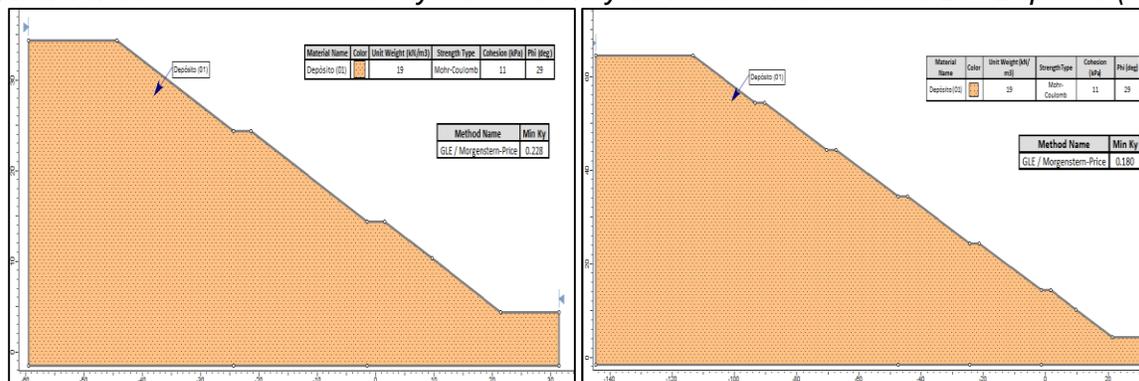
### 4.1 DETERMINACIÓN DE ACELERACIÓN CRÍTICA ( $k_y$ )

Una vez se definen las secciones topográficas y los parámetros de resistencia se realizan los análisis en el software Slide 2D, 2018 que permiten la obtención de la aceleración crítica. En la Tabla 7 se compilan los resultados obtenidos para todos los modelos.

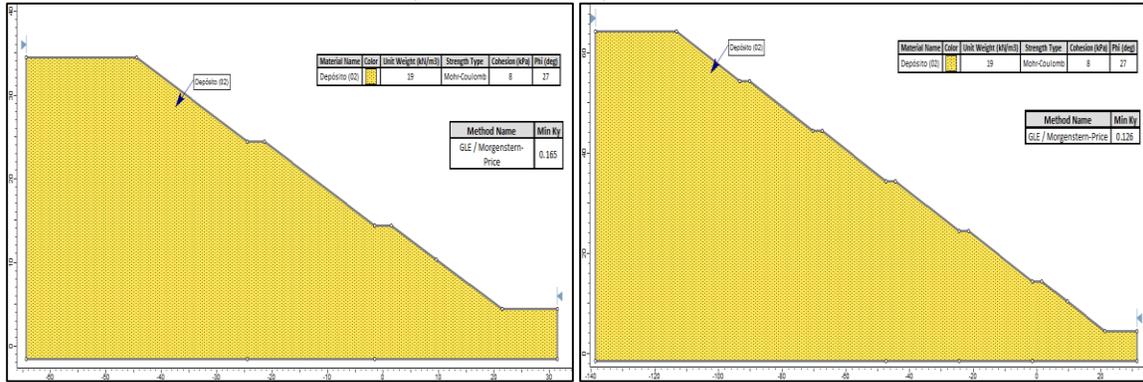
**Figura. 13.** Secciones de análisis  $k_y$ . Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (0)



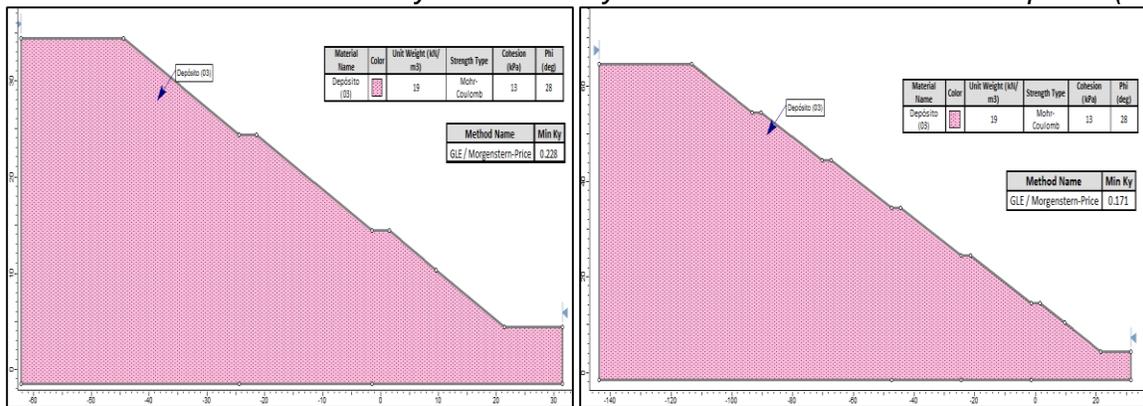
**Figura. 14.** Secciones de análisis  $k_y$ . Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (01)



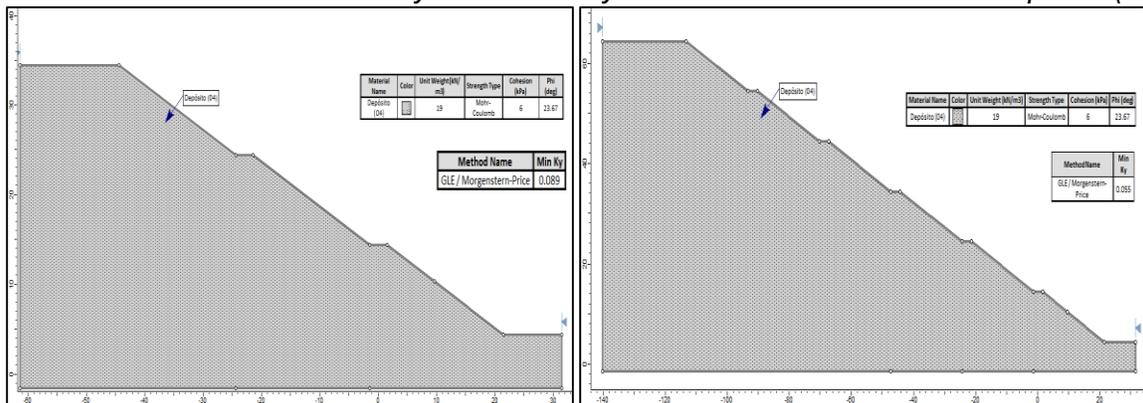
**Figura. 15. Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (02)**



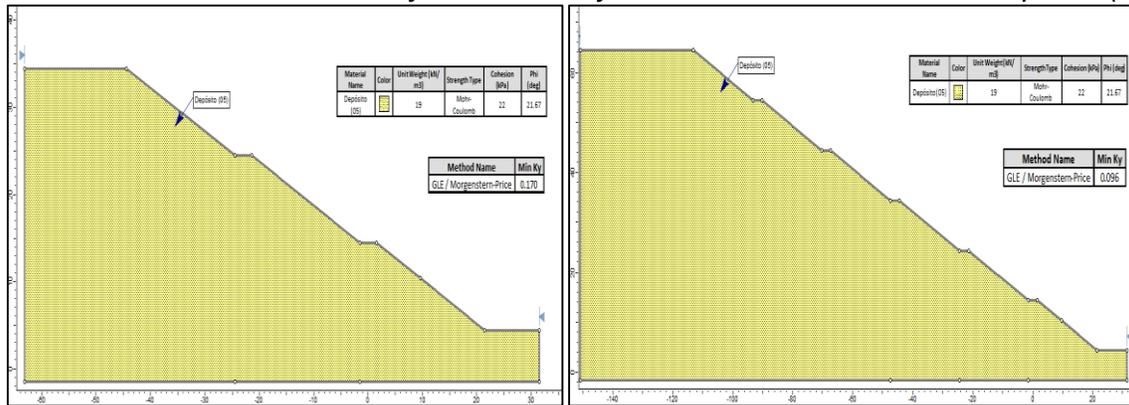
**Figura. 16. Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (03)**



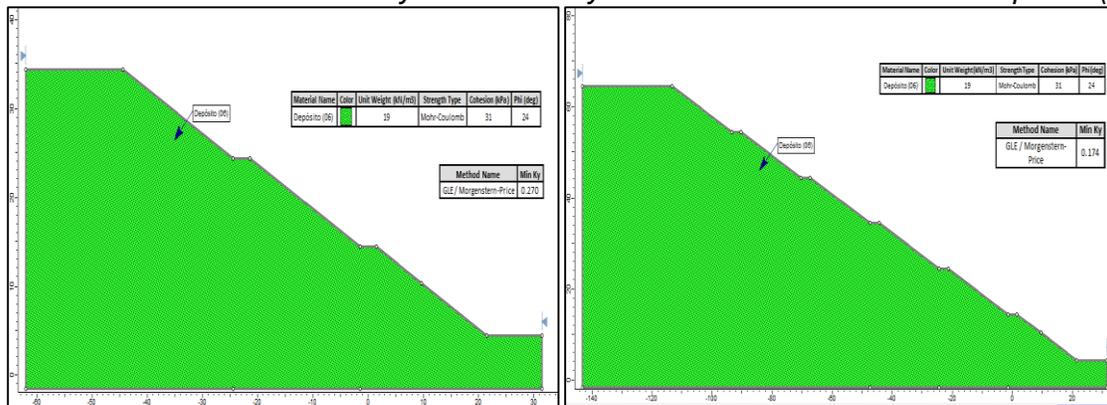
**Figura. 17. Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (04)**



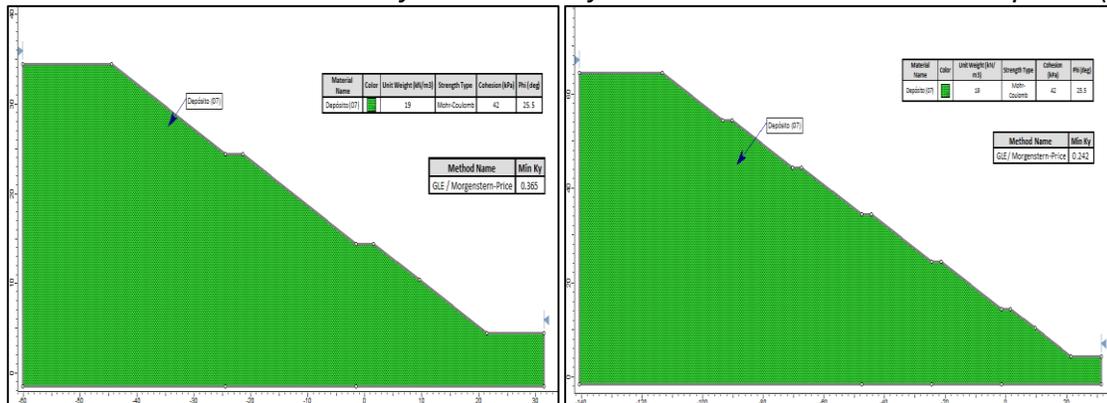
**Figura. 18.** Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (05)



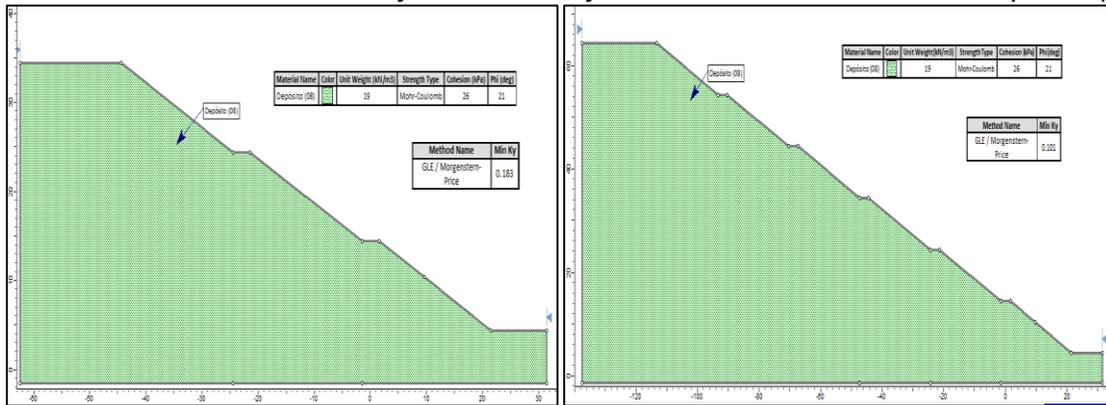
**Figura. 19.** Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (06)



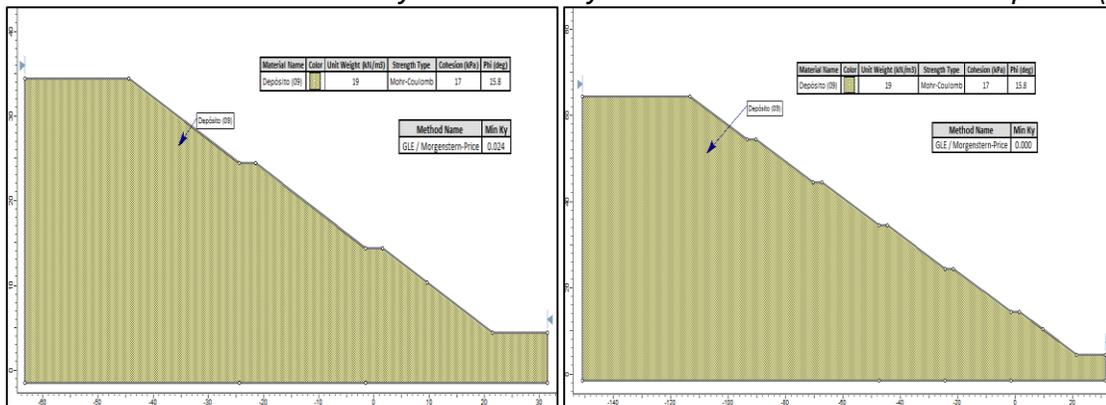
**Figura. 20.** Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (07)



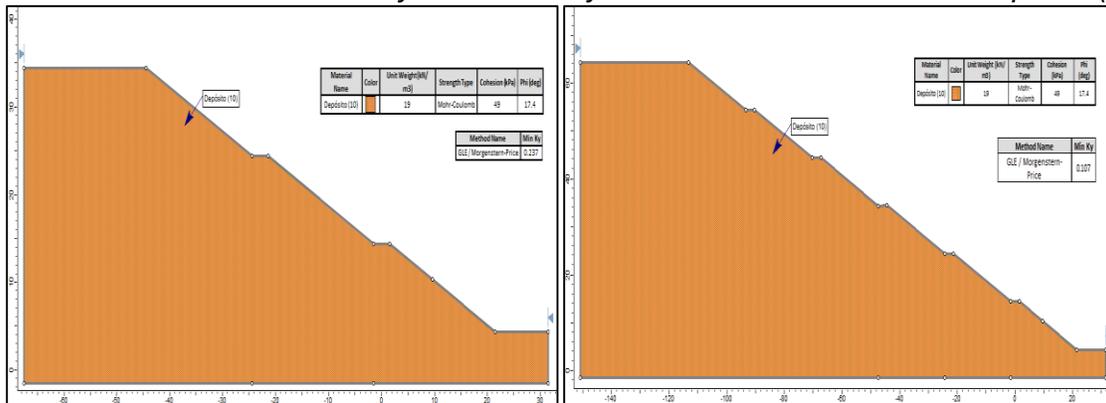
**Figura. 21. Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (08)**



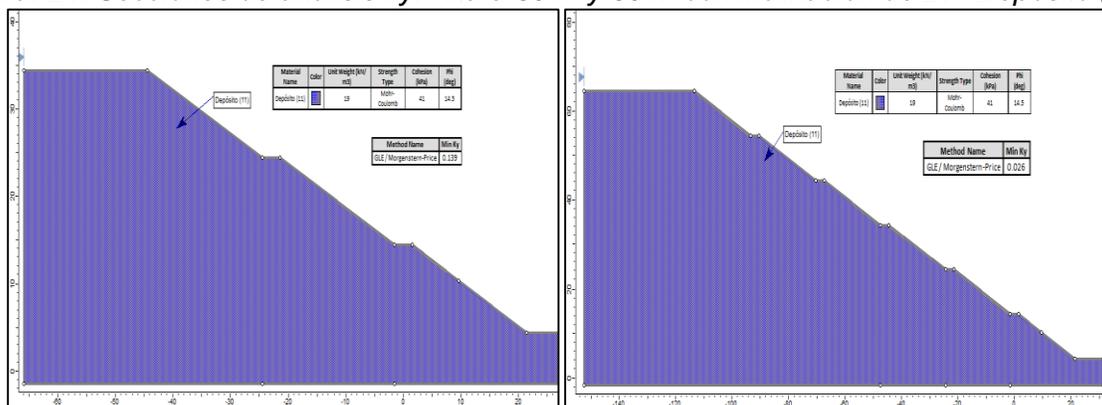
**Figura. 22. Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (09)**



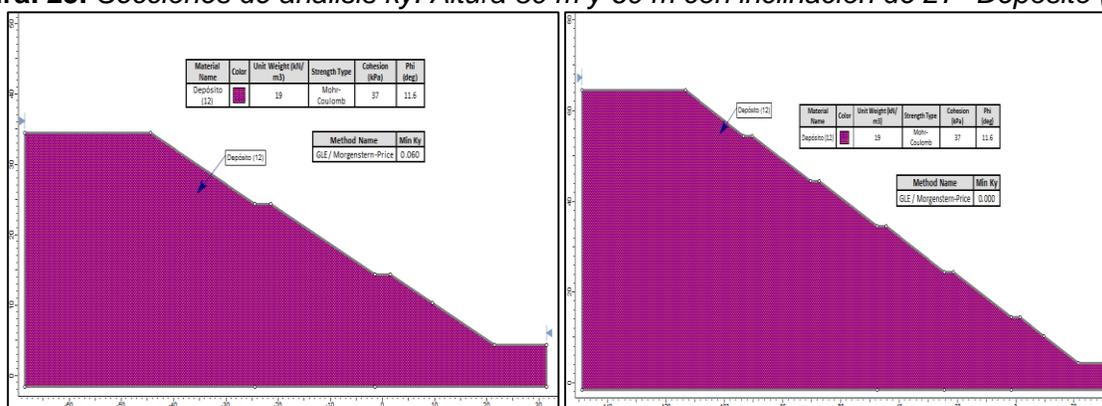
**Figura. 23. Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (10)**



**Figura. 24.** Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (11)



**Figura. 25.** Secciones de análisis ky. Altura 30 m y 60 m con inclinación de 27° Depósito (12)



**Tabla 6.** Valores obtenidos de Aceleración crítica ky, según diferentes parámetros geotécnicos y combinaciones de taludes topográficos.

VALORES DE ky										
Parámetros de análisis		#	Altura (m)	Inclinación						
$\phi'$	c (kPa)			27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°
30	15	0	10	0,439	0,329	0,245	0,157	0,045	0	0
			20	0,336	0,211	0,133	0,046	0	0	0
			30	0,286	0,153	0,078	0	0	0	0
			40	0,257	0,137	0,047	0	0	0	0
			50	0,232	0,109	0,017	0	0	0	0
			60	0,221	0,092	0,006	0	0	0	0
29	11	1	10	0,355	0,240	0,150	0,055	0	0	0
			20	0,263	0,153	0,064	0	0	0	0
			30	0,228	0,105	0,022	0	0	0	0
			40	0,204	0,092	0	0	0	0	0
			50	0,188	0,071	0	0	0	0	0
			60	0,180	0,058	0	0	0	0	0
27	8	2	10	0,259	0,127	0,028	0	0	0	0
			20	0,193	0,08	0	0	0	0	0
			30	0,165	0,035	0	0	0	0	0
			40	0,150	0,031	0	0	0	0	0

VALORES DE $k_y$										
Parámetros de análisis		#	Altura (m)	Inclinación						
$\phi'$	c (kPa)			27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°
			50	0,133	0,009	0	0	0	0	0
			60	0,126	0,002	0	0	0	0	0
			70	0,122	0	0	0	0	0	0
			10	0,368	0,266	0,18	0,090	0	0	0
			20	0,268	0,159	0,081	0	0	0	0
			30	0,228	0,105	0,027	0	0	0	0
			40	0,203	0,091	0	0	0	0	0
			50	0,185	0,067	0	0	0	0	0
			60	0,171	0,048	0	0	0	0	0
			70	0,163	0,038	0	0	0	0	0
			10	0,150	0,011	0	0	0	0	0
			20	0,110	0	0	0	0	0	0
			30	0,089	0	0	0	0	0	0
			40	0,074	0	0	0	0	0	0
			50	0,064	0	0	0	0	0	0
			60	0,055	0	0	0	0	0	0
			70	0,050	0	0	0	0	0	0
			10	0,386	0,324	0,266	0,189	0,112	0,028	0
			20	0,233	0,148	0,073	0	0	0	0
			30	0,170	0,066	0	0	0	0	0
			40	0,134	0,04	0	0	0	0	0
			50	0,112	0,001	0	0	0	0	0
			60	0,096	0	0	0	0	0	0
			70	0,086	0	0	0	0	0	0
			10	0,560	0,507	0,451	0,396	0,381	0,243	0,072
			20	0,351	0,283	0,221	0,143	0,068	0	0
			30	0,270	0,18	0,114	0	0	0	0
			40	0,225	0,135	0,06	0	0	0	0
			50	0,194	0,093	0,025	0	0	0	0
			60	0,174	0,065	0	0	0	0	0
			70	0,049	0,049	0	0	0	0	0
			10	0,755	0,707	0,635	0,589	0,590	0,631	0,264
			20	0,471	0,405	0,347	0,290	0,220	0,158	0,000
			30	0,365	0,282	0,227	0,176	0,077	0	0
			40	0,302	0,226	0,151	0,083	0	0	0
			50	0,266	0,175	0,108	0,032	0	0	0
			60	0,242	0,143	0,074	0	0	0	0
			70	0,222	0,120	0,039	0	0	0	0
			10	0,426	0,375	0,324	0,259	0,244	0,111	0
			20	0,253	0,179	0,108	0,025	0	0	0
			30	0,183	0,085	0,015	0	0	0	0
			40	0,143	0,050	0	0	0	0	0
			50	0,116	0,009	0	0	0	0	0
			60	0,101	0	0	0	0	0	0
			70	0,086	0	0	0	0	0	0
			10	0,195	0,111	0,049	0	0	0	0
			20	0,075	0	0	0	0	0	0
			30	0,024	0	0	0	0	0	0
			40	0,00	0	0	0	0	0	0

VALORES DE $k_y$										
Parámetros de análisis		#	Altura (m)	Inclinación						
$\phi'$	c (kPa)			27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°
			50	0	0	0	0	0	0	0
			60	0	0	0	0	0	0	0
			70	0	0	0	0	0	0	0
17,4	49	10	10	0,621	0,640	0,591	0,566	0,552	0,565	0,296
			20	0,356	0,308	0,265	0,214	0,145	0,118	0
			30	0,237	0,169	0,116	0,065	0	0	0
			40	0,177	0,103	0,037	0	0	0	0
			50	0,134	0,050	0	0	0	0	0
			60	0,107	0,016	0	0	0	0	0
			70	0,087	0	0	0	0	0	0
14,5	41	11	10	0,613	0,467	0,431	0,405	0,399	0,301	0,118
			20	0,304	0,204	0,154	0,097	0,027	0	0
			30	0,139	0,062	0,008	0	0	0	0
			40	0,087	0,003	0	0	0	0	0
			50	0,050	0	0	0	0	0	0
			60	0,026	0	0	0	0	0	0
			70	0,008	0	0	0	0	0	0
11,6	37	12	10	0,478	0,355	0,319	0,297	0,289	0,192	0,015
			20	0,188	0,092	0,039	0	0	0	0
			30	0,060	0	0	0	0	0	0
			40	0,011	0	0	0	0	0	0
			50	0	0	0	0	0	0	0
			60	0	0	0	0	0	0	0
			70	0	0	0	0	0	0	0

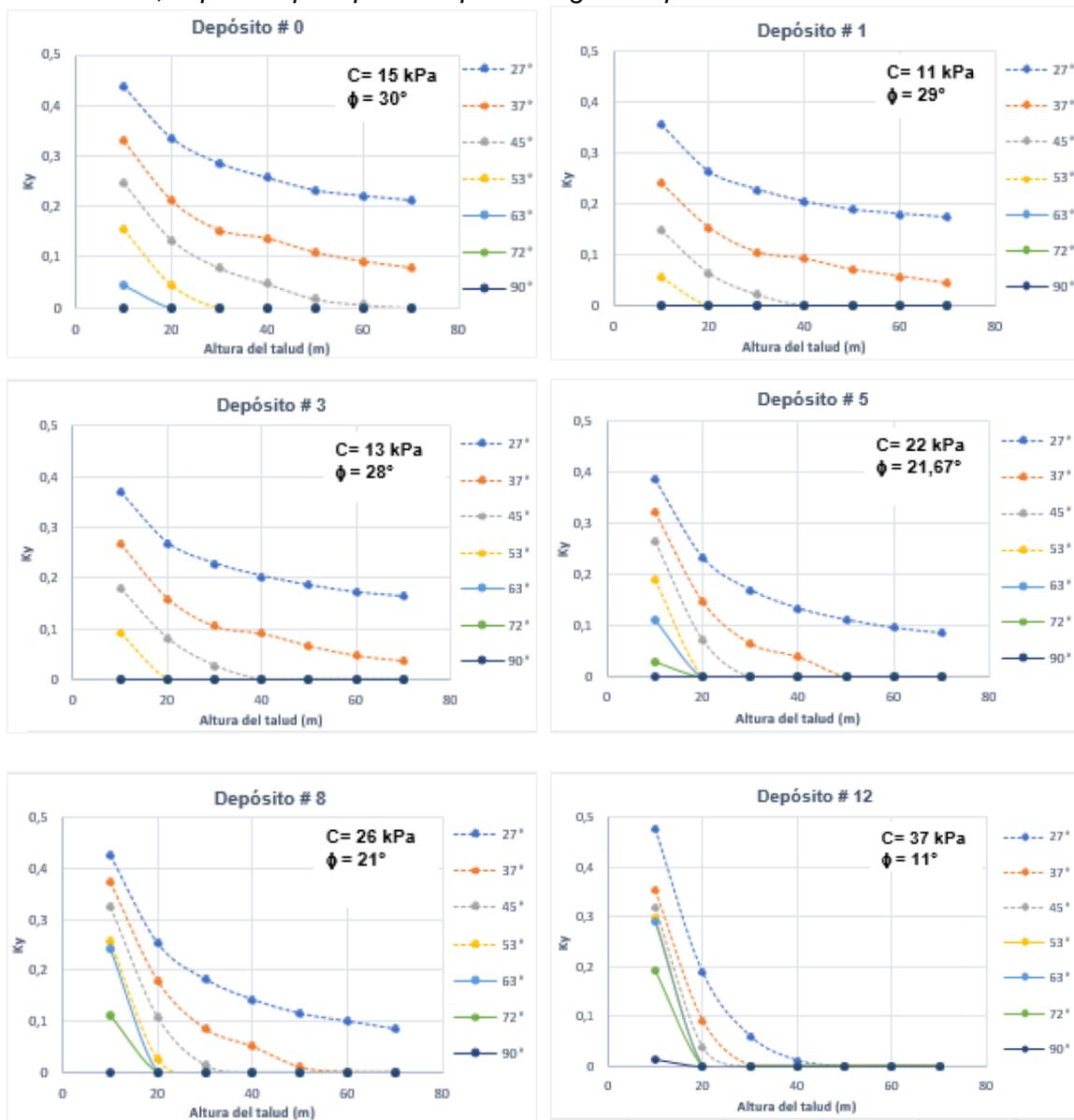
De acuerdo con los valores obtenidos de aceleración crítica se evidencia que,  $k_y$  depende además de la configuración geometría del talud de los parámetros de resistencia, por lo cual es razonable asumir que, con excepción a gravas gruesas a muy gruesas, cantos o materiales granulares, el suelo no drena apreciablemente por lo que deben considerarse propiedades 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. (Bray et al, 2018).

La variación de la aceleración crítica,  $k_y$ , se puede observar en la discretización de la graficas  $k_y$  vs altura e inclinación de talud mostrados desde la Figura. 26 hasta Figura. 30. Posteriormente, en los análisis se logró identificar tres (3) grupos variación de la aceleración crítica por ejemplo, los depósitos en los cuales se tienen cohesión entre 11 kPa a 37 kPa y ángulo de fricción interno entre 11° y 30° (Ver Tabla 7) presentan valores de  $k_y < 0,5$ .

**Tabla 7.** Grupo 1. Parámetros geotécnicos de referencia para la determinación aceleración crítica,  $k_y$ .

PARÁMETROS DE ANÁLISIS		
#	$\phi$	C Kpa
0	30,0	15
1	29,0	11
3	28,0	13
5	21,67	22
8	21,0	26
12	11,6	37

**Figura. 26** Grupo 1. Variación del coeficiente de aceleración crítica,  $k_y$  vs altura e inclinación del talud, separado por tipo de depósito según los parámetros de análisis.

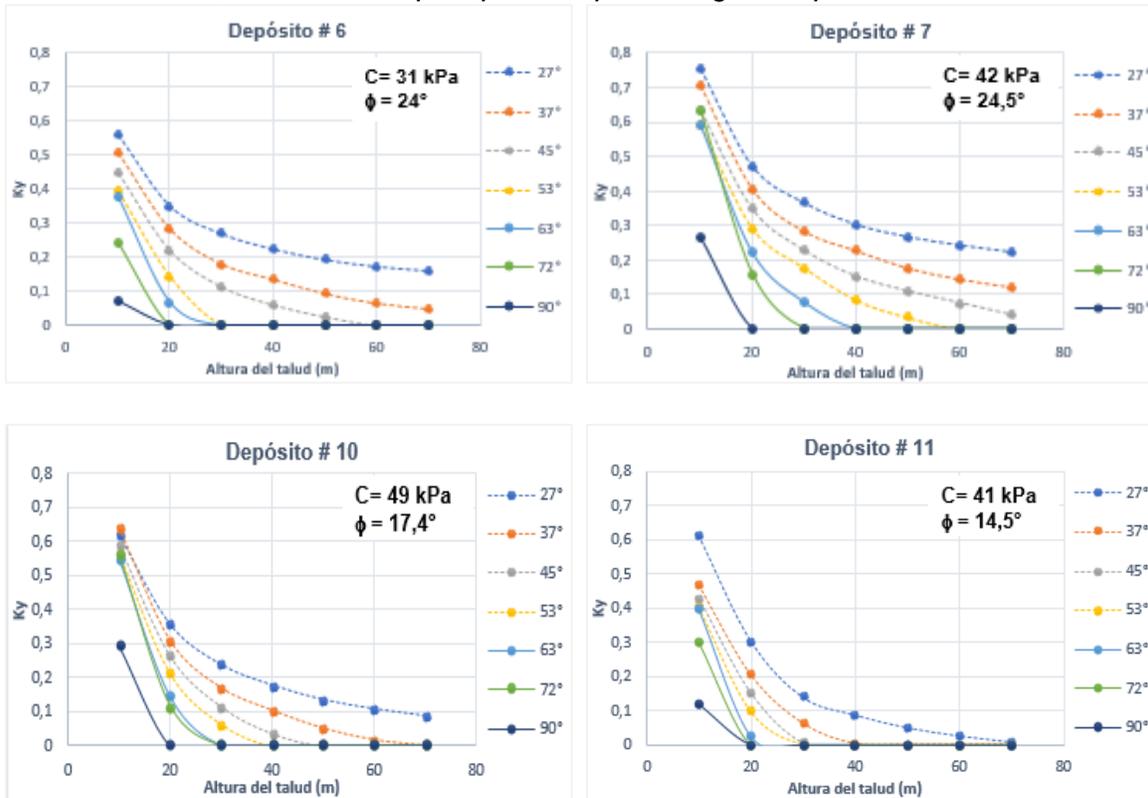


El segundo grupo de depósitos tienen parámetros de resistencia mayores (Ver Tabla 8), ángulo de fricción interna entre 14,5° y 25,5 ° y cohesión entre 31 kPa y 49 kPa por lo que se obtienen valores más altos de aceleración crítica,  $k_y$  hasta 0,8. En la Figura 44 se puede ver la variación de  $k_y$  tanto en altura como en valores de cohesión y ángulo de fricción.

**Tabla 8.** Grupo 2. Parámetros geotécnicos de referencia para la determinación aceleración crítica,  $k_y$ .

PARÁMETROS DE ANÁLISIS		
#	$\phi$	C Kpa
6	24,0	31
7	25,5	42
10	17,4	49
11	14,5	41

**Figura. 27** Grupo 2. Variación del coeficiente de aceleración crítica,  $k_y$  vs Altura e inclinación del talud, discretizando por tipo de depósito según los parámetros de análisis.

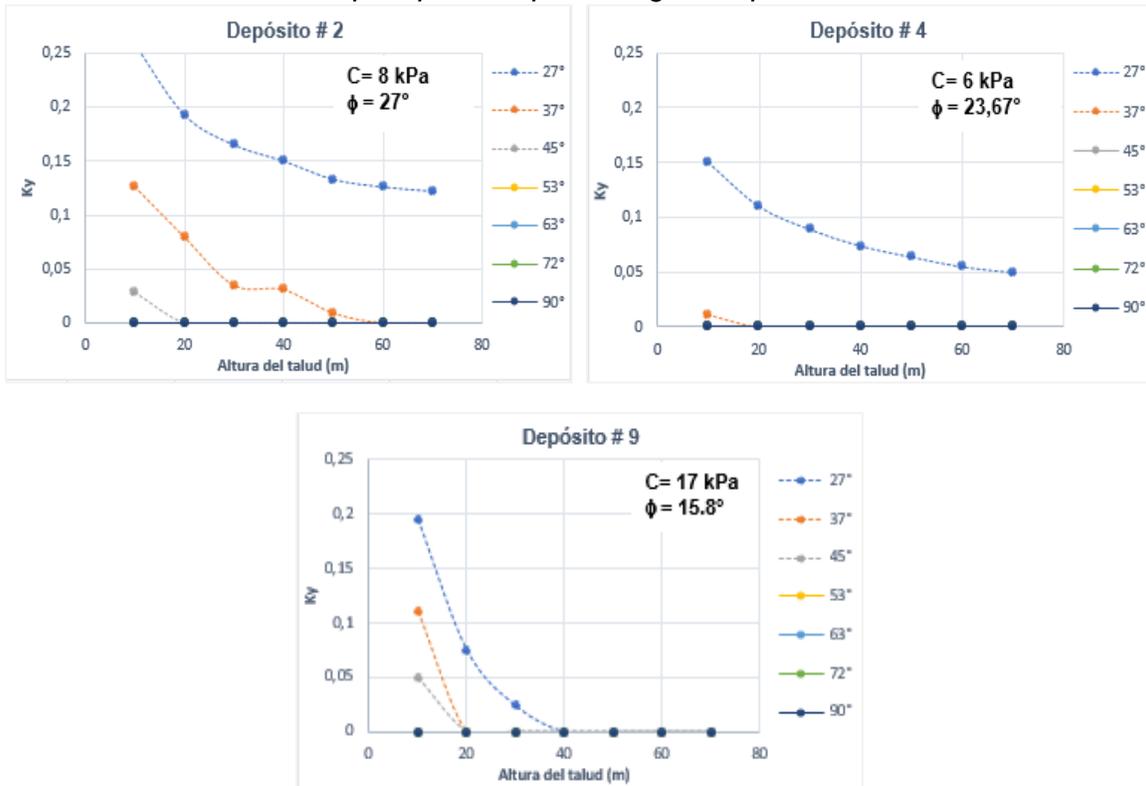


El último grupo de depósitos se caracteriza porque tiene valores de parámetros de resistencia inferiores (Ver Tabla 34), ángulo de fricción interna entre 15,8° y 23,67 ° y cohesión entre 6 kPa a 17 kPa, razón por la cual se obtienen valores bajos de aceleración crítica,  $k_y < 0,25$  como se puede ver en la Figura. 28.

**Tabla 9.** Grupo 3. Parámetros geotécnicos de referencia para la determinación aceleración crítica,  $k_y$ .

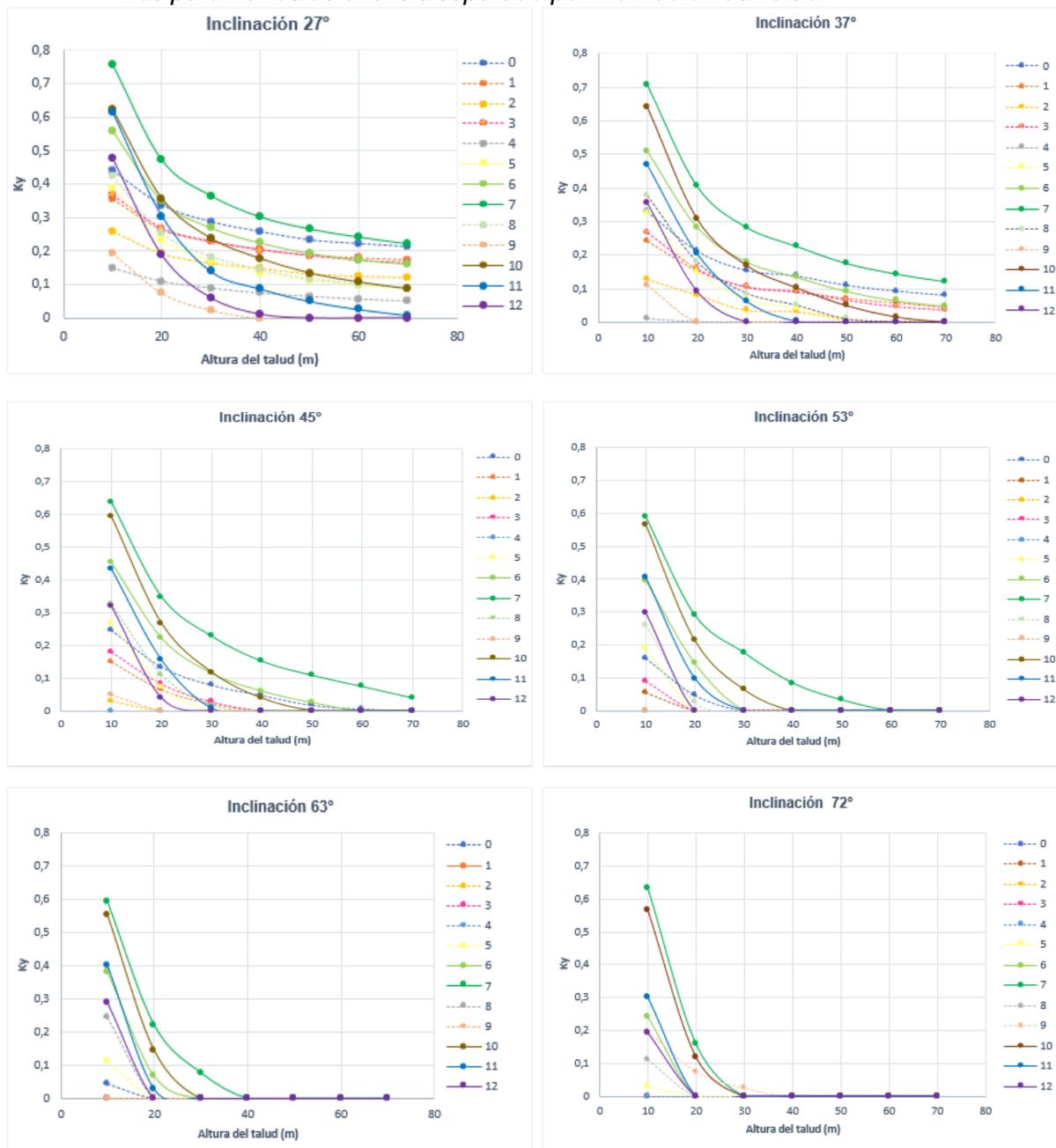
PARÁMETROS DE ANÁLISIS		
#	$\phi$	C (kPa)
2	27,0	8
4	23,67	6
9	15,8	17

**Figura. 28** Grupo 3. Variación del coeficiente de aceleración crítica,  $k_y$  vs Altura e inclinación del talud, discretizando por tipo de depósito según los parámetros de análisis.



**Finalmente,** es posible observar que son los taludes que logran aceleraciones críticas,  $k_y$  mayores ( $k_y = 0,8$ ) contrario a los taludes con bajos parámetros de resistencia los que registran  $k_y$  entre 0,25 hasta 0,5 independiente de la inclinación de corte del talud. Esta variación se puede observar en la Figura. 29 con líneas continuas corresponden a depósitos de mayor resistencia al corte y las líneas a trazas a depósitos con bajos parámetros de resistencia.

**Figura. 29** Variación del coeficiente de aceleración crítica,  $k_y$  vs altura y tipo de depósito según los parámetros de análisis separado por inclinación del talud.



## 4.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESPECTRO SÍSMICO

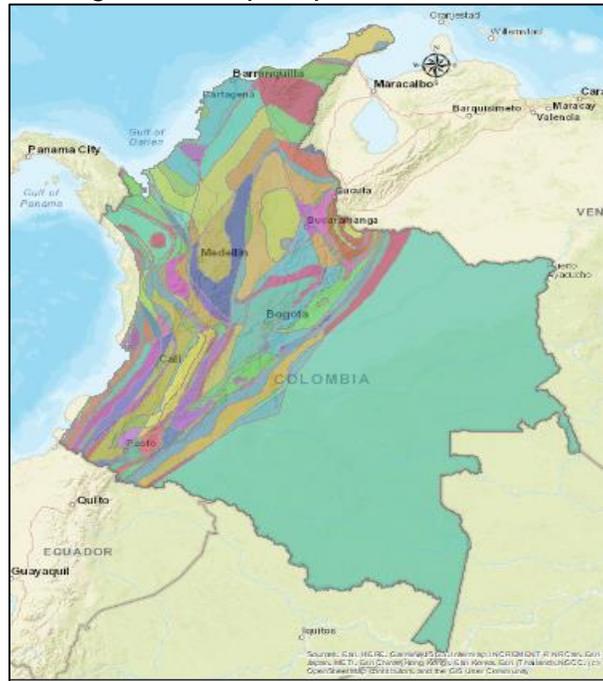
Inicialmente se indica que bajo las diferentes normativas que aplican en el análisis pseudoestático en Colombia no se presenta una discretización que tenga en cuenta la variación en el espectro sísmico de cada ciudad, tipo de fuente sismogénica y la magnitud asociada al sismo que podría generar, por lo que ciudades localizadas geográficamente distantes se

identifican con el mismo valor de PGA, pero, son afectados por diferentes fuentes sismogénicas y magnitud. A continuación, se presenta un ejemplo de las incertidumbres involucradas y las afectaciones de no incluir estas variables.

#### 4.2.1 Análisis de afectación por no diferenciación de fuente sismogénica

En la Figura. 30 se muestra el mapa de integración de PGA, Ss (0,2s) y S1(1,0s) con las fuentes sismogénicas de origen cortical para un período de retorno de 475 años en el cual se obtiene 170 zonas y en la Tabla 10 se presentan características de algunas zonas.

**Figura. 30.** Integración mapa de zonificación del PGA, Ss (0,2s) y S1(1,0s) con fuentes sismogénicas de origen cortical para período de retorno de 475 años.



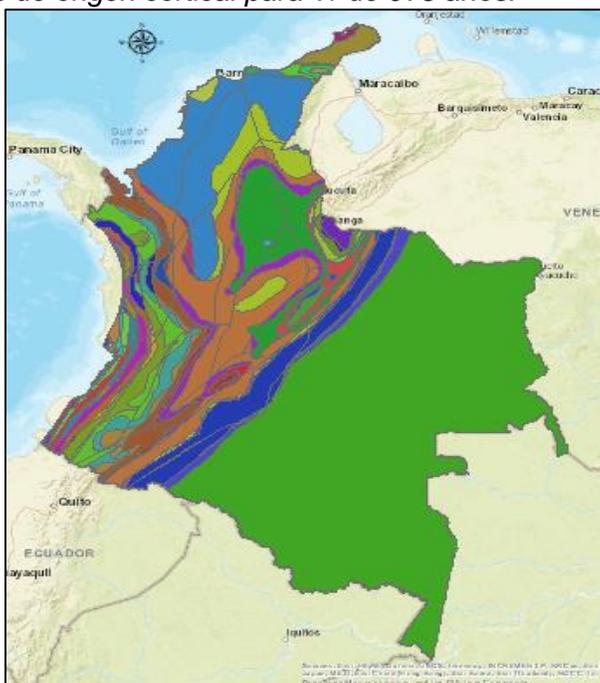
Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2018.

**Tabla 10.** Integración del PGA, Ss (0.2s) y S1(1,0s) con las fuentes corticales para Tr de 475 años

ZONA	Zona_C	PGA	S1 (1.0s)	Ss (0.2s)	FID_cortic	area_t	a_gr	b_gr	máx_mag	mín_mag
0	1	0,05	0,05	0,2	0	cc_25	3,55	0,925	6,6	5
1	1	0,05	0,05	0,2	5	cc_24	3,756	1,028	7,4	5
2	1	0,05	0,05	0,2	17	cc_10	4,775	1,103	6,65	5
3	1	0,05	0,05	0,2	26	cc_03	3,608	0,942	6,82	5
4	4	0,55	0,3	1,2	24	cc_16	2,82	0,739	6,8	5
5	4	0,55	0,3	1,2	25	cc_11	4,226	1,024	6,5	5

En la Figura. 31 se identifica el mapa con PGA, Ss (0,2s), S1(1,0s) y las fuentes sísmogénicas de origen cortical para un período de retorno de 975 años así como en la Tabla 11 se presenta las características de algunas de las 288 zonas resultantes.

**Figura. 31.** Integración mapa de zonificación del PGA, Ss (0,2s), S1(1,0s) con las fuentes sísmogénicas de origen cortical para Tr de 975 años.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2018.

**Tabla 11.** Integración del PGA, Ss (0,2s) y S1 (SI 1,0s) con las fuentes corticales Tr de 975 años

FID	Zona_C	PGA	S1 (1.0s)	Ss (0.2s)	FID_cortic	area_t	a_gr	b_gr	máx_má g	mín_má g
0	0	0,1	0,05	0,2	0	cc_25	3,55	0,925	6,6	5
1	0	0,1	0,05	0,2	5	cc_24	3,756	1,028	7,4	5
2	1	0,1	0,1	0,2	0	cc_25	3,55	0,925	6,6	5
3	1	0,1	0,1	0,2	5	cc_24	3,756	1,028	7,4	5
4	2	0,3	0,1	0,6	15	cc_05	3,479	0,916	6,5	5
5	2	0,3	0,1	0,6	16	cc_08	2,753	0,798	6,7	5

De acuerdo con los mapas presentados tanto en la Figura 12 como Figura 13 es posible que, ciudades como Riohacha, Montería, Barranquilla o Cartagena así como Arauca y Leticia que se encuentran geográficamente alejadas tienen parámetros sísmicos de diseño iguales (PGA, Ss (0,2 s), S1 (1,0 s) pero, están afectadas por diferentes fuentes corticales y magnitud que varía desde Mw 6,6 hasta Mw 7,4, lo relevante es que según las normativas en Colombia **no** se tiene en cuenta la magnitud asociada a cada fuente sísmogénica, variable de la cual depende la generación de desplazamiento sísmicos en taludes y por ende los análisis de estabilidad **son**

iguales para todo el país sin tener en cuenta esta condición. Las características sísmicas, así como los valores de magnitud de cada ciudad se presentan a continuación en la Tabla 12:

**Tabla 12.** Integración PGA, Ss (0,2s) y S1 (1,0s) con las fuentes corticales para Tr 475 años

ZONA	Ciudad	Zona_C	PGA	S1 (1.0s)	Ss (0.2s)	area_t	a_gr	b_gr	máx_mag	mín_mag
0	Arauca, Amazonía, Leticia	1	0,05	0,05	0,2	cc_25	3,55	0,925	6,6	5
1	Área abierta	1	0,05	0,05	0,2	cc_24	3,756	1,028	7,4	5
2	Riohacha	1	0,05	0,05	0,2	cc_10	4,775	1,103	6,65	5
3	Montería, Barranquilla, Cartagena	1	0,05	0,05	0,2	cc_03	3,608	0,942	6,82	5

Otro ejemplo de ciudades que están ubicadas en extremos geográficos del país, pero tienen parámetros sísmicos de diseño iguales son Saravena, Popayán e Ítsmina, pero, no se tiene en cuenta la fuente sismogénica que los afecta evidenciada la variación en la magnitud con valores de Mw entre 6,5 y 7,5, tal como se resume a continuación en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Integración del PGA, Ss (0,2s) y S1 (1,0s) con las fuentes corticales para Tr 475 años

ZONA	Ciudad	Zona_C	PGA	S1 (1.0s)	Ss (0.2s)	area_t	a_gr	b_gr	máx_mag	mín_mag
21	Saravena	10	0,35	0,2	0,8	cc_15	3,72	0,86	7,5	5
22	Corinto	10	0,35	0,2	0,8	cc_18	2,551	0,702	7,08	5
23	Popayán, Tuluá	10	0,35	0,2	0,8	cc_17	2,049	0,05	6,81	5
24	Ítsmina	10	0,35	0,2	0,8	cc_11	4,226	1,024	6,5	5
25	Norte de Quibdó	10	0,35	0,2	0,8	cc_02	4,622	0,995	7,4	5

De igual forma, ciudades como Florencia, Tunja y Necoclí tienen PGA iguales, pero diferentes valores de magnitud variando desde Mw 6,5 hasta Mw 7,4. Las características sísmicas, así como los valores de magnitud de cada ciudad se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Integración PGA, Ss (0,2s) y S1 (1,0s) con las fuentes corticales para Tr de 475 años

ZONA	Ciudad	Zona_C	PGA	S1 (1.0s)	Ss (0.2s)	area_t	a_gr	b_gr	máx_mag	mín_mag
42	Florencia	22	0,2	0,1	0,4	cc_24	3,756	1,028	7,4	5
43	Cerca Mocoa	22	0,2	0,1	0,4	cc_22	2,631	0,694	7,0	5
47	Tunja, Villeta	22	0,2	0,1	0,4	cc_20	3,135	0,832	6,8	5
53	Salgar	22	0,2	0,1	0,4	cc_11	4,226	1,024	6,5	5
55	Bahía Necoclí	22	0,2	0,1	0,4	cc_02	4,622	0,995	7,4	5

Cuando zonas con iguales características sísmicas, PGA, Ss (0,2 s), S1 (1,0 s) se les tienen en cuenta las fuentes sismogénicas de origen intra-placa/ subducción, se evidencia que son

diferenciadas por valores de magnitud del momento, que es la variable de la cual depende el comportamiento de los taludes durante la ocurrencia de un evento sísmico, Por ejemplo, para ciudades como Nuqui, Buenaventura, o la costa de Cauca o Valle del Cauca con iguales PGA, Ss (0,2 s) y S1 (1,0 s) la magnitud varía desde Mw 7,5 hasta Mw 8,0 cómo es posible ver en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Integración del PGA, Ss (0.2s) y S1 (1.0s) con las fuentes de intra-placa/subducción para Tr 475 años

CIUDAD	ZONA	Zonas_In	PGA	S1 (1.0s)	Ss (0.2g)	Fuente sismogénica	a_gr	b_gr	máx_mag	mín_mag
Costa Cauca, Valle del Cauca (17 Km)	0	3	0,55	0,3	1,2	0_In_Slab_40	3,69	0,77	7,5	6
Nuqui, Choco	15	50	0,55	0,35	1,2	2_Interfase_02	2,91	0,69	7,8	6
Buenaventura	1	3	0,55	0,3	1,2	1_Interfase_01	2,79	0,72	8,0	6

La importancia de mostrar los ejemplos anteriores es que ciudades que distan geográficamente entre ellas tiene las mismas características sísmicas de análisis, PGA, Ss (0,2 s), S1 (1,0 s), por lo que todos los análisis de estabilidad son iguales para todo el país, pero, si se involucra el tipo de fuente sismogénica que podría generar el sismo que está representado por la magnitud de momento, variable de la cual depende el análisis de desplazamiento sísmicos en taludes.

Lo relevante es que según las normativas en Colombia **no** se tiene en cuenta la diferenciación de cada fuente sismogénica asociada (Cortical o Subducción), ni las características del contenido frecuencial, magnitud de momento máxima que pudiese generar el sismo por cada periodo de retorno.

Por otra parte, las actuales normativas para los análisis de estabilidad de taludes en condición pseudoestática, no tienen en cuenta el contenido frecuencial de la fuente sismogénica que afecta cada área, en especial la aceleración espectral (Sa) esta variable involucra además el periodo de vibración del talud de análisis, así como las características de resistencia representadas por la Velocidad de onda de corte (Vs).

#### **4.2.2 Cálculo de aceleración espectral a Sa**

El período de vibración del talud Ts se estima como  $T_s = 4H/V_s$  (H = altura del talud) y para análisis que involucran fuentes sismogénicas de origen cortical se limita a perfiles de suelo Vs <

450 m/s, mientras que para fuentes de subducción es hasta  $V_s = 760$  m/s. Los valores obtenidos se presentan a continuación desde la Tabla 16 hasta Tabla 18.

**Tabla 16** *Período de vibración  $T_s$  Vs < 450 m/s*

Período de Vibración $T_s$										
Altura del Talud (m)	Vs (m/s) PERFIL D							Vs (m/s) PERFIL C		
	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450
10	0,222	0,190	0,167	0,148	0,133	0,121	0,111	0,103	0,095	0,089
20	0,444	0,381	0,333	0,296	0,267	0,242	0,222	0,205	0,190	0,178
30	0,667	0,571	0,500	0,444	0,400	0,364	0,333	0,308	0,286	0,267
40	0,889	0,762	0,667	0,593	0,533	0,485	0,444	0,410	0,381	0,356
50	1,111	0,952	0,833	0,741	0,667	0,606	0,556	0,513	0,476	0,444
60	1,333	1,143	1,000	0,889	0,800	0,727	0,667	0,615	0,571	0,533
70	1,556	1,333	1,167	1,037	0,933	0,848	0,778	0,718	0,667	0,622

**Tabla 17** *Período de vibración  $T_s$  para Perfil de Suelo D*

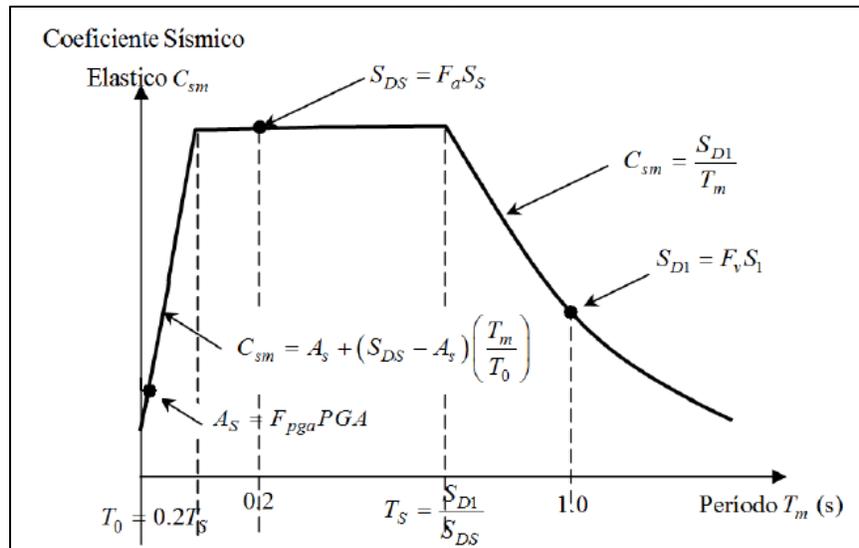
Período de Vibración $T_s$								
Altura del Talud (m)	Vs (m/s) PERFIL DE SUELO D							
	180	210	240	270	300	330	360	390
10	0,222	0,190	0,167	0,148	0,133	0,121	0,111	0,103
20	0,444	0,381	0,333	0,296	0,267	0,242	0,222	0,205
30	0,667	0,571	0,500	0,444	0,400	0,364	0,333	0,308
40	0,889	0,762	0,667	0,593	0,533	0,485	0,444	0,410
50	1,111	0,952	0,833	0,741	0,667	0,606	0,556	0,513
60	1,333	1,143	1,000	0,889	0,800	0,727	0,667	0,615
70	1,556	1,333	1,167	1,037	0,933	0,848	0,778	0,718

**Tabla 18** *Período de vibración  $T_s$  para Perfil de Suelo C*

Período de Vibración $T_s$								
Altura del Talud (m)	Vs (m/s) PERFIL DE SUELO C							
	410	450	510	560	610	660	710	760
10	0,098	0,089	0,078	0,071	0,066	0,061	0,056	0,053
20	0,195	0,178	0,157	0,143	0,131	0,121	0,113	0,105
30	0,293	0,267	0,235	0,214	0,197	0,182	0,169	0,158
40	0,390	0,356	0,314	0,286	0,262	0,242	0,225	0,211
50	0,488	0,444	0,392	0,357	0,328	0,303	0,282	0,263
60	0,585	0,533	0,471	0,429	0,393	0,364	0,338	0,316
70	0,683	0,622	0,549	0,500	0,459	0,424	0,394	0,368

De igual forma se debe conocer el valor de aceleración espectral  $S_a$  para período de 1,3  $T_s$   $S_a(1,3 T_s)$  y ,1,5  $T_s$   $S_a(1,5 T_s)$ , por lo cual se utiliza el procedimiento presentado en el Código de Puentes CCP-14 en la Sección 3-Cargas y Factores de carga capítulo 3.10.4- Caracterización de la Amenaza Sísmica, 3.10.4.1-Espectro de Diseño el cual se presenta en la Figura 32.

**Figura. 32** Espectro de aceleraciones de diseño para 5% de amortiguamiento



Nota: Tomado del Código de Puentes CCP-14 en la Sección 3-Cargas y Factores de carga capítulo 3.10.4-Characterización de la Amenaza Sísmica.

- Coeficiente Elástico de respuesta sísmica

Para períodos iguales o menores que  $T_0$ , el coeficiente sísmico elástico para el modo de vibración  $m$ ,  $C_{sm}$ , debe ser:

$$C_{sm} = A_s + (S_{DS} - A_s) * \left(\frac{T_m}{T_0}\right) \quad (21)$$

En el cual:

$$A_s = F_{pga}PGA \quad S_{DS} = F_a S_s \quad (22)$$

Donde:

PGA = Coeficiente de aceleración espectral pico del terreno en roca (Perfil de suelo Tipo B).

FPGA = Factor de amplificación por efecto del perfil de suelo

Ss = Coeficiente de aceleración espectral de respuesta horizontal para un periodo de vibración de 0,2 segundos en roca (Perfil de suelo Tipo B).

Tm = Periodo de vibración del modo de vibración  $m$  en segundos.

T0 = Periodo de vibración de referencia empleado para definir la forma espectral e igual a 0,2 segundos.

Ts = Periodo de vibración que define el punto en el cual el espectro de aceleraciones cambia de la zona donde es independiente del periodo a ser inversamente proporcional al periodo =  $S_{D1}/S_{DS}$ , en segundos. Para períodos mayores o iguales que T0 y menores o iguales a Ts, el coeficiente sísmico elástico de respuesta sísmica  $C_m$ , debe ser:

$$C_{Sm} = S_{DS} \quad (23)$$

Para períodos mayores a Ts, el coeficiente sísmico elástico de respuesta sísmica  $C_m$ , debe tomarse como:

$$C_{Sm} = \frac{S_{D1}}{T_m} \quad (24)$$

En el cual:

$$S_{D1} = F_V S1 \quad (25)$$

Donde, S1 = Coeficiente de aceleración espectral de respuesta horizontal para un periodo de vibración de 1,0 segundo en roca.

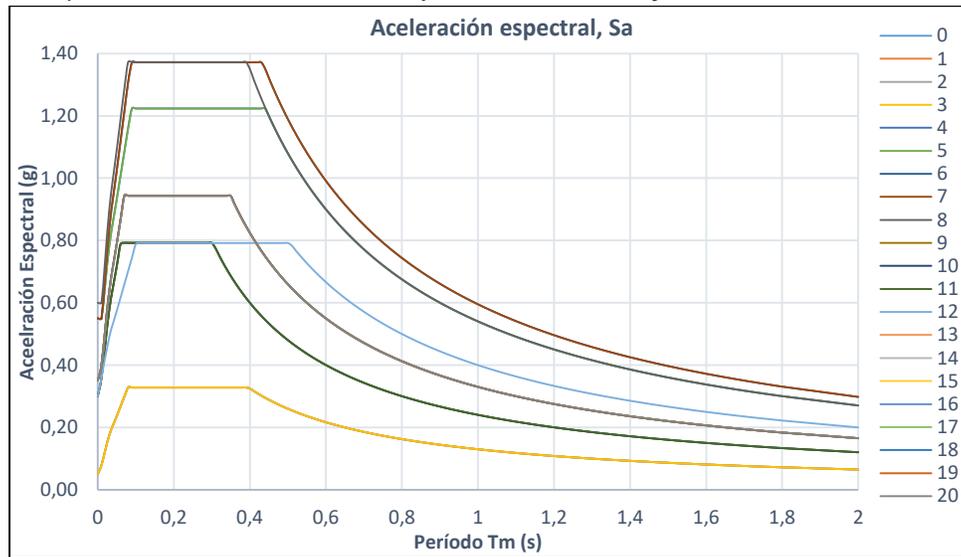
Con los resultados presentados de la Integración del PGA, Ss (0,2 s) y S1 (S1 1,0 s) con cada una de las fuentes sismogénicas para período de retorno de 475 años y 975 años, se realiza el procedimiento anterior para determinar la aceleración espectral. Se presenta a continuación el resultado de 20 zonas a modo de ejemplificación para taludes de 30,0 m de altura y Vs de 180 m/s (Ts 0,667), las demás se adjuntan en el Anexo 1. Cálculo de Aceleración espectral para fuentes corticales y de subducción Tr 475 años y 975 años.

**Tabla 19** Cálculo de Aceleración espectral, Sa (1,3 Ts)

CÁLCULO DE ACCELERACIÓN ESPECTRAL, SA PARA PERFIL DE SUELO TIPO D (Vs 180 m/S)												
ZONAS	S1 (1,0s)	Ss (0,2s)	PGA	FPGA	Fa	Fv	SDI	SDs	Ts	To	As	0,87
0	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,15
1	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,15
2	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,15
3	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,15
4	0,3	1,2	0,55	1,00	1,02	1,80	0,54	1,22	0,44	0,09	0,55	0,62
5	0,3	1,2	0,55	1,00	1,02	1,80	0,54	1,22	0,44	0,09	0,55	0,62
6	0,35	1,4	0,55	1,00	0,98	1,70	0,60	1,37	0,43	0,09	0,55	0,68
7	0,35	1,4	0,55	1,00	0,98	1,70	0,60	1,37	0,43	0,09	0,55	0,68
8	0,3	1,4	0,6	1,00	0,98	1,80	0,54	1,37	0,39	0,08	0,60	0,62
9	0,1	0,6	0,3	1,20	1,32	2,40	0,24	0,79	0,30	0,06	0,36	0,28
10	0,1	0,6	0,3	1,20	1,32	2,40	0,24	0,79	0,30	0,06	0,36	0,28
11	0,1	0,6	0,3	1,20	1,32	2,40	0,24	0,79	0,30	0,06	0,36	0,28
12	0,2	0,6	0,3	1,20	1,32	2,00	0,40	0,79	0,51	0,10	0,36	0,46
13	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38

CÁLCULO DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA PARA PERFIL DE SUELO TIPO D (Vs 180 m/S)												
ZONAS	S1 (1,0s)	Ss (0,2s)	PGA	FPGA	Fa	Fv	SDI	SDs	Ts	To	As	0,87
14	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38
15	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38
16	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38
17	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38
18	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38
19	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38
20	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,38

Figura. 33 Sa para las zonas definidas de la Integración del PGA, Ss (0.2s) y S1 (S1 1.0s) con las fuentes corticales para Tr 475 años y Vs 180 m/s.



Finalmente para la adecuada aplicación de la metodología se debe conocer el valor de la Magnitud de momento, Mw del sismo de análisis, razón por la cual se tiene en cuenta la Magnitud máxima (máx\_mag) determinada por el SGC, 2018 para cada una de las fuentes corticales y se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Magnitud de momento máxima para las fuentes corticales para Tr de 475 años

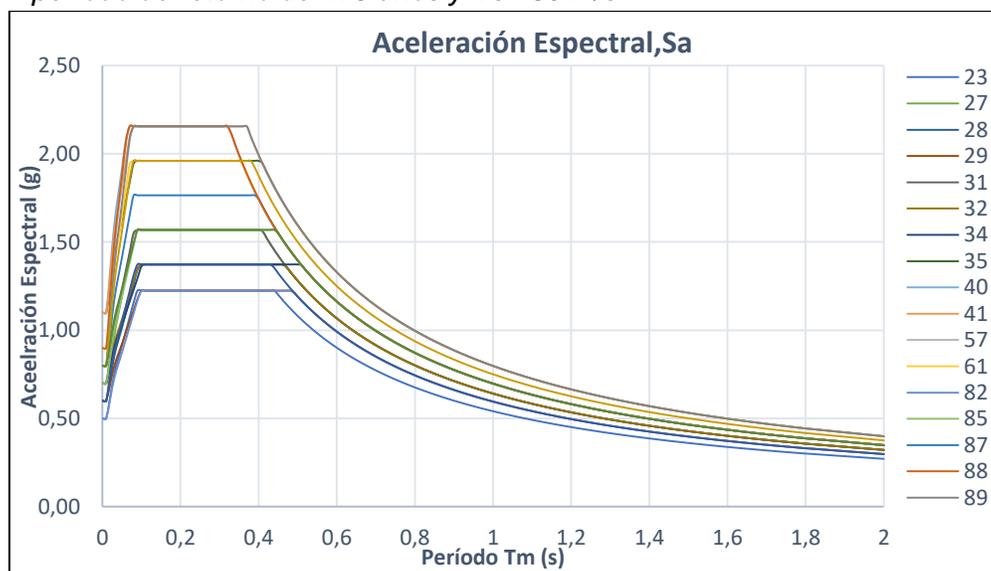
Magnitud de momento máxima para Fuentes Corticales					
ZONA	Zona_C	Máx_mag	S1 (1,0s)	Ss (0,2s)	PGA
0	1	6,6	0,05	0,2	0,05
1	1	7,4	0,05	0,2	0,05
2	1	6,65	0,05	0,2	0,05
3	1	6,82	0,05	0,2	0,05
4	4	6,8	0,3	1,2	0,55
5	4	6,5	0,3	1,2	0,55
6	5	6,8	0,35	1,4	0,55
7	5	6,5	0,35	1,4	0,55
8	6	6,5	0,3	1,4	0,6
9	7	6,5	0,1	0,6	0,3
10	7	6,8	0,1	0,6	0,3
11	7	6,5	0,1	0,6	0,3

Magnitud de momento máxima para Fuentes Corticales					
12	8	6,5	0,2	0,6	0,3
13	9	7	0,15	0,8	0,35
14	9	7,5	0,15	0,8	0,35
15	9	6,8	0,15	0,8	0,35

Tabla 21 Cálculo de Aceleración espectral, Sa (1,5 Ts)

CÁLCULO DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA PARA PERFIL DE SUELO TIPO D (Vs 180 m/S)												
ZONAS	S1 (1,0s)	Ss (0,2s)	PGA	FPGA	Fa	Fv	SDI	SDs	Ts	To	As	1,0
0	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,13
1	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,13
2	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,13
3	0,05	0,2	0,05	1,60	1,64	2,60	0,13	0,33	0,40	0,08	0,08	0,13
4	0,3	1,2	0,55	1,00	1,02	1,80	0,54	1,22	0,44	0,09	0,55	0,54
5	0,3	1,2	0,55	1,00	1,02	1,80	0,54	1,22	0,44	0,09	0,55	0,54
6	0,35	1,4	0,55	1,00	0,98	1,70	0,60	1,37	0,43	0,09	0,55	0,60
7	0,35	1,4	0,55	1,00	0,98	1,70	0,60	1,37	0,43	0,09	0,55	0,60
8	0,3	1,4	0,6	1,00	0,98	1,80	0,54	1,37	0,39	0,08	0,60	0,54
9	0,1	0,6	0,3	1,20	1,32	2,40	0,24	0,79	0,30	0,06	0,36	0,24
10	0,1	0,6	0,3	1,20	1,32	2,40	0,24	0,79	0,30	0,06	0,36	0,24
11	0,1	0,6	0,3	1,20	1,32	2,40	0,24	0,79	0,30	0,06	0,36	0,24
12	0,2	0,6	0,3	1,20	1,32	2,00	0,40	0,79	0,51	0,10	0,36	0,40
13	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
14	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
15	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
16	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
17	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
18	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
19	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33
20	0,15	0,8	0,35	1,15	1,18	2,20	0,33	0,94	0,35	0,07	0,40	0,33

Figura, 34 Cálculo de Aceleración espectral, Sa para las zonas definidas de la Integración del PGA, Ss (0,2s) y S1 (SA 1,0s) con las fuentes de subducción (In\_Slab\_40) para período de retorno de 475 años y Vs 180 m/s



Finalmente, para la adecuada aplicación de la metodología se debe conocer el valor de la Magnitud de momento, Mw del sismo de análisis, razón por la cual se tiene en cuenta la Magnitud máxima (máx\_mag) determinada por el SGC, 2018 para cada una de las fuentes de subducción, sin embargo, en la Tabla 22 se presenta la información para las fuentes de subducción Interfase\_02 para Tr 975 años,

**Tabla 22.** Magnitud de momento máximo para las fuentes de subducción Interfase\_02 para período de retorno de 975 años

Magnitud de momento máxima para Fuentes de Subducción Interfase_02									
ZONA	Zona_in_02	PGA	S1 (1,0s)	Ss (0,2g)	FID_inte_rf	a_val	b_val	mín_mag	máx_mag
0	23	0,5	0,3	1,2	2	2,91	0,69	6	7,8
1	27	0,6	0,4	1,6	2	2,91	0,69	6	7,8
2	28	0,6	0,4	1,4	2	2,91	0,69	6	7,8
3	29	0,6	0,35	1,2	2	2,91	0,69	6	7,8
4	31	0,7	0,4	1,6	2	2,91	0,69	6	7,8
5	32	0,7	0,4	1,4	2	2,91	0,69	6	7,8
6	34	0,7	0,45	1,4	2	2,91	0,69	6	7,8
7	35	1,1	0,55	2	2	2,91	0,69	6	7,8
8	40	1,1	0,45	2,2	2	2,91	0,69	6	7,8
9	41	1,1	0,55	2,2	2	2,91	0,69	6	7,8
10	57	0,8	0,45	2,2	2	2,91	0,69	6	7,8
11	61	0,9	0,45	2	2	2,91	0,69	6	7,8
12	82	0,5	0,35	1,2	2	2,91	0,69	6	7,8
13	85	0,7	0,45	1,6	2	2,91	0,69	6	7,8
14	87	0,8	0,45	1,8	2	2,91	0,69	6	7,8
15	88	0,9	0,45	2,2	2	2,91	0,69	6	7,8

### 4.3 ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS SÍSMICOS

Se procede a enunciar de forma práctica el procedimiento de implementación para la estimación de desplazamientos sísmicos admisibles asociado a diferentes fuentes sismogénicas, discretizando en los siguientes pasos e ilustrado posteriormente en la Figura. 36 con un diagrama de flujo.

1. Determinar de forma precisa los parámetros de resistencia al corte no drenado del perfil de suelo involucrado en el análisis, aunque es posible emplear estos procedimientos con parámetros en condiciones estáticas, para mayor confiabilidad se deben conocer los parámetros de resistencia en condiciones dinámicas.

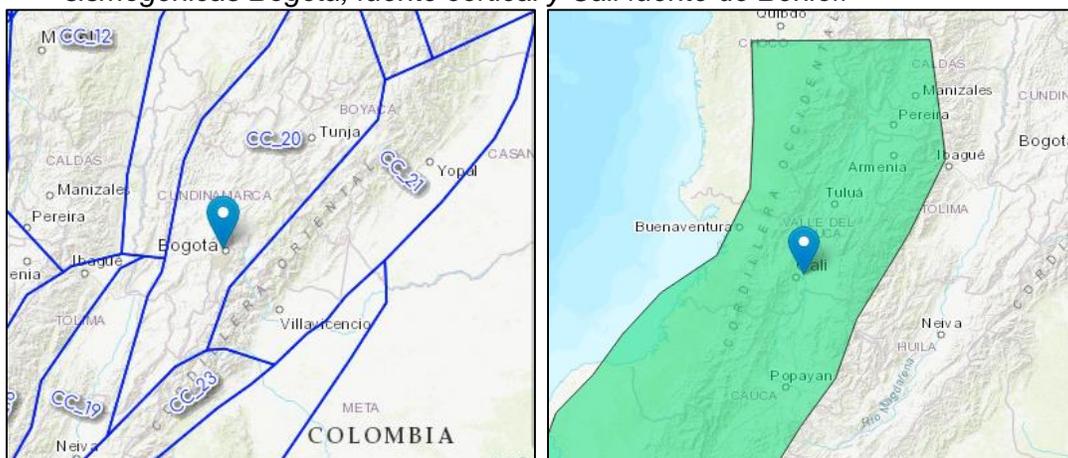
Los materiales empleados en el análisis, se infiere que no perderán de manera considerable la resistencia al corte en el momento de ocurrencia de un sismo, y que por ende permiten desplazamientos horizontales, de no ser así, la disminución en la resistencia al corte

provocado por la duración de sismo generará procesos de inestabilidad asociados con licuación en materiales granulares o ablandamiento cíclico en materiales finos, los cuales deben calcularse por otra metodología.

De igual forma, se debe conocer 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,  $T_s = 4H/ V_s$ .
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  $FS = 1,00$ . Los materiales involucrados en estos análisis consideran parámetros de resistencia al corte no drenados y aceleración crítica entre  $k_y = 0$  y  $k_y = 0,85$ .
4. Localizar el sitio de análisis y a que fuente sismogénica 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 según SGC, 2018) con una  $M_w$  máx de 6,8 y la ciudad de Cali se localiza en la fuente sismogénica de (Intra-placa In\_Slab\_ 40) Benioff con  $M_w$  máx de 7,5. Como ejemplo, se puede ver el ejemplo en la Figura 35.

**Figura. 35** Localización de ciudad de Bogotá y Cali respectivamente junto con sus fuentes sismogénicas Bogotá, fuente cortical y Cali fuente de Benioff



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.

5. Asignar los valores de PGA, Ss (0,2 s) y S1 (1,0 s) para los diferentes períodos de retorno (475 años o 975 años).

6. Escoger el procedimiento a emplear para la estimación de desplazamientos sísmicos y calcular la aceleración espectral para 1,3 Ts (Sa 1,3 Ts) y 1,5 Ts (Sa 1,5 Ts), según la fuente sismogénica que origina el sismo de análisis, fuentes corticales o fuentes de intra-placa / subducción.

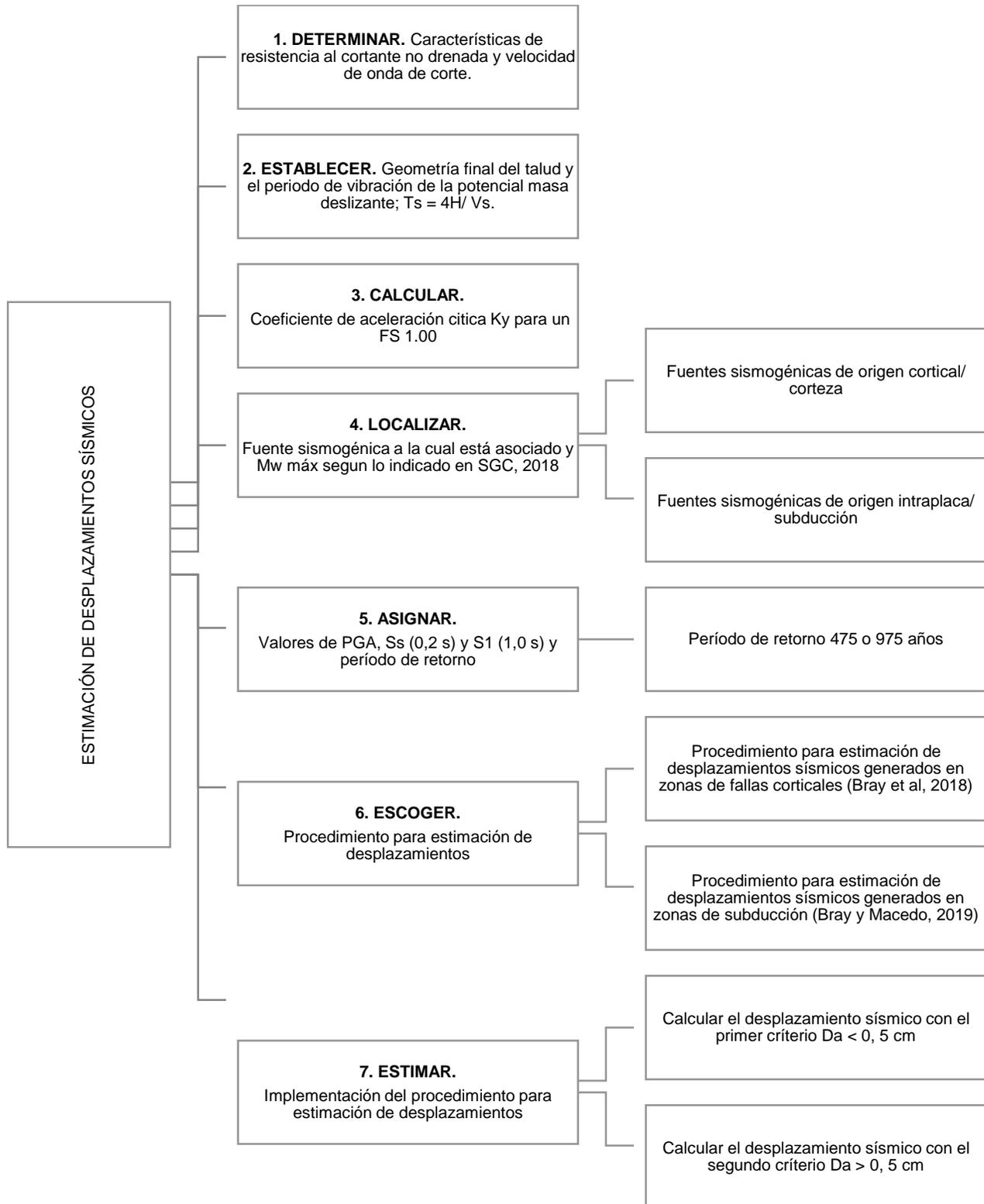
7. Con los valores de Ts, ky, Sa (1,3 Ts) o Sa (1,5 Ts) y la magnitud máxima para el sismo de análisis, implementar el procedimiento de estimación de desplazamientos sísmicos admisibles la cual se subdivide en dos criterios:

*1. La probabilidad que el desplazamiento sísmico sea “Cero” lo que significa que el desplazamiento es inferior a 0,5 cm.*

*2. La probabilidad que el desplazamiento sea “Diferente de cero”, indicando valores mayores a 0,5 cm.*

Generalmente el análisis de probabilidad de desplazamiento “Cero” se desprecia dado que la mayoría de los taludes presentan valores mayores a 0,5 cm de desplazamiento sísmico, (Bray et al 2018 y Bray y Macedo 2019). Por lo cual el análisis de desplazamiento “Diferente de Cero” se emplea teniendo en cuenta la probabilidad de excedencia del 16% y el 84% obteniendo así los valores máximos y mínimos de posibles desplazamientos sísmicos inducidos dada la magnitud del sismo de análisis.

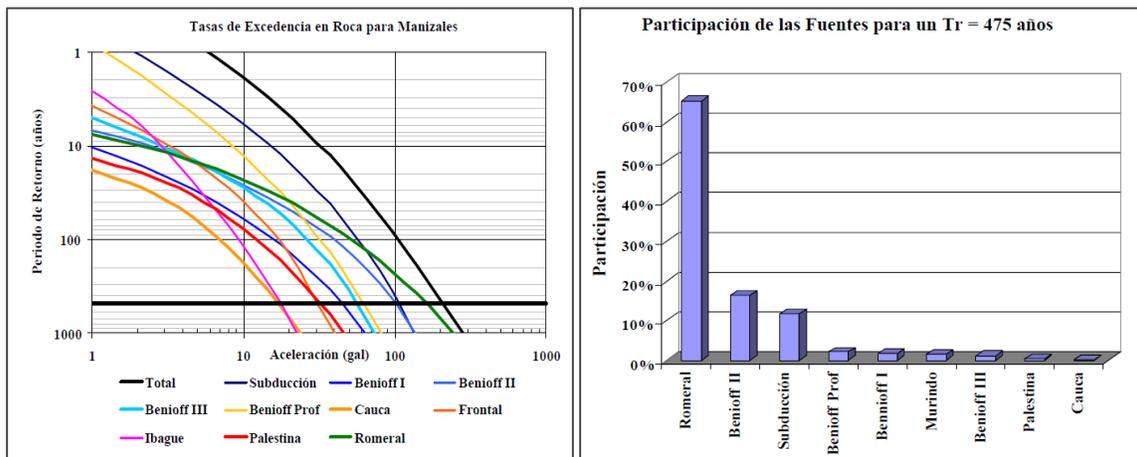
**Figura. 36** Diagrama de flujo implementación de procedimiento de para la estimación de desplazamientos sísmicos



### 4.3.1 Desplazamientos sísmicos admisibles generados en zonas de fuentes corticales para Tr 475 años

Como ejemplo de la aplicación del procedimiento para estimar desplazamientos sísmicos admisibles en originados en zonas de fuentes corticales para Tr 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, en las cuales se puede ver que la mayor amenaza sísmica la aporta la Falla Romeral asociada a la fuente sismogénica de origen cortical, (Ver Figura. 37), Se presenta a continuación las características sísmicas en la Tabla 23.

**Figura. 37** Izq, Tasa de excedencia por fuente y total para el caso de la A máx, Der Participación de las fuentes más relevantes en la amenaza sísmica de Manizales



Fuente: Microzonificación sísmica de Manizales. Figuras 4,7 y 4,8 año 2002

**Tabla 23.** Características sísmicas para Manizales en un período de retorno 475 años

<b>CIUDAD</b>	Manizales
<b>Zona</b>	54
<b>PGA</b>	0,20
<b>S1 (1,0 s)</b>	0,1
<b>Ss (0,2 s)</b>	0,6
<b>Fuente</b>	CC_12
<b>NOMBRE</b>	Aránzazu-Manizales
<b>NOMBRE</b>	Norte Cordillera Central
<b>a<sub>gr</sub></b>	3,658
<b>b<sub>gr</sub></b>	0,919
<b>M<sub>máx</sub></b>	6,5
<b>M<sub>mín</sub></b>	5

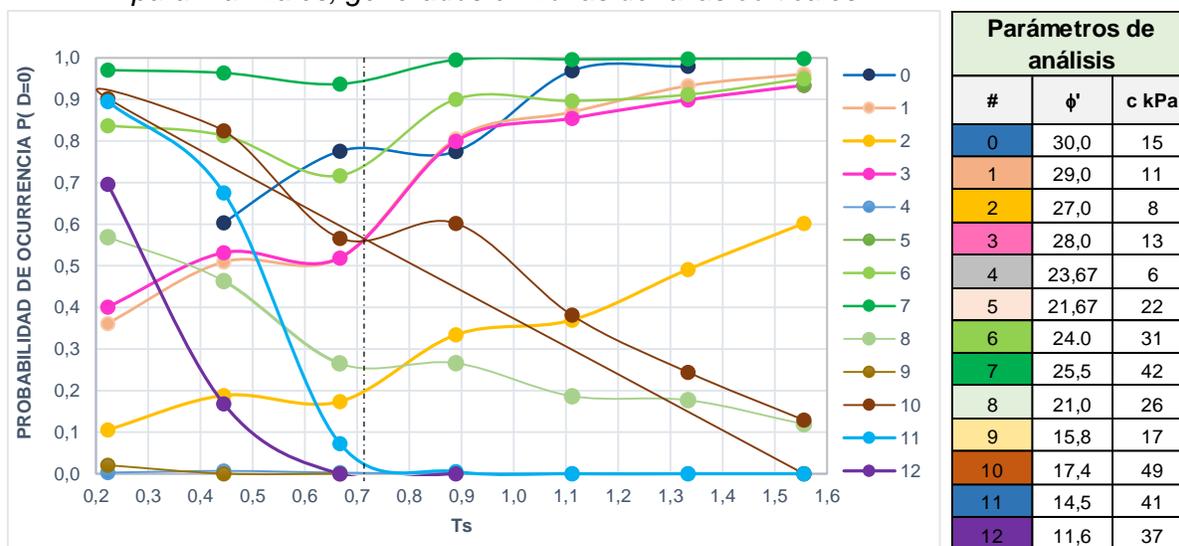
Fuente: Elaboración propia.

Con los valores de  $T_s$ ,  $K_y$ ,  $S_a$  ( $1,3 T_s$ ) y la magnitud máxima, se emplea la metodología de estimación de desplazamientos sísmicos con el primer criterio:

- El desplazamiento sísmico “Cero” lo que significa que es inferior a 0,5 cm

A partir de los resultados obtenidos con la aplicación del primer criterio, se concluye de manera general que a partir 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 hasta  $T_s = 0,66$  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. 38.

**Figura. 38** Variación  $T_s$  vs Probabilidad de excedencia para desplazamientos sísmicos,  $P(D=0)$  para Manizales, generados en zonas de fallas corticales



Fuente: Elaboración propia.

Es posible evidenciar además que, para un mismo tipo de suelo 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, Hay casos donde la probabilidad

aumenta con  $T_s$  y otros donde disminuye, A modo de ejemplo específico, se puede observar de la Figura. 38 la variación drástica entre el comportamiento generado por el depósito 7 y 11 en los cuales la variación de la cohesión es mínima (Ver Tabla 24), 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. Se infiere que los desplazamientos sísmicos de los taludes están influenciados por el contenido de partículas granulares vs partículas finas, siendo entre mayor el porcentaje de materiales finos es el comportamiento tiende hacer cohesivo y es por lo tanto que los desplazamientos que se podrían generar son mayores dado que no pierdan considerablemente la resistencia al cortante durante la ocurrencia de un sismo.

**Tabla 24.** Características de los depósitos 7 y 11

PARÁMETROS DE ANÁLISIS		
#	$\phi$	C kPa
7	25,5	42
11	14,5	41

De igual forma, se implementa el procedimiento con el segundo criterio:

- Que el desplazamiento sísmico sea mayor a 5 cm.  $D > 0,5$  cm.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la ciudad de Manizales en zonas de fuentes corticales para  $T_r$  475 años, este ejercicio se repite para las ciudades de Cali, Bogotá y Medellín, en razón que estas tienen estudios de microzonificación sísmica. En la Tabla 25 se presentan los desplazamientos que podrían generar los taludes bajo un sismo originado por una fuente cortical con magnitud,  $M_w$ , de 6,5.

**Tabla 25.** Desplazamientos sísmicos originados en zonas de fallas corticales para Manizales con  $T_r$  de 475 años y sismo de  $M_w$  6,5 (Talud con inclinación  $27^\circ$  y  $V_s$  180 m/s)

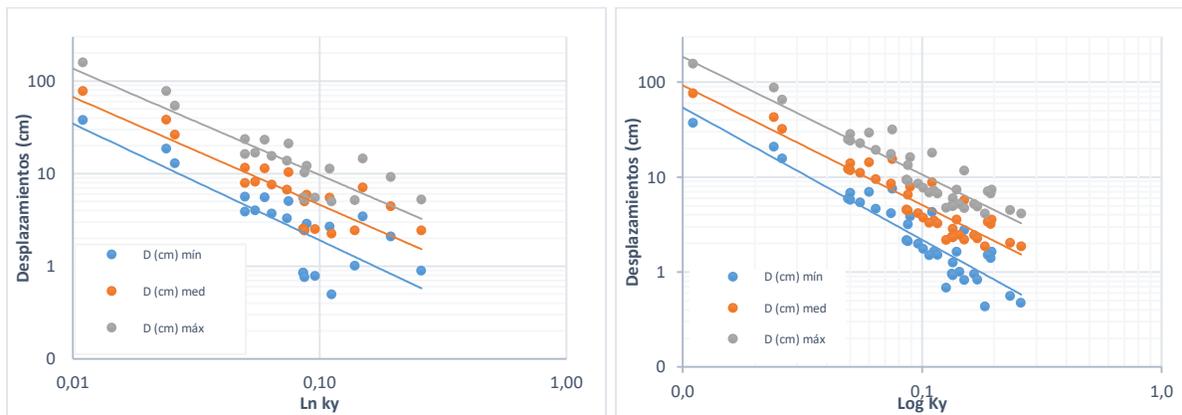
Depósito	H	$M_w$	$T_s = 4H/V_s$	$K_y$	$S_a(1,3 T_s)$	$P(D=0)$	$\ln(D)$ med	D (cm)	D (cm)	D (cm)
								medio	mínimo	máximo
0	10	6,50	0,222	0,439	0,790	0,60	-0,08	0,93	<0,5	1,10

Depósito	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3 Ts)	P(D=0)	Ln (D) med	D (cm)	D (cm)	D (cm)
								medio	mínimo	máximo
	20	6,50	0,444	0,336	0,410	0,78	-0,50	0,61	<0,5	0,41
	30	6,50	0,667	0,286	0,280	0,77	-0,58	0,56	<0,5	0,38
	40	6,50	0,889	0,257	0,210	0,97	-0,65	0,52	<0,5	<0,5
	50	6,50	1,111	0,232	0,170	0,98	-0,63	0,53	<0,5	<0,5
	60	6,50	1,333	0,221	0,140	0,99	-0,79	0,45	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,556	0,212	0,120	1,00	-0,96	0,38	<0,5	<0,5
1	10	6,50	0,222	0,355	0,790	0,36	0,37	1,45	<0,5	2,35
	20	6,50	0,444	0,263	0,410	0,51	0,04	1,04	<0,5	1,44
	30	6,50	0,667	0,228	0,280	0,52	-0,07	0,93	<0,5	1,28
	40	6,50	0,889	0,204	0,210	0,81	-0,11	0,89	<0,5	0,46
	50	6,50	1,111	0,188	0,170	0,87	-0,14	0,87	<0,5	<0,5
	60	6,50	1,333	0,180	0,140	0,93	-0,30	0,74	<0,5	<0,5
2	70	6,50	1,556	0,173	0,120	0,96	-0,47	0,62	<0,5	<0,5
	10	6,50	0,222	0,259	0,790	0,11	1,00	2,71	0,89	5,25
	20	6,50	0,444	0,193	0,410	0,19	0,68	1,97	<0,5	3,64
	30	6,50	0,667	0,165	0,280	0,17	0,62	1,86	<0,5	3,46
	40	6,50	0,889	0,150	0,210	0,33	0,55	1,74	<0,5	2,89
	50	6,50	1,111	0,133	0,170	0,37	0,62	1,86	<0,5	3,00
3	70	6,50	1,333	0,126	0,140	0,49	0,50	1,64	<0,5	2,32
	70	6,50	1,556	0,122	0,120	0,60	0,32	1,38	<0,5	1,65
	10	6,50	0,222	0,368	0,790	0,40	0,30	1,35	<0,5	2,11
	20	6,50	0,444	0,268	0,410	0,53	0,00	1,00	<0,5	1,34
	30	6,50	0,667	0,228	0,280	0,52	-0,07	0,93	<0,5	1,28
	40	6,50	0,889	0,203	0,210	0,80	-0,10	0,90	<0,5	0,49
4	50	6,50	1,111	0,185	0,170	0,85	-0,10	0,90	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,333	0,171	0,140	0,90	-0,18	0,83	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,556	0,163	0,120	0,93	-0,33	0,72	<0,5	<0,5
	10	6,50	0,222	0,150	0,790	0,00	1,96	7,12	3,45	14,55
	20	6,50	0,444	0,110	0,410	0,01	1,72	5,57	2,68	11,36
	30	6,50	0,667	0,089	0,280	0,00	1,78	5,96	2,89	12,18
5	40	6,50	0,889	0,074	0,210	0,00	1,91	6,75	3,29	13,81
	50	6,50	1,111	0,064	0,170	0,00	2,03	7,62	3,72	15,59
	70	6,50	1,333	0,055	0,140	0,00	2,11	8,23	4,02	16,83
	70	6,50	1,556	0,050	0,120	0,00	2,07	7,96	3,89	16,29
5	10	6,50	0,222	0,386	0,790	0,45	0,20	1,22	<0,5	1,80
	20	6,50	0,444	0,233	0,410	0,37	0,30	1,34	<0,5	2,17
	30	6,50	0,667	0,170	0,280	0,20	0,56	1,75	<0,5	3,20
	40	6,50	0,889	0,134	0,210	0,19	0,79	2,19	<0,5	4,05
	50	6,50	1,111	0,112	0,170	0,15	0,98	2,65	0,50	5,01
	70	6,50	1,333	0,096	0,140	0,13	1,06	2,89	0,79	5,53
6	70	6,50	1,556	0,086	0,120	0,12	1,05	2,87	0,85	5,52
	10	6,50	0,222	0,560	0,790	0,84	-0,62	0,54	<0,5	0,12
6	20	6,50	0,444	0,351	0,410	0,81	-0,60	0,55	<0,5	0,26

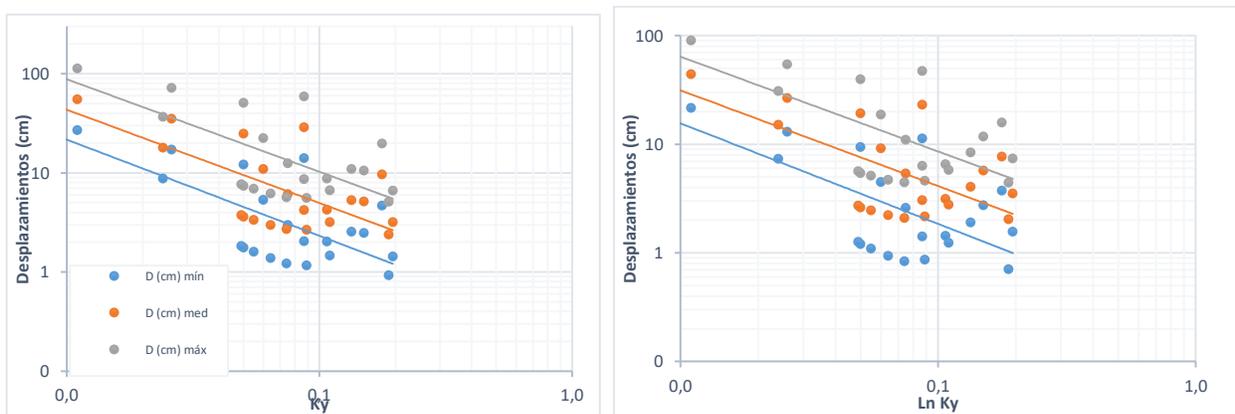
Depósito	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3 Ts)	P(D=0)	Ln (D) med	D (cm)	D (cm)	D (cm)
								medio	mínimo	máximo
	30	6,50	0,667	0,270	0,280	0,72	-0,45	0,64	<0,5	0,57
	40	6,50	0,889	0,225	0,210	0,90	-0,34	0,71	<0,5	<0,5
	50	6,50	1,111	0,194	0,170	0,90	-0,21	0,81	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,333	0,174	0,140	0,91	-0,22	0,80	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,556	0,049	0,120	0,95	2,11	8,25	<0,5	<0,5
7	10	6,50	0,222	0,755	0,790	0,97	-1,32	0,27	<0,5	<0,5
	20	6,50	0,444	0,471	0,410	0,96	-1,29	0,28	<0,5	<0,5
	30	6,50	0,667	0,365	0,280	0,94	-1,16	0,31	<0,5	<0,5
	40	6,50	0,889	0,302	0,210	1,00	-1,03	0,36	<0,5	<0,5
	50	6,50	1,111	0,266	0,170	1,00	-0,96	0,38	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,333	0,242	0,140	1,00	-1,01	0,36	<0,5	<0,5
	70	6,50	1,556	0,222	0,120	1,00	-1,08	0,34	<0,5	<0,5
8	10	6,50	0,222	0,426	0,790	0,57	-0,01	0,99	<0,5	1,25
	20	6,50	0,444	0,253	0,410	0,46	0,12	1,13	<0,5	1,66
	30	6,50	0,667	0,183	0,280	0,27	0,40	1,50	<0,5	2,63
	40	6,50	0,889	0,143	0,210	0,27	0,65	1,92	<0,5	3,36
	50	6,50	1,111	0,116	0,170	0,19	0,90	2,47	<0,5	4,56
	70	6,50	1,333	0,101	0,140	0,18	0,96	2,61	<0,5	4,85
	70	6,50	1,556	0,086	0,120	0,12	1,05	2,87	0,85	5,52
9	10	6,50	0,222	0,195	0,790	0,02	1,52	4,56	2,11	9,23
	20	6,50	0,444	0,075	0,410	0,00	2,34	10,35	5,06	21,18
	30	6,50	0,667	0,024	0,280	0,00	3,65	38,30	18,72	78,37
10	10	6,50	0,222	0,621	0,790	0,90	-0,86	0,43	<0,5	<0,5
	20	6,50	0,444	0,356	0,410	0,82	-0,63	0,53	<0,5	0,20
	30	6,50	0,667	0,237	0,280	0,57	-0,15	0,86	<0,5	1,09
	40	6,50	0,889	0,177	0,210	0,60	0,20	1,22	<0,5	1,46
	50	6,50	1,111	0,134	0,170	0,38	0,60	1,83	<0,5	2,92
	70	6,50	1,333	0,107	0,140	0,24	0,84	2,32	<0,5	4,12
	70	6,50	1,556	0,087	0,120	0,13	1,03	2,80	0,76	5,37
11	10	6,50	0,222	0,613	0,790	0,90	-0,83	0,44	<0,5	<0,5
	20	6,50	0,444	0,304	0,410	0,68	-0,27	0,76	<0,5	0,77
	30	6,50	0,667	0,139	0,280	0,07	0,96	2,61	1,01	5,16
	40	6,50	0,889	0,087	0,210	0,01	1,62	5,05	2,44	10,32
	50	6,50	1,111	0,050	0,170	0,00	2,45	11,57	5,65	23,67
	70	6,50	1,333	0,026	0,140	0,00	3,28	26,48	12,94	54,19
	70	6,50	1,556	0,008	0,120	0,00	4,46	86,61	42,33	177,23
12	10	6,50	0,222	0,478	0,790	0,70	-0,26	0,77	<0,5	0,73
	20	6,50	0,444	0,188	0,410	0,17	0,73	2,08	<0,5	3,88
	30	6,50	0,667	0,060	0,280	0,00	2,43	11,39	5,57	23,31
	40	6,50	0,889	0,011	0,210	0,00	4,36	77,89	38,07	159,39

A continuación, se presentan la Figura. 39 y Figura. 40 obtenidas una vez se grafican los valores de  $k_y$  con los desplazamientos mínimos, medios y máximos generados por taludes con diferentes inclinaciones y velocidades de onda de corte,  $V_s$ . De acuerdo con los resultados se puede ver que, hay un amplio rango de desplazamientos sísmicos que varía desde 0,0 cm hasta 100 cm para un talud de inclinación de  $27^\circ$ . Se indica que, se omite en la generación de estas graficas los valores de desplazamiento  $D < 0,5$  cm dado que afectan las líneas de tendencia.

**Figura. 39** Variación desplazamientos sísmicos en zonas de fallas corticales para la ciudad de Manizales con  $T_r$  475 años, para taludes con inclinación  $27^\circ$  y (Izq) Vs 180 m/s y (Der) 270 m/s



**Figura. 40** Variación desplazamientos sísmicos en zonas de fallas corticales para la ciudad de Manizales con  $T_r$  475 años, para taludes con inclinación  $27^\circ$  y (Izq) Vs 360 m/s y (Der) 450 m/s



Ahora, con el fin de identificar los desplazamientos sísmicos generados en una fuente sísmogénica cortical con un sismo de  $M_w$  6,5 en un talud de diferentes alturas e inclinaciones, iguales características de resistencia y diferente velocidad de onda de corte,  $V_s$ , se presentan a

continuación en la Tabla 26 los resultados resumidos para el depósito 2 ( $\phi$  27,0° y C 8 kPa), en la Tabla 27 depósito 7 ( $\phi$  25,5° y C 42 kPa) y Tabla 28 depósito 11 ( $\phi$  11,6° y C 41 kPa). En el Anexo 2. Memorias de Cálculo se adjuntan los resultados discretizando el cálculo de desplazamientos admisibles.

**Tabla 26. Comparación de desplazamientos para Manizales con Tr 475 años y sismo de Mw 6,5**

Depósito 2			Vs 180 m/s			Vs 270 m/s			Vs 360 m/s			Vs 450 m/s		
C 8 kPa		$\phi$ 27°	D (cm)			D (cm)			D (cm)			D (cm)		
H	i	Ky	mín.	med	máx	mín.	med	máx	mín.	med	máx	mín.	med	máx
10,0	27	0,26	<0,5	1,04	2,80	0,47	1,87	4,15	<0,5	1,63	3,66	<0,5	1,77	4,04
20,0		0,19	<0,5	1,91	4,36	1,41	3,21	6,73	<0,5	0,63	1,87	<0,5	0,45	1,57
30,0		0,17	<0,5	1,84	4,14	0,95	2,44	5,23	<0,5	<0,5	1,18	<0,5	<0,5	0,87
40,0		0,15	<0,5	1,28	3,46	0,82	2,19	4,72	<0,5	<0,5	0,87	<0,5	<0,5	0,55
50,0		0,13	<0,5	1,24	3,59	0,96	2,36	5,02	<0,5	<0,5	0,96	<0,5	<0,5	0,56
60,0		0,13	<0,5	0,43	2,78	0,68	2,17	4,76	<0,5	<0,5	0,85	<0,5	<0,5	0,44
70,0		0,12	<0,5	<0,5	1,97	<0,5	1,84	4,24	<0,5	<0,5	0,70	<0,5	<0,5	0,37
10,0	37	0,13	2,96	6,14	12,62	3,65	7,50	15,35	3,27	6,71	13,74	3,64	7,48	15,32
20,0		0,08	5,48	11,23	22,98	6,93	14,17	29,00	2,67	5,50	11,27	2,34	4,83	9,92
30,0		0,04	14,30	29,27	59,90	14,03	28,72	58,77	5,59	11,43	23,39	4,68	9,58	19,59
40,0		0,03	15,04	30,78	62,97	14,18	29,01	59,37	5,24	10,73	21,96	4,21	8,62	17,64
50,0		0,009	54,06	110,62	226,35	43,38	88,76	181,62	18,06	36,95	75,61	14,02	28,69	58,70
60,0		0,002	106,57	218,08	446,24	75,55	154,59	316,34	36,57	74,83	153,13	27,68	56,64	115,90
10,0	45	0,028	21,21	43,39	88,79	22,08	45,19	92,47	19,78	40,47	82,81	22,05	45,12	92,32

**Tabla 27. Comparación de desplazamientos para Manizales con Tr 475 años y sismo de Mw 6,5**

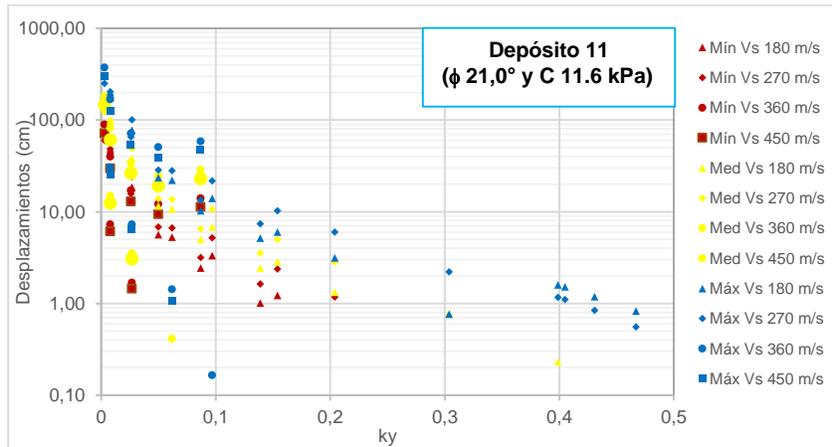
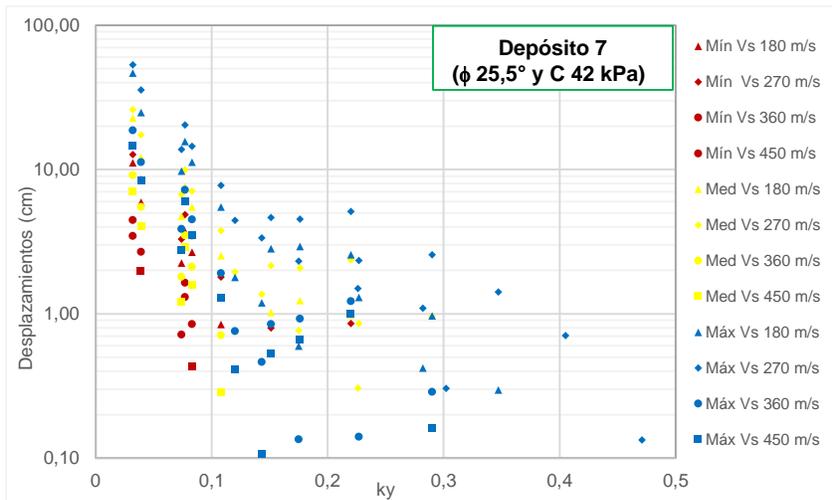
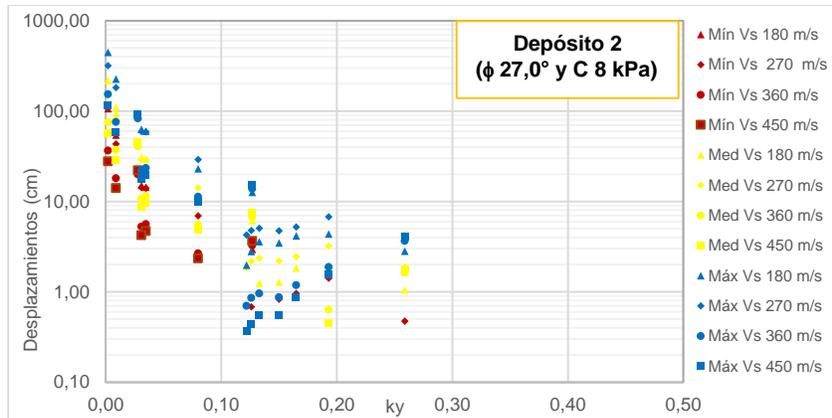
Depósito 7			Vs 180 m/s			Vs 270 m/s			Vs 360 m/s			Vs 450 m/s			
C 42 kPa		$\phi$ 25,5°	D (cm)			D (cm)			D (cm)			D (cm)			
H	i	Ky	mín.	med	máx	mín.	med	máx	mín.	med	máx	mín.	med	máx	
10,0	27	0,755	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
20,0		0,471	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,13	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
30,0		0,365	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
40,0		0,302	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,30	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
50,0		0,266	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
70,0		0,242	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
70,0		0,222	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
10,0	37	0,707	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
20,0		0,405	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,71	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
30,0		0,282	<0,5	<0,5	0,42	<0,5	<0,5	1,09	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
40,0		0,226	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,31	1,50	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
50,0		0,175	<0,5	<0,5	0,60	<0,5	0,77	2,32	<0,5	<0,5	0,13	<0,5	<0,5	<0,5	
70,0		0,143	<0,5	<0,5	1,19	<0,5	1,37	3,36	<0,5	<0,5	0,46	<0,5	<0,5	0,11	
70,0		0,12	<0,5	<0,5	1,79	<0,5	1,95	4,44	<0,5	<0,5	0,76	<0,5	<0,5	0,41	
10,0	45	0,635	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
20,0		0,347	<0,5	<0,5	0,30	<0,5	<0,5	1,42	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
30,0		0,227	<0,5	<0,5	1,30	<0,5	0,86	2,34	<0,5	<0,5	0,14	<0,5	<0,5	<0,5	
40,0		0,151	<0,5	1,02	2,82	0,80	2,16	4,65	<0,5	<0,5	0,85	<0,5	<0,5	0,53	
50,0		0,108	0,84	2,52	5,49	1,80	3,77	7,76	<0,5	0,71	1,91	<0,5	0,29	1,29	
70,0		0,074	2,25	4,73	9,75	3,29	6,74	13,81	0,72	1,81	3,87	<0,5	1,21	2,76	
70,0		0,039	5,92	12,1	24,79	8,49	17,38	35,56	2,68	5,49	11,23	1,97	4,06	8,33	
10,0	53	0,589	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
20,0		0,29	<0,5	<0,5	0,97	<0,5	0,96	2,56	<0,5	<0,5	0,29	<0,5	<0,5	0,16	
30,0		0,176	<0,5	1,24	2,92	0,67	2,07	4,53	<0,5	<0,5	0,92	<0,5	<0,5	0,66	
40,0		0,083	2,67	5,49	11,25	3,45	7,09	14,51	0,85	2,12	4,51	0,43	1,59	3,51	
50,0		0,032	11,1	22,8	46,66	12,68	25,94	53,08	4,46	9,13	18,68	3,46	7,08	14,50	
10,0		63	0,59	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
20,0			0,22	<0,5	0,99	2,57	0,86	2,37	5,12	<0,5	<0,5	1,23	<0,5	<0,5	1,00
30,0	0,077		3,72	7,62	15,60	4,86	9,94	20,35	1,64	3,49	7,22	1,31	2,88	6,00	

**Tabla 28. Comparación de desplazamientos para Manizales con Tr 475 años y sismo de Mw 6,5**

Depósito 11		Vs 180 m/s			Vs 270 m/s			Vs 360 m/s			Vs 450 m/s			
C 21 kPa	$\phi$ 11,6 °	D (cm)												
H	i	Ky	mín,	med	máx	mín,	mín,	med	máx	mín,	mín,	med	máx	mín,
10,0	27	0,613	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
20,0		0,304	<0,5	<0,5	0,77	<0,5	0,75	2,22	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
30,0		0,139	1,01	2,43	5,16	1,64	3,57	7,41	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
40,0		0,087	2,44	5,03	10,32	3,19	6,54	13,40	14,05	28,75	58,83	11,28	23,09	47,25
50,0		0,05	5,65	11,57	23,67	6,82	13,96	28,57	12,13	24,81	50,77	9,41	19,26	39,42
70,0		0,026	12,94	26,48	54,19	15,72	32,17	65,83	17,11	35,02	71,65	12,95	26,50	54,23
70,0		0,008	42,33	86,61	177,2	48,68	99,60	203,8	40,12	82,10	168,0	29,86	61,10	125,0
10,0	37	0,467	<0,5	<0,5	0,83	<0,5	<0,5	0,55	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
20,0		0,204	<0,5	1,33	3,16	1,18	2,84	6,01	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
30,0		0,062	5,29	10,82	22,15	6,70	13,72	28,07	<0,5	0,42	1,42	<0,5	<0,5	1,06
40,0		0,003	72,99	149,3	305,6	60,30	123,3	252,4	89,49	183,1	374,7	71,87	147,0	300,9
10,0	45	0,431	<0,5	<0,5	1,19	<0,5	<0,5	0,85	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
20,0		0,154	1,23	2,87	6,04	2,39	5,00	10,28	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
30,0		0,008	46,67	95,50	195,4	45,21	92,52	189,3	7,30	14,94	30,57	6,12	12,51	25,61
10,0	53	0,405	<0,5	<0,5	1,52	<0,5	<0,5	1,11	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
20,0		0,097	3,34	6,87	14,07	5,22	10,69	21,88	<0,5	<0,5	0,16	<0,5	<0,5	<0,5
10,0	63	0,399	<0,5	0,23	1,60	<0,5	<0,5	1,18	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
20,0		0,027	18,62	38,10	77,97	24,12	49,36	101,0	1,68	3,53	7,28	1,45	3,09	6,39

De acuerdo con los resultados se puede ver en este resumen que de los tres depósitos es aquel que tiene menores características de resistencia ( $\phi$  27,0° y C 8 kPa) el que permite que se genere un amplio rango de desplazamientos, contrario al talud con parámetros más altos ( $\phi$  25,5° 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 valores de desplazamiento opuesto a los taludes rígidos que producen desplazamientos mínimos, lo cual es posible evidenciarlas en la Figura. 41 donde varían los valores de D (cm) según las velocidades de ondas de corte (Vs).

**Figura. 41 Variación de rango de desplazamientos vs la velocidad de onda de corte Vs**

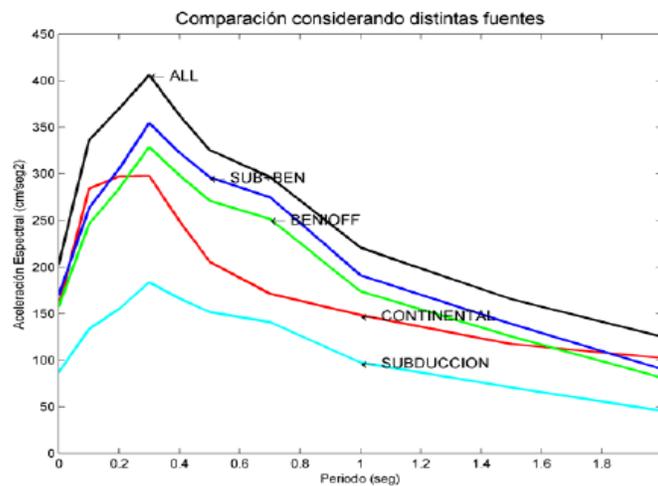


### 4.3.2 Desplazamientos sísmicos admisibles generados en zonas de fuentes de subducción para $T_r$ 475 años

Como ejemplo de la aplicación del procedimiento para estimar desplazamientos sísmicos en zonas de subducción para  $T_r$  475 años, se presenta a continuación los resultados obtenidos

para Cali con las características sísmicas identificadas en la Tabla 42 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 Benioff, como se puede ver en la Figura. 42.

**Figura. 42** Comparación del aporte a la amenaza sísmica para distintas fuentes sismogénicas



Fuente: Microzonificación sísmica de Santiago de Cali, 2002

**Tabla 29.** Características sísmicas para la ciudad de Cali

<b>CIUDAD</b>	Cali
<b>Zona</b>	12
<b>PGA</b>	0,40
<b>S1 (1,0 s)</b>	0,2
<b>Ss (0,2 s)</b>	1
<b>Fuente</b>	Subducción
<b>NOMBRE</b>	Benioff
<b>NOMBRE</b>	In_slab_50
<b>a_gr</b>	3,69
<b>b_gr</b>	0,768
<b>M_máx</b>	7,5
<b>M_mín</b>	6,0

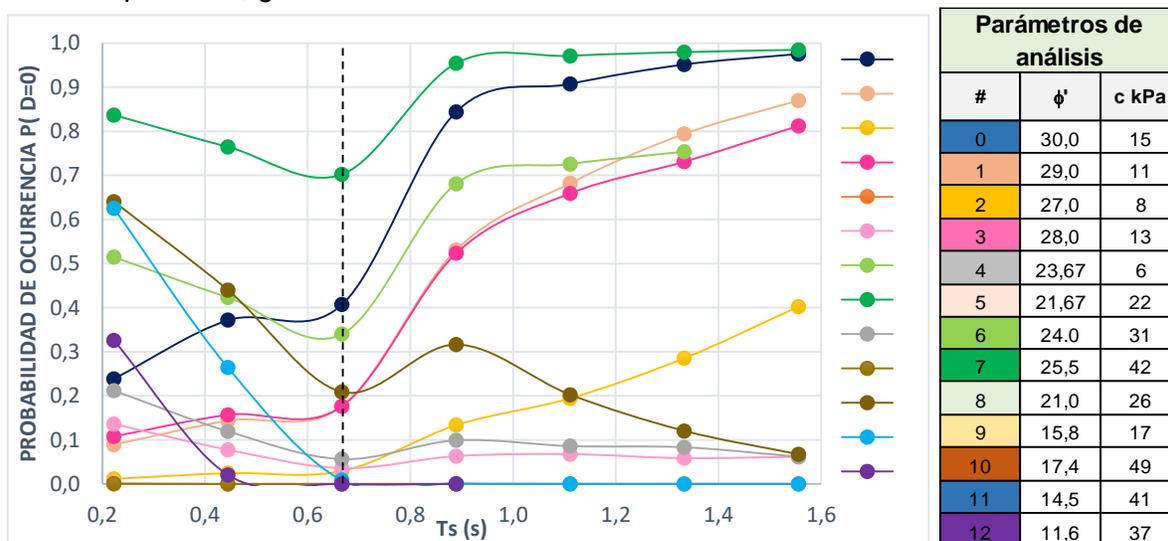
Fuente: Elaboración propia.

Con los valores de  $T_s$ ,  $K_y$ ,  $S_a$  ( $1,5 T_s$ ) y la magnitud máxima, se emplea el procedimiento de estimación de desplazamientos sísmicos con el primer criterio:

- El desplazamiento sísmico "Cero" es decir inferior a 0,5 cm

Se concluye de manera general que, a partir de  $T_s$  0,66 s se puede ver 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  $M_w$  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  $P(D=0)$  si aumenta el periodos de vibración dado que los taludes se flexibilizan.

**Figura. 43** Variación  $T_s$  vs Probabilidad de ocurrencia de desplazamientos sísmicos,  $P(D=0)$  para Cali, generados en zonas de subducción



Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo específico en la Figura. 43 se puede observar 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 Benioff domina los

desplazamientos generados para taludes con periodos de vibración  $T_s$  entre 0,4 y 0,9, es decir, entre 30,0 m y 40,0 m de altura con  $V_s$  de 180 m/s.

Se concluye que los desplazamientos sísmicos de los taludes están influenciados por el contenido de partículas granulares vs partículas finas, siendo entre mayor el porcentaje de materiales finos (mayor cohesión) es mayor el desplazamiento que se podría generar, con la premisa que, los materiales de análisis deben ser de comportamiento cohesivo dado que no pierdan considerablemente la resistencia al cortante durante la ocurrencia de un sismo.

**Tabla 30.** Características de los depósitos 7 y 11,

PARÁMETROS DE ANÁLISIS		
#	$\phi$	C Kpa
7	25,5	42
11	14,5	41

De igual forma, se implementa el procedimiento de estimación de desplazamientos sísmicos con el segundo criterio:

- El desplazamiento sísmico sea de “Diferente de Cero” lo que significa mayor a 0,5 cm

A continuación, se presenta la estimación de los valores de desplazamiento para la ciudad de Cali generados por sismos originados por fuentes de subducción para  $T_r$  475 años con magnitud,  $M_w$ , de 7,5 en la Tabla 31 se presentan los desplazamientos que podrían generar.

**Tabla 31.** Desplazamientos sísmicos originados en zonas de subducción para Cali con período de retorno de 475 años y sismo de  $M_w$  7,5 (Talud con inclinación  $27^\circ$  y  $V_s$  180 m/s)

Depósito	H	$M_w$	$T_s$	$K_y$	$S_a(1,5 T_s)$	$P(D=0)$	$\ln(D)$	<i>min</i>	<i>max</i>	D (cm)	D (cm)	D (cm)	D (cm)
								$\ln(D)$	$\ln(D)$		mín	Med	máx
0	10	7,50	0,222	0,439	1,10	0,24	0,62	-0,11	1,35	1,85	<0,5	1,38	3,34
	20	7,50	0,444	0,336	0,60	0,37	0,31	-0,42	1,04	1,36	<0,5	0,75	2,21
	30	7,50	0,667	0,286	0,40	0,41	0,14	-0,59	0,87	1,15	<0,5	0,55	1,79
	40	7,50	0,889	0,257	0,31	0,84	0,13	-0,60	0,86	1,14	<0,5	<0,5	<0,5
	50	7,50	1,111	0,232	0,24	0,91	0,02	-0,71	0,75	1,02	<0,5	<0,5	<0,5
	60	7,50	1,333	0,221	0,20	0,95	-0,12	-0,85	0,61	0,89	<0,5	<0,5	<0,5
	70	7,50	1,556	0,212	0,17	0,98	-0,31	-1,04	0,42	0,73	<0,5	<0,5	<0,5
1	10	7,50	0,222	0,355	1,10	0,09	1,16	0,43	1,89	3,21	1,14	2,93	6,33
	20	7,50	0,444	0,263	0,60	0,14	0,97	0,24	1,70	2,63	0,58	2,25	5,04
	30	7,50	0,667	0,228	0,40	0,18	0,77	0,04	1,50	2,15	<0,5	1,77	4,04
	40	7,50	0,889	0,204	0,31	0,53	0,79	0,06	1,52	2,20	<0,5	<0,5	2,96
	50	7,50	1,111	0,188	0,24	0,68	0,63	-0,10	1,36	1,88	<0,5	<0,5	1,87
	60	7,50	1,333	0,180	0,20	0,79	0,49	-0,24	1,22	1,63	<0,5	<0,5	0,93
	70	7,50	1,556	0,173	0,17	0,87	0,30	-0,43	1,03	1,36	<0,5	<0,5	<0,5
2	10	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	1,91	1,18	2,64	6,77	3,18	6,69	13,91
	20	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	1,73	1,00	2,46	5,64	2,55	5,51	11,52

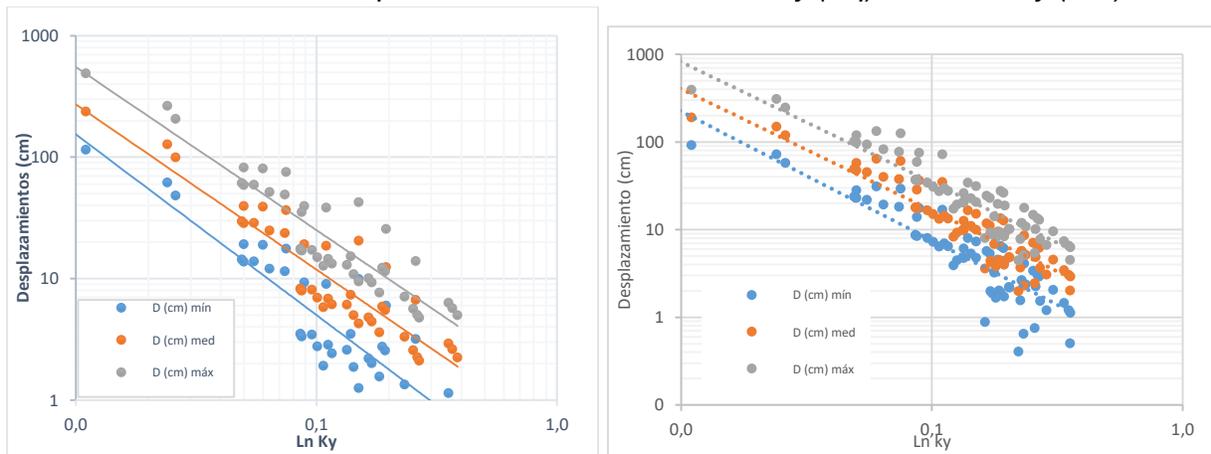
Depósito	H	Mw	Ts	Ky	Sa(1,5 Ts)	P(D=0)	Ln(D)	min	max	D (cm)	D (cm)	D (cm)	D (cm)
								Ln(D)	Ln(D)		mín	Med	máx
	30	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	1,60	0,87	2,33	4,94	2,20	4,80	10,06
	40	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	1,59	0,86	2,32	4,92	1,25	4,27	9,48
	50	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	1,56	0,83	2,29	4,77	<0,5	3,81	8,84
	60	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	1,47	0,74	2,20	4,34	<0,5	2,96	7,55
	70	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	1,28	0,55	2,01	3,61	<0,5	1,76	5,67
3	10	7,50	0,222	0,368	1,10	0,11	1,07	0,34	1,80	2,93	0,93	2,62	5,72
	20	7,50	0,444	0,268	0,60	0,16	0,92	0,19	1,65	2,51	0,36	2,11	4,76
	30	7,50	0,667	0,228	0,40	0,18	0,77	0,04	1,50	2,15	<0,5	1,77	4,04
	40	7,50	0,889	0,203	0,31	0,52	0,80	0,07	1,53	2,23	<0,5	<0,5	3,04
	50	7,50	1,111	0,185	0,24	0,66	0,68	-0,05	1,41	1,97	<0,5	<0,5	2,08
	70	7,50	1,333	0,171	0,20	0,73	0,64	-0,09	1,37	1,89	<0,5	<0,5	1,58
70	7,50	1,556	0,163	0,17	0,81	0,48	-0,25	1,21	1,61	<0,5	<0,5	0,75	
4	10	7,50	0,222	0,150	1,10	0,00	3,02	2,29	3,75	20,57	9,95	20,57	42,51
	20	7,50	0,444	0,110	0,60	0,00	2,93	2,20	3,66	18,64	9,01	18,64	38,52
	30	7,50	0,667	0,089	0,40	0,00	2,95	2,22	3,68	19,20	9,29	19,20	39,68
	40	7,50	0,889	0,074	0,31	0,00	3,17	2,44	3,90	23,75	11,49	23,75	49,08
	50	7,50	1,111	0,064	0,24	0,00	3,22	2,49	3,95	24,94	12,06	24,93	51,53
	70	7,50	1,333	0,055	0,20	0,00	3,36	2,63	4,09	28,72	13,88	28,71	59,34
	70	7,50	1,556	0,050	0,17	0,00	3,35	2,62	4,08	28,52	13,79	28,51	58,93
5	10	7,50	0,222	0,386	1,10	0,14	0,95	0,22	1,68	2,59	0,64	2,24	4,99
	20	7,50	0,444	0,233	0,60	0,08	1,28	0,55	2,01	3,58	1,34	3,31	7,11
	30	7,50	0,667	0,170	0,40	0,04	1,52	0,79	2,25	4,59	2,01	4,44	9,32
	40	7,50	0,889	0,134	0,31	0,06	1,87	1,14	2,60	6,49	2,58	6,11	13,00
	50	7,50	1,111	0,112	0,24	0,07	1,99	1,26	2,72	7,30	2,85	6,83	14,58
	70	7,50	1,333	0,096	0,20	0,06	2,15	1,42	2,88	8,56	3,46	8,08	17,17
	70	7,50	1,556	0,086	0,17	0,06	2,17	1,44	2,90	8,74	3,49	8,23	17,51
6	10	7,50	0,222	0,560	1,10	0,51	-0,05	-0,78	0,68	0,95	<0,5	<0,5	1,31
	20	7,50	0,444	0,351	0,60	0,42	0,19	-0,54	0,92	1,21	<0,5	0,54	1,86
	30	7,50	0,667	0,270	0,40	0,34	0,30	-0,43	1,03	1,35	<0,5	0,81	2,25
	40	7,50	0,889	0,225	0,31	0,68	0,51	-0,22	1,24	1,67	<0,5	<0,5	1,67
	50	7,50	1,111	0,194	0,24	0,73	0,54	-0,19	1,27	1,72	<0,5	<0,5	1,48
	70	7,50	1,333	0,174	0,20	0,75	0,59	-0,14	1,32	1,80	<0,5	<0,5	1,36
70	7,50	1,556	0,049	0,17	0,00	3,39	2,66	4,12	29,67	14,35	29,66	61,31	
7	10	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	-0,94	-1,67	-0,21	0,39	<0,5	<0,5	0,09
	20	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	-0,67	-1,40	0,06	0,51	<0,5	<0,5	0,36
	30	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	-0,59	-1,32	0,14	0,56	<0,5	<0,5	0,52
	40	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	-0,35	-1,08	0,38	0,71	<0,5	<0,5	<0,5
	50	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	-0,39	-1,12	0,34	0,68	<0,5	<0,5	<0,5
	70	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	-0,40	-1,13	0,33	0,67	<0,5	<0,5	<0,5
	70	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	-0,45	-1,18	0,28	0,64	<0,5	<0,5	<0,5
8	10	7,50	0,222	0,426	1,10	0,21	0,70	-0,03	1,43	2,01	<0,5	1,56	3,68
	20	7,50	0,444	0,253	0,60	0,12	1,07	0,34	1,80	2,91	0,85	2,57	5,64
	30	7,50	0,667	0,183	0,40	0,06	1,34	0,61	2,07	3,82	1,56	3,62	7,67
	40	7,50	0,889	0,143	0,31	0,10	1,71	0,98	2,44	5,54	1,87	5,01	10,88
	50	7,50	1,111	0,116	0,24	0,09	1,90	1,17	2,63	6,70	2,42	6,15	13,26
	70	7,50	1,333	0,101	0,20	0,08	2,02	1,29	2,75	7,57	2,76	6,97	15,00
	70	7,50	1,556	0,086	0,17	0,06	2,17	1,44	2,90	8,74	3,49	8,23	17,51
9	10	7,50	0,222	0,195	1,10	0,00	2,52	1,79	3,25	12,41	5,99	12,40	25,64
	20	7,50	0,444	0,075	0,60	0,00	3,60	2,87	4,33	36,53	17,68	36,53	75,50
	30	7,50	0,667	0,024	0,40	0,00	4,85	4,12	5,58	128,06	61,96	128,06	264,66
10	10	7,50	0,222	0,621	1,10	0,64	-0,35	-1,08	0,38	0,70	<0,5	<0,5	0,78
	20	7,50	0,444	0,356	0,60	0,44	0,15	-0,58	0,88	1,16	<0,5	0,47	1,75
	30	7,50	0,667	0,237	0,40	0,21	0,66	-0,07	1,39	1,94	<0,5	1,52	3,56
	40	7,50	0,889	0,177	0,31	0,32	1,17	0,44	1,90	3,22	<0,5	2,05	5,46
	50	7,50	1,111	0,134	0,24	0,20	1,54	0,81	2,27	4,68	<0,5	3,69	8,63
	70	7,50	1,333	0,107	0,20	0,12	1,88	1,15	2,61	6,57	1,91	5,80	12,75
70	7,50	1,556	0,087	0,17	0,07	2,14	1,41	2,87	8,50	3,33	7,96	16,98	
11	10	7,50	0,222	0,613	1,10	0,63	-0,31	-1,04	0,42	0,73	<0,5	<0,5	0,84
	20	7,50	0,444	0,304	0,60	0,26	0,58	-0,15	1,31	1,79	<0,5	1,28	3,17
	30	7,50	0,667	0,139	0,40	0,01	2,00	1,27	2,73	7,42	3,51	7,36	15,27
	40	7,50	0,889	0,087	0,31	0,00	2,84	2,11	3,57	17,14	8,27	17,12	35,41
	50	7,50	1,111	0,050	0,24	0,00	3,68	2,95	4,41	39,67	19,19	39,67	81,98
	70	7,50	1,333	0,026	0,20	0,00	4,60	3,87	5,33	99,92	48,35	99,92	206,51

Depósito	H	Mw	Ts	Ky	Sa(1,5 Ts)	P(D=0)	Ln(D)	min	max	D (cm)	D (cm)	D (cm)	D (cm)
								Ln(D)	Ln(D)		mín	Med	máx
	70	7,50	1,556	0,008	0,17	0,00	5,65	4,92	6,38	284,37	137,59	284,37	587,70
12	10	7,50	0,222	0,478	1,10	0,33	0,39	-0,34	1,12	1,47	<0,5	0,92	2,48
	20	7,50	0,444	0,188	0,60	0,02	1,79	1,06	2,52	6,00	2,75	5,88	12,28
	30	7,50	0,667	0,060	0,40	0,00	3,67	2,94	4,40	39,12	18,93	39,12	80,85
	40	7,50	0,889	0,011	0,31	0,00	5,47	4,74	6,20	237,89	115,11	237,89	491,65

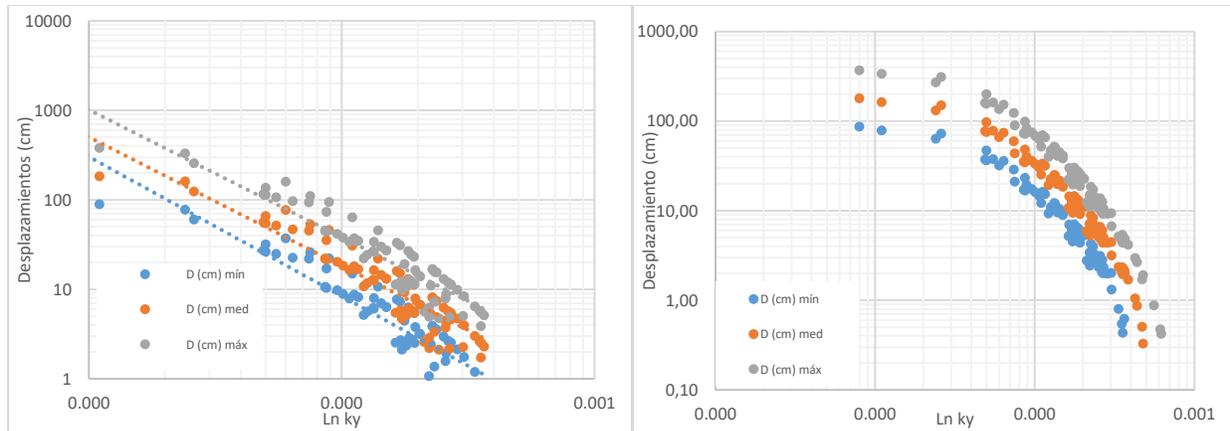
A continuación, se presentan la Figura. 44 y

Figura. 45 obtenidas una vez se grafican los valores de ky vs desplazamientos mínimos, medios y máximos generados en taludes con diferentes inclinaciones y velocidades de onda de corte, Vs, en las cuales se puede ver que hay un amplio rango de desplazamientos sísmicos que varía desde 0,0 cm hasta 580 cm para un talud de inclinación de 27°. Cuando se involucra la fuente sísmogénica, 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.

**Figura. 44** Variación desplazamientos sísmicos en zonas de subducción para la ciudad de Cali con Tr 475 años, para taludes con inclinación 27° y (Izq) Vs 180 m/s y (Der) 360 m/s



**Figura. 45** Variación desplazamientos sísmicos en zonas de subducción para la ciudad de Cali con Tr 475 años, para taludes con inclinación 27° y (Izq) Vs 450 m/s y (Der) 760 m/s



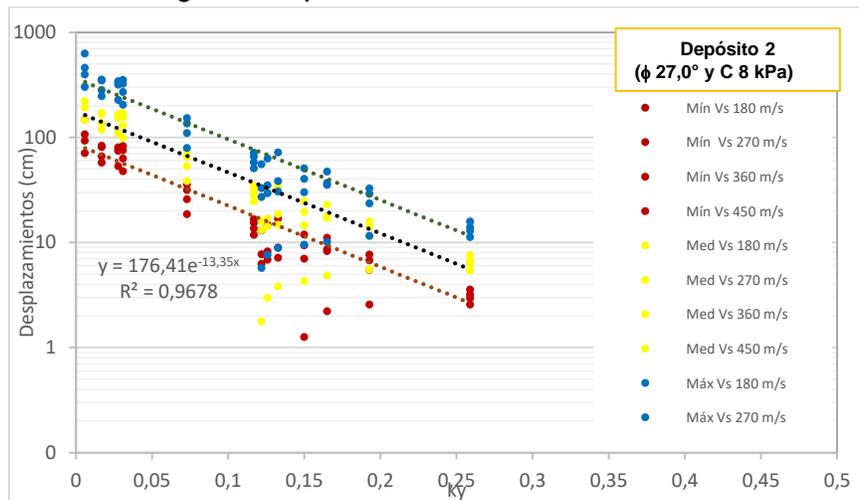
De las gráficas anteriores, es posible observar que entre mayor sea la velocidad de onda de corte, aumenta la correlación entre  $ky$  y los desplazamientos sísmicos, variaron logarítmicamente entre  $r = 0,57$  para taludes que tiene  $V_s = 180$  m/s y  $r = 0,87$  para taludes con  $V_s$  de 760 m/s, y esto sucede en razón que estos últimos taludes son más rígidos. Ahora, con el fin de identificar los desplazamientos sísmicos generados en una fuente sismogénica de subducción asociada a una  $M_w 7,5$  en un talud de diferentes alturas e inclinaciones, pero, con las mismas características de resistencia y diferente velocidad de onda de corte,  $V_s$ , se presentan a continuación los resultados resumidos para los depósitos 2 ( $\phi 27,0^\circ$  y  $C 8$  kPa), 7 ( $\phi 25,5^\circ$  y  $C 42$  kPa) y 11 ( $\phi 11,6^\circ$  y  $C 41$  kPa) en la Tabla 32 y Tabla 33, respectivamente. En el Anexo 3. Memorias de Cálculo se adjuntan los resultados discretizando del cálculo de desplazamientos.

Se evidencia que las estimaciones de desplazamientos sísmicos están estrictamente ligados a  $ky$  como se puede ver por ejemplo que el talud del Depósito 2 de bajas características de resistencia ( $\phi 27,0^\circ$  y  $C 8$  kPa) permite que se genere un rango reducido de desplazamientos cuando se tienen inclinaciones de  $27^\circ$  y con  $ky$  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  $ky = 0$ , 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. La correlación para este talud con las características de resistencia y con este escenario sísmico según la **Figura. 46**, el  $ky$  y el desplazamiento es de  $r = 0,97$ .

**Tabla 32. Comparación de los desplazamientos para Cali con Tr 475 años y sismo de Mw 7,5**

Depósito 2			Vs 180 m/s			Vs 360 m/s			Vs 450 m/s			Vs 760 m/s		
C 8 kPa	$\phi$ 27°	Ky	D (cm)											
H	i		mín,	med	máx									
10,0	27	0,259	3,18	6,69	13,91	2,94	6,19	12,87	2,54	5,38	11,20	3,54	7,55	15,73
20,0		0,193	2,55	5,51	11,52	7,62	15,76	32,59	6,74	13,94	28,82	5,47	11,33	23,43
30,0		0,165	2,20	4,80	10,06	8,23	17,01	35,17	11,02	22,77	47,07	8,60	17,77	36,73
40,0		0,15	1,25	4,27	9,48	6,99	14,46	29,90	9,36	19,35	40,00	11,82	24,44	50,50
50,0		0,133	<0,5	3,81	8,84	7,11	14,71	30,40	8,91	18,43	38,09	16,76	34,64	71,59
60,0		0,126	<0,5	2,96	7,55	6,83	14,13	29,22	8,17	16,89	34,90	14,69	30,37	62,76
70,0		0,122	<0,5	1,76	5,67	6,25	13,00	26,93	7,66	15,83	32,73	12,95	26,76	55,31
10,0	37	0,117	15,28	31,57	65,26	13,52	27,94	57,75	11,78	24,35	50,32	16,58	34,26	70,80
20,0		0,073	18,46	38,14	78,83	35,58	73,54	151,98	31,47	65,05	134,44	25,59	52,89	109,31
30,0		0,031	47,52	98,22	202,99	75,23	155,47	321,32	82,21	169,91	351,16	62,73	129,65	267,94
40,0		0,028	53,02	109,57	226,44	73,78	152,47	315,11	79,65	164,61	340,20	76,40	157,90	326,33
50,0		0,006	146,07	301,89	623,91	106,61	220,33	455,36	92,60	191,38	395,53	70,58	145,88	301,48
10,0	45	0,017	82,76	171,04	353,49	65,78	135,95	280,97	57,31	118,45	244,79	80,65	166,67	344,47

**Figura. 46 Variación de rango de desplazamientos vs la velocidad de onda de corte Vs**



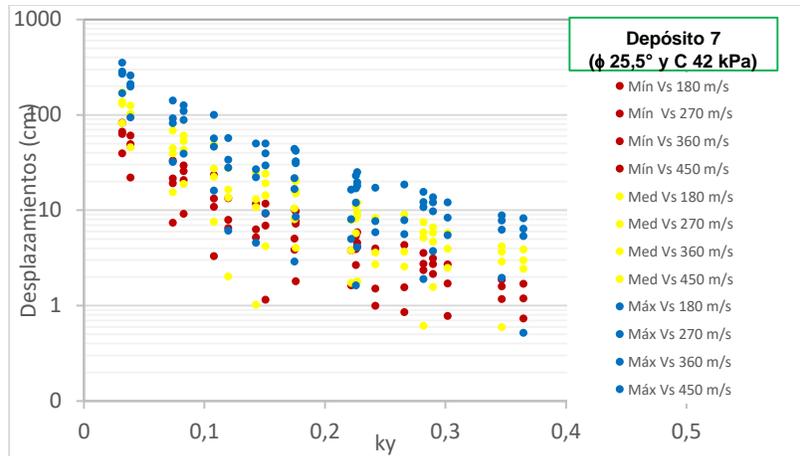
Contrario, para taludes con mayores parámetros de resistencia como el depósito 7 ( $\phi$  25,5° y C 42 kPa), se observa que las estimaciones de desplazamientos sísmicos además de estar ligados a  $k_y$ , los parámetros de resistencia y la velocidad de onda de corte son determinantes para el análisis, ya que para este tipo de taludes el rango de desplazamientos es

reducido hasta máximo 60 cm para inclinación de 37° y altura de 70,0 m, pero posterior a estas características geométricas se desarrollarán valores hasta de 350 cm, los cuales puede generar posibles afectaciones en la inestabilidad global del talud. Para este talud con las características de resistencia y con este escenario sísmico el  $k_y$  vs el desplazamiento se tiene una correlación de  $r = 0,77$ , según lo presentado en la Figura. 47.

**Tabla 33.** Comparación de los desplazamientos para Cali con Tr 475 años y sismo de Mw 7,5

Depósito 7			Vs 180 m/s			Vs 360 m/s			Vs 450 m/s			Vs 760 m/s		
C 42 kPa	$\phi$ 25,5°	Ky	D (cm)			D (cm)			D (cm)			D (cm)		
H	I		mín,	med	máx	mín,	med	máx	mín,	med	máx	mín,	med	máx
10,0	27	0,755	<0,5	<0,5	0,09	<0,5	<0,5	0,15	<0,5	<0,5	0,08	<0,5	<0,5	<0,5
20,0		0,471	<0,5	<0,5	0,36	<0,5	1,56	3,68	<0,5	1,31	3,18	<0,5	0,94	2,47
30,0		0,365	<0,5	<0,5	0,52	0,73	2,42	5,35	1,68	3,88	8,22	1,19	2,97	6,39
40,0		0,302	<0,5	<0,5	<0,5	0,77	2,48	5,48	1,70	3,93	8,33	2,70	5,77	12,01
50,0		0,266	<0,5	<0,5	<0,5	0,85	2,55	5,60	1,55	3,68	7,84	4,31	8,97	18,58
70,0		0,242	<0,5	<0,5	<0,5	0,99	2,69	5,85	1,51	3,59	7,65	3,95	8,25	17,11
70,0		0,222	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,72	4,99	1,63	3,77	8,00	3,77	7,89	16,37
10,0	37	0,707	<0,5	<0,5	0,31	<0,5	<0,5	0,33	<0,5	<0,5	0,26	<0,5	<0,5	0,30
20,0		0,405	<0,5	<0,5	0,97	0,97	2,67	5,82	0,72	2,30	5,08	<0,5	1,77	4,03
30,0		0,282	<0,5	0,61	1,90	2,36	5,14	10,75	3,56	7,48	15,51	2,75	5,84	12,15
40,0		0,226	<0,5	<0,5	1,62	2,65	5,71	11,92	3,90	8,16	16,92	5,34	11,08	22,91
50,0		0,175	<0,5	<0,5	2,89	3,83	8,01	16,62	5,01	10,41	21,55	10,28	21,26	43,93
70,0		0,143	<0,5	1,01	4,55	5,16	10,71	22,15	6,27	12,98	26,85	11,73	24,24	50,09
70,0		0,12	<0,5	2,02	6,07	6,49	13,49	27,93	7,92	16,39	33,87	13,34	27,56	56,97
10,0	45	0,635	<0,5	<0,5	0,68	<0,5	<0,5	0,69	<0,5	<0,5	0,58	<0,5	<0,5	0,74
20,0		0,347	<0,5	0,59	1,95	1,86	4,18	8,82	1,58	3,66	7,75	1,17	2,90	6,22
30,0		0,227	<0,5	1,80	4,10	4,15	8,66	17,95	5,84	12,10	25,02	4,56	9,47	19,60
40,0		0,151	1,15	4,17	9,29	6,89	14,27	29,49	9,24	19,11	39,49	11,68	24,15	49,91
50,0		0,108	3,30	7,58	16,04	10,80	22,32	46,12	13,20	27,28	56,38	23,35	48,25	99,71
70,0		0,074	7,39	15,43	31,99	19,06	39,38	81,40	21,46	44,34	91,65	33,07	68,35	141,26
70,0		0,039	21,97	45,41	93,85	46,33	95,75	197,88	49,16	101,60	209,98	60,27	124,57	257,44
10,0	53	0,589	<0,5	<0,5	1,03	<0,5	<0,5	1,02	<0,5	<0,5	0,86	<0,5	<0,5	1,14
20,0		0,29	<0,5	1,56	3,71	3,11	6,57	13,65	2,72	5,79	12,05	2,15	4,66	9,75
30,0		0,176	1,79	4,04	8,51	7,23	14,95	30,90	9,76	20,17	41,69	7,62	15,75	32,56
40,0		0,083	9,12	18,87	39,02	20,64	42,66	88,17	25,60	52,91	109,34	29,34	60,63	125,30
50,0		0,032	39,37	81,37	168,18	62,63	129,43	267,50	66,30	137,02	283,17	82,28	170,05	351,45

**Figura. 47** Variación de rango de desplazamientos vs la velocidad de onda de corte Vs

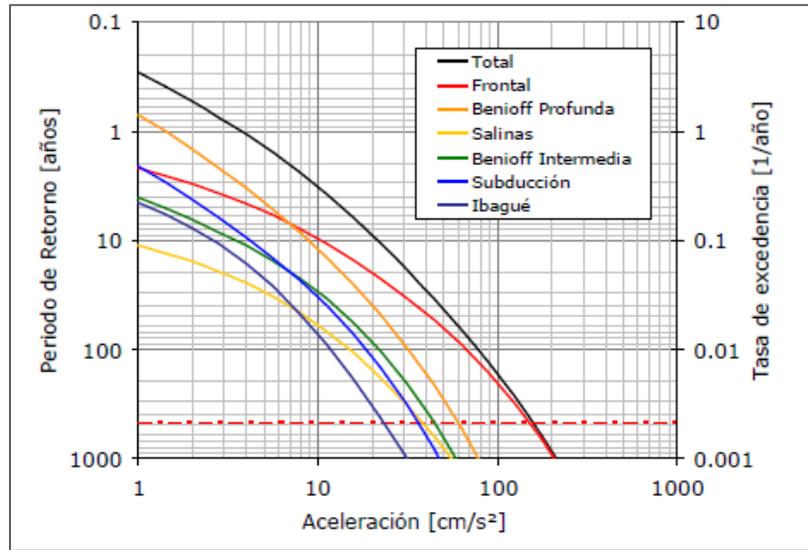


Finalmente, con las gráficas generadas a modo de ejemplo es posible evidenciar que, para la estimación de los desplazamientos sísmicos generados en taludes por un sismo de Mw 7,50, en una fuente sismogénica de subducción no se deberían homogenizar dado que se generan valores de desplazamiento muy distantes variando desde 0,5 cm hasta máximo 350 cm. En comparación con los desplazamientos para la fuente sismogénica de origen cortical los valores que se obtienen son menores para la primera máximo 100 cm y la principal variable que determinan estos valores es la magnitud del sismo que se podría llegar a generar.

#### 4.4 COMPARACIÓN CON EL ANÁLISIS DE BLOQUE DESLIZANTE DE NEWMARK

Dado que el procedimiento base para la implementación de análisis simplificado que involucran desplazamientos sísmicos es el Bloque deslizante de Newmark, se realiza un ejemplo de aplicación para Tr 475 años en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los estudios de Microzonificación sísmica Bogotá del año 2006, en el cual se indica que las fuentes sismogénicas tienen el mayor aporte dentro de la amenaza sísmica es la Falla Frontal de origen cortical, como se puede ver en la Figura. 48 y Tabla 34.

**Figura. 48** Comparación del aporte a la amenaza sísmica para distintas fuentes sismogénicas



Fuente: Microzonificación sísmica de Bogotá, 2006

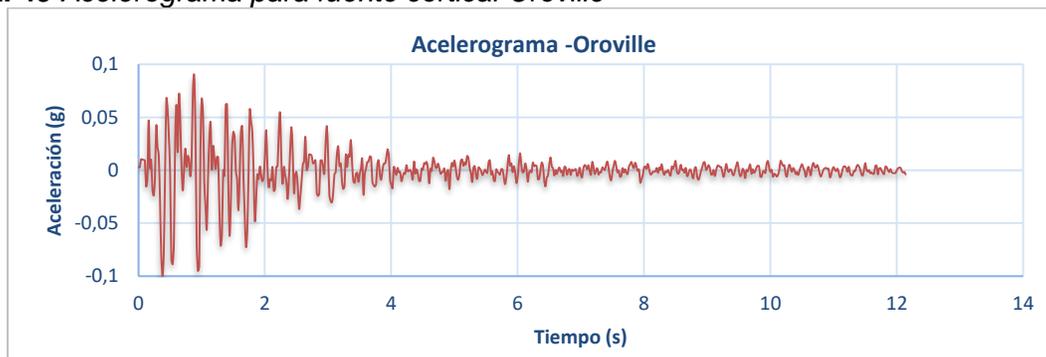
Y a partir de la MZSB, 2006 se establecen las señales sísmicas empleadas para los análisis dinámicos las cuales se presentan en la Tabla 34 y se presentan los acelerogramas de Oroville y Mammoth Lakes mostradas en la Figura. 49 y Figura. 50.

**Tabla 34.** Características de los registros sísmicos para las fuentes corticales cercanas

FECHA	HORA	NOMBRE SISMO	Ms	Mw	MI	Mb	ESTACION	PGA [g]
1975/08/01	20:20:13	OROVILLE	5.8	6	5.7	5.7	OROV. SS	0.0998
1980/0528	18:57:56	MAMMOTH LAKES AS			5.7	4.9	LONG VAL.U	0.1009
1983/07/22	2:39:54	COALINGA AS	5.8	4.4	6	6	SULPHUR.BH	0.1257
1984/04/29	5:02:59	UMBRIA	5.4	5.7	5.4	5.1	PIETRALUNG	0.1958
1995/19/01		LA URIBE					SANTA	0.0935

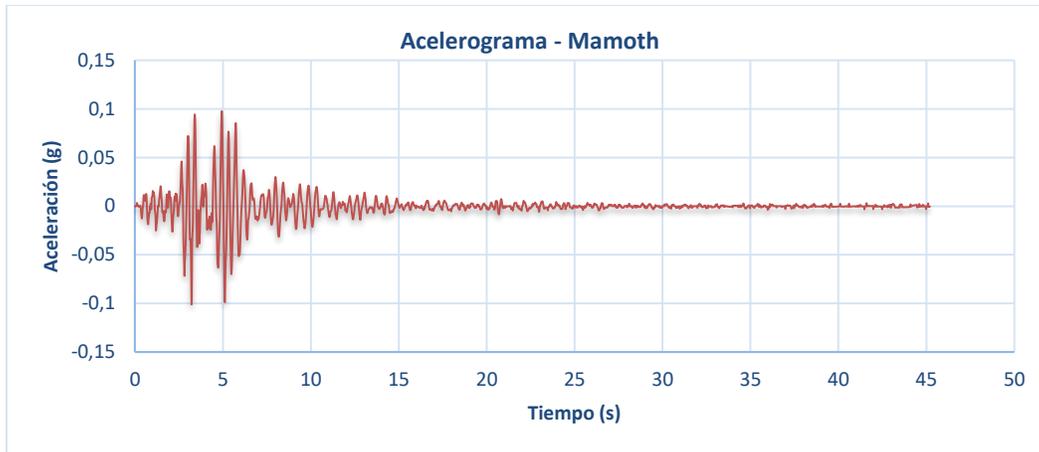
Fuente: Microzonificación sísmica de Bogotá, 2006

**Figura. 49** Acelerograma para fuente cortical Oroville



Fuente: Microzonificación sísmica de Bogotá, 2006

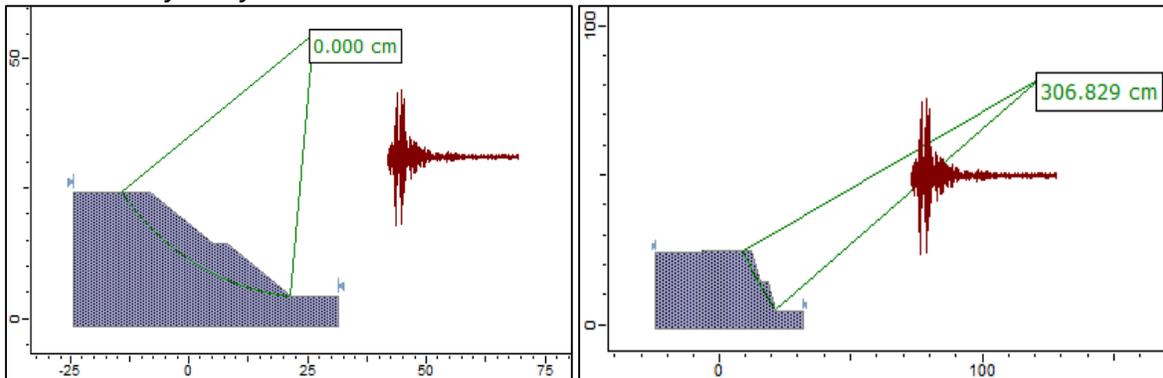
**Figura. 50** Acelerograma de representación de fuente cortical Mammoth



Fuente: Microzonificación sísmica de Bogotá, 2006

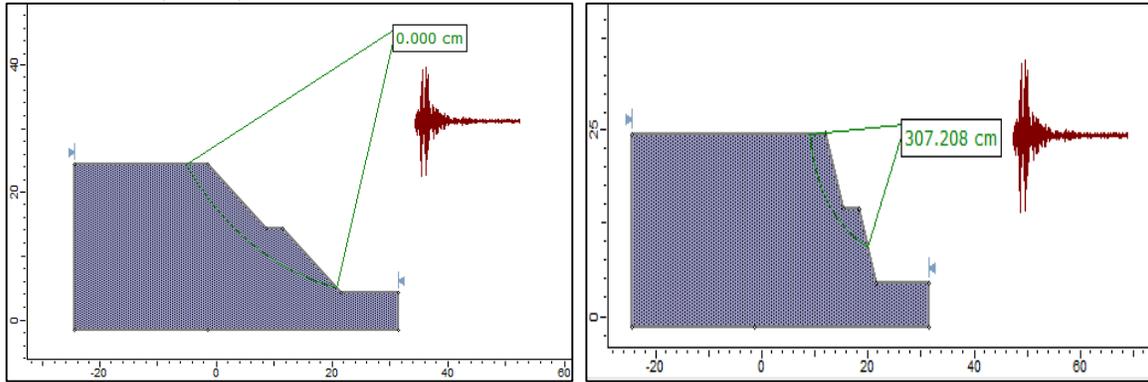
Por medio del software Slide 2D, 2018 se realizan los análisis de desplazamientos por medio de Bloque deslizando en los cuales se observa que, para inclinaciones menores  $< 45^\circ$  los desplazamientos que se generan son mínimos aproximados a cero, por el contrario, cuando se tienen inclinaciones  $> 45^\circ$  hasta  $72^\circ$  se presentan valores altos aprox de 310 cm, valores a los que se les debe prestar atención dado que para este punto los materiales que conforman el talud, ya han sido afectados por procesos de inestabilidad, grietas y fisuras y generar inestabilidad y falla en el talud. Las salidas gráficas que se pueden ver a continuación:

**Figura. 51.** Análisis de Bloque deslizando para el depósito 2, Altura de 20 m con inclinación de  $37^\circ$  y  $72^\circ$  y Velocidad de onda de corte  $V_s$  de 270 m/s



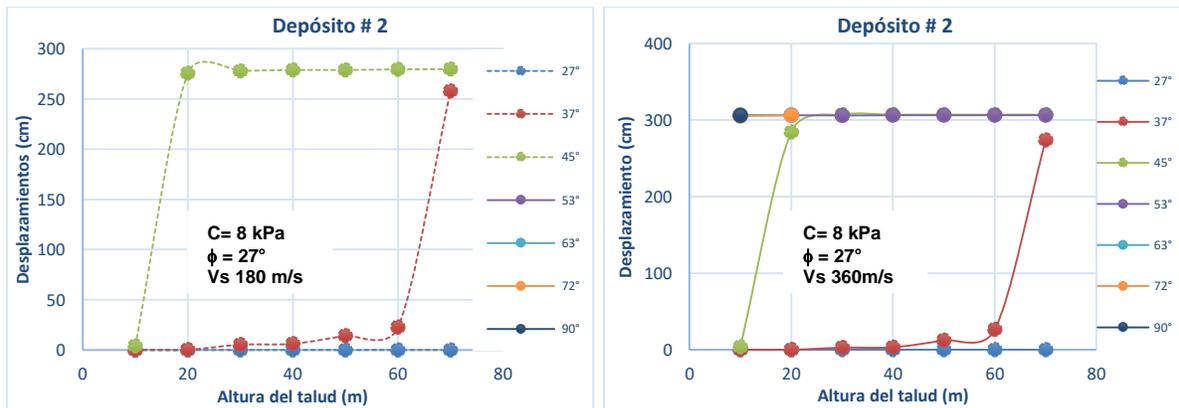
**Figura. 52.** Análisis de Bloque deslizando para el depósito 2, Altura de 20 m con inclinación de

37° y 72° y Velocidad de onda de corte Vs de 450 m/s



En la Tabla 59 y Tabla 60, se presenta el compilado de los resultados de los análisis de Bloque deslizando de Newmark, en los cuales es posible evidenciar que, para taludes como el Deposito 2 ( $C = 8 \text{ kPa}$  y  $\phi = 27^\circ$ ) los desplazamientos sísmicos son máximo de 0,1 cm para inclinación de  $27^\circ$  sin ser afectados de manera considerable por el cambio en la velocidad de onda de corte,  $V_s$ , pero, cuando aumenta la inclinación después de  $45^\circ$  los desplazamientos alcanzan valores hasta de 250 cm, volviéndose constante posterior al aumento de la inclinación como se puede ver en la Figura. 53.

**Figura. 53.** Análisis de Bloque deslizando para el depósito 2 para diferentes altura e inclinaciones



Para taludes rígidos como el asociado al Deposito 7 ( $C = 42 \text{ kPa}$  y  $\phi = 25,5^\circ$ ) sólo se presentan desplazamientos sísmicos cuando los taludes tienen inclinaciones mayores a  $53^\circ$  y con alturas mínimas de 30,0 m variando desde 2 cm hasta 250 cm sin ser afectados de manera considerable por el cambio en la velocidad de onda de corte,  $V_s$  como se puede ver en la Figura. 54.

Figura. 54. Análisis de Bloque deslizante para el depósito 7 para diferentes altura e inclinaciones

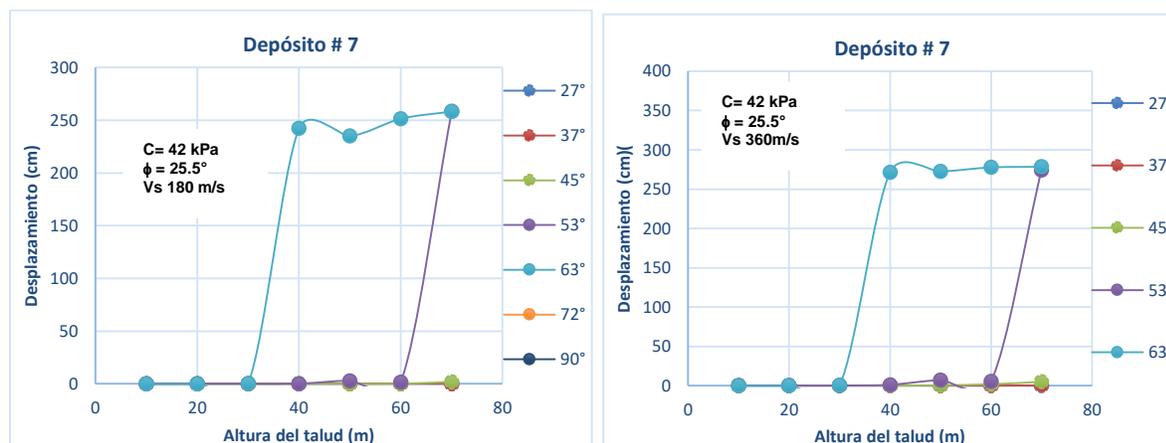


Tabla 35. Compilado de los resultados de los análisis de bloque deslizante para la ciudad de Bogotá en un Tr de 475 años para fuentes corticales

VALORES DE D (cm)- Mammoth Lakes 475 años Cortical			Vs_ 180 * Acoplado							Vs_ 270 * Acoplado							
$\phi$	C Kpa	#	Altura (m)	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°
30	15	0	10	0	0	0	0,0	1,869	258,9	277,9	0	0	0	0,0	1,869	302,4	303,6
			20	0	0	0	3,5	258,5	277,2	277,0	0	0	0,0	1,8	306,8	306,8	306,8
			30	0	0	1,077	259,4	279,7	279,9	274,5	0	0	0,1	267,3	303,6	306,5	279,2
			40	0	0	3,86	279,0	278,3	277,1	271,9	0	0	2,3	279,8	305,4	306,2	278,3
			50	0	0,136	8,10	277,76	279,10	279,32	274,18	0	0,201	9,41	279,15	306,68	305,62	275,61
			60	0	0,447	14,59	279,86	279,73	279,48	270,85	0	1,09	17,70	278,97	306,50	306,50	278,19
			70	0	0,077	258,50	258,50	258,50	258,50	258,50	0	1,467	263,90	280,75	306,57	306,80	275,05
29	11	1	10	0	0	0	1,57	304,34	280,38	281,21	0	0	0	1,337	304,34	306,05	302,14
			20	0	0	0,655	273,44	304,11	303,92		0	0	0,352	306,81	306,85	306,84	306,84
			30	0	0,467	7,805	278,03	301,59	305,15	274,47	0	0,009	6,17	306,84	306,85	306,84	306,84
			40	0	0,841	276,3	279,59	305,82	305,15	274,47	0	0,147	270,34	306,03	306,85	306,27	278,34
			50	0	1,936	267,44	279,11	305,6	305,15	274,47	0	1,58	278,32	306,85	306,84	305,62	275,61
			60	0	2,484	276,71	279,86	305,6	305,15	274,47	0	3,046	277,55	306,84	306,84	306,62	278,19
			70	0	3,579	274,72	279,36	305,6	305,15	274,47	0	4,023	279,16	306,85	306,83	306,83	258,5
27	8	2	10	0	0	4,062	306,41	306,38	305,21	305,8	0	0	3,735	306,85	306,85	306,83	306,84
			20	0	0,244	275,74	306,41	306,38	305,21	305,8	0	0,192	306,85	306,85	306,85	306,83	306,84
			30	0	5,223	277,93	306,07	306,38	305,21	305,8	0	2,909	306,85	306,85	306,85	306,83	306,84
			40	0	6,142	278,91	306,4	306,38	305,21	305,8	0	4,6	306,85	306,85	306,85	306,83	306,84
			50	0,002	14,181	278,95	306,36	306,38	305,21	305,8	0	13,315	306,85	306,85	306,85	306,83	306,84
			60	0,0013	22,719	279,54	306,38	306,38	305,21	305,8	0,017	26,079	306,84	306,85	306,85	306,83	306,84
			70	0,044	257,94	279,87	306,4	306,38	305,21	305,8	0,108	270,86	306,85	306,85	306,85	306,83	306,84
28	13	3	10	0	0	0	0,065	276,16	278,89	0	0	0	0,03	306,85	306,85	306,85	
			20	0	0	0,358	272,05	276,16	278,89	0	0	0	0,142	303,65	303,65	303,65	
			30	0	0,515	6,645	276,02	276,16	278,89	0	0	0,013	4,468	306,35	306,35	306,35	
			40	0	0,857	261,43	279,59	276,16	278,89	0	0	0,315	268,18	306,03	306,03	306,03	
			50	0	1,902	259,24	279,11	276,16	278,89	0	0	1,979	278,32	306,6	306,6	306,6	
			60	0	2,529	276,71	279,86	276,16	278,89	0	0	2,529	276,71	279,86	279,86	279,86	
			70	0	3,671	268,53	279,36	276,16	278,89	0	0	3,671	268,53	279,36	279,36	279,36	
23,67	6	4	10	0	8,951	306,41	306,41	306,38	306,8	305,8	0	8,951	306,41	306,51	306,51	306,51	306,51
			20	0,004	276,33	306,4	306,41	306,38	306,8	305,	0	8,716	306,84	306,85	306,85	306,85	306,85
			30	0,865	300,41	306,41	306,41	306,38	306,8	305,	0,097	306,85	306,85	306,85	306,85	306,85	306,85
			40	1,729	300,48	306,39	306,41	306,38	306,8	305,	0,808	306,85	306,85	306,85	306,85	306,85	306,85
			50	2,289	300,77	306,41	306,41	306,38	306,8	305,	1,919	306,85	306,85	306,85	303,65	303,65	303,65
			60	2,611	281,04	306,41	306,41	306,38	306,8	305,	2,657	306,85	306,85	306,85	306,35	306,35	306,35
			70	3,067	304,43	306,4	306,41	306,38	306,8	305,	3,417	306,85	306,85	306,85	306,03	306,03	306,03
25,5	42	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

VALORES DE D (cm)- Mammoth Lakes 475 años Cortical				Vs_ 180 * Acoplado						Vs_ 270 * Acoplado								
φ	C Kpa	#	Altura (m)	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°	
			30	0	0	0	0	0,278	36,106	243,08	0	0	0	0	1,559	38,876	270,31	
			40	0	0	0	0,123	242,41	245,74	241,68	0	0	0	1,304	264,04	275,12	267,57	
			50	0	0	0	2,912	235,22	250,17	241,34	0	0	0,296	6,637	260,41	276,41	258,52	
			60	0	0	0,042	1,701	251,52	249,92	240,13	0	0,001	1,941	5,141	272,25	276,17	264,5	
			70	0	0	1,92	258,5	258,5	258,5	258,5	0	0,053	3,323	268,42	271,64	274,11	256,07	
14,5	41	11	10	0	0	0	0	0	0,029	0	0	0	0	0	0	0	0	
			20	0	0	0	0,909	8,151	246,77	247	0	0	0	1,119	9,602	276,97	278	
			30	0	1,024	9,995	251,28	255,18	258,88	254,55	0	2,621	14,535	276,33	278,6	277,45	274,78	
			40	0	15,619	246,42	258,39	262,47	266,26	244	0,328	19,765	276,37	279,1	278,11	277,45	274,78	
			50	0	240,83	254,08	260,67	264,04	262,23	245,24	1,5	265,91	278,32	279,15	277,45	277,45	274,78	
			60	0,058	244,72	250,81	256,25	260	264			2,563	273,3	278	279,15	277,45	277,45	274,78
			70	0	243,56	255,6	260	264				4,851	271,23	279,16	279,15	277,45	277,45	274,78

Tabla 36. Compilado de los resultados de los análisis de bloque deslizante para la ciudad de Bogotá en un Tr de 475 años para fuentes corticales

VALORES DE D (cm)- Mammoth Lakes 475 años Cortical				Vs_ 360 * Acoplado						Vs_ 450 * Acoplado							
φ	C Kpa	#	Altura (m)	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°
30	15	0	10	0	0	0	0,0	1,690	307,1	307,1	0	0	0	0,0	1,702	283,6	307,0
			20	0	0	0	1,8	306,6	307,1	307,1	0	0	0	1,59	307,2	307,2	307,2
			30	0	0	0,117	273,7	307,1	307,1	305,9	0	0	0,069	304,3	307,2	307,2	307,2
			40	0	0	1,759	304,9	307,1	307,0	305,5	0	0	1,667	307,2	307,2	307,2	307,2
			50	0	0,005	8,46	307,1	307,1	307,1	302,70	0	0,004	7,48	307,21	307,21	307,20	305,94
			60	0	0,179	17,08	305,19	307,06	306,95	300,87	0	0,063	16,83	307,21	307,21	307,21	307,21
			70	0	0,889	254,51	307,07	307,06	307,06	306,54	0	0,227	273,25	307,21	307,21	307,21	258,50
29	11	1	10	0	0	0	1,217	307,08	307,08	307,07	0	0	0	1,187	284,36	307,21	307,21
			20	0	0	0,436	306,81	307,07	307,07	307,08	0	0	0,411	307,21	307,21	306,94	306,94
			30	0	0,005	5,429	307,06	307,08	307,08	307,08	0	0,004	5,717	306,94	306,94	306,94	306,94
			40	0	0,057	303,7	307,08	307,07	307,07	307,07	0	0,056	304,76	307,21	307,21	307,21	307,21
			50	0	0,436	278,76	307,08	307,08	307,08	307,08	0	0,414	306,65	307,21	307,21	307,21	307,21
			60	0	1,344	303,88	307,08	307,07	307,07	307,07	0	0,947	307,18	307,21	307,21	307,21	307,21
			70	0	2,812	302,96	307,07	307,08	307,08	307,08	0	2,053	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21
27	8	2	10	0	0	3,777	284,34	307,08	0	0	0	0	3,922	282,64	0	0	0
			20	0	0,137	284,24	307,07	0	0	0	0	0,112	284,41	307,21	0	0	0
			30	0	2,923	307,08	307,08	0	0	0	0	2,864	307,21	307,21	0	0	0
			40	0	3,466	307,08	307,08	0	0	0	0	3,786	307,21	307,21	307,21	307,21	0
			50	0	12,643	307,08	307,08	0	0	0	0	12,684	307,21	307,21	307,21	307,21	0
			60	0	26,755	307,08	307,08	0	0	0	0	28,083	307,21	307,21	307,21	307,21	0
			70	0,003	274,15	307,08	307,08	0	0	0	0	303,51	307,21	307,21	307,21	307,21	0
28	13	3	10	0	0	0,028	284,31	284,31	284,31	284,31	0	0	0	0,037	284,36	284,36	284,36
			20	0	0	0,113	306,4	306,4	306,4	306,4	0	0	0,098	307,21	307,21	307,21	307,21
			30	0	0	4,267	306,97	306,97	306,97	306,97	0	0,007	4,48	306,94	306,94	306,94	306,94
			40	0	0,71	274,41	307,08	307,08	307,08	307,08	0	0,058	304,76	307,21	307,21	307,21	307,21
			50	0	0,657	273,58	307,08	307,08	307,08	307,08	0	0,609	304,19	307,21	307,21	307,21	307,21
			60	0	2,626	303,88	307,08	307,08	307,08	307,08	0	1,581	307,18	307,21	307,21	307,21	307,21
			70	0	4,056	279,72	307,07	307,07	307,07	307,07	0	2,612	306,87	307,21	307,21	307,21	307,21
23,67	6	4	10	0	8,716	284,33	307,08	0	0	0	0	8,487	284,41	284,41	284,41	284,41	284,41
			20	0	307,08	307,08	307,08	0	0	0	0	284,36	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21
			30	0,103	307,08	307,08	0	0	0	0	0,05	307,21	307,21	307,21	306,94	306,94	306,94
			40	0,359	307,08	307,08	0	0	0	0	0,286	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21
			50	0,67	307,08	307,08	0	0	0	0	0,574	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21
			60	1,417	307,08	307,08	0	0	0	0	0,96	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21
			70	2,264	307,08	307,08	0	0	0	0	1,295	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21	307,21
25,5	42	7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			30	0	0	0	0	0,519	41,826	278,39	0	0	0	0	0,246	40,457	278,64
			40	0	0	0	1,015	271,43	278,81	278,65	0	0	0	0,185	276,94	278,22	278,06
			50	0	0	0,46	6,927	272,46	278,48	275,98	0	0	0,04	5,942	275,67	278,61	278,63

VALORES DE D (cm)- Mammoth Lakes 475 años Cortical				Vs_ 360 * Acoplado							Vs_ 450 * Acoplado							
$\phi$	C Kpa	#	Altura (m)	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°	27°	37°	45°	53°	63°	72°	90°	
			60	0	0	1,761	5,313	277,65	278,87	259,74	0	0	1,469	4,209	278,88	278,08	276,71	
			70	0	0,278	5,052	274,09	278,55	278,45	278,43	0	0,215	4,757	277,12	278,67	278,2	276,27	
14,5	41	11	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			20	0	0	0	0,268	8,997	270,87			0	0	0	0,225	7,979	273,32	274
			30	0	1,885	15,25	278,86	277,43	277,57	278,72	0	0,769	14,81	278,6	302	304	304	278,64
			40	0,28	22,46	278,9	278,78	277,43	277,57	278,72	0,004	23,666	277,53	303,74	302	304	304	275,2
			50	2,334	278,18	278,77	278,85	277,43	277,57	278,72	1,96	278,5	301,1	303,74	302	304	304	275,2
			60	4,695	278,9	278,93	277,43	277,43	277,57	278,72	5,32	278,6	278,72	303,74	302	304	304	275,2
			70	7,962	278,87	278,93	277,43	277,43	277,57	278,72	9,36	278,44	302,2	303,74	302	304	304	275,2

De acuerdo con los resultados obtenidos para el análisis realizados para todos los 13 depósitos con taludes con variación de altura entre 10,0 m y 70,0 m e inclinación desde 27° hasta 90° para diferentes velocidades de onda de corte (180, 270, 360 y 450) m/s, y se evidencia que esta metodología de Bloque deslizando arroja valores de desplazamiento sísmico hasta 300 cm para taludes con alturas mayores a 20,0 m e inclinación de 37° y para taludes con inclinaciones inferiores a 37° y alturas menores que 20,0 m no genera desplazamientos o si es el caso son inferiores a 10,0 cm.

Al comparar este análisis de bloque deslizando con el procedimiento simplificado que estima desplazamientos sísmicos admisibles para sismos originados en zonas de fallas corticales, según los ejemplos mostrados para el Depósito 2 ( $\phi$  27,0° y C 8 kPa) y Depósito 7 ( $\phi$  25,5° y C 42 kPa) Capítulo 4.3.1, se evidencia que, con este último los desplazamientos generados están en un amplio rango, contrario al talud con parámetros más altos ( $\phi$  25,5° y C 42 kPa) que permite desplazamiento con valores máximo 15,0 cm. Con los resultados obtenidos a partir de bloque deslizando que no discretiza por parámetros de resistencia y genera valores muy altos (350 cm), es decir para la implementación práctica estos valores de desplazamiento requerirá obras de estabilización robustas.

Por lo anterior, y dada las diferencias distales entre el análisis muy conservador de bloque deslizando vs el análisis pseudoestático muy simplificado se observa óptima y pertinente aplicación del procedimiento de estimación de desplazamientos admisibles que, tiene en cuenta la variación en las características geométricas y resistencia para diferentes taludes así como el del entorno sismogénico (fuentes sismogénicas corticales y de subducción) y espectro sísmico (distinción del tipo de sismo, magnitud, espectro, amplitud, periodo de retorno).

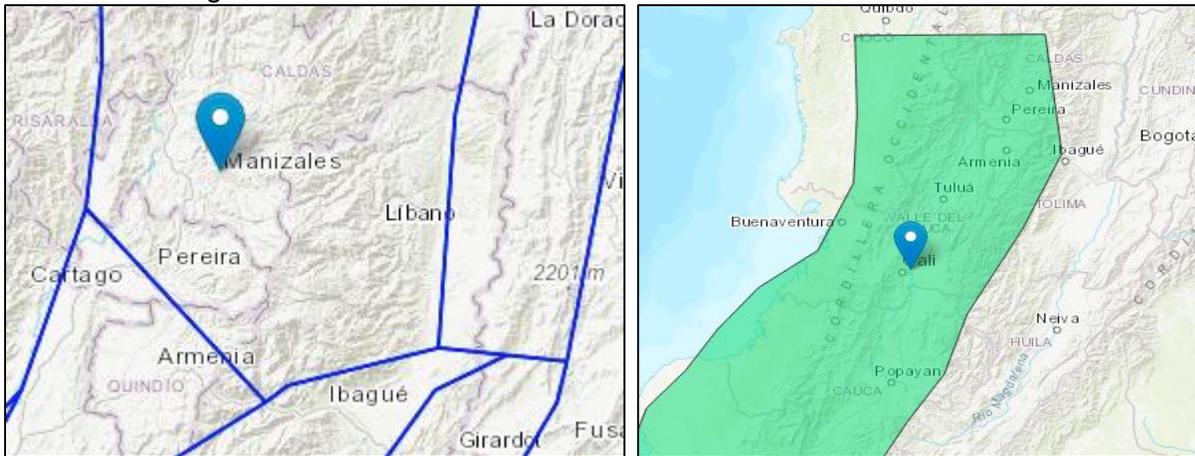
## 5. GENERACIÓN DE HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

### 5.1 ESTIMACIÓN COEFICIENTE DE ACELERACIÓN HORIZONTAL, 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 sismológico 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 sismogénica 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 sismogénica de intra-placa In\_Slab\_ 40 Benioff con  $M_w$  máx de 7,5

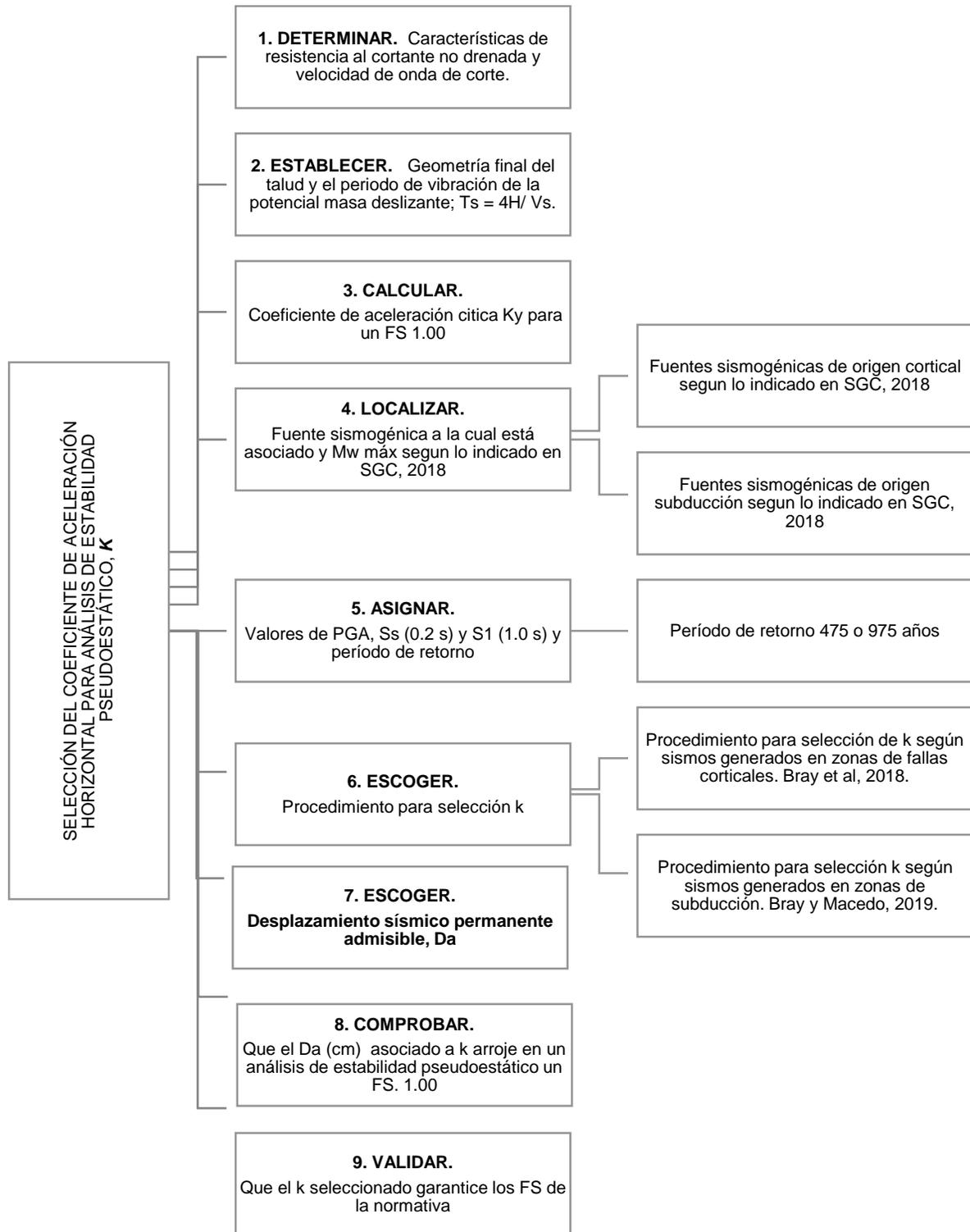
**Figura. 55** Localización de ciudad de Bogotá y Cali respectivamente junto con sus fuentes sismogénicas



Fuente: SGC, 2018

5. Asignar los valores de PGA,  $S_s$  (0,2 s) y  $S_1$  (1,0 s) para los diferentes períodos 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 sismogénica 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. 56** Diagrama de flujo para la selección del coeficiente de aceleración horizontal para análisis pseudoestáticos



### 5.1.1 Coeficiente de aceleración horizontal, $k$ en zonas de fuentes corticales para $T_r$ 475 años

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 sismogénica de origen cortical se obtienen aceleraciones pico de terreno para diferentes zonas de la ciudad con las características sísmicas compiladas en la Tabla 37.

**Tabla 37.** Características sísmicas del área de la fuente cortical de la ciudad de Manizales

CIUDAD	Manizales
Zona	54
PGA	0,20
S1 (1,0 s)	0,1
Ss (0,2 s)	0,6
Fuente	CC 12
NOMBRE	Aránzazu-Manizales
a <sub>gr</sub>	3,658
b <sub>gr</sub>	0,919
M <sub>máx</sub>	6,5
M <sub>mín</sub>	5

CONVENCIONES

- ZONA A - CENIZAS
- ZONA B - RELLENOS
- ZONA C - ROCAS, FLUJOS Y DEPÓSITOS DE POCO ESPESOR

MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE MANIZALES			
	Zona A	Zona B	Zona C
To	0.10	0.10	0.10
Tc	0.65	0.50	0.50
TL	3.25	2.50	2.50
Am	0.44	0.40	0.30
An	0.44	0.40	0.30
Fa	1.00	1.00	1.00
Fv	1.63	1.25	1.25

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores de aceleración pico de terreno presentados, se toma el valor más alto de  $A_m = 0,44$  postulando diferentes valores de  $D_a$  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  $A_m$  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  $D_a$  de 2,52 cm y se calcula un  $k = 0,44$  para este caso, el  $k = A_m$ , pero se obtiene un FS de 0,77, es decir que bajo un análisis pseudoestático este talud falla, sin embargo, si se toma un  $D_a$  de 9,30 cm se obtiene un  $k$  de 0,23, que es el 52% de  $A_m$  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 38, se presentan los Da (cm) y los k asociados.

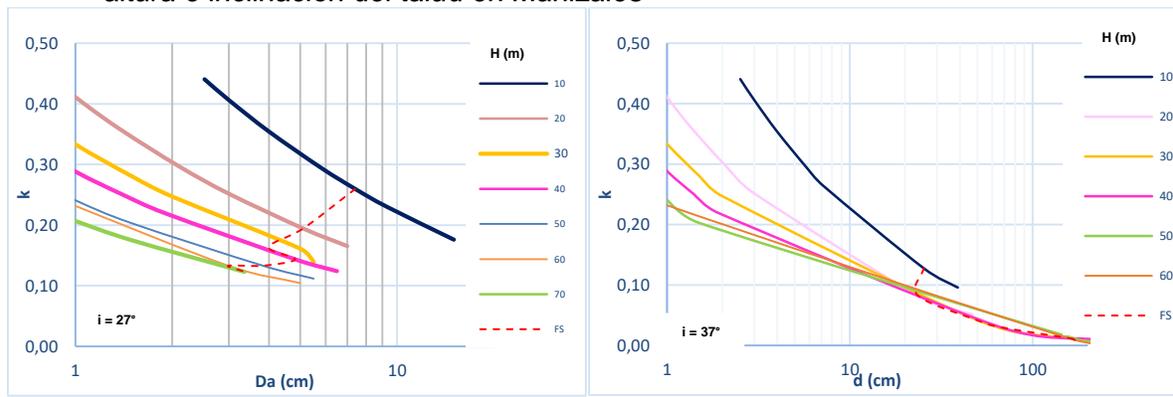
**Tabla 38.** Coeficiente de aceleración horizontal taludes con Vs 180 m/s e inclinación de 27 ° para Manizales en Depósito 2 (C 8 kPa  $\phi$  21°)

H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3Ts)	Desplazamientos admisibles	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,44
					Da (cm)	a	b	k	% k	FS
10	6,50	0,222	0,259	0,790	2,52	2,572	4,710	0,440	1,00	0,77
	6,50	0,222	0,259	0,790	3,00	2,572	4,539	0,406	0,92	0,80
	6,50	0,222	0,259	0,790	4,00	2,572	4,257	0,354	0,80	0,86
	6,50	0,222	0,259	0,790	5,80	2,572	3,893	0,294	0,67	0,95
	6,50	0,222	0,259	0,790	7,40	2,572	3,653	0,260	0,59	1,00
	6,50	0,222	0,259	0,790	9,30	2,572	3,359	0,230	0,52	1,05
20	6,50	0,222	0,259	0,790	15,00	2,572	2,961	0,176	0,40	1,16
	6,50	0,444	0,193	0,410	0,85	2,798	5,739	0,440	1,00	0,67
	6,50	0,444	0,193	0,410	1,10	2,798	5,486	0,395	0,90	0,72
	6,50	0,444	0,193	0,410	1,40	2,798	5,250	0,356	0,81	0,76
	6,50	0,444	0,193	0,410	2,10	2,798	4,852	0,297	0,67	0,84
	6,50	0,444	0,193	0,410	3,00	2,798	4,503	0,252	0,57	0,90
30	6,50	0,444	0,193	0,410	5,11	2,798	4,221	0,194	0,44	1,00
	6,50	0,444	0,193	0,410	7,00	2,798	3,981	0,169	0,38	1,05
	6,50	0,667	0,165	0,280	0,51	2,929	6,374	0,438	1,00	0,62
	6,50	0,667	0,165	0,280	0,66	2,929	6,122	0,395	0,90	0,66
	6,50	0,667	0,165	0,280	1,00	2,929	5,715	0,333	0,76	0,73
	6,50	0,667	0,165	0,280	1,50	2,929	5,317	0,280	0,64	0,81
40	6,50	0,667	0,165	0,280	2,00	2,929	5,035	0,247	0,56	0,85
	6,50	0,667	0,165	0,280	5,00	2,929	4,817	0,161	0,37	1,00
	6,50	0,667	0,165	0,280	5,50	2,929	4,168	0,139	0,32	1,05
	6,50	0,889	0,150	0,210	0,34	3,028	6,906	0,442	1,00	0,61
	6,50	0,889	0,150	0,210	0,60	3,028	6,350	0,355	0,81	0,68
	6,50	0,889	0,150	0,210	1,00	3,028	5,849	0,288	0,66	0,77
50	6,50	0,889	0,150	0,210	1,40	3,028	5,519	0,250	0,57	0,81
	6,50	0,889	0,150	0,210	1,90	3,028	5,220	0,219	0,50	0,88
	6,50	0,889	0,150	0,210	4,82	3,028	4,951	0,143	0,33	1,00
	6,50	0,889	0,150	0,210	6,50	3,028	4,309	0,124	0,28	1,05
	6,50	1,111	0,133	0,170	0,26	3,101	7,284	0,440	1,00	0,59
	6,50	1,111	0,133	0,170	0,40	3,101	6,671	0,348	0,79	0,68
60	6,50	1,111	0,133	0,170	0,60	3,101	6,274	0,296	0,67	0,73
	6,50	1,111	0,133	0,170	1,00	3,101	5,773	0,241	0,55	0,80
	6,50	1,111	0,133	0,170	1,50	3,101	5,376	0,203	0,46	0,87
	6,50	1,111	0,133	0,170	3,83	3,101	5,094	0,133	0,30	1,00
	6,50	1,111	0,133	0,170	5,50	3,101	4,457	0,111	0,25	1,05
	6,50	1,333	0,126	0,140	0,19	3,167	7,634	0,438	1,00	0,58
70	6,50	1,333	0,126	0,140	0,30	3,167	7,186	0,370	0,84	0,63
	6,50	1,333	0,126	0,140	0,50	3,167	6,686	0,305	0,69	0,71
	6,50	1,333	0,126	0,140	0,80	3,167	6,225	0,254	0,58	0,78
	6,50	1,333	0,126	0,140	1,00	3,167	6,007	0,232	0,53	0,81
	6,50	1,333	0,126	0,140	2,99	3,167	5,419	0,133	0,30	1,00
	6,50	1,333	0,126	0,140	5,00	3,167	4,744	0,104	0,24	1,05
70	6,50	1,556	0,122	0,120	0,14	3,220	7,923	0,437	0,99	0,57
	6,50	1,556	0,122	0,120	0,35	3,220	7,025	0,312	0,71	0,70
	6,50	1,556	0,122	0,120	0,50	3,220	6,675	0,273	0,62	0,74
	6,50	1,556	0,122	0,120	0,75	3,220	6,278	0,233	0,53	0,80
	6,50	1,556	0,122	0,120	1,00	3,220	5,996	0,207	0,47	0,85
	6,50	1,556	0,122	0,120	1,50	3,220	5,599	0,175	0,40	0,90
6,50	1,556	0,122	0,120	3,35	3,220	4,811	0,123	0,28	1,00	

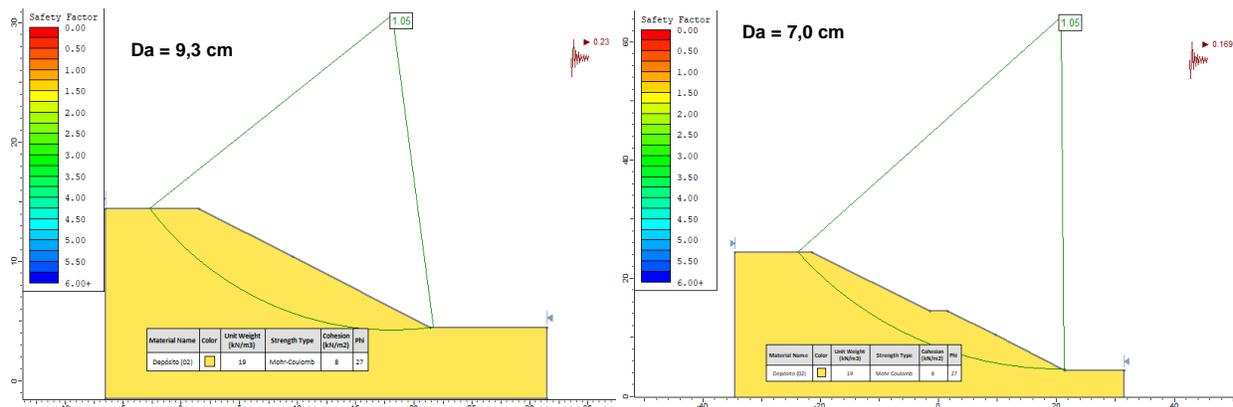
En la Figura. 57 se grafican los desplazamientos admisibles vs coeficiente de aceleración horizontal teniendo en cuenta los diferentes factores de seguridad, hacia la izquierda FS < 1,0 y

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  $D_a$  (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  $D_a$  (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. 57** Determinación  $k$ , para taludes del depósito 2 y  $V_s$  180 m/s, teniendo en cuenta la altura e inclinación del talud en Manizales



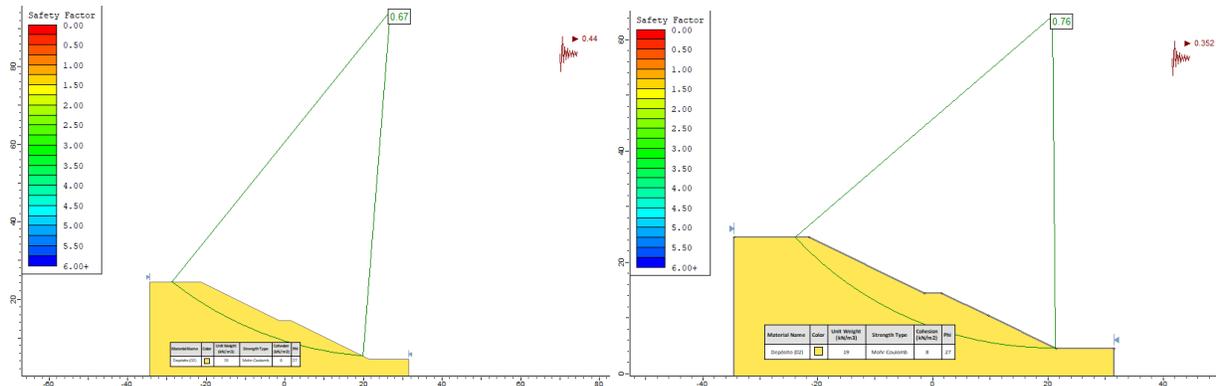
**Figura. 58** Validación de  $k$ , para taludes del depósito 2 dependiendo de  $D_a$  (cm) y con  $FS = 1,05$



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  $KST/A_{m\max}$  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. 59** Análisis de estabilidad pseudo estático bajo la AIS, 2010 en la ciudad de Manizales



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  $D_a$  (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  $D_a$  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%.

**Tabla 39.** Coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  para taludes con  $V_s$  180 m/s para Manizales en Depósitos tipo 0 ( $C$  15 kPa  $\phi$   $30^\circ$ )

Inclinación	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3Ts)	Da (cm)	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,44
							a	b	k	% k	FS
27°	10	6,50	0,22	0,44	0,79	<b>2,52</b>	2,57	4,71	<b>0,44</b>	<b>1,00</b>	1,00
	20	6,50	0,44	0,34	0,41	<b>1,61</b>	2,80	5,11	<b>0,33</b>	<b>0,76</b>	1,00
	30	6,50	0,67	0,29	0,28	<b>1,44</b>	2,93	5,36	<b>0,29</b>	<b>0,65</b>	1,00
	40	6,50	0,89	0,26	0,21	<b>1,28</b>	3,03	5,61	<b>0,26</b>	<b>0,59</b>	1,00
	50	6,50	1,11	0,23	0,17	<b>1,07</b>	3,10	5,71	<b>0,23</b>	<b>0,53</b>	1,00
	60	6,50	1,33	0,22	0,14	<b>1,11</b>	3,17	5,91	<b>0,22</b>	<b>0,50</b>	1,00
37°	10	6,50	0,22	0,33	0,79	<b>4,00</b>	2,57	4,26	<b>0,35</b>	<b>0,80</b>	1,00
	20	6,50	0,44	0,21	0,41	<b>4,29</b>	2,80	4,15	<b>0,21</b>	<b>0,48</b>	1,00
	30	6,50	0,67	0,15	0,28	<b>3,00</b>	2,93	4,45	<b>0,19</b>	<b>0,43</b>	1,00
	40	6,50	0,89	0,14	0,21	<b>3,00</b>	3,03	4,77	<b>0,18</b>	<b>0,41</b>	1,00
	50	6,50	1,11	0,11	0,17	<b>2,50</b>	3,10	4,88	<b>0,16</b>	<b>0,37</b>	1,00
	60	6,50	1,33	0,09	0,14	<b>2,00</b>	3,17	5,14	<b>0,09</b>	<b>0,21</b>	1,00
45°	10	6,50	0,22	0,25	0,79	<b>8,33</b>	2,57	3,54	<b>0,24</b>	<b>0,55</b>	1,00
	20	6,50	0,44	0,13	0,41	<b>10,34</b>	2,80	3,29	<b>0,13</b>	<b>0,31</b>	1,00
	30	6,50	0,67	0,08	0,28	<b>16,90</b>	2,93	2,75	<b>0,07</b>	<b>0,17</b>	1,00
	40	6,50	0,89	0,05	0,21	<b>31,38</b>	3,03	2,47	<b>0,05</b>	<b>0,12</b>	1,00
	50	6,50	1,11	0,02	0,17	<b>99,90</b>	3,10	1,26	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	1,00
	60	6,50	1,33	0,01	0,14	<b>176,17</b>	3,17	0,75	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	1,00

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° son inferiores a 4,0 cm y se obtienen k entre 0,12 a 0,37 lo que significa que se reduce Am entre 28% y 83%; pero, cuando se tiene una inclinación de 37° 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 Da hasta 167,55 cm y se determina un coeficiente de aceleración entre 0,24 y 0,04; finalmente si aumenta a 45° la inclinación los Da (cm) máximos son de 90,05 y un k de 0,02.

**Tabla 40.** Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales en Depósitos tipo 1 (C 11 kPa  $\phi$  27°)

Inclinación	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3 Ts)	Da (cm)	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,44
							a	b	k	% k	FS
27°	10	6,5	0,2222	0,355	0,79	<b>3,72</b>	2,57	4,33	<b>0,37</b>	<b>0,83</b>	1,00
	20	6,5	0,4444	0,263	0,41	<b>2,67</b>	2,80	4,62	<b>0,27</b>	<b>0,60</b>	1,00
	30	6,5	0,6667	0,228	0,28	<b>2,36</b>	2,93	4,87	<b>0,23</b>	<b>0,52</b>	1,00
	40	6,5	0,8889	0,204	0,21	<b>2,20</b>	3,03	5,08	<b>0,21</b>	<b>0,47</b>	1,00
	50	6,5	1,1111	0,188	0,17	<b>1,78</b>	3,10	5,21	<b>0,19</b>	<b>0,43</b>	1,00
	60	6,5	1,3333	0,18	0,14	<b>1,50</b>	3,17	5,42	<b>0,18</b>	<b>0,41</b>	1,00
	70	6,5	1,5556	0,173	0,12	<b>1,54</b>	3,22	5,57	<b>0,17</b>	<b>0,39</b>	1,00
37°	10	6,5	0,2222	0,24	0,79	<b>8,52</b>	2,57	3,52	<b>0,24</b>	<b>0,55</b>	1,00
	20	6,5	0,4444	0,15	0,41	<b>8,19</b>	2,80	3,52	<b>0,15</b>	<b>0,35</b>	1,00
	30	6,5	0,6667	0,11	0,28	<b>9,10</b>	2,93	3,36	<b>0,11</b>	<b>0,24</b>	1,00
	40	6,5	0,8889	0,09	0,21	<b>10,73</b>	3,03	3,52	<b>0,10</b>	<b>0,22</b>	1,00
	50	6,5	1,1111	0,07	0,17	<b>12,71</b>	3,10	3,28	<b>0,07</b>	<b>0,16</b>	1,00
	60	6,5	1,3333	0,06	0,14	<b>15,81</b>	3,17	3,11	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	1,00
	70	6,5	1,5556	0,04	0,12	<b>24,68</b>	3,22	2,85	<b>0,04</b>	<b>0,10</b>	1,00
45°	10	6,5	0,222	0,15	0,79	<b>19,19</b>	2,57	2,72	<b>0,15</b>	<b>0,35</b>	1,00
	20	6,5	0,444	0,06	0,41	<b>36,41</b>	2,80	2,06	<b>0,06</b>	<b>0,14</b>	1,00
	30	6,5	0,667	0,02	0,28	<b>90,05</b>	2,93	1,11	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	1,00

**Tabla 41.** Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales en Depósitos tipo 2 (C 8 kPa  $\phi$  27°)

Inclinación	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3 Ts)	Da (cm)	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,44
							a	b	k	% k	FS
27°	10	6,50	0,22	0,26	0,79	<b>7,40</b>	2,57	3,65	<b>0,26</b>	<b>0,59</b>	1,00
	20	6,50	0,44	0,19	0,41	<b>5,11</b>	2,80	3,98	<b>0,19</b>	<b>0,44</b>	1,00
	30	6,50	0,67	0,17	0,28	<b>3,99</b>	2,93	4,17	<b>0,16</b>	<b>0,37</b>	1,00
	40	6,50	0,89	0,15	0,21	<b>4,82</b>	3,03	4,31	<b>0,14</b>	<b>0,33</b>	1,00
	50	6,50	1,11	0,13	0,17	<b>3,83</b>	3,10	4,46	<b>0,13</b>	<b>0,30</b>	1,00
	60	6,50	1,33	0,13	0,14	<b>2,99</b>	3,17	4,74	<b>0,13</b>	<b>0,30</b>	1,00
	70	6,50	1,56	0,12	0,12	<b>3,35</b>	3,22	4,81	<b>0,12</b>	<b>0,28</b>	1,00
37°	10	6,50	0,22	0,13	0,79	<b>25,38</b>	2,57	2,45	<b>0,13</b>	<b>0,29</b>	1,00
	20	6,50	0,44	0,08	0,41	<b>23,60</b>	2,80	2,48	<b>0,08</b>	<b>0,19</b>	1,00
	30	6,50	0,67	0,04	0,28	<b>41,15</b>	2,93	1,88	<b>0,04</b>	<b>0,09</b>	1,00
	40	6,50	0,89	0,03	0,21	<b>66,14</b>	3,03	1,74	<b>0,03</b>	<b>0,07</b>	1,00
	50	6,50	1,11	0,01	0,17	<b>176,98</b>	3,10	0,70	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	1,00
	60	6,50	1,33	0,00	0,14	<b>167,55</b>	3,17	0,80	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	1,00
45°	10	6,50	0,22	0,03	0,79	<b>151,76</b>	2,57	0,69	<b>0,03</b>	<b>0,07</b>	1,00

**Tabla 42. Coeficiente de aceleración horizontal, k para taludes con Vs 180 m/s para Manizales en Depósitos tipo 3 (C 13 kPa  $\phi$  28°)**

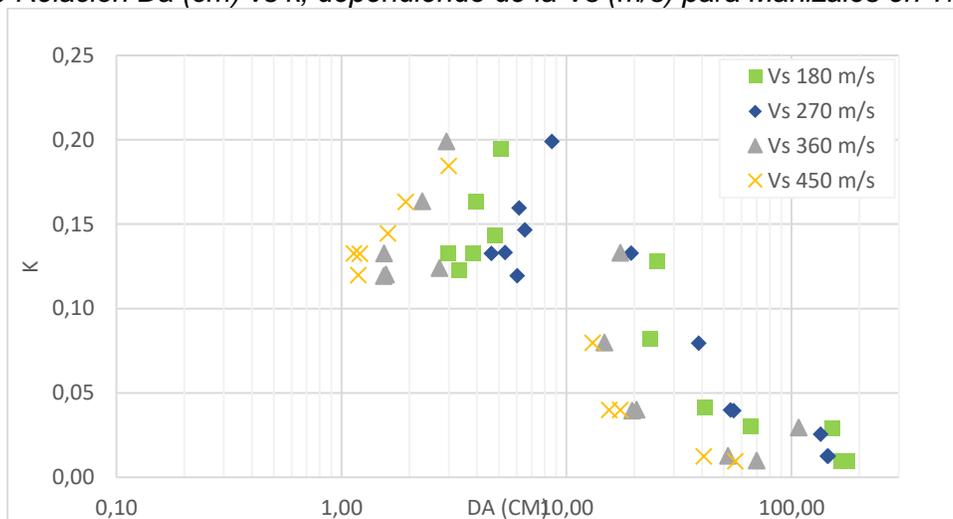
Inclinación	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3 Ts)	Da (cm)	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,44
							a	b	k	% k	FS
27°	10,00	6,50	0,22	0,37	0,79	3,41	2,57	4,41	0,38	0,87	1,00
	20,00	6,50	0,44	0,27	0,41	2,48	2,80	4,69	0,28	0,63	1,00
	30,00	6,50	0,67	0,23	0,28	2,23	2,93	4,93	0,24	0,54	1,00
	40,00	6,50	0,89	0,20	0,21	2,23	3,03	5,06	0,20	0,47	1,00
	50,00	6,50	1,11	0,19	0,17	1,65	3,10	5,28	0,19	0,44	1,00
	60,00	6,50	1,33	0,17	0,14	1,62	3,17	5,34	0,17	0,40	1,00
	70,00	6,50	1,56	0,16	0,12	1,78	3,22	5,43	0,16	0,37	1,00
37°	10,00	6,50	0,22	0,27	0,79	7,13	2,57	3,69	0,26	0,60	1,00
	20,00	6,50	0,44	0,16	0,41	7,31	2,80	3,63	0,16	0,37	1,00
	30,00	6,50	0,67	0,11	0,28	9,12	2,93	3,36	0,11	0,24	1,00
	40,00	6,50	0,89	0,09	0,21	10,71	3,03	3,53	0,10	0,22	1,00
	50,00	6,50	1,11	0,07	0,17	12,62	3,10	3,29	0,07	0,16	1,00
	60,00	6,50	1,33	0,05	0,14	19,08	3,17	2,93	0,05	0,12	1,00
	70,00	6,50	0,22	0,04	0,12	27,27	3,22	2,76	0,04	0,09	1,00
45,00	10,00	6,50	0,22	0,18	0,79	13,89	2,57	3,04	0,18	0,42	1,00
	20,00	6,50	0,44	0,08	0,41	23,59	2,80	2,48	0,08	0,19	1,00
	30,00	6,50	0,67	0,03	0,28	57,24	2,93	1,56	0,03	0,07	1,00

Una vez se realizan todos los cálculos en los cuales se estiman para cada depósito los desplazamientos sísmicos admisibles y por ende los coeficientes de aceleración horizontal k, con los cuales en un análisis de estabilidad pseudoestático alcanzan FS=1,0. En la Tabla 44 Se compilan todos los resultados de Da (cm) vs k teniendo en cuenta la variación de onda de corte. En la Figura. 65 se puede ver que, los Da (cm) para Vs entre 180 m/s y 270 m/s se generan relativamente valores más grandes que para taludes con Vs entre 360 m/s y 450 m/s; lo cual indica que son los taludes rígidos ante la ocurrencia de un sismo de Mw 6,5 producen Da < 5,0 cm para inclinación 27° y Da < 15,0 cm para 37° inclinación.

**Tabla 43. Coeficiente de aceleración horizontal para Manizales en Depósito 7 (C 42 kPa  $\phi$  25,5°)**

Características			Vs 180 m/s				Vs 270 m/s				Vs 360 m/s				Vs 450 m/s			
Inclinación	H	Mw	Ts = 4H/Vs	Da (cm)	k	Am	Da (cm)	k	Am	Da (cm)	k	Am	Da (cm)	k	Am			
						% k			% k			% k			% k			
27°	10	6,50	0,22															
	20	6,50	0,44	5,11	0,19	0,44	8,63	0,20	0,45	2,93	0,20	0,45	3,00	0,18	0,42			
	30	6,50	0,67	3,99	0,16	0,37	6,17	0,16	0,36	2,29	0,16	0,37	1,93	0,16	0,37			
	40	6,50	0,89	4,82	0,14	0,33	6,54	0,15	0,33	2,73	0,12	0,28	1,61	0,14	0,33			
	50	6,50	1,11	3,83	0,13	0,30	5,34	0,13	0,30	1,55	0,13	0,30	1,21	0,13	0,30			
	60	6,50	1,33	2,99	0,13	0,30	4,64	0,13	0,30	1,54	0,12	0,27	1,13	0,13	0,30			
	70	6,50	1,56	3,35	0,12	0,28	6,04	0,12	0,27	1,58	0,12	0,27	1,19	0,12	0,27			
37°	10	6,50	0,22	25,38	0,13	0,29	19,38	0,13	0,30	17,36	0,13	0,30						
	20	6,50	0,44	23,60	0,08	0,19	38,76	0,08	0,18	14,75	0,08	0,18	13,10	0,08	0,18			
	30	6,50	0,67	41,15	0,04	0,09	53,61	0,04	0,09	20,52	0,04	0,09	17,36	0,04	0,09			
	40	6,50	0,89	66,14	0,03	0,07	55,49	0,04	0,09	19,62	0,04	0,09	15,51	0,04	0,09			
	50	6,50	1,11	176,98	0,01	0,02	145,96	0,01	0,03	70,14	0,01	0,02	56,43	0,01	0,02			
	60	6,50	1,33	167,55	0,01	0,02	144,56	0,01	0,03	52,33	0,01	0,03	40,86	0,01	0,03			
45°	10	6,50	0,22	151,76	0,03	0,07	134,93	0,03	0,06	107,71	0,03	0,07						

**Figura. 60** Relación  $Da$  (cm) vs  $k$ , dependiendo de la  $V_s$  (m/s) para Manizales en Tr 475 años

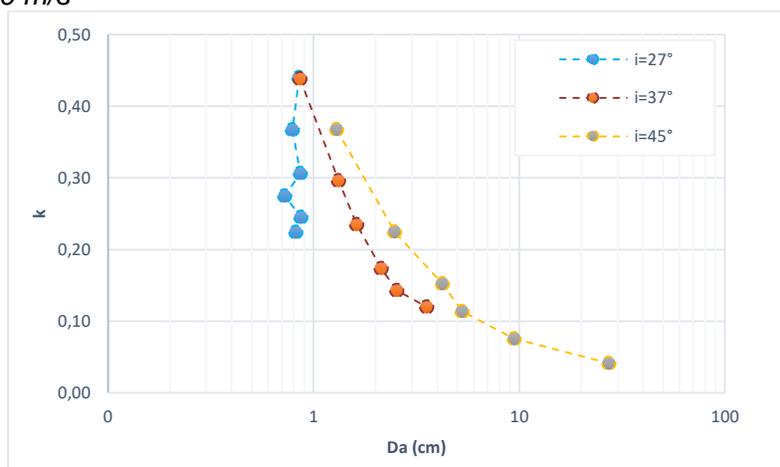


Con el fin de ver el contraste que se presenta para un talud de mayor resistencia se toma a modo de ejemplo el depósito 7 con parámetros de  $C$  42 kPa  $\phi$  25,5° y se evidencia que **no** se generan desplazamientos sísmicos admisibles mayores a 1,0 cm para inclinación de 27°, 4,0 cm para 37° y 10,0 cm para 45° 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. A continuación, en la Tabla 44, se resaltan los  $Da$  (cm) y coeficientes  $k$  asociados, así como el porcentaje respecto al  $A_m$  indicado para la ciudad de Manizales. Se puede evidenciar, además, que la dispersión de  $Da$  (cm) es baja en cuenta que depende la variación respecto a la inclinación y no de la altura del talud como se puede ver en la Figura. 61.

**Tabla 44.** Coeficiente de aceleración horizontal para taludes  $V_s$  180 m/s e inclinación de 27 ° para Manizales en Depósito 7 ( $C$  42 kPa  $\phi$  25,5°)

Inclinación	H (m)	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3Ts)	Da (cm)	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,44
							a	b	k	% k	FS
27°	20	6,50	0,22	0,76	0,79	0,85	2,80	5,74	0,44	1,00	1,00
	30	6,50	0,44	0,47	0,41	0,79	2,93	5,95	0,37	0,84	1,00
	40	6,50	0,67	0,37	0,28	0,86	3,03	5,99	0,31	0,70	1,00
	50	6,50	0,89	0,30	0,21	0,72	3,10	6,09	0,27	0,62	1,00
	60	6,50	1,11	0,27	0,17	0,87	3,17	6,14	0,25	0,56	1,00
70	6,50	1,33	0,24	0,14	0,82	3,22	6,19	0,22	0,51	1,00	
37°	20	6,50	0,44	0,41	0,41	0,86	2,80	5,73	0,44	1,00	1,00
	30	6,50	0,67	0,28	0,28	1,32	2,93	5,44	0,30	0,67	1,00
	40	6,50	0,89	0,23	0,21	1,62	3,03	5,38	0,24	0,53	1,00
	50	6,50	1,11	0,18	0,17	2,13	3,10	5,03	0,17	0,39	1,00
	60	6,50	1,33	0,14	0,14	2,54	3,17	4,90	0,14	0,32	1,00
70	6,50	1,56	0,12	0,12	3,55	3,22	4,75	0,12	0,27	1,00	
37°	20	6,50	0,44	0,35	0,41	1,30	2,80	5,33	0,37	0,84	1,00
	30	6,50	0,67	0,23	0,28	2,48	2,93	4,83	0,22	0,51	1,00
	40	6,50	0,89	0,15	0,21	4,23	3,03	4,44	0,15	0,35	1,00
	50	6,50	1,11	0,11	0,17	5,27	3,10	4,14	0,11	0,26	1,00
	60	6,50	1,33	0,07	0,14	9,47	3,17	3,61	0,08	0,17	1,00
70	6,50	1,56	0,04	0,12	27,27	3,22	2,76	0,04	0,09	1,00	

**Figura. 61** Estimación del coeficiente de aceleración horizontal  $k$  para taludes del depósito 7 y Vs 180 m/s

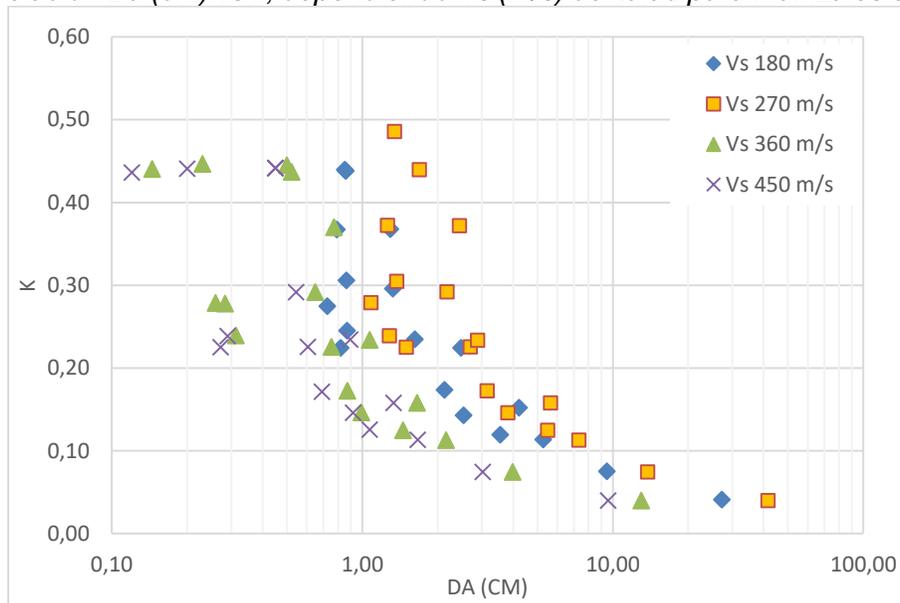


Una vez se obtienen los resultados de la estimación de  $Da$ , se determinan los  $k$  con los cuales en un análisis de estabilidad pseudoestático alcanzan  $FS=1,0$ . En la Tabla 45 Se compilan todos los valores de  $Da$  (cm) vs  $k$  teniendo en cuenta la variación de onda de corte y en la Figura. 65 se puede ver que, los  $Da$  (cm) están influenciados para estos taludes con parámetros de resistencia altos de la inclinación del talud que, la variación de la velocidad de onda de corte lo cual indica que son los taludes rígidos ante la ocurrencia de un sismo de  $M_w 6,5$  producen  $Da < 5,5$  cm para inclinación  $27^\circ$  y  $37^\circ$  y  $Da < 14,0$  cm para  $45^\circ$  inclinación, con poca variación en función de la altura.

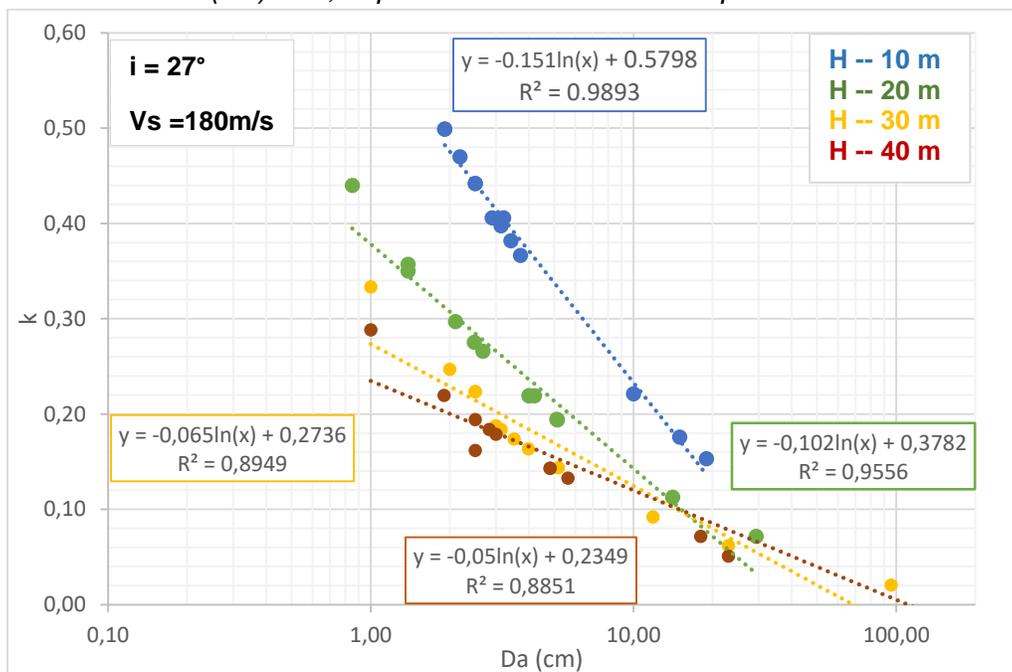
**Tabla 45.** Coeficiente de aceleración horizontal para Manizales en Depósito 7 ( $C 42$  kPa  $\phi 25,5^\circ$ )

Inclinación	Características			Vs 180 m/s			Vs 270 m/s			Vs 360 m/s			Vs 450 m/s		
	H (m)	Mw	Ts = 4H/Vs	Da (cm)	k	Am % k	Da (cm)	k	Am % k	Da (cm)	k	Am % k	Da (cm)	k	Am % k
27°	20	6,50	0,22	0,85	0,44	1,00	1,35	0,49	1,10	0,50	0,45	1,01	0,45	0,44	1,00
	30	6,50	0,44	0,79	0,37	0,84	1,26	0,37	0,85	0,23	0,45	1,02	0,54	0,29	0,66
	40	6,50	0,67	0,86	0,31	0,70	1,37	0,31	0,69	0,15	0,44	1,00	0,61	0,23	0,51
	50	6,50	0,89	0,72	0,27	0,62	1,08	0,28	0,63	0,28	0,28	0,63	0,69	0,17	0,39
	60	6,50	1,11	0,87	0,25	0,56	1,28	0,24	0,54	0,26	0,28	0,63	0,92	0,15	0,33
	70	6,50	1,33	0,82	0,22	0,51	1,50	0,23	0,51	0,31	0,24	0,54	1,07	0,13	0,29
37°	20	6,50	0,44	0,86	0,44	1,00	1,69	0,44	1,00	0,77	0,37	0,84	0,45	0,44	1,00
	30	6,50	0,67	1,32	0,30	0,67	2,18	0,29	0,66	0,65	0,29	0,66	0,20	0,44	1,00
	40	6,50	0,89	1,62	0,24	0,53	2,70	0,23	0,51	0,75	0,23	0,51	0,12	0,44	0,99
	50	6,50	1,11	2,13	0,17	0,39	3,15	0,17	0,39	0,87	0,17	0,39	0,08	0,44	1,01
	60	6,50	1,33	2,54	0,14	0,32	3,81	0,15	0,33	0,99	0,15	0,33	0,29	0,24	0,54
	70	6,50	1,56	3,55	0,12	0,27	5,49	0,13	0,28	1,45	0,12	0,28	0,27	0,23	0,51
45°	20	6,50	0,44	1,30	0,37	0,84	2,44	0,37	0,85	0,52	0,44	0,99	0,45	0,44	1,00
	30	6,50	0,67	2,48	0,22	0,51	2,88	0,23	0,53	1,07	0,23	0,53	0,89	0,23	0,53
	40	6,50	0,89	4,23	0,15	0,35	5,65	0,16	0,36	1,65	0,16	0,36	1,33	0,16	0,36
	50	6,50	1,11	5,27	0,11	0,26	7,33	0,11	0,26	2,16	0,11	0,26	1,67	0,11	0,26
	60	6,50	1,33	9,47	0,08	0,17	13,76	0,07	0,17	3,98	0,07	0,17	3,03	0,07	0,17
	70	6,50	1,56	27,27	0,04	0,09	41,68	0,04	0,09	12,99	0,04	0,09	9,60	0,04	0,09

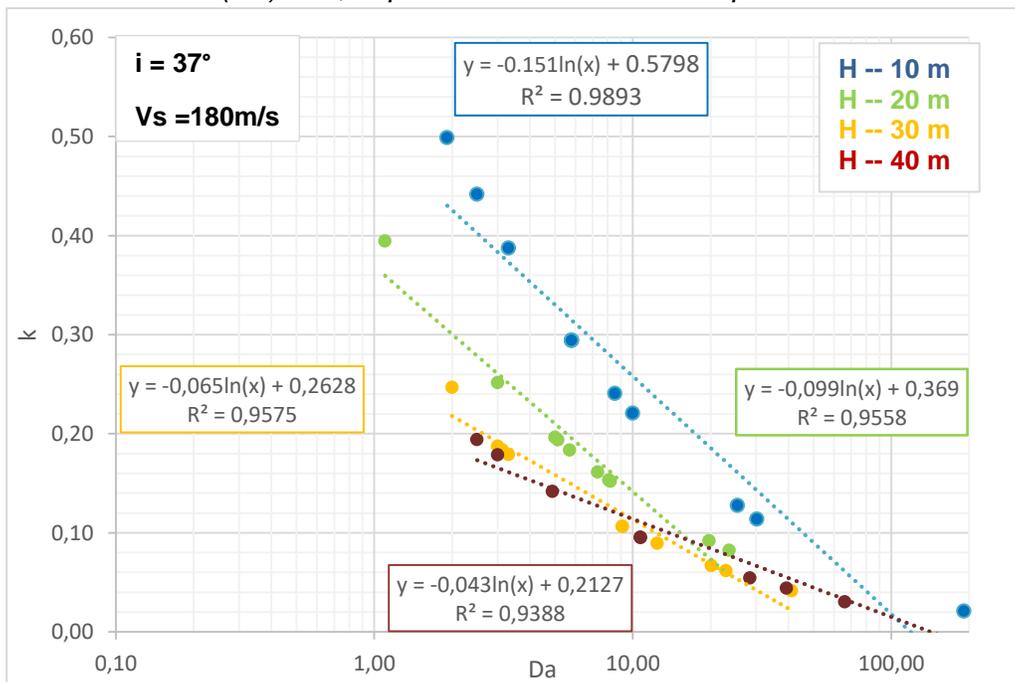
**Figura. 62** Relación  $Da$  (cm) vs  $k$ , dependiendo  $V_s$  (m/s) del talud para Manizales en Tr 475 años



**Figura. 63** Relación  $Da$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Manzales en Tr 475 años



**Figura. 64** Relación  $Da$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Manzales en Tr 475 años

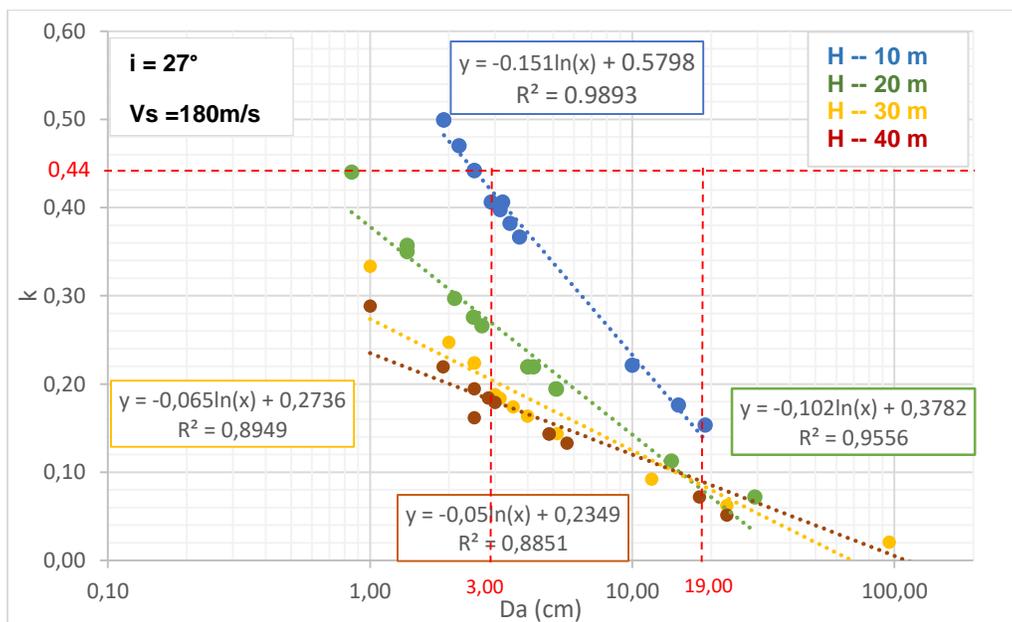


Para implementar el uso de la Figura. 65 se debe identificar la altura e inclinación del talud y limitarse el valor de  $A_m = 0,44$  como máximo  $k$ , con lo cual se puede estimar el rango de desplazamientos admisibles y determinar el rango de coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  con

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  $Da$  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  $Am$ ; se despeja la ecuación de tendencia logarítmica asociada y se obtienen los valores, se debe iterar entre ese rango de  $Da$  (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  $Da$  (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  $Da$  (cm) los materiales comienzan a agrietarse, generar fisuras e iniciar un proceso de estado de falla del talud.

**Figura. 65** Ejemplo uso relación entre  $Da$  (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  $Am$  garantizando en el análisis de estabilidad pseudoestático un  $FS$  de 1,00.

### 5.1.2 Coeficiente de aceleración horizontal, $k$ para taludes ubicados en zonas de subducción para $T_r$ 475 años

Dado que, el ejemplo de la aplicación de la metodología para estimar desplazamientos sísmicos originados en zonas de fuentes de subducción para período de retorno  $T_r$  475 años, se realizó para la ciudad de Cali, se continua con las características sísmicas compiladas en la Tabla 46.

**Tabla 46.** Características sísmicas para la ciudad de Cali

CIUDAD	Cali	ZONA						
Zona	71	Am (g)	Sm (g)	$T_0$ (s)	$T_0$ (s)	$T_L$ (s)		
PGA	0,40	ZONA 1: CERROS	0.22	0.45	0.17	0.55	3.0	
S1 (1,0 s)	0,2	ZONA 2: FLUJOS Y SUELO RESIDUAL	0.35	0.75	0.10	0.45	3.0	
Ss (0,2 s)	1	ZONA 3: PIEDEMONTE	0.35	0.85	0.20	1.05	2.0	
Fuente	Subducción	ZONA 4A: ABANICO MEDIO DE CALI	0.33	0.75	0.20	0.75	2.0	
NOMBRE	Benioff	ZONA 4B: ABANICO DISTAL DE CALI Y MENGA	ETC	0.28	0.65	0.20	0.70	2.5
			ETL	0.28	0.50	0.20	1.60	2.5
NOMBRE	In_slab_50	ZONA 4C: ABANICO CAÑAVERALEJO	ETC	0.40	1.00	0.25	0.45	2.0
			ETL	0.40	0.65	0.25	1.50	2.0
a <sub>gr</sub>	3,69	ZONA 4D: ABANICO DE MELENDEZ Y LILI		0.28	0.62	0.15	1.20	2.0
b <sub>gr</sub>	0,768	ZONA 4E: ABANICO DE PANCE		0.25	0.57	0.17	0.95	3.0
M <sub>máx</sub>	7,5	ZONA 5: TRANSICIÓN ABANICOS - LLANURA	ETC	0.28	0.70	0.17	0.60	2.5
M <sub>mín</sub>	6		ETL	0.28	0.52	0.17	1.35	2.5
		ZONA 6: LLANURA ALUVIAL		0.25	0.68	0.22	1.15	2.5

Con los valores de aceleración pico de terreno presentados, se toma el valor más alto  $A_m = 0,40$  para estimar el coeficiente de aceleración,  $k$  y se postulan diferentes valores de  $D_a$  con el fin de validar a que coeficientes sísmico  $k$  están asociados a emplear en un análisis pseudoestático donde se obtenga un FS de 1,00.

Se expone a modo de ejemplo, un talud con parámetros de resistencia del depósito 2 (C 8 kPa  $\phi$  27°) y  $V_s$  de 180 m/s y es posible observar que el máximo desplazamiento sísmico admisible es de 15,0 cm para un talud de 10,0 m de altura con el cual se logra reducir el  $k$  hasta en un 59 % del valor de  $A_m$ ,  $k = 0,24$ , mientras que para un talud de 70,0 m de altura el  $D_a$  es de 14, 47 cm obteniendo un  $k = 0,12$ , valor que es el 31% de  $A_m$ , con los coeficiente de aceleración horizontal estimados se logran en los análisis de estabilidad pseudoestático FS = 1,00. 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 9,0 cm y 14,5 cm y es posible reducir  $A_m$  entre el 31 % y 63 %, obteniendo un coeficiente de aclaración horizontal entre 0,12 y 0,25.

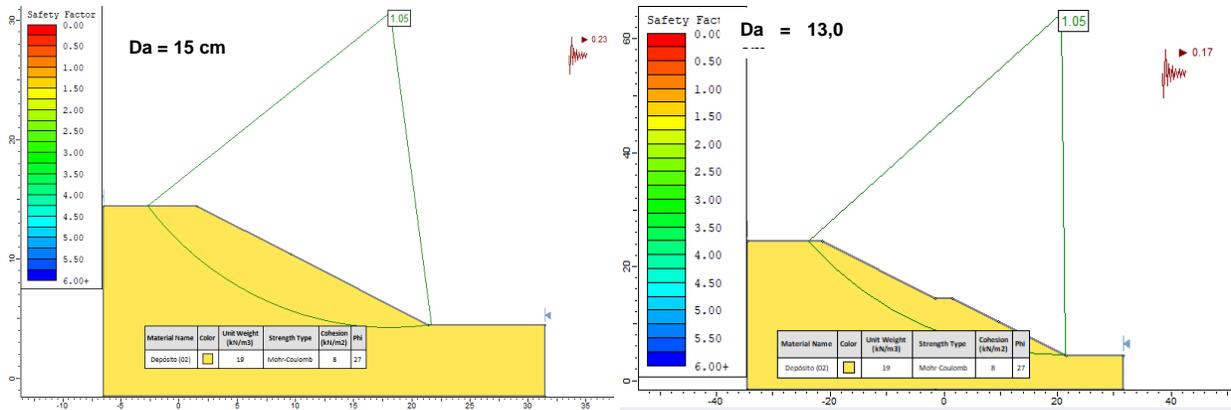
**Tabla 47. Coeficiente de aceleración horizontal para taludes con Vs 180 m/s e inclinación 27 ° para Cali en Depósito 2 (C 8 kPa  $\phi$  27°)**

H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,5Ts)	P (D=0)	D (cm)	Desplazamientos admisibles	Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,40
							Da (cm)	a	b	k	% k	FS
10	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	6,77	4,25	3,302	6,702	0,40	1,00	0,81
	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	6,77	4,87	3,302	6,489	0,38	0,95	0,87
	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	6,77	8,00	3,302	5,715	0,31	0,78	0,92
	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	6,77	10,00	3,302	5,367	0,28	0,71	0,96
	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	6,77	13,00	3,302	4,958	0,25	0,63	1,00
	7,50	0,222	0,259	1,10	0,01	6,77	15,00	3,302	4,734	0,23	0,59	1,05
20	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	5,64	1,42	3,628	8,480	0,40	1,00	0,71
	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	5,64	2,30	3,628	7,724	0,34	0,84	0,78
	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	5,64	3,00	3,628	7,313	0,31	0,77	0,82
	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	5,64	4,00	3,628	6,864	0,27	0,69	0,87
	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	5,64	5,00	3,628	6,516	0,25	0,63	0,90
	7,50	0,444	0,193	0,60	0,02	5,64	7,00	3,628	5,991	0,19	0,55	1,00
30	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	13,00	3,628	5,434	0,17	0,47	1,05
	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	0,73	3,846	9,795	0,40	1,00	0,66
	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	1,00	3,846	9,308	0,36	0,90	0,70
	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	2,00	3,846	8,227	0,29	0,71	0,80
	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	3,00	3,846	7,594	0,25	0,62	0,85
	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	4,00	3,846	7,145	0,22	0,56	0,89
40	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	5,00	3,846	6,797	0,20	0,51	0,92
	7,50	0,667	0,165	0,40	0,03	4,94	9,00	3,846	5,880	0,16	0,40	1,05
	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	0,56	3,983	10,681	0,40	1,00	0,64
	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	0,80	3,983	10,116	0,36	0,89	0,68
	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	1,20	3,983	9,483	0,31	0,78	0,73
	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	1,70	3,983	8,940	0,28	0,70	0,78
50	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	2,30	3,983	8,468	0,25	0,63	0,82
	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	4,00	3,983	7,605	0,21	0,52	0,89
	7,50	0,889	0,150	0,31	0,13	4,92	9,38	3,983	6,276	0,15	0,38	1,05
	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	0,41	4,121	11,604	0,40	1,00	0,62
	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	0,65	4,121	10,890	0,35	0,87	0,67
	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	1,00	4,121	10,218	0,31	0,76	0,72
60	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	1,30	4,121	9,809	0,28	0,70	0,75
	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	1,70	4,121	9,390	0,26	0,65	0,79
	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	2,00	4,121	9,137	0,24	0,61	0,81
	7,50	1,111	0,133	0,24	0,19	4,77	10,45	4,121	6,557	0,14	0,34	1,05
	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	0,38	4,219	12,281	0,40	1,00	0,61
	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	0,70	4,219	11,318	0,33	0,84	0,68
70	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	1,00	4,219	10,761	0,30	0,75	0,72
	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	1,20	4,219	10,477	0,28	0,71	0,74
	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	1,50	4,219	10,129	0,26	0,66	0,76
	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	2,00	4,219	9,680	0,24	0,60	0,80
	7,50	1,333	0,126	0,20	0,29	4,34	12,00	4,219	6,885	0,13	0,32	1,05
	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	0,36	4,306	12,901	0,40	1,00	0,60
70	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	0,60	4,306	12,125	0,35	0,87	0,66
	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	0,80	4,306	11,676	0,32	0,80	0,69
	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	1,20	4,306	11,043	0,28	0,71	0,73
	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	1,50	4,306	10,695	0,26	0,66	0,76
	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	2,00	4,306	10,246	0,24	0,61	0,79
	7,50	1,556	0,122	0,17	0,40	3,61	14,17	4,306	7,192	0,12	0,31	1,05

Es evidente que, los desplazamientos sísmicos admisibles generados por la ocurrencia de un sismo de Mw 7,5 en zonas de subducción son relativamente constantes, entre 9,0 cm hasta

15,0 cm sin ser afectados por la geometría e inclinación del talud, sin embargo, entre mayor sea la altura el porcentaje de reducción de  $A_m$  es 30% por lo que se reduce el  $A_m$  para obtener  $k$  entre 0,24 y 0,12 alcanzando FS de 1,0 y 1,05. En la Figura. 66 se observa la validación en los análisis pseudoestáticos para taludes con altura de 10,0 m y 20,0 m y FS = 1,05.

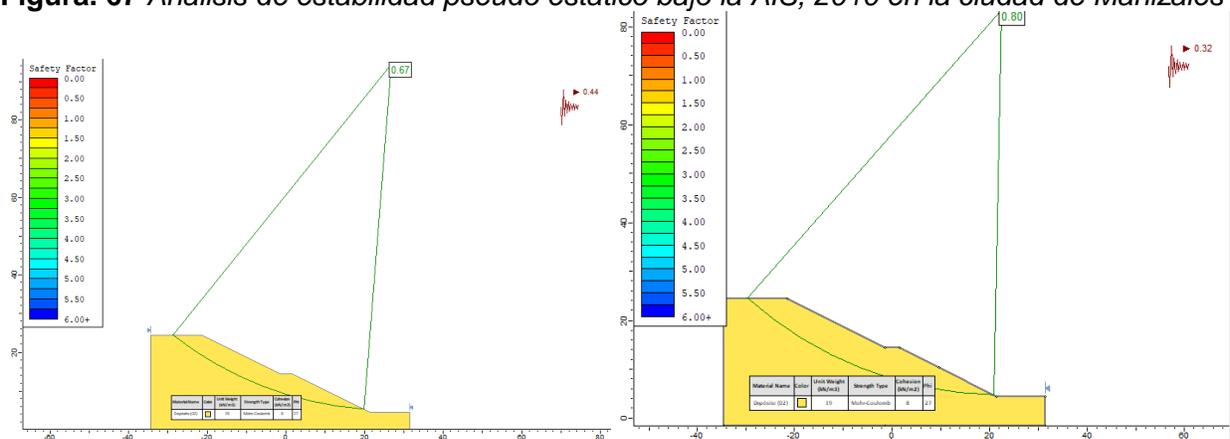
**Figura. 66** Validación de  $k$  (Cali), para taludes del depósito 2 dependiendo de  $D_a$  (cm) y con FS = 1,05



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  $k=0,32$  y se obtienen un FS 0,8 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 sísmológico en él está inmerso el talud de análisis, además de proporcionar un soporte técnico si se quiere reducir el  $A_m$  como se puede ver en la

**Figura. 67.**

**Figura. 67** Análisis de estabilidad pseudo estático bajo la AIS, 2010 en la ciudad de Manizales



Por otra parte, y con el fin de ver la variación en los desplazamientos sísmicos admisibles que presenta un talud con parámetros de resistencia más altos se toma a modo de ejemplo el depósito 7 C 42 kPa  $\phi$  25,5° y Vs de 180 m/s y se evidencia que no se generan desplazamientos sísmicos admisibles mayores a 3,0 cm, sin embargo, es posible reducir hasta el 55% el Am y obtener valores de coeficiente de aceleración horizontal k, entre 0,22 a 0,36. Aunque son mínimos los desplazamientos sísmicos admisibles ( $D_a < 3,0$  cm) que se permiten para taludes rígidos, es posible reducir el valor de Am hasta en un 55% con valores de coeficiente de aceleración horizontal k, entre 0,22 a 0,36 y con los cuales en un análisis de estabilidad pseudoestática se logran FS = 1,00. A continuación, en la Tabla 48, se resaltan los  $D_a$  (cm) y coeficientes k asociados, así como el porcentaje respecto al Am indicado para la ciudad de Cali.

**Tabla 48.** Coeficiente de aceleración horizontal para taludes Vs 180 m/s e inclinación de 27° para Cali en Depósito 7 (C 42 kPa  $\phi$  25,5°)

H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3Ts)	P (D=0)	D (cm)	Desplazamientos admisibles			Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,40
							Da (cm)			a	b	k	% k	FS
10	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	1,40	3,302	8,434	0,60	1,50	1,00		

H	Mw	Ts = 4H/Vs	Ky	Sa (1,3Ts)	P (D=0)	D (cm)	Desplazamientos admisibles		Coeficiente sísmico de diseño			Am	0,40
							Da (cm)	a	b	k	% k	FS	
7,50	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	4,26	3,302	6,699	0,40	1,00	1,44	
	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	8,00	3,302	5,715	0,31	0,78	1,72	
	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	10,00	3,302	5,367	0,28	0,71	1,79	
	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	13,00	3,302	4,958	0,25	0,63	1,88	
	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	15,00	3,302	4,734	0,24	0,59	1,93	
	7,50	0,222	0,755	1,10	0,84	0,39	20,00	3,302	4,286	0,21	0,52	2,02	
20	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	0,51	<b>0,87</b>	3,628	9,237	<b>0,47</b>	<b>1,18</b>	<b>1,00</b>	
	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	0,51	1,90	3,628	8,025	0,36	0,90	1,21	
	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	0,51	3,00	3,628	7,313	0,31	0,77	1,27	
	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	0,51	4,00	3,628	6,864	0,27	0,69	1,33	
	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	0,51	5,00	3,628	6,516	0,25	0,63	1,38	
	7,50	0,444	0,471	0,60	0,76	0,51	7,00	3,628	5,991	0,22	0,55	1,46	
30	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	10,00	3,628	5,434	0,19	0,47	1,54	
	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	0,73	3,846	9,795	0,40	1,00	0,96	
	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	<b>1,00</b>	3,846	9,308	<b>0,36</b>	<b>0,90</b>	<b>1,00</b>	
	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	2,33	3,846	7,986	0,27	0,68	1,14	
	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	3,00	3,846	7,594	0,25	0,62	1,21	
	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	4,00	3,846	7,145	0,22	0,56	1,26	
40	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	5,00	3,846	6,797	0,20	0,51	1,31	
	7,50	0,667	0,365	0,40	0,70	0,56	6,00	3,846	6,513	0,19	0,48	1,34	
	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	0,56	3,983	10,681	0,40	1,00	0,87	
	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	0,80	3,983	10,116	0,36	0,89	0,92	
	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	<b>1,20</b>	3,983	9,483	<b>0,31</b>	<b>0,78</b>	<b>1,00</b>	
	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	1,70	3,983	8,940	0,28	0,70	1,04	
50	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	2,30	3,983	8,468	0,25	0,63	1,09	
	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	3,10	3,983	8,005	0,23	0,57	1,18	
	7,50	0,889	0,302	0,31	0,95	0,71	5,00	3,983	7,257	0,19	0,48	1,22	
	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	0,41	4,121	11,604	0,40	1,00	0,82	
	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	0,65	4,121	10,890	0,35	0,87	0,88	
	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	1,00	4,121	10,218	0,31	0,76	0,95	
60	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	<b>1,30</b>	4,121	9,809	<b>0,28</b>	<b>0,70</b>	<b>1,00</b>	
	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	1,70	4,121	9,390	0,26	0,65	1,02	
	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	2,00	4,121	9,137	0,24	0,61	1,05	
	7,50	1,111	0,266	0,24	0,97	0,68	4,16	4,121	7,996	0,19	0,48	1,07	
	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	0,38	4,219	12,281	0,40	1,00	0,78	
	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	0,70	4,219	11,318	0,33	0,84	0,86	
70	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	1,00	4,219	10,761	0,30	0,75	0,90	
	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	1,20	4,219	10,477	0,28	0,71	0,93	
	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	1,50	4,219	10,129	0,26	0,66	0,96	
	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	<b>2,00</b>	4,219	9,680	<b>0,24</b>	<b>0,60</b>	<b>1,00</b>	
	7,50	1,333	0,242	0,20	0,98	0,67	5,69	4,219	8,049	0,17	0,43	1,03	
	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	0,36	4,306	12,901	0,40	1,00	0,76	
70	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	0,60	4,306	12,125	0,35	0,87	0,81	
	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	0,80	4,306	11,676	0,32	0,80	0,85	
	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	1,20	4,306	11,043	0,28	0,71	0,90	
	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	1,50	4,306	10,695	0,26	0,66	0,93	
	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	2,00	4,306	10,246	0,24	0,61	0,97	
	7,50	1,556	0,222	0,17	0,98	0,64	<b>2,72</b>	4,306	9,769	<b>0,22</b>	<b>0,55</b>	<b>1,00</b>	

Cuando el talud tiene  $V_s = 360$  m/s los desplazamientos sísmicos admisibles aumentan con la inclinación de corte del talud desde valores máximos de 3,45 cm, 15,5 cm y 24,9 cm para 27°, 37° y 45°, respectivamente, Con los  $Da$  (cm) se obtiene valores de coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  entre 0,11 y 0,23 reduciendo  $Am$  entre el 28 % y 57% alcanzando el FS de 1,00 en un análisis de estabilidad pseudoestático. Si el talud tiene  $V_s = 760$  m/s es posible ver que el incremento de los desplazamientos sísmicos admisibles aumenta con la inclinación de corte del talud con valores máximos de 20,0 cm, 33,5 cm y 61,2 cm para 27°, 37° y 45° grados

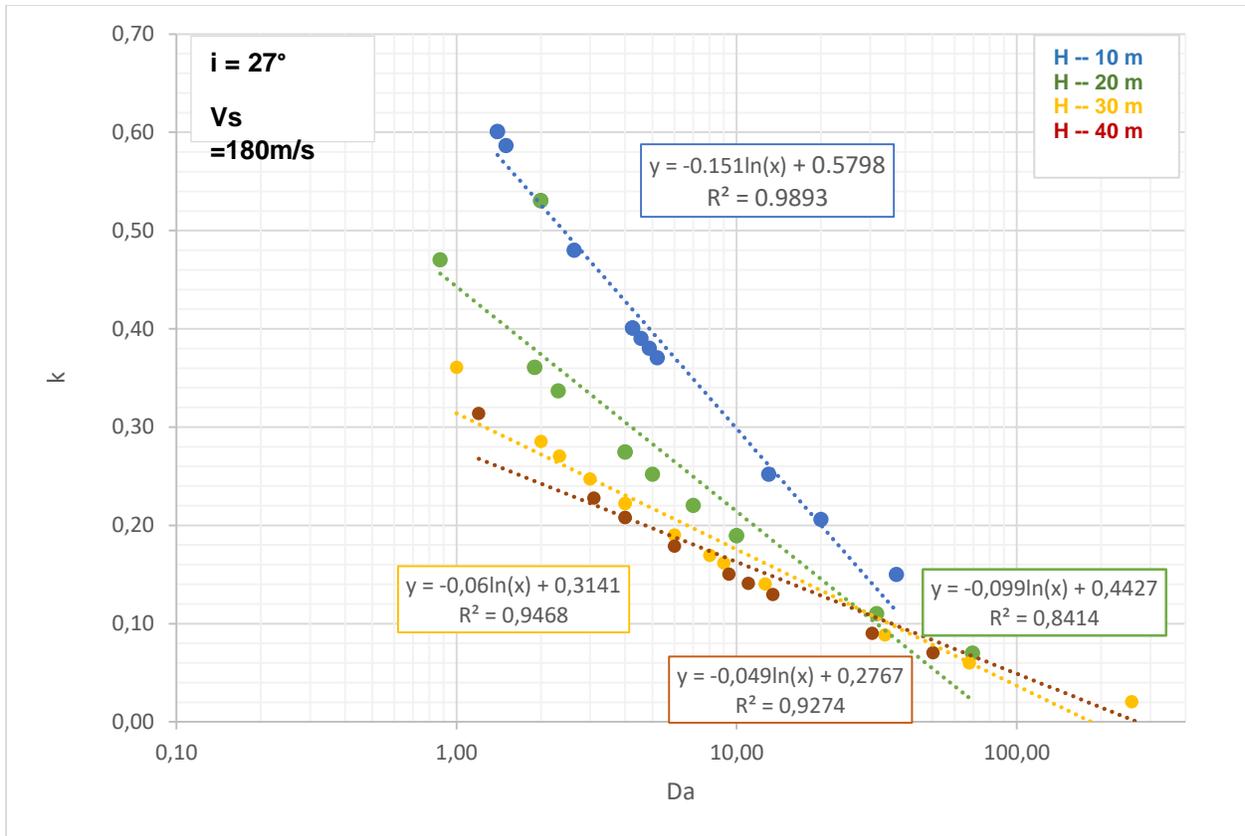
respectivamente. Con los  $D_a$  (cm) se obtiene valores de coeficiente de aceleración horizontal,  $k$  entre 0,15 y 0,36 lo que indica que se reduce el  $A_m$  entre el 37 % y 90% alcanzando el FS de 1,00 en un análisis de estabilidad pseudoestático.

De lo anterior se concluye que, aunque el talud con los mismos parámetros de resistencia e iguales características sísmicas, los desplazamientos sísmicos admisibles y por ende el coeficiente de aclaración horizontal,  $k$  son diferentes cuando se discretiza por la Velocidad de onda de corte,  $V_s$ .

Se pudo evidenciar además que, conforme se incrementa la altura del talud, los desplazamientos sísmicos admisible, con los cuales en el análisis de estabilidad pseudoestático arroja un FS de 1,00 aumentan vs el coeficiente de aceleración horizontal que disminuye.

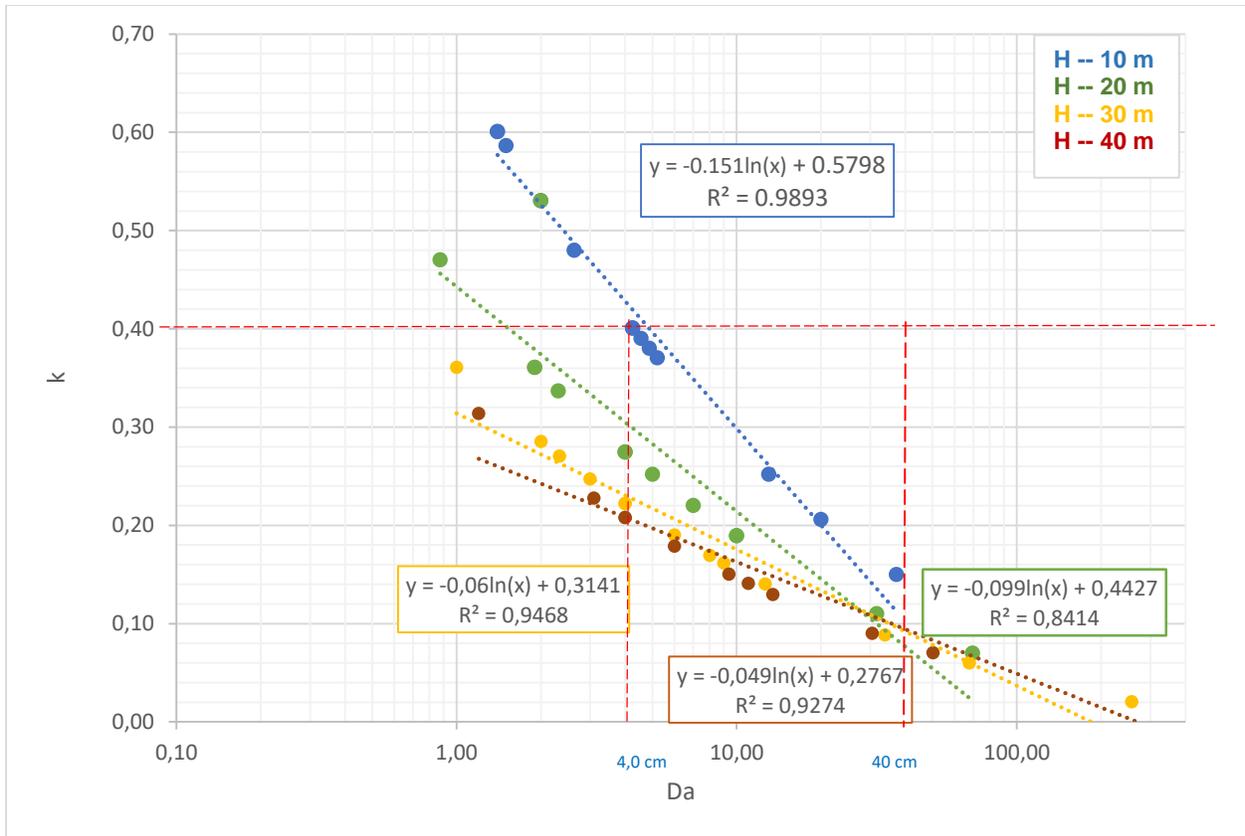
Finalmente, se compilan los resultados en la Figura. 68 de los valores de desplazamientos sísmicos admisibles para todos los materiales de los depósitos con los cuales se determinan los coeficientes de aceleración horizontal,  $k$  con los que se alcanzan FS 1,00 en los cuales se puede ver la relación logarítmica entre  $D_a$  (cm) y  $k$  con  $r$  entre 0,84 y 0,98, sin embargo, es importante resaltar que, rigen dos criterios para el empleo de los valores de desplazamientos (1) la afectación que genera que los materiales comiencen a agrietarse y pueden generar falla y (2) las consecuencias que producen en el desempeño los valores escogidos de  $D_a$ .

**Figura. 68** *Relación  $D_a$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Cali en Tr 475 años*



Para implementar el uso de la Figura. 68 se debe identificar la altura e inclinación del talud y limitarse el valor de  $Am = 0,40$  como máximo  $k$ , por ejemplo, para un talud con inclinación de  $27^\circ$  y altura de  $10,0 \text{ m}$  se tiene un rango de  $Da$  entre  $4,0$  a  $40,0 \text{ cm}$  con lo cual se asocia un rango de  $k$  entre  $0,4$  a  $0,15$ , es decir que se reduce al  $90\%$  y  $38\%$  de  $Am$ ; se despeja la ecuación de tendencia logarítmica asociada y se obtienen los valores, se debe iterar entre ese rango de  $Da$  (cm), dado que depende intrínsecamente de los parámetros de resistencia de cada talud.

**Figura. 69** Ejemplo uso relación entre  $Da$  (cm) vs  $k$ , dependiendo altura del talud para Manizales en  $Tr$  475 años



## 6. CONCLUSIONES

Con los análisis y resultados obtenidos en esta tesis analítica se presentan a continuación las siguientes conclusiones:

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

Se realizaron 780 análisis geotécnicos con los cuales 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.

Y por lo anterior, en esta tesis se realiza la Integración de las zonas de PGA,  $S_s$  (0,2s) y  $S_1$  (1,0s) delimitadas según lo propuesto en Arcila, et al, 2020 con la geometría que representan las fuentes corticales y zonas de subducción para Tr 475 años y Tr 975 años, 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 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 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.**

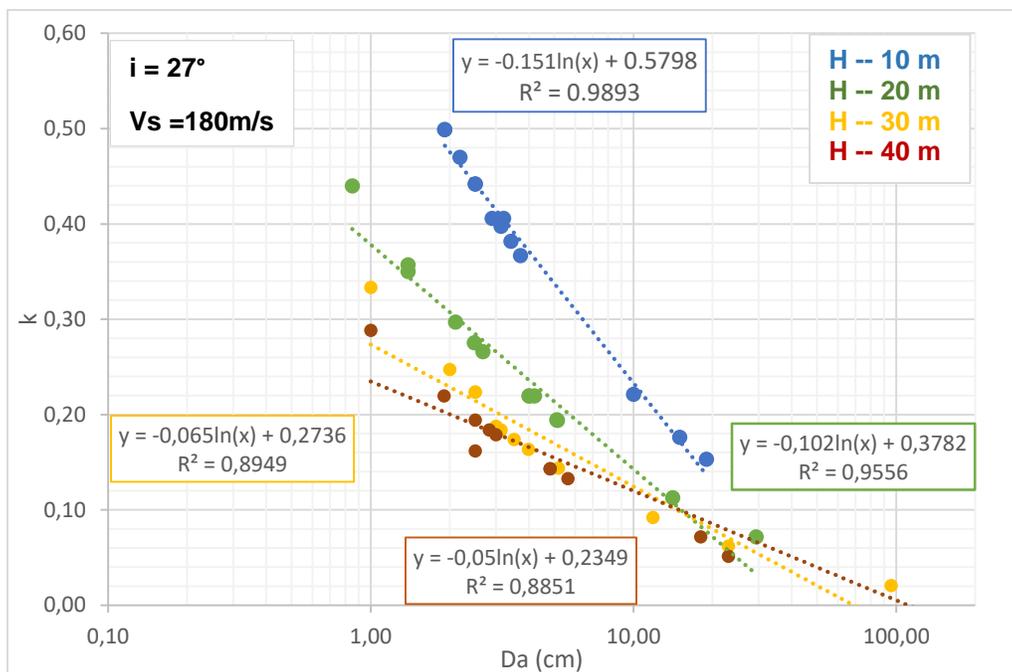
- Generar la herramienta para la determinación del coeficiente k para análisis pseudoestático en estabilidad de taludes de corte

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  $D_a$  (cm) altos los materiales comienzan agrietarse y pueden generar falla y (2) las consecuencias que producen en el desempeño los valores escogidos de  $D_a$  (cm).

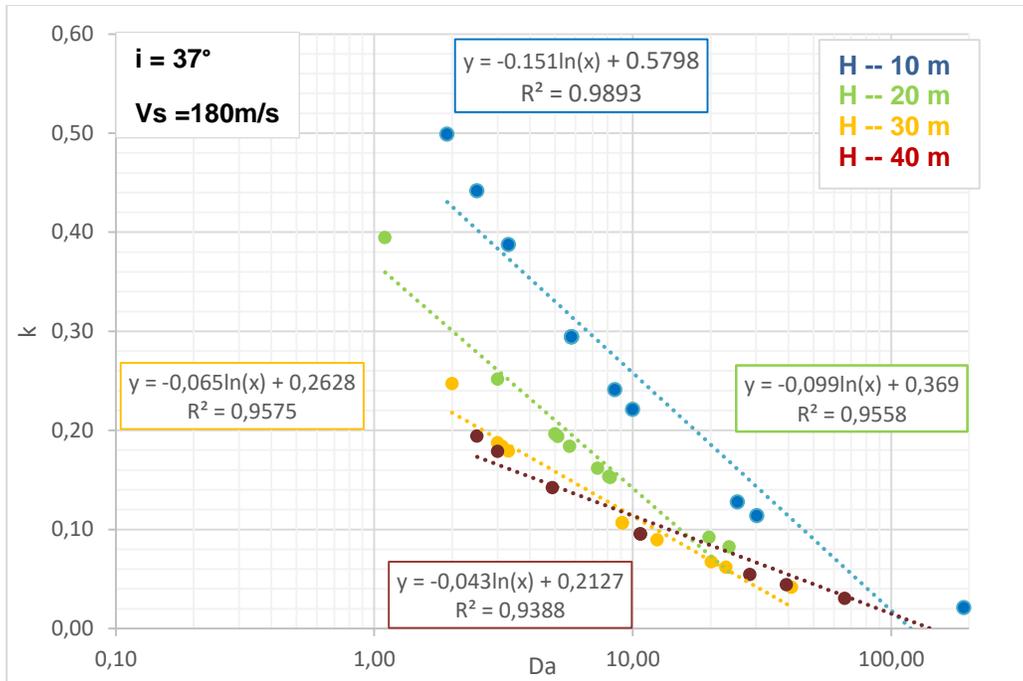
Con la implementación de este procedimiento se logra generar un soporte técnico para la escogencia de un coeficiente de aceleración horizontal k, con el cual se reduce el  $A_m$  para emplear en un análisis de estabilidad pseudoestático según lo establecido en la AIS, 2010 ,por lo que, al involucrar 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  $A_m$ .

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  $D_a$  (cm) y  $k$  con las cuales se alcanzan los FS pero, es importante tener en cuenta 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  $D_a$ .

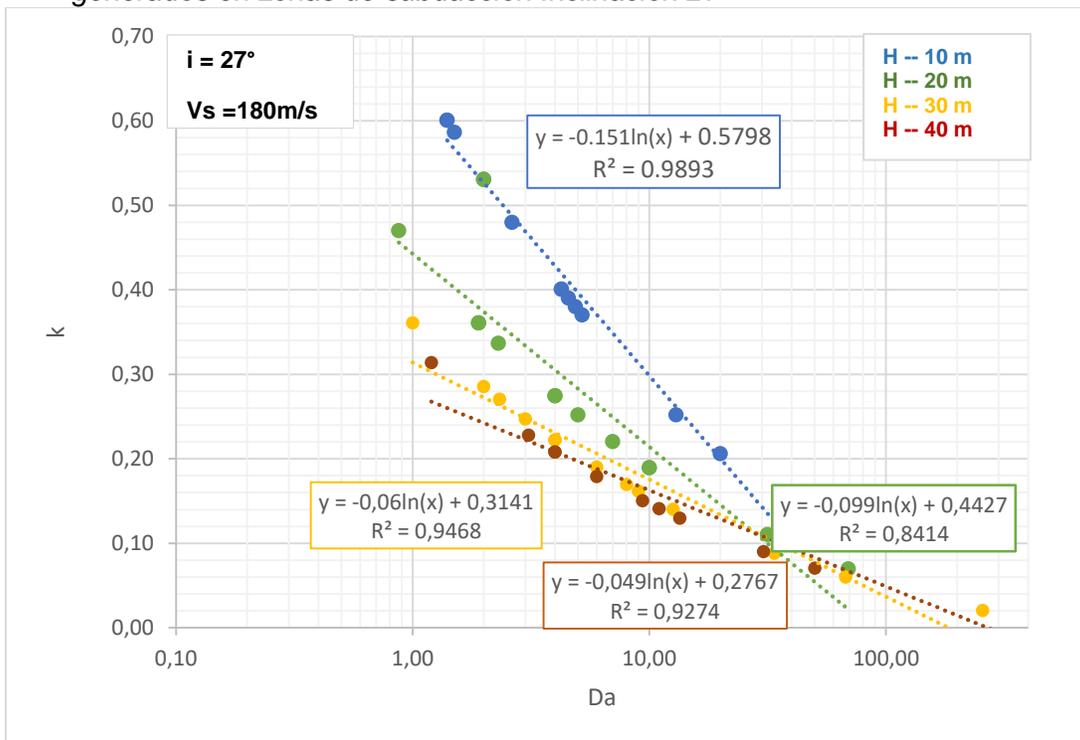
**Figura. 70** Relación  $D_a$  (cm) vs  $k$ , para Manizales en Tr 475 años; teniendo en cuenta sismos generados en zonas de fallas corticales, Inclinación  $27^\circ$



**Figura. 71** Relación  $D_a$  (cm) vs  $k$ , para Manizales en Tr 475 años, teniendo en cuenta sismos generados en zonas de fallas corticales Inclinación  $37^\circ$



**Figura. 72** Relación  $Da$  (cm) vs  $k$ , para Cali en Tr 475 años teniendo en cuenta sismos generados en zonas de subducción Inclinación  $27^\circ$



## 7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

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. 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,, Montejo, 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. **M**ethods 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.