

INDICE

Resumen	viii	
Abstract	ix	
Síntesis del trabajo	x	
1	OBJETIVOS Y ALCANCE	1
2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
3	ANTECEDENTES	4
4	DEFINICIONES	6
5	METODOLOGIA	10
6	MARCO TECTONICO Y GEOLOGICO	19
6.1	MARCO GEODINAMICO	19
6.1.2	ZONA DE SUBDUCCIÓN	20
6.1.3	CINTURON DE VOLCANES CUATERNARIO	20
6.2	GEOLOGIA DE EL SALVADOR	21
6.2.1	GEOLOGIA ESTRUCTURAL DE EL SALVADOR	23
6.3	VULCANOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO	26
6.3.1	ESTRATIGRAFÍA	27
6.3.2	DESCRIPCION DE LAS UNIDADES VULCANOLOGICAS	29
6.4.	TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ)	33
6.4.1	Depósitos de flujos piroclásticos	35
6.4.2	Secuencia de ignimbritas y coignimbritas	38
6.4.3	Estratigrafía de la TBJ	39
6.4.4	Lineamientos tectónicos y estructura volcánica	43
6.4.5	Edad y volumen de TBJ	45
6.4.6	Efectos sociales en los indígenas por la erupción de TBJ	46
7	CARACTERIZACION GEOMECÁNICA Y ASPECTOS VULCANOLOGICOS DE TBJ	47
7.1	SOBRE LOS PARÁMETROS DE LABORATORIO	47
7.2	PARAMETROS FISICOS Y MECÁNICOS DE TBJ	50
7.2.1	Unidad G	51
7.2.1.1	Contenido de humedad	51
7.2.1.2	Límites de consistencia	51

7.2.1.3	Análisis granulométrico	52
7.2.1.4	Angulo de fricción interna	53
7.2.1.5	Cohesión	54
7.2.1.6	Gravedad específica	55
7.2.1.7	Peso volumétrico húmedo	55
7.2.1.8	Otros parámetros	56
7.2.2	Unidad F	62
7.2.2.1	Contenido de humedad	62
7.2.2.2	Límites de consistencia	63
7.2.2.3	Análisis granulométrico	63
7.2.2.4	Angulo de fricción interna	65
7.2.2.5	Cohesión	66
7.2.2.6	Gravedad específica	67
7.2.2.7	Peso volumétrico húmedo	67
7.2.2.8	Otros parámetros	67
7.2.3	Unidad E	67
7.2.3.1	Contenido de humedad	68
7.2.3.2	Límites de consistencia	68
7.2.3.3	Análisis granulométrico	69
7.2.3.4	Angulo de fricción Interna	70
7.2.3.5	Cohesión	70
7.2.3.6	Gravedad específica	70
7.2.3.7	Peso volumétrico húmedo	70
7.2.3.8	Otros parámetros	71
7.2.4.	Unidad D	71
7.2.4.1	Contenido de humedad	72
7.2.4.2	Limites de consistencia	72
7.2.4.3	Análisis granulométrico	73
7.2.4.4	Angulo de fricción Interna	74
7.2.4.5	Cohesión	74
7.2.4.6	Gravedad específica	75
7.2.4.7	Peso volumétrico húmedo	75
7.2.4.8	Otros parámetros	75
7.2.5	Unidad C	76
7.2.5.1	Contenido de humedad	77
7.2.5.2	Límites de consistencia	77
7.2.5.3	Análisis granulométrico	77
7.2.5.4	Angulo de fricción interna	78
7.2.5.5	Cohesión	78
7.2.5.6	Gravedad específica	79
7.2.5.7	Peso volumétrico húmedo	79

7.2.5.8	Otros parámetros	79
7.3	COMPARACION CON OTROS RESULTADOS	80
7.4	IDENTIFICACION DE UNIDADES GEOTECNICAS	81
7.4.1	Síntesis de las características geomecánicas	81
7.4.2	Unidades geotécnicas de TBJ	83
8	PROCESOS DESESTABILIZADORES DE TALUDES	86
8.1	INTEMPERISMO FÍSICO EN IGNIMBRITAS GUESAS	86
8.2	PROCESO DE EXFOLIACION	89
8.2.1	Cambios de temperatura	89
8.2.2	Lluvias	90
8.2.3	Actividad vegetal	92
8.2.4	Actividad sísmica	92
8.3	INTEMPERISMO FÍSICO EN IGNIMBRITAS FINAS	93
8.4	COHESION EN TBJ	96
8.4.1	Microfábrica	97
8.4.2	Succión	98
8.4.3	Cementación	99
9	IMPACTO AMBIENTAL	103
9.1	EROSIÓN	103
9.2	ASOLVAMIENTO DE PRESAS	105
9.3	ANALISIS DE AMENAZAS POR DERRUMBES	106
9.4	MEDIDAS DE PREVENSIÓN Y MITIGACIÓN	108
10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
11	REFERENCIAS	115

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Area Metropolitana de San Salvador	xiv
Figura 2: Fotografía aérea de mostrando la alta densidad poblacional.....	2
Figura 3: Talud en Periférico del tramo Paquete III.....	12
Figura 4. Zonas y puntos de muestreo.....	13
Figura 5: Perfiles estratigráficos de TBJ.....	14
Figura 6: Extracción de muestra inalterada C2.....	14
Figura 7: Maniobras de excavación para la extracción de muestra F1.....	15
Figura 8: Ensayo de compresión triaxial Q(UU).....	16
Figura 9: Interacción de las placas de Cocos y El Caribe	19
Figura 10: Mapa geológico simplificado.....	22
Figura 11: Esquema estructural de El Salvador.....	25
Figura 12: Esquema de sección transversal de los depósitos.....	28

Figura 13: Mapa vulcanológico.....	32
Figura 14: Isopacas de TBJ en El Salvador.....	34
Figura 15: Colapso de columna eruptiva	36
Figura 16: Colapso de columna eruptiva y formación de flujo.....	37
Figura 17: Depósitos piroclásticos de caída de cenizas.....	38
Figura 18: Perfil estratigráfico de los depósitos de Tierra Blanca Joven.	41
Figura 19: Estructuras volcánicas y fallas en la caldera de Ilopango.....	44
Figura 20: Tierra Blanca Joven en taludes verticales	50
Figura 21: Curvas de distribución granulométricas de las unidades DFG.	58
Figura 22: Curvas de distribución granulométricas de las unidades CDE.	59
Figura 23: Afloramiento de horizontes de bloques de pómez.....	62
Figura 24: Superficie de erosión y de deformación.....	66
Figura 25: Detalle del afloramiento de la unidad E.....	69
Figura 26: Lapilli acrecional	72
Figura 27: La cementación de la unidad D en la zona sur.....	75
Figura 28: Perfil de unidades geotécnicas de TBJ.....	85
Figura 29: Discontinuidades paralelas en la cara del talud	87
Figura 30: Textura gruesa en ignimbrita.....	88
Figura 31: Variaciones de temperatura	90
Figura 32: Diagrama de barras de la lluvia mensual (1975-1977).....	91
Figura 33: Intemperismo, ruptura y derrumbe de ignimbrita.....	93
Figura 34: Discontinuidades paralelas a la cara del talud en ignimbrita....	94
Figura 35: Talud en Unidad G.....	95
Figura 36: Intemperismo, ruptura y derrumbe de la ignimbrita.....	96
Figura 37: Fragmentos piroclásticos de vidrio volcánico.....	98
Figura 38: Taludes verticales en la Autopista San Salvador- San Miguel..	101
Figura 39: Mineralización secundaria en la Unidad D.....	101
Figura 40: Formación de surcos de erosión en taludes de ignimbritas (F)..	104
Figura 41: Los vertidos de aguas servidas.....	105
Figura 42: Vista aérea del municipio de Ilopango.....	108
Figura 43: Viviendas en la cabecera del talud.....	108
Figura 44: Derrumbe en la comunidad 3 de Enero.....	109

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estratigrafía de las unidades del área de estudio.....	28
Tabla 2: Puntos de afloramientos y espesores (En ANEXO A).....	
Tabla 3: Parámetros físicos y mecánicos de TBJ.....	60
Tabla 4: Parámetros físicos y mecánicos de TBJ en AMSS.....	61
Tabla 5: Composición mineralógica secundaria de TBJ.....	102
Tabla 6: Carga de sedimentos en la cuenca del Río Las Cañas.....	106

DOCUMENTO 2: ANEXOS

ANEXO A: Mapa de puntos de afloramientos

Tabla 2: Puntos de afloramientos

ANEXO B: Datos de laboratorio de suelos

ANEXO C: Datos de hidrometría

ANEXO D: Datos de difracción de Rayos X

RESUMEN

Este trabajo pretende obtener la caracterización geomecánica y vulcanológica de los productos piroclásticos de la última erupción explosiva de la caldera de Ilopango (430 años D.C.), que cubrieron prácticamente todo el territorio salvadoreño. Actualmente varios municipios del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), se encuentran asentados sobre las tefras de esa erupción conocidas como Tierra Blanca Joven (TBJ). El área de estudio es de aproximadamente 65 km². En el trabajo de campo se tomaron 11 muestras inalteradas en dos zonas separadas 8 km, las que fueron analizadas en laboratorio de suelos para efectuar las pruebas de acuerdo a las normas ASTM que incluyen: granulometría mecánica y método del hidrómetro, humedad, límites de consistencia, gravedad específica, peso unitario y ensayos de compresión triaxial. Los datos de laboratorio fueron analizados y comparados entre las distintas unidades. Adicionalmente, el trabajo de campo incluyó la medida de espesores, la identificación de discontinuidades, deformaciones, texturas y estructuras de las unidades.

Los resultados señalan que algunos depósitos de caída de cenizas cerca del borde caldérico son más cohesivos, presentan mayor densidad y dureza, debido a que están parcialmente cementados. En general, las ignimbritas poseen mejores condiciones geomecánicas para la estabilidad de taludes que los depósitos de lluvia de cenizas. La microfábrica, la succión y la cementación actúan a la vez para mantener los taludes verticales en las distintas unidades. El carácter isotrópico de las ignimbritas favorece el desarrollo de la exfoliación, la cual determina el mecanismo de ruptura en los taludes. Es conveniente para la estabilidad de taludes en TBJ que se construyan drenajes y se proteja la superficie de los mismos con gramíneas. Debido al carácter deleznable de los depósitos de caída de cenizas de la Unidad Geotécnica IV, sus taludes son más estables cuando reposan en ángulos $\leq 45^\circ$ y los de la Unidad Geotécnica III son estables aún con pendientes $\geq 45^\circ$.

ABSTRACT

This work pretends to characterize the geomechanical and vulcanological properties of the pyroclastic products from the last explosive eruption from the Ilopango Caldera (430 A.D.). This eruption buried the whole country at that time. Presently, there are some municipalities that belong to the Metropolitan Area of San Salvador (AMSS) that are built over those tephras known as Tierra Blanca Joven (TBJ). The geographical delimitation of the area covers approximately 65 km². During the field work, it was taken eleven unaltered soil samples distributed in two zones, separated at 8 Km wide. These samples were analyzed in soil laboratory. The tests were carry out under ASTM standards, following is a list of the test performed: mechanical granulometry and hydrometer method, humidity, specific gravity, unitary weight and triaxial compression test. The laboratory data was analyzed and compared to other units. Additionally, the field work included the thickness measurements, identification of discontinuities, deformations, textures and structures in the soil units.

The results showed up that some ash fall deposits settle closer to the caldera rim these deposits are more cohesive, have more density and are harder, partially due to cementation. In general, the ignimbrite presents better geomechanical conditions for slope stability than the ash fall deposits. The microfabric, the suction and cementation properties act together to maintain vertical slopes in the different soils units. The isotropic character of the ignimbrites facilitates the exfoliation development, which determines the rupture mechanism. It is recommended in order to attain TBJ slope stability to build well designed drainages and protect the slope surface with vegetation. Due to the unconsolidated property of ash fall deposits from the geotechnical unit IV, its slopes become more stable at inclinations $\leq 45^\circ$ in comparison with unit III which slopes are stable even at inclinations $\geq 45^\circ$.

SINTESIS DEL TRABAJO

Los productos eruptivos de la última erupción pliniana (430 años D.C.) de la caldera de Ilopango dieron origen a los depósitos de Tierra Blanca Joven (TBJ), que han cubierto gran extensión del territorio y sobre sus depósitos ha sido edificada la ciudad de San Salvador y otros municipios contiguos a dicha ciudad. Debido al alto crecimiento demográfico de la capital y áreas aledañas, la presión que sobre la tenencia de la tierra se genera y a las condiciones de pobreza, se construye inclusive sobre los taludes en este tipo de depósitos produciendo situaciones de amenaza por derrumbes y deslizamientos de la TBJ. Este hecho indujo a llevar a cabo el presente estudio, con el objeto de comprender las características mecánicas de las tefras de la estructura volcánico-tetónica de Ilopango.

El trabajo sobre la caracterización geomecánica de los depósitos piroclásticos de la TBJ, se ha relacionado con el tipo de erupción y los procesos vulcanológicos que formaron dichos depósitos. Tomando en consideración la identificación de las distintas unidades de TBJ de trabajos vulcanológicos anteriores, se partió para iniciar la toma de muestras inalteradas de cinco unidades estudiadas para conocer sus propiedades físicas y mecánicas.

Los trabajos de campo permitieron encontrar en la facie proximal, nuevas unidades que vinieron a redefinir la estratigrafía de la TBJ y que señalan la complejidad de estos depósitos; además, se identificaron las zonas de mayor acumulación de suelos de TBJ, que están controlados por estructuras de “horts y grabens” angostos y paralelos con rumbo NW-SE, situados entre la carretera que conduce a Tonacatepeque y la carretera Troncal del Norte. El bajo estructural entre Soyapango y el Río Las Cañas es uno de los más profundos, donde se han acumulado al menos 60 m de espesor de TBJ. La erosión regresiva al pie de los taludes en este tipo de material volcánico es importante y por eso se ha conformado un canal amplio en el Río Las Cañas. Ese tipo de erosión afecta grandemente la estabilidad de estos taludes y las edificaciones allí establecidas.

Se han estudiado también los procesos que inciden en el derrumbe de taludes donde no hay corrientes de ríos que los desestabilicen. Las ignimbritas de matriz gruesa y fina son afectadas por varios factores naturales que les generan exfoliaciones, cuyo desarrollo da la pauta para que los derrumbes se produzcan a lo largo de las discontinuidades producidas por el intemperismo físico. En la Unidad G, ese mecanismo es más complejo dado a que está formada por una secuencia compuesta por ignimbritas de matriz fina y depósitos de caída (coignimbritas). Parece que los derrumbes son influenciados por las discontinuidades que surgen en las ignimbritas.

Como parte de estos estudios se tomaron en dos zonas previamente establecidas 11 muestras de suelo inalteradas, a una distancia de 3 Km (zona 1) y 8 Km (zona 2) del borde de la caldera. Los análisis de laboratorio de suelo que se les efectuaron son los siguientes: granulometría por el método mecánico y del hidrómetro, humedad natural, límites de consistencia, peso unitario, gravedad específica y pruebas de compresión triaxial. Los resultados de estas pruebas sirvieron para relacionarlos entre sí y con datos encontrados en la literatura, los cuales, en su mayoría parecen corresponder al Unidad G. Se analizaron los cambios de esos parámetros en la medida que los depósitos se alejan del centro emisor. Esas propiedades también se relacionaron con los procesos eruptivos involucrados.

Debido a que los taludes verticales sobre la Autopista San Salvador – San Miguel se mantienen estables, aún después haber estado expuestos a una serie de terremotos de importantes magnitudes y lluvias torrenciales como el de huracán Mitch, condujo a prestar atención a las propiedades como la succión, cementación y a la microfábrica presente en esos depósitos. Estos factores conjuntamente operan para mantener firmes los taludes, sin embargo, esos tres factores no siempre están presentes con la misma intensidad en las unidades, por ejemplo, la cementación tiende a ser mayor en la cercanía del borde caldérico y no lejos, y que la microfábrica en los depósitos de flujos piroclásticos es más efectiva que en los depósitos de caída de cenizas (suelos finos y

uniformes). Se identificó además que el mecanismo de ruptura esta controlado por el proceso de exfoliación de las ignimbritas.

La erosión regresiva sobre la base de los taludes por las crecidas del Río Las Cañas y sus afluentes, desestabiliza importantes masas de material de TBJ, la cual pasa a formar parte de la carga de sedimentos del río. La tubería de los vertidos de agua servidas de las edificaciones se encuentran colocados en la parte media del talud incrementando también la erosión regresiva debajo de la tubería, desestabilizando así la cabecera del talud que eventualmente se cae. Ese proceso regresivo por largo tiempo llega a poner bajo amenaza las familias que habitan las viviendas más cercanas al talud.

La erosión de la TBJ por las lluvias y las crecidas de la cuenca del Río Las Cañas, transporta una carga total de sedimentos promedio de $103,404 \text{ m}^3$ que anualmente son depositados en el embalse Cerrón Grande, lo que disminuye gradualmente su capacidad de almacenamiento de agua para generación de energía eléctrica.

INTRODUCCIÓN

La última erupción explosiva de composición silícea de la caldera de Ilopango (430 años D.C), está siendo considerada como una de las más catastróficas de Centroamérica y posiblemente también del mundo entero. Sus productos eruptivos de 20-50 km³ (DRE), cubrieron enormes extensiones que superaron en superficie el actual territorio de El Salvador. Esa erupción por más de un siglo mantuvo un ambiente árido, desolador y sin posibilidad de vida humana en el actual territorio salvadoreño. Tanto flujos piroclásticos como cenizas de esa erupción cubren grandes áreas de la zona central del país, donde se localiza la capital San Salvador, ciudad densamente poblada, y centro económico más importante del país; se encuentra asentada sobre esos depósitos susceptibles a los derrumbes por lluvias y sismos fuertes. Por eso reviste de importancia el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la Tierra Blanca Joven (TBJ), para comprender los mecanismos de desestabilización y ruptura de los taludes de esos materiales, para encontrar formas prácticas para contrarrestar ese comportamiento.

En la caracterización geomecánica de las unidades de (TBJ) se trata de encontrar el comportamiento geomecánico de cinco unidades y buscar cambios físicos y mecánicos conforme los productos se alejan del borde de la caldera, así como también, entre cada unidad para encontrar diferencias o similitudes. Tal análisis conlleva a caracterizar las unidades que poseen mejores condiciones para la estabilidad de los taludes.

El estudio de las características físicas y mecánicas de la TBJ fue realizado en el área comprendida entre los Ríos Tomayate y Las Cañas, la cual ocupa una superficie de aproximadamente 65 km², y está situada al noroeste del Lago de Ilopango (Véase figura1). La imagen muestra el Area Metropolitana de San Salvador (AMSS), el volcán de San Salvador a la izquierda, el lago de Ilopango a la derecha. Esta área tiene un alto crecimiento demográfico y alta densidad poblacional. La parte norte del área de estudio es la zona de mayor probabilidad de crecimiento de toda el Area Metropolitana de San

Salvador (AMSS). Debido a que el área es atravesada por esos dos ríos con valles profundos, se puede observar la estratigrafía de los depósitos y las amenazas por desprendimientos y deslizamientos de tierra.

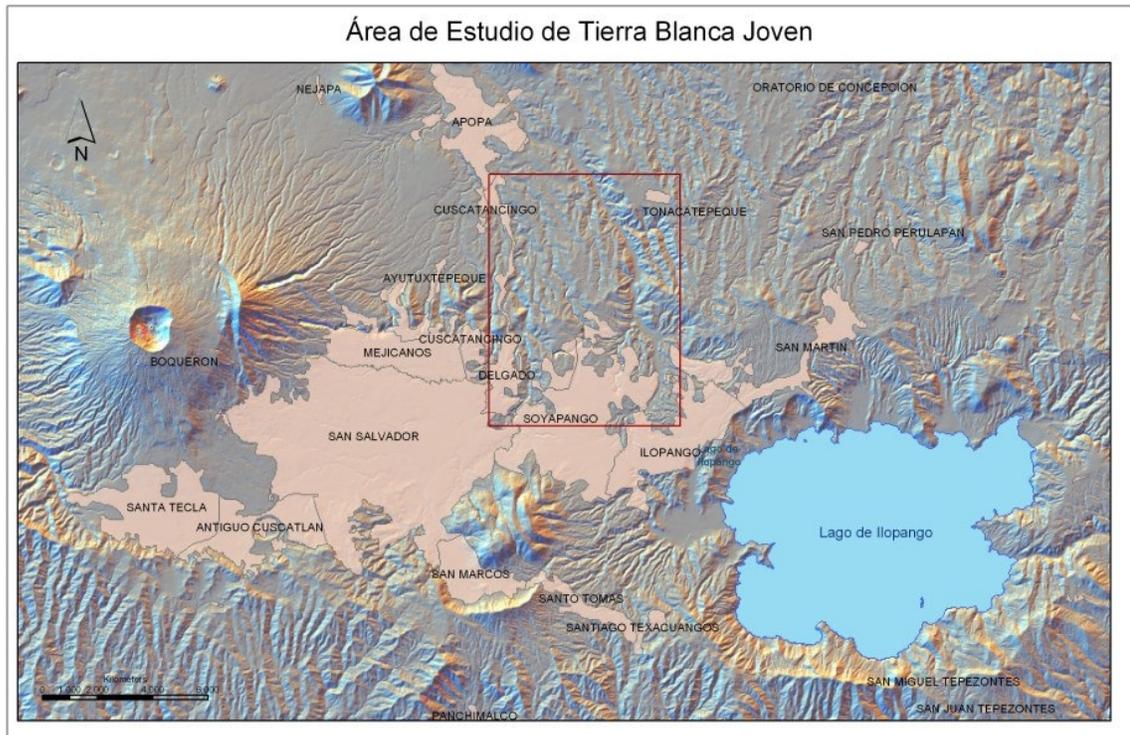


Figura 1. Area Metropolitana de San Salvador y ubicación del área de estudio.

Este trabajo se desarrolló en varias etapas que consistieron en el planteamiento del problema y definición del área de estudio, el trabajo geológico de campo, toma muestras de suelos inalteradas, mediciones de espesores e identificación de las características texturales, físicas y estructurales de cada unidad; pruebas de laboratorio, análisis e interpretación de los resultados de laboratorio, comparación con otros datos de literatura y la elaboración del documento final.

Para llevar a cabo el presente trabajo se contó con el apoyo logístico para las tareas de campo y de oficina, del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). Para la realización de los ensayos de laboratorio de suelos, se tuvo la colaboración del Instituto

Tecnológico Centroamericano ITCA-FEPADE y de la Universidad de El Salvador (UES); para los análisis mineralógicos se contó con la valiosa colaboración de la empresa LaGeo SA de CV.

Para efectos de identificar cambios de comportamiento físico y mecánicos de las unidades con la distancia desde el borde caldérico, se escogieron dos zonas separadas una de otra hasta 8 km para la toma de muestras inalteradas, una en la zona sur del área de estudio (proximal) y otra en la norte (intermedia), encontrándose cierta asociación entre los procesos eruptivos, los mecanismos de transporte y sedimentación de los depósitos piroclásticos y los parámetros en estudio. Se realizaron mediciones de espesores de las unidades de la TBJ en 65 puntos, y se incluyeron las mediciones de las secuencias piroclásticas más antiguas que corresponden a los depósitos de caída de pómez TB2, TB3 y TB4. Se midió también la Unidad G1, que es un depósito de pómez caída, dacítico, intercalado entre TB3 y TB4, procedente del volcán San Salvador. En la zona de Soyapango- Río Las Cañas, el conjunto de todos estos depósitos que constituyen las Tobas Superiores (Ts), poseen un espesor máximo estimado en 80 m de materiales piroclásticos poco consolidado.

De las cinco unidades de TBJ analizadas en el laboratorio de mecánica de suelos, los depósitos de flujos piroclásticos de la unidad Unidad F, resultan ser los de mayor espesor y los que mejores propiedades físicas y mecánicas presentan, y son los más aptos como unidades para el soporte de cargas y para la estabilidad de taludes. Con el fin de facilitar la comprensión bibliográfica debido a las denominaciones distintas que los autores dan a una misma unidad geológica, se ha elaborado una tabla estratigráfica comparativa. Una tabla resumen se ha elaborado donde aparecen los espesores y las coordenadas de cada unidad de TBJ, TB2, TB3, TB4 y se incluye G1 y un mapa de puntos de cada sitio medido acompaña al documento.

Se presenta un análisis sobre el mecanismo de ruptura en fajas o rebanadas de los depósitos de flujos piroclásticos de matriz gruesa y matriz fina, y también de los

depósitos de caída. En este análisis se incluyen las propiedades de la microfábrica, la succión y cementación, las cuales individualmente operan mejor en un tipo de depósito que en otro, pero que conjuntamente juegan un papel importante en la verticalidad y estabilidad de los taludes. Se ha incluido una tabla con parámetros geomecánicos y físicos de suelo de TBJ que se encuentran en la literatura, y se hacen comparaciones con los parámetros de este trabajo. Después del estudio de cada unidad, se compararon unas con otras y de acuerdo a sus posiciones estratigráficas, espesores y características geomecánicas semejantes en el laboratorio y las observaciones en el campo, se elaboró un perfil desde el punto de vista geomecánico y que divide la TBJ en cuatro unidades geotécnicas.