

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO DE
HUMEDAD DEL SUELO EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
DE TALUDES, APLICANDO LOS MODELOS: TRADICIONAL
(MOHR-COULOMB) Y PARCIALMENTE SATURADO, EN
TALUDES CONSTITUIDOS POR TIERRA BLANCA JOVEN**

PRESENTADO POR:

LUIS ALONSO FIGUEROA ARTEAGA

MANUEL ÁNGEL FLORES MORENO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ph.D. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

ING. ANIBAL RODOLFO ORTIZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO DE HUMEDAD
DEL SUELO EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES,
APLICANDO LOS MODELOS: TRADICIONAL (MOHR-COULOMB) Y
PARCIALMENTE SATURADO, EN TALUDES CONSTITUIDOS POR
TIERRA BLANCA JOVEN**

Presentado por :

**LUIS ALONSO FIGUEROA ARTEAGA
MANUEL ÁNGEL FLORES MORENO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**INGRA. LESLY EMÍDALIA MENDOZA MEJÍA
ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA
Ph.D. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ
(Asesor Externo)**

San Salvador, agosto de 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

INGRA. LESLY EMÍDALIA MENDOZA MEJÍA

ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

Ph.D. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ
(Asesor Externo)

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a **DIOS**, por permitirnos concluir satisfactoriamente esta investigación y por iluminarnos con sabiduría, inteligencia y perseverancia a lo largo de todo nuestro proceso de formación universitaria.

A mis padres **María Cruz Arteaga Magaña** y **Luis Alonso Figueroa Quintanilla** gracias por apoyarme en cada momento de este largo camino. A todos mis hermanos **Cruz María, Cristina, Francisco, Vanessa** y mis tías **Angela, Julia**, gracias por no dejarme solo, brindarme su ayuda y siempre preocuparse por mí.

A mi novia **Sandra Beatriz Rivas**, por brindarme todo su amor y apoyo incondicional desde el inicio de mi carrera universitaria.

A mi compañero de tesis **Manuel Ángel Flores Moreno**.

Agradezco a mis asesores internos: **Ing. Lesly Emídalía Mendoza** por su tiempo en cada una de las revisiones de este trabajo, además, por su gran comprensión; también, al **Ing. José Landaverde Quijada** por guiarme con sus conocimientos de campo en la ejecución de esta investigación, a mi asesor externo: **PhD. Ing. José Alexander Chávez Hernández** por brindarme su conocimiento, a cada uno de ellos agradezco infinitamente.

"No solo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy. **¡GRACIAS TOTALES!**"

Gustavo Cerati.

Luis Alonso Figueroa Arteaga

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias primeramente a Dios por haber culminado mi carrea con éxito, de igual manera quiero expresar mis agradecimientos a aquellas personas que me dieron su apoyo durante este proceso:

Agradezco y honro a mis padres **Manuel de Jesús Flores Diaz y Karina Beatriz Moreno de Flores**, quienes, en medio de dificultades, fue fundamental su apoyo y sacrificio para mi formación.

Muchísimas gracias a los Asesores **Ing. Lesly Emidalia Mendoza, Ing. José Miguel Landaverde, PhD. José Alexander Chávez**, por la paciencia, dedicación de tiempo y conocimiento para realizar cada etapa del trabajo de graduación.

A mi hermano **Jonathan** quien siempre conté con su apoyado cuando fue necesario en cada etapa de mi estudio.

A mis abuelos y abuelas en especial a mi abuela **Mercedes Diaz**, quien admiro mucho, quien siempre me dio ánimo, y se desveló esperándome cuando regresaba de estudiar.

A mi compañero de tesis **Luis Alonso Figueroa Arteaga** quien demostró seriedad y compromiso, contando con su tiempo y esfuerzo para poder realizar cada etapa del trabajo de graduación.

Al Ing. Ranulfo Cárcamo por velar por el buen manejo para los procesos del trabajo de graduación.

Manuel Ángel Flores Moreno

DEDICATORIA

A mi familia principalmente a mis padres, mis hermanas y tías, por todo el apoyo y amor que me han dado a lo largo de todos estos años, sin su apoyo habría sido muy difícil recorrer este camino.

A dos personas muy importante en mi vida y que me cuidan desde el cielo mis abuelos Francisco Arteaga y María Elisa Magaña, mi feliz infancia paso con su compañía, mis amados abuelos, con sus mágicas historias y cariño infinito, ahora para verlos solo debo mirar al cielo y recordar sus cálidas voces; los extraño con todo mi corazón.

Luis Alonso Figueroa Arteaga

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de estudiar y abrirme puertas en todo este tiempo, para alcanzar mis objetivos.

A mis padres y muchos de mis familiares que conté con su apoyo, en la cual fue de gran importancia en cada año que cursé de mi carrera, los bendigo mucho.

A mis compañeros de estudio, la cual Dios puso en mi camino, que juntos nos unimos para superar cada dificultad que se nos fue puesta en nuestra formación.

Manuel Ángel Flores Moreno

ÍNDICE

CONTENIDO	Pág. N°
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO No.1	1
CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4 ALCANCES	7
1.5 LIMITACIONES	8
1.6 JUSTIFICACIÓN	9
CAPÍTULO No.2	11
MARCO TEÓRICO	11
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.2 TALUDES	13
2.2.1 Definición de Talud ¹	13
2.2.2 Nomenclatura de un Talud	14
2.2.3 Análisis de estabilidad de taludes	15
2.2.3.1 Concepto de Factor de Seguridad (F. S.)	16
2.2.3.2 Concepto de Superficie de Falla	18

2.2.3.3 Ley de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para Suelos Saturados ²	19
2.2.3.4 Parámetros fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes	21
2.2.3.5 Métodos de análisis de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes.	24
2.3 ANÁLISIS SÍSMICO	26
2.3.1 Coeficientes sísmicos según norma técnica para el diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes de El Salvador ³	27
2.4 SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS ⁴	28
2.4.1 Estimaciones de las funciones de propiedades de suelos parcialmente saturados ⁵ .	31
2.4.2 Definición de succión y curva característica suelo-agua.	33
2.4.2.1 Definición de succión.	33
2.4.2.2 Definición de curva característica suelo-agua.	37
2.4.2.2.1 Regiones de la curva característica ⁶	39
2.4.2.2.2 Modelos matemáticos para la obtención de la curva característica suelo-agua.	40
2.4.2.2.3 Estimación de la curva característica suelo-agua a partir de algunos puntos.	42
2.4.2.2.4 Factores que afectan la determinación de la curva característica	42
2.4.3 CRITERIOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS ⁷	44
2.4.3.1 Criterio de resistencia de Mohr-Coulomb	44
2.4.3.2 Criterio de resistencia de Fredlund	48
2.4.3.3 Criterio de resistencia de Vanapalli	49

2.4.3.4 Criterio de resistencia de Khalili	50
2.4.3.5 Criterio de resistencia de Bao	51
2.5 Generalidades de la Tierra blanca Joven ⁸ (TBJ).	52
2.5.1 Composición química de la TBJ.	59
2.5.2 Fallas en Taludes de Tierra Blanca.	59
CAPÍTULO No.3	62
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	62
3.1 INTRODUCCIÓN	63
3.2 METODOLOGÍA	64
3.2.1 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	64
3.2.2 TRABAJO DE CAMPO	66
3.2.2.1 VISITAS DE CAMPO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.	67
3.2.2.2 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS.	74
3.2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO	76
3.2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS TALUDES EN ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS.	78
3.2.5 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.	78
3.2.6 DEFINICIÓN DE MÉTODOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA.	79
3.2.7 MODELACIÓN	79

CAPÍTULO No.4	81
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	81
4.1 INTRODUCCIÓN	82
4.2 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA	83
4.3.1 VISITAS DE CAMPO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.	95
4.3.2 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS.	98
4.4 ENSAYOS DE LABORATORIO	100
4.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS TALUDES EN ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS.	116
4.6 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.	130
4.7 DEFINICIÓN DE MÉTODOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA.	131
4.8 MODELACION.	132
CAPÍTULO No.5	154
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	154
5.1 INTRODUCCIÓN	155
5.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	156
CAPÍTULO No.6	186
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	186
6.1 CONCLUSIONES	187
6.2 RECOMENDACIONES	190

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	193
ANEXOS	196

INTRODUCCIÓN

El Salvador, es un país en la cual es afectado por constante amenazas de desastres naturales a lo largo de su historia. En el área metropolitana de San Salvador (AMSS) la mayoría de los taludes están conformado por tefras volcánicas llamadas tierra blanca joven (TBJ) que son producto de la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango; Los deslizamientos de estos taludes constituidos por TBJ son un fenómeno que afecta reiteradamente a nuestro país, provocando pérdidas de vidas humanas, ambientales, sociales y económicas importantes, Esto conlleva a que sean necesarias obras de mitigación de manera constante en la zona.

La Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) cuenta con información de antecedentes, que describe graves problemas de estabilidad de taludes; y dispone de diversos estudios que muestran que los taludes presentan un alto grado de susceptibilidad en tiempo lluvioso.

En nuestro medio, se aplican metodologías de análisis de estabilidad de taludes tradicionales (que aplican la ley de resistencia al corte de Mohr Coulomb para suelos saturados) que permiten conocer el factor de seguridad de los taludes en estudio, en cierta medida estas metodologías métodos son limitados ya que incorporan algunos parámetros como la succión que se encuentra presente en las diferentes unidades de TBJ, por lo que no representan condiciones que se adecuen a las propiedades y características de taludes constituido por TBJ.

Este trabajo de investigación, busca determinar la influencia del cambio de humedad en taludes constituidos por tierra blanca joven en el área metropolitana de San Salvador, aplicando los modelos: tradicional (Mohr-Coulomb) y modelos de suelos parcialmente saturado, con la ayuda de un software para realizar el análisis de estabilidad de taludes, que toman en consideración parámetros de succión y curva característica suelo-agua en el análisis de estabilidad; y de esta forma proporcionar a entidades gubernamentales criterios que les permitan cambiar la forma tradicional de revisar la estabilidad de los taludes.

La metodología general consistió: se realizó una investigación bibliográfica para obtener diferentes parámetros necesarios para la modelación de los taludes en estudio, también se realizaron visitas de campo a los taludes en estudio para realizar el levantamiento topográfico, extracción de muestras (alteradas e inalteradas), para la realización de ensayos de laboratorio, con los que obtuvieron parámetros a utilizar en la modelación de los taludes, que posteriormente fueron introducidos en los softwares especializados: SVSOILS y SVSLOPE, para el análisis de estabilidad de taludes y posteriormente se realizó la comparación de los resultados obtenidos, de acuerdo a los diferentes criterios que fueron tomados en cuenta en la presente investigación, los cuales fueron las siguientes:

1. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes considerando fallas de tipo circular y no circular, para el cual se utilizó el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados.

2. Determinación de la influencia de los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados contra el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados.
3. Determinación de la influencia del procedimiento empleado para la obtención de la curva característica suelo-agua utilizados en los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados.
4. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes de acuerdo a la estación del año: época lluviosa contra época seca.

Posteriormente, se realizó el análisis de los resultados, y en base a esto se pudo redactar las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación

CAPÍTULO No.1

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

El área metropolitana de San Salvador (AMSS), experimenta graves problemas de estabilidad de taludes, que se presenta principalmente en las tefras volcánicas llamadas tierra blanca joven (TBJ) que son producto de la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango, estos suelos tienen la característica que son muy susceptibles a problemas relacionados con el agua, con movimientos sísmicos y con condiciones antrópicas (actuación del hombre), ejemplos de esto es, que la problemática se ha incrementado en los últimos años, debido a las lluvias relacionadas con los huracanes o depresiones tropicales como el Mitch (1998), Stan (2005), Ida (2009), Alex (2010), Agatha (2010) y 12-E (2011); así como los terremotos en 1986 y 2001.

Estas tefras de TBJ en la época lluviosa presentan una disminución de resistencia al corte y colapso al ser saturadas, provocando pérdidas de vidas humanas, ambientales, sociales y económicas importantes, en la zona.

En El Salvador durante las dos estaciones del año (época seca y época lluviosa) el nivel de las aguas subterráneas en las zonas más urbanas se mantiene en 35 m de profundidad (Rolo et al., 2004), esto significa que la mayoría de los suelos en el país son parcialmente saturados (presencia de agua, aire y suelo) y hay fuerzas capilares que actúan sobre la estructura del suelo haciendo que una “cohesión aparente” o succión mejore la resistencia del suelo, la cual se pierde cuando es saturado o debido a terremotos/vibraciones.

Para conocer adecuadamente el comportamiento de las TBJ es necesario tomar en cuenta, la relación entre el contenido de humedad y la cohesión aparente que presentan, ya que al aumentar la humedad es común que se pierda el valor de la cohesión, Normalmente, en El Salvador todos los diseños geotécnicos sobre TBJ, utilizan el círculo de esfuerzos de falla de Mohr-Coulomb para la obtención de los parámetros: cohesión “c” y el ángulo de fricción interna “ ϕ ”. Que han servido de base para la modelación de cimentaciones, taludes, entre otros. Este fundamento deja de lado el efecto que tiene el cambio de la humedad en la resistencia del suelo.

Entre los métodos utilizados en el análisis de estabilidad de taludes se puede mencionar los siguientes:

Método de cálculo de las deformaciones: este método considera en el cálculo: las deformaciones del terreno, las leyes de la estática, la geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elastoplásticas, niveles freáticos.

Método de equilibrio límite, se basa en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno parcialmente inestable, este método no toma en cuenta las deformaciones del terreno, utiliza los parámetros siguientes: geometría del talud, estratigrafía, características de los suelos (ángulo de fricción, cohesión, peso unitario del suelo), niveles freáticos y cargas externas.

Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de equilibrio límite. Este sistema supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie

de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas.

Cada día se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson y Fellenius (1936). Algunos métodos son precisos y otros, solamente aproximados. Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión.

Los métodos de análisis no consideran el efecto que tiene los cambios de humedad en la estabilidad de los taludes, por lo que un estudio que considere dicho efecto permitiría hacer una evaluación más precisa de la seguridad de los taludes.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Salvador se encuentra en una región de intensa actividad sísmica, generada por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la del Caribe y por la activación de las fallas geológicas y está ubicado geográficamente en la zona tropical del planeta, es caracterizado por una época lluviosa marcada por eventos como huracanes, depresiones tropicales entre otros, donde las precipitaciones pueden extenderse por largos periodos

de tiempo, teniendo intensidades altas, debido a los fenómenos mencionados en la mayoría de taludes en AMSS, presentan un alto grado de inestabilidad.

Realizar un análisis tradicional de estabilidad de taludes es en cierto modo limitado debido al uso de simples valores o parámetros para describir las características o propiedades de un talud. Consecuentemente los tradicionales métodos de análisis sólo producen valores estimados de su estabilidad, sin embargo, existe una variabilidad inherente dentro de sus características las cuales afectan a la estabilidad del mismo.

Por lo tanto, los resultados obtenidos se pueden considerar que no están completamente apegados al comportamiento real, ya que el grado de humedad presente puede variar, tomar en cuenta dichas variaciones de humedad sirve para justificar la forma adecuada de realizar el análisis de estabilidad.

La deficiencia en la aplicación de modelos geotécnicos que pronostiquen y simulen un comportamiento más apegado a la realidad presente en algunas zonas del AMSS, ha motivado la necesidad de abordar la búsqueda de la aplicación de modelos que muestren resultados que, al ser comparados con los obtenidos a partir del análisis tradicional de estabilidad de taludes, nos brinde una justificación para determinar cuál metodología guarda mayor similitud con el comportamiento real.

Ante la situación actual, es necesario investigar métodos de modelación geotécnica, que permitan incorporar los fenómenos que hacen variar la resistencia al corte de los suelos, en su análisis, es decir que las características físicas del talud se están modificando y a

cada cambio es necesario considerarlo para la modelación y análisis más representativo del estado de los taludes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia del cambio de humedad del suelo en el análisis de estabilidad de taludes, aplicando los modelos: tradicional (Mohr-Coulomb para suelos saturados) y suelo parcialmente saturado, en taludes constituidos por tierra blanca joven (TBJ).

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proporcionar teoría básica para el análisis de estabilidad de taludes, en la que se refleje los parámetros que tienen efecto significativo en su estabilidad.
- Determinar la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes considerando fallas de tipo circular y no circular.
- Determinar la influencia de los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados contra el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados, en el análisis de estabilidad de taludes.
- Determinar la influencia del procedimiento empleado para la obtención de la curva característica suelo-agua utilizados en los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados, en el análisis de estabilidad de taludes.

- Determinación de la influencia de los puntos de succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes, considerando falla de tipo no circular respecto a la estación del año en estudio: época lluviosa contra época seca.

1.4 ALCANCES

Con esta investigación se pretende lo siguiente:

- Con información existente, se modelará el comportamiento de al menos dos taludes constituidos por TBJ.
- Se realizarán ensayos de laboratorio de los parámetros requeridos para el análisis de estabilidad de taludes: contenido de humedad, análisis granulométrico, gravedad específica y corte directo.
- Se representará la curva característica de suelo-agua representativa de las TBJ, utilizando el software SVSOIL.
- Se realizará el análisis de estabilidad de taludes considerando puntos de succión como presión de poros y no considerándolos, tomando en cuenta el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados, además se evaluarán las condiciones gravedad y gravedad más sismo, utilizando el software SVSLOPE.
- Se realizará el análisis de estabilidad de taludes considerando puntos de succión como presión de poros, tomando en cuenta los criterios de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados y de suelos parcialmente saturados:

Fredlund y Vanapalli, además se considerará las condiciones gravedad y gravedad más sismo, utilizando el software SVSLOPE.

- Se realizará el análisis de estabilidad de taludes considerando puntos de succión como presión de poros, tomando en cuenta los criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados: Fredlund y Vanapalli, considerando una falla no circular y tomando en cuenta los procedimientos empleados para la obtención de la curva característica suelo-agua: estimación a partir de la curva granulométrica y medición directa de succión, además se considerará las condiciones gravedad y gravedad más sismo, utilizando el software SVSLOPE.
- Se realizará el análisis de estabilidad de taludes considerando puntos de succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes, tomando en cuenta el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados, considerando falla de tipo no circular respecto a la estación del año en estudio: época lluviosa contra época seca, además se considerará las condiciones gravedad y gravedad más sismo, utilizando el software SVSLOPE.

1.5 LIMITACIONES

Se proveen las siguientes limitaciones:

- Debido a la gran cantidad de taludes dentro de la zona de estudio, se limitará el número que serán considerados; seleccionando aquellos que estén constituidos

por TBJ, y que se tenga alguna información preliminar que sirva de referencia para el estudio.

- Ya que parte de la información requerida para la realización de este estudio serán proporcionada por OPAMSS, depende de que tan pronto se nos proporcione ésta para realizar la investigación.
- La simulación de los modelos solamente se efectuará haciendo uso del software especializado, denominado SVSLOPE.
- Ya que no se cuenta con las licencias de los softwares especializados utilizados se depende de la disponibilidad de nuestro asesor externo que posee las licencias de dichos softwares.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Los suelos TBJ que se encuentran en el AMSS y que conforman la mayoría de los taludes, presentan un alto grado de susceptibilidad ante la variación de la humedad, sismos, etc. teniendo como consecuencia la inestabilidad de los mismos.

La Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), cuenta actualmente con una gran cantidad de información registrada a través del estudio de diferentes taludes ubicados en zonas del AMSS, donde se muestra los cambios de contenido gravimétrico que experimentan éstos a lo largo del año (época lluviosa y seca), por lo tanto, se tendría una base de información disponible para ser introducida a los modelos para el análisis de estabilidad.

Por lo que, se considera necesario el uso de estos parámetros, en la revisión de estabilidad de taludes, usando herramientas (software) que consideren el efecto que tiene la succión en el análisis de éstos. Con los resultados obtenidos se podrán comparar el comportamiento de los taludes, evaluados de forma tradicional (usando el criterio de resistencia al corte de Mohr –Coulomb para suelos saturados) contra los resultados usando criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados (succión) y de esta forma, determinar si es adecuado diseñar de la forma tradicional o incluyendo el efecto de la succión.

Esta investigación planteará un análisis de estabilidad de talud a través de la modelación geotécnica, la cuál será con la ayuda del paquete de software SVOFFICE, que son herramientas de modelación que incluye consideraciones hidrológicas, como la succión como presión de poros y curvas suelo-agua representativas de los materiales que se encuentran en la zona de estudio, que en la actualidad normalmente no se consideran en el diseño de taludes.

Con este estudio, se pretende proporcionar a las entidades gubernamentales criterios que les permitan cambiar la forma tradicional de revisar la estabilidad de taludes, y a partir de esto, proveer información para justificar cambios en la forma de presentar estos análisis.

CAPÍTULO No.2

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Para evaluar las condiciones de falla en taludes en el área metropolitana de San Salvador (AMSS), se requiere que evolucione la metodología que se viene aplicando para la revisión de su estabilidad. Para esto son aplicados métodos tradicionales de equilibrio límite, que no incluyen ciertos parámetros que son significativos cuando estudiamos el comportamiento de taludes conformados por TBJ, ya que la mayoría de taludes en el AMSS están conformados por este material, por esta y más razones se hace necesarios presentar los conceptos básicos relacionados con fenómenos que experimentan estos, y que debido a ellos se le deben en gran medida la estabilidad de los taludes en el AMSS. En éste capítulo en primer lugar se describen y profundizan los conceptos fundamentales acerca de los taludes y cómo responden estos cuando son sometidos a diversas condiciones, las cuales actúan hasta llevarlos a la falla, considerando las características de las TBJ, posteriormente se definirá el concepto de succión, curvas características y suelos parcialmente saturados, con el objetivo de establecer una buena base teórica que nos permita, cambiar la tendencia de la metodología que comúnmente se viene usando, a una que sea más apegada al comportamiento de los taludes en el AMSS.

2.2 TALUDES

En el presente apartado se presentan generalidades acerca de la teoría básica de taludes, detallando los elementos que lo conforman.

2.2.1 Definición de Talud¹

Sé comprende bajo el nombre genérico de talud cualesquiera superficies inclinadas respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería. Los taludes se dividen en naturales o artificiales (ver figura No. 2.1)

No hay duda que el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable.

Las obras de infraestructura lineal (carreteras y ferrocarriles), canales, conducciones, explotaciones mineras, y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie, precisa la excavación de taludes, Suarez (1998).

Para profundizar en el tema es importante definir las partes de un talud, y estos se mostrará en el siguiente apartado.

¹ información obtenida de: Suarez Díaz, "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales", Publicaciones UIS, 1998.

2.2.2 Nomenclatura de un Talud

Existen algunos términos para definir las partes de un talud. El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semirrecta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, base, en la cual ocurren principalmente procesos de depositación, Suarez (1998).

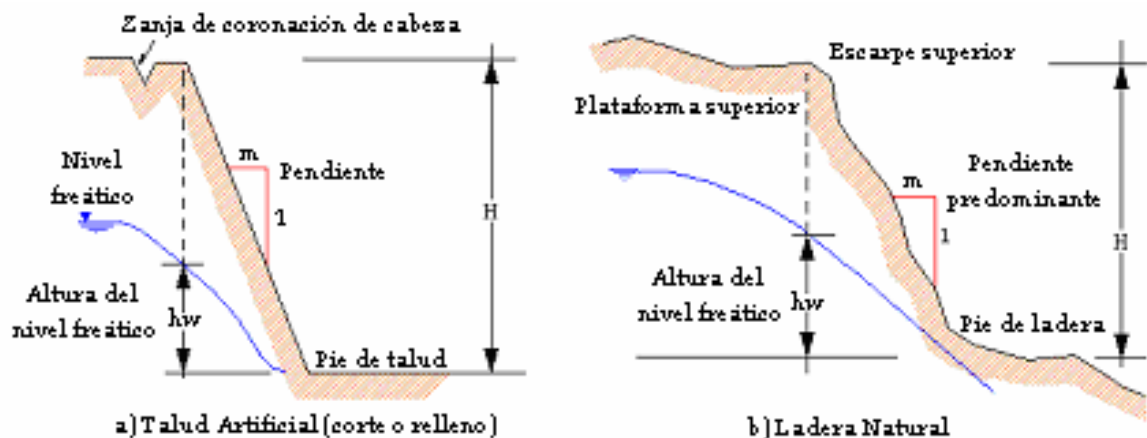


Figura No. 2. 1 Nomenclatura de Taludes y Laderas.

Fuente: Suarez Díaz (1998), "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales", Publicaciones UIS, pág.2.

En la tabla No. 2.1 se muestran los elementos que constituyen los taludes y laderas:

Tabla No. 2. 1 Elementos que conforman los taludes y laderas.

ELEMENTO	DEFINICIÓN
ALTURA	Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
PIE O BASE	Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior

CABEZA O ESCARPE	Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior
ALTURA DE NIVEL FREÁTICO	Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
PENDIENTE	Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical

Fuente: De los autores, con información obtenida de: Suarez Díaz (1998), "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales", Publicaciones UIS.

Además, se deben definir otros factores topográficos, como son: longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

Luego de haber definido los elementos de un talud, es importante determinar las condiciones de estabilidad del mismo, para diseñar los taludes cumpliendo con términos de seguridad y economía. Por lo antes mencionado, a continuación, se muestra teoría básica del análisis de estabilidad de taludes.

2.2.3 Análisis de estabilidad de taludes

Mediante el cálculo de un factor de seguridad se procede al análisis de la estabilidad de cada talud, de forma que se pueda definir el tipo de medidas correctoras que deben ser aplicadas en caso de fallas potenciales. Para este procedimiento se vuelve necesario un estudio geológico y geomecánico de los materiales conformantes del talud, de los posibles mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura en inclinación), factores geológicos (presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos relacionados con el comportamiento mecánico del terreno.

Todos estos factores pueden determinar la condición de rotura a lo largo de una superficie de falla. La probabilidad de rotura y los mecanismos de esta están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos, los cuales son intrínsecos a los materiales naturales.

Los cálculos para el factor de seguridad dependen de:

- a) La precisión de los parámetros mecánicos del suelo obtenidos en los ensayos de laboratorio para los estados de carga que son necesarios para el diseño del talud.
- b) El método de análisis de estabilidad utilizado en el cálculo del factor de seguridad.
- c) El método elegido para el análisis de estabilidad y la forma en que se definan los valores de las presiones intersticiales a usar en cada uno de ellos.

Como anteriormente se menciona, para el análisis de estabilidad de taludes parte del cálculo de un factor de seguridad, por lo tanto, es importante definir los conceptos de factor de seguridad y superficie de falla.

2.2.3.1 Concepto de Factor de Seguridad (F. S.)

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el

cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad (ecuación 2.1) como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$FS = \frac{\textit{Resistencia al corte disponible}}{\textit{Esfuerzo al cortante actuante}} \quad (2.1)$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes, como se muestra en la ecuación 2.2:

$$FS = \frac{\textit{Momento resistente disponible}}{\textit{Momento actuante}} \quad (2.2)$$

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de equilibrio límite, donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del factor de seguridad.

Otro criterio es dividir la masa que se va a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos, como se muestra en las ecuaciones 2.3 y 2.4:

$$FS = \frac{\sum \textit{Resistencias al cortante disponibles}}{\sum \textit{Esfuerzos al cortante actuantes}} \quad (2.3)$$

$$FS = \frac{\sum \text{Momentos resistentes disponibles}}{\sum \text{Momentos actuantes}} \quad (2.4)$$

2.2.3.2 Concepto de Superficie de Falla

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud (Figura No. 2.2); sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente.

En los métodos de equilibrio límite, el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla. Generalmente, se asume un gran número de superficies de falla para encontrar la superficie de falla con el valor mínimo de factor de seguridad, la cual se denomina “superficie crítica de falla”. Esta superficie crítica de falla es la superficie más probable para que se produzca el deslizamiento; no obstante, pueden existir otras superficies de falla con factores de seguridad ligeramente mayores, los cuales también se requiere tener en cuenta para el análisis.

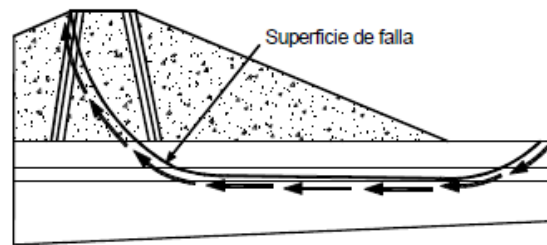


Figura No. 2. 2 Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante (U. S. Corps of Engineers, 2003).

Fuente: Suarez Díaz (2009), "Deslizamiento: análisis geotécnico", vol.1, pág. 131.

Definidos los aspectos básicos del análisis de estabilidad de talud, se procederá a desarrollar, la ley de resistencia al corte, utilizada para el análisis tradicional considerando los suelos en condición saturada, además a continuación, se realizará una explicación de los métodos de análisis:

2.2.3.3 Ley de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para Suelos Saturados²

Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación 2.5:

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (2.5)$$

Siendo:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte.

c' = Cohesión efectiva

σ = Presión normal total

u_w = Presión del agua intersticial o de poro

² información obtenida de: Suarez Díaz, "Deslizamiento: análisis geotécnico", vol.1, 2009.

En la figura No. 2.3 se muestra la representación gráfica de la ecuación de Coulomb.

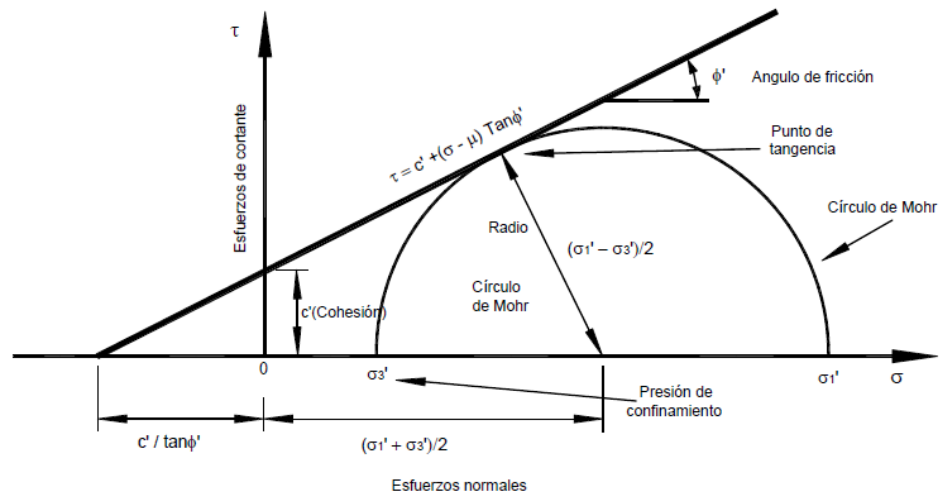


Figura No. 2. 3 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb.

Fuente: Suarez Díaz (2009), "Deslizamiento: análisis geotécnico", vol.1, pág. 75.

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere conocer los parámetros, el ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo que depende de las presiones internas o de poros de acuerdo con la ecuación de Coulomb, en la cual el factor μ está restando al valor de la presión normal total. La presión resultante se le conoce con el nombre de presión efectiva σ' .

$$\sigma' (\text{Presión efectiva}) = \sigma - u_w$$

ϕ' = ángulo de fricción interna para presiones efectivas

c' = Cohesión para presiones efectivas

2.2.3.4 Parámetros fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes

Los parámetros de los suelos, necesarios para realizar el análisis de estabilidad de taludes, se definen a continuación:

❖ *Ángulo de fricción*

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \tan\phi$$

El ángulo de fricción depende de varios factores, entre ellos algunos de los más importantes son: el tamaño de los granos, forma de los granos, distribución de los tamaños de granos, densidad.

❖ *Cohesión*

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina suelos no cohesivos.

❖ *Presión de Poros*

La presión de poros consiste en la presión en el agua dentro de los poros del suelo y se identifica con la letra " u_w ". La presión de poros disminuye los esfuerzos normales

efectivos entre las partículas, trata de separarlas y disminuye la resistencia a la fricción (Figura No. 2.4). Al colocar una carga se puede producir un cambio en la presión de poros que se denomina como $\Delta\mu$ (exceso de presión de poros) o deficiencia de presión de poros inducidos por las condiciones de carga.

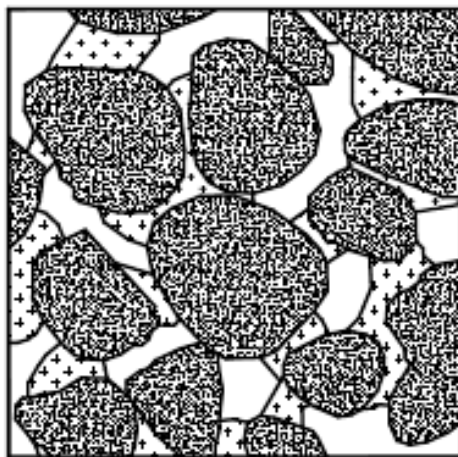
Si el agua en el suelo no está en movimiento, la altura del agua genera un fenómeno de presión hidrostática, definida en la ecuación 2.6:

$$u_w = \gamma_w \cdot Z_w \quad (2.6)$$

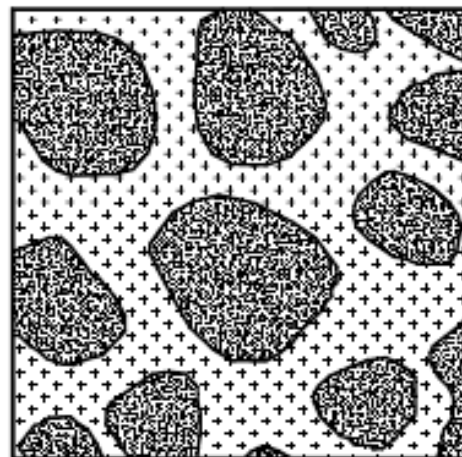
Siendo:

γ_w = peso unitario del agua

Z_w = profundidad vertical del punto por debajo del nivel de agua freática.



La tensión de agua en los poros intenta unir las partículas
a) No saturado



La presión de agua produce que las partículas se traten de separar
b) Saturado

Figura No. 2. 4 La presión de poros trata de separar las partículas y de esta forma, se disminuye la resistencia a la fricción.

Fuente: Suarez Díaz (2009), "Deslizamiento: análisis geotécnico", vol.1, pág.78.

Si el agua está en movimiento, la presión de poros puede ser superior a $\gamma_w \cdot Z_w$, y debe determinarse la cabeza hidrostática h_u por medio de un piezómetro o una red de flujo. En este caso, la presión de poros se calcula por medio de la ecuación 2.7:

$$u = \gamma_w \cdot h_u \quad (2.7)$$

Si se supone la superficie freática inclinada a un ángulo θ con la horizontal (ver figura No. 2.5), la cabeza piezométrica se determina con la ecuación 2.8:

$$h_u = h_w \cos^2 \theta \quad (2.8)$$

Siendo:

h_u : es la distancia vertical a la línea del nivel freático.

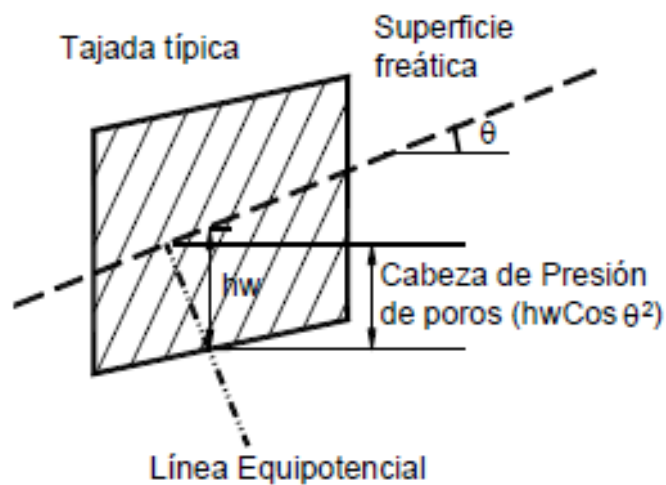


Figura No. 2. 5 Medición de la presión de poros.
Fuente: Suarez Díaz (2009), "Deslizamiento: análisis geotécnico", vol.1, pág.79.

La presión de poros aumenta en los taludes en temporadas de lluvias y disminuye en temporadas de sequía. Es muy importante entender y cuantificar la variación temporal y espacial de la presión de poros en los taludes. La variabilidad es mayor en la cuesta que en el pie del talud.

2.2.3.5 Métodos de análisis de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes.

A continuación, en la tabla No. 2.2 se presentan algunos métodos de análisis conocidos para el cálculo del factor de seguridad.

Tabla No. 2. 2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

MÉTODO	SUPERFICIES DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERÍSTICAS
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop, 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.

Fuente: Suarez Díaz (1998), "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales", Publicaciones UIS, pág.122.

Además de las condiciones establecidas anteriormente, es necesario para el análisis de estabilidad introducir los efectos que un evento sísmico provoca en la estabilidad de un talud.

2.3 ANÁLISIS SÍSMICO

El país a diario se ve sometido a una serie de eventos sísmicos, que tienen repercusión en los taludes. San Salvador ha experimentado en los últimos días, magnitudes de sismos que oscilan en el rango de 1.1 a 6.8 en escala de Richter, razón por la cual es necesario introducir este fenómeno en el análisis de estabilidad de los taludes.

Los eventos sísmicos son capaces de inducir fuerzas de gran magnitud, de naturaleza cíclica, las cuales pueden producir la falla rápida de taludes y laderas, principalmente en la estación lluviosa. Además, la resistencia al corte de un suelo puede reducirse a causa de cargas oscilatorias que generan deformaciones cíclicas, o debido a la generación de presiones altas de poros. La combinación entre la acción de las cargas sísmicas y la disminución de la resistencia pueden producir una disminución general de la estabilidad.

El caso más crítico es el de materiales no plásticos de grano fino como son los limos o las arenas finas. En el análisis de estabilidad se requiere analizar los cinco factores que se indican a continuación:

- Magnitud de la fuerza sísmica.
- Disminución de la resistencia a causa de las cargas oscilatorias.
- Disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros.

- Fenómeno de resonancia.
- Amplificación de las cargas sísmicas por la presencia de suelos blandos.

Ya que la presente investigación incluirá la condición de gravedad más sísmo para el análisis estabilidad de taludes, se tomará en cuenta los lineamientos que nos proporciona la “Norma técnica para el diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes de El Salvador”, para obtener los coeficientes sísmicos a utilizar.

2.3.1 Coeficientes sísmicos según norma técnica para el diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes de El Salvador³

La Norma Técnica Salvadoreña indica que el análisis de estabilidad deberá tomar en cuenta las fuerzas estáticas y las fuerzas sísmicas aplicadas. La fuerza sísmica, se determinará multiplicando el peso de cada cuña deslizante por el coeficiente sísmico correspondiente a cada zona, los valores a considerar se muestran en la Tabla No. 2.3:

Tabla No. 2. 3 Coeficientes para diseño por sismo.

ZONA	COEFICIENTE SÍSMICO HORIZONTAL, K_h	COEFICIENTE SÍSMICO VERTICAL, K_v
I	0.16	0.00
II	0.12	0.00

Fuente: De los autores, con apoyo de la norma técnica para diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes, el salvador, 1993.

En la figura No. 2.6 se muestra la zonificación sísmica de El Salvador, de acuerdo a la norma técnica para el diseño por sismo.



Figura No. 2. 6 Zonificación sísmica de El Salvador.
Fuente: Norma Técnica Para Diseño Por Sismo, El Salvador, 1993.

Nuestra investigación se basa fundamentalmente en la comparación entre resultados del análisis de estabilidad de taludes utilizando el método tradicional y el modelo de suelos parcialmente saturados, por lo tanto, es importante dar a conocer teoría básica acerca de este tema, para una mejor comprensión de la temática.

2.4 SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS⁴

Los suelos saturados y los suelos secos, constituyen un sistema de 2 fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. Pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases en el suelo que

⁴ información obtenida de: Meza Ochoa v., “suelos parcialmente saturados, de la investigación universitaria”, Universidad Nacional de Colombia, 2012.

interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire. De acuerdo con Fredlund y Morgenstern (1977) se podría hablar de una cuarta fase: la interfase aire-agua, o membrana contráctil.

La figura No. 2.7 muestra el esquema planteado por Fredlund (2000) para representar los estados del suelo dependiendo de las fases presentes.

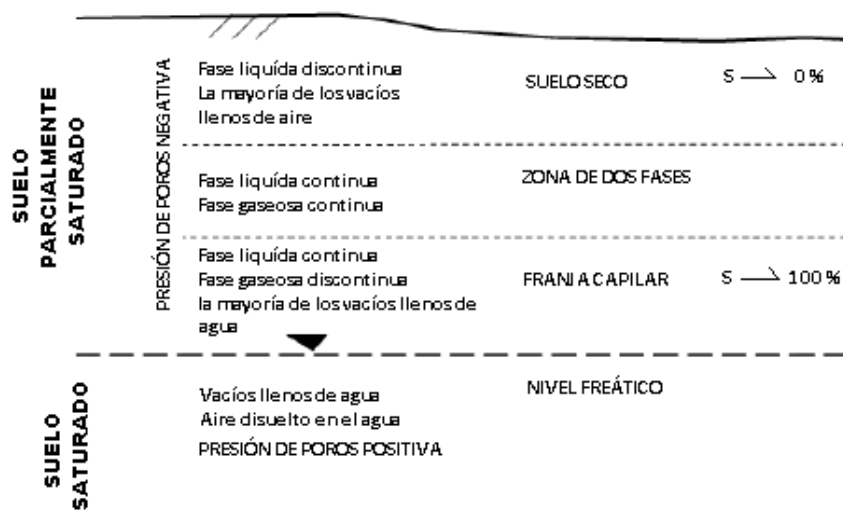


Figura No. 2.7 Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado.

Fuente: Meza Ochoa v. (2012), "Suelos parcialmente saturados, de la investigación universitaria", Universidad Nacional de Colombia.

Los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático se consideran en estado saturado, es decir, que los espacios vacíos están ocupados completamente por agua. De acuerdo con las leyes de la hidráulica, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, es decir que ejerce una fuerza positiva, de igual magnitud y en todas las direcciones y se le conoce como presión de poros debida al agua (u_w).

Los suelos que se encuentran por encima del nivel freático, pueden estar en estado seco o parcialmente saturado. La zona de suelo seco es la que se encuentra más cerca de la superficie del terreno, y de acuerdo con Fredlund (2000), la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de aire, pudiendo existir una fase líquida, pero en estado discontinuo, es decir, como pequeñas gotas de agua aisladas. El grado de saturación del suelo seco es $S \rightarrow 0\%$.

La franja más cercana al nivel freático, es la franja capilar, donde la mayor parte de los vacíos se encuentran llenos de agua de manera continua, pero puede existir una fase gaseosa discontinua, es decir, se presentan burbujas de aire. El grado de saturación del suelo en la franja capilar es cercano al 100% ($S \rightarrow 100\%$), pero el suelo no se considera saturado y a diferencia de este, el agua que ocupa los vacíos, se encuentra a una presión negativa, es decir la presión de poros debida al agua (u_w) es negativa y se rige por el fenómeno de capilaridad.

Entre la zona del suelo seco y la franja capilar, existe una zona intermedia denominada por Fredlund (2000) como zona de dos fases, que corresponde a la zona del suelo parcialmente saturado, propiamente dicha. En esta zona, el agua y el aire se encuentran ocupando los poros, ambos de manera continua y el grado de saturación se encuentra en un intervalo entre el 20% y el 80%. La presión en los poros del suelo es negativa, pero es debida a la diferencia de presión entre ambas fases, es decir, a la presión del agua en los poros (u_w) y a la presión del aire en los poros (u_a).

A continuación, es necesario tener la capacidad de calcular o estimar las funciones relevantes de propiedades de suelos parcialmente saturados para modelar el comportamiento de la parte superior de los estratos del suelo.

Ya que la parte superior del perfil del suelo juega un papel dominante en el almacenamiento de agua y en la transmisión de agua a los estratos de suelos infrayacentes. El comportamiento de la resistencia al cortante y el cambio de volumen de la porción del suelo parcialmente saturado también cambian significativamente en respuesta al flujo de humedad en la superficie del terreno.

2.4.1 Estimaciones de las funciones de propiedades de suelos parcialmente saturados⁵.

Según la metodología propuesta por Fredlund, Houston y Houston (2002), para la determinación de las propiedades de suelos parcialmente saturados se puede dividir en cuatro niveles (ver figura No. 2.8)

⁵ Información obtenida de: FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. & FREDLUND, M, D., "Unsaturated soil mechanics in engineering practice". Ed. John Wiley & Sons, 2012.

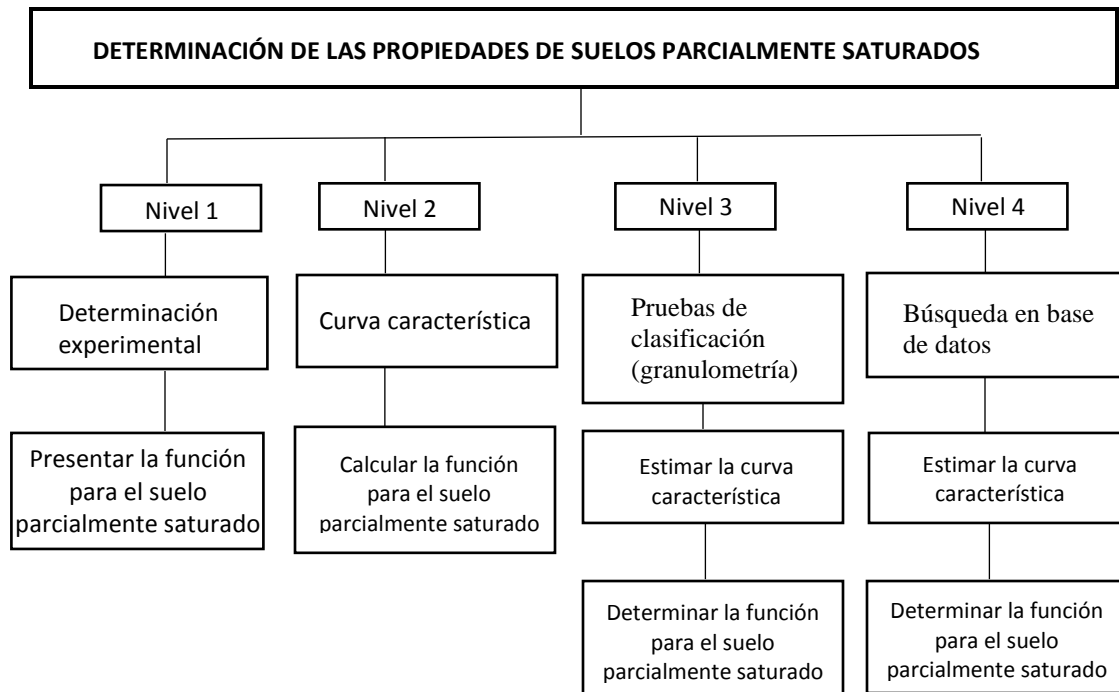


Figura No. 2. 8 Aproximaciones para la determinación de las funciones de suelos parcialmente saturados.

Fuente: FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. & FREDLUND, M, D. (2012), "Unsaturated soil mechanics in engineering practice". Ed. John Wiley & Sons. pág.9.

En el nivel 1 la determinación de las funciones se basa completamente en ensayos de laboratorio; es decir, se deben determinar desde propiedades índices hasta propiedades en suelos parcialmente saturados.

En el nivel 2 se determinarán las propiedades índices y propiedades de suelos en condiciones saturadas, además de la curva característica. Los resultados se usarán en conjunto para obtener las funciones del suelo parcialmente saturado.

El nivel 3 y nivel 4 son quizá los más viables, para la determinar las funciones de los suelos parcialmente saturados. En el tercero sólo se requiere la determinación de propiedades

índices para tomarlas como base e inferir la curva característica, y después emplearla para determinar las funciones.

El nivel 4 se utiliza en aquellos casos en los que únicamente se puedan determinar propiedades índices. Si se conocen dichas propiedades se puede hacer uso de bases de datos, y buscar un suelo con características parecidas al suelo en estudio.

2.4.2 Definición de succión y curva característica suelo-agua.

En la presente sección se definirán los conceptos de succión, curva característica suelo-agua, también se definirán las partes de dicha curva, así como los factores que afectan a la misma.

2.4.2.1 Definición de succión.

La succión total es referida como la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (Lee y Wray, 1995). Ridley (1993) la define como la energía requerida para remover una molécula de agua de la matriz de suelo por medio de la evaporación.

La energía necesaria para remover el agua del suelo o succión total tiene dos componentes, una asociada al efecto de la capilaridad denominada succión matricial (ψ_m) y una componente debida a la presencia de sales disueltas en el agua, llamada succión osmótica (π).

La succión matricial (ψ_m), es la componente de la succión total asociada a la capilaridad, debida a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la adsorción desarrollada en la superficie de las partículas. La succión matricial se expresa como la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros, como se muestra en la ecuación 2.9:

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (2.9)$$

Siendo:

Ψ_m = succión matricial,

u_w = presión del agua en los poros

u_a = presión del aire en los poros.

El valor de la succión matricial depende del tamaño y distribución de las partículas, del tamaño de los poros y del grado de saturación (Dineen, 1997). Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños, el radio de curvatura del menisco se reduce y de esta manera, la succión matricial se incrementa.

La succión osmótica (π) es la componente de la succión asociada a la presencia de sales disueltas en el agua. La presencia de sales disueltas, reduce la presión de vapor en el espacio que se encuentra por encima de la interfase agua-aire, por lo tanto, se requiere de una mayor energía para remover una molécula de agua. Esta energía adicional requerida, es la succión osmótica, y es independiente de los efectos por capilaridad.

La succión total es considerada como la suma algebraica de las componentes matricial y osmótica, ecuación 2.10:

$$\psi = \psi_m + \pi \quad (2.10)$$

Siendo:

Ψ = succión total

Ψ_m = succión matricial

π = succión osmótica

Los principales problemas geotécnicos que involucran a los suelos no saturados, están relacionados con cambios ambientales, y estos cambios modifican principalmente la succión matricial, mientras que los cambios en la succión osmótica son menos significativos. En general, la succión osmótica tiene importancia en el comportamiento del suelo, cuando se presentan problemas que involucren contaminación química, (Fredlund y Rahardjo, 1993).

En la tabla No. 2.4 se presentan algunos métodos para la medición de la succión matricial, osmótica y total, junto con la gama de succión y el tiempo requerido por cada prueba.

Tabla No. 2.4 Rangos de medición aproximados y tiempos de equilibrado en la medición y control de la succión del suelo.

INSTRUMENTO	COMPONENTE DE SUCCION	MEDIDA (kPa)	TIEMPO DE EQUILIBRIO
MEDIDA DE SUCCION			
Placa de presión	Matricial	0—1500	Varias horas o días
Tensiómetro y sondas de succión	Matricial	0—1500	Varios minutos
Sensores de conductividad térmica	Matricial	1—1500	Varias horas o días
Sensores de conductividad eléctrica	Matricial	50—1500	Varias horas s semanas
Contactos de papel filtro	Matricial	0—10000 o mayor	2-57 días
Psicrómetros termopar	Total	100—8000	Varios minutos a varias horas
Psicrométrica	Total	100—70000	Alrededor de 1 hora
Psicrómetros espejo enfriado	Total	1—60000	3-10 minutos
El papel filtro sin contacto	Total	1000—10000 o mayor	2-14 días
Conductividad eléctrica del agua de los poros extraídos de experimentar con fluidos	Osmótica	Toda la gama	
CONTROL DE SUCCIÓN			
Técnica de columna de agua negativo (colgante)	Matricial	0—30 o mayor con varias columnas o de control de vacío	Varias horas o días
Técnica de traslación de ejes	Matricial	0—1500	Varias horas o días
Técnica osmótica	Matricial	0—10000	Hasta 2 meses
Técnica de equilibrio de vapor	Total	4000—600000	1—2 meses

Fuente: MURRAY, E. & SIVAKUMAR, V. (2010), "Unsaturated soils: a fundamental interpretation of soil behavior". Ed. Wiley- Blackwell, pág.35.

En la tabla No.2.5 Se muestran las ventajas y desventajas de cada método de medición de la succión:

Tabla No. 2.5 Métodos de medición de succión: ventajas y desventajas.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Olla de presión	<ul style="list-style-type: none"> El tiempo que se obtienen los resultados son de poca duración 	<ul style="list-style-type: none"> A veces los resultados suelen ser erróneos si no se tiene gran cuidado El rango de presión es corto, limitando conocer valores de succión Solo es posible obtener la succión matricial.
Tensiómetro y sondas de succión	<ul style="list-style-type: none"> Se obtienen resultados poco tiempo (en algunos minutos) Medidas precisas 	<ul style="list-style-type: none"> El rango de presión es corto, limitando conocer valores de succión Solo es posible obtener la succión matricial.
Sensores de conductividad térmica	<ul style="list-style-type: none"> Simplicidad Detector no destructivo 	<ul style="list-style-type: none"> Solo permite medir la succión matricial El rango de presión es corto, limitando conocer valores de succión
Sensores de conductividad eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> Es muy fácil de usar Simplicidad 	<ul style="list-style-type: none"> Solo permite medir la succión matricial El rango de presión es corto, limitando conocer valores de succión
Contactos de papel filtro	<ul style="list-style-type: none"> Permite obtener amplio rango de presión y de esta forma obtener más valores de succión 	<ul style="list-style-type: none"> Carece de precisión y fiabilidad Solo es posible obtener succión Matricial Los resultados tardan mucho en ser conocidos
Psicrométricos termopares	<ul style="list-style-type: none"> Permite determinar la succión total del suelo El rango de presiones es amplio Permite obtener los valores de succión en poco tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> A veces requiere ocupar sensores adicionales por descompensación de voltaje
Psicrómetro	<ul style="list-style-type: none"> Alta precisión en los resultados si se tiene cuidado 	<ul style="list-style-type: none"> Debe tener lugar un acondicionamiento al entorno antes de cada medición importante y también se debe cambiar la mecha. Manipulación importante (prácticamente se debe humedecer con agua destilada antes de cada medición).
Psicrómetro espejo enfriado	<ul style="list-style-type: none"> Permite obtener el resultado de la medición de la succión en muy poco tiempo con respecto a los demás métodos (de 3 a 10 min) 	<ul style="list-style-type: none"> El equipo muy difícil de encontrarlo

	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen valores de succión totales • El rango de presión del ensayo es grande permitiendo conocer más valores de succión 	
Papel filtro sin contacto	<ul style="list-style-type: none"> • Mide tanto presión Matricial y osmótica 	<ul style="list-style-type: none"> • Carece de precisión y fiabilidad

Fuente: De los autores.

2.4.2.2 Definición de curva característica suelo-agua.

La curva retención suelo-agua es una relación entre la cantidad de agua en el suelo y la succión. La cantidad de agua en el suelo generalmente se cuantifica en términos de humedad gravimétrica (ω), grado de saturación (S), o humedad volumétrica (Θ). Los resultados se grafican como la succión matricial en el intervalo de baja succión y como succión total en el intervalo de succión alta; el término succión del suelo se lleva a las abscisas del gráfico.

La curva de retención puede ser caracterizada con la finalidad de formular ecuaciones. La caracterización es realizada a partir de las trayectorias típicas obtenidas por procedimientos de secado o humedecimiento.

La figura No.2.9 muestra características de las curvas de retención, adquiridas por humedecimiento y secado, pudiendo verificarse el fenómeno de histéresis (curvas no coincidentes por los procesos de humedecimiento y secado) asociada a las dos formas de obtención.

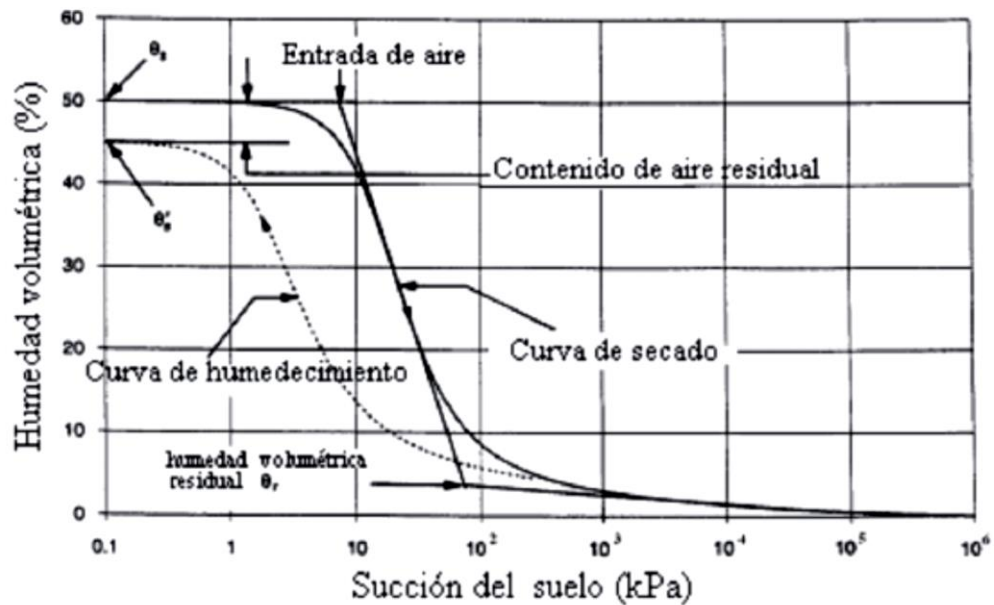


Figura No. 2.9 Elementos de la curva de retención según Fredlund et. al. (1994).
Fuente: Alfaro Soto, M. (2008), Geotecnia en Suelos no Saturados. Volumen XXXII.

La naturaleza de la curva retención suelo-agua está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo (T. J., 1993); por tanto, la relación puede variar para diferentes tipos de suelos (figura No. 2.10). Nótese que para el caso de suelos finos (arcillas), estos pierden humedad en forma gradual; mientras que para suelos granulares, la pérdida de agua ocurre en forma muy rápida.

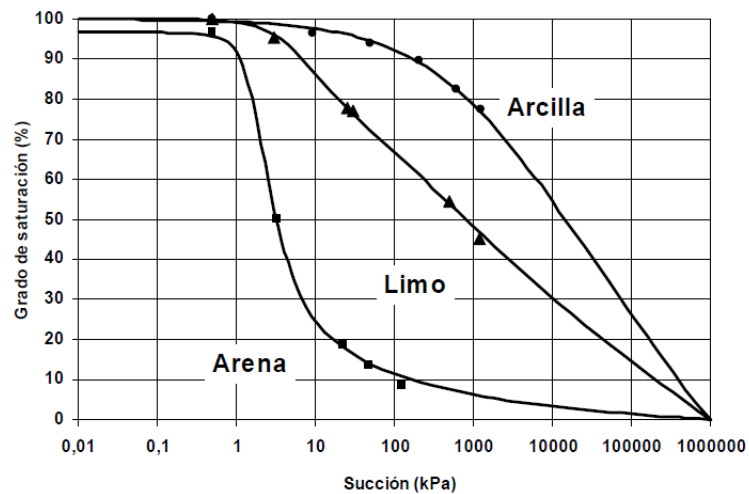


Figura No. 2.10 Curvas características para suelos con diferentes texturas.

Fuente: Pérez, N. (2006), Development of a Protocol for the Assessment of Unsaturated Soil Properties. PhD thesis. Arizona State University.

En otras palabras, la curva característica no es más que una representación de la capacidad de un suelo para retener agua, bajo cierto valor de succión aplicada.

2.4.2.2.1 Regiones de la curva característica⁶

La curva característica se compone de tres zonas: la capilar, la de desaturación, y la residual. La **zona capilar** es aquella en la cual el suelo se mantiene en un estado de saturación, y termina en el valor de entrada de aire (Fredlund, 1999), el cual está definido como el valor que debe de exceder la succión matricial, antes de que el aire empiece a entrar en los macroporos del suelo, ver figura No. 2.11.

En la **zona de desaturación**, el agua es desplazada por aire; por tanto, la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incrementa a medida que el suelo pierde más agua. Al finalizar esta zona, el agua se encuentra en un estado

⁶ información obtenida de: Pérez, N. "Determinación De Las Curvas Características En Suelos No Saturados Con Celdas De Presión". Publicación Técnica No. 313. Sanfandila, 2008.

discontinuo y el coeficiente de permeabilidad se reduce en forma importante, ver figura No. 2.11.

Para la **zona residual**, un incremento de succión no produce un cambio importante en el contenido de agua, la cual es tan escasa que no fluye entre los poros y la remoción puede ser sólo por evaporación (Hosagasi, 2006). En esta región en donde las succiones son muy altas, el agua está adsorbida a las partículas, ver figura No. 2.11.

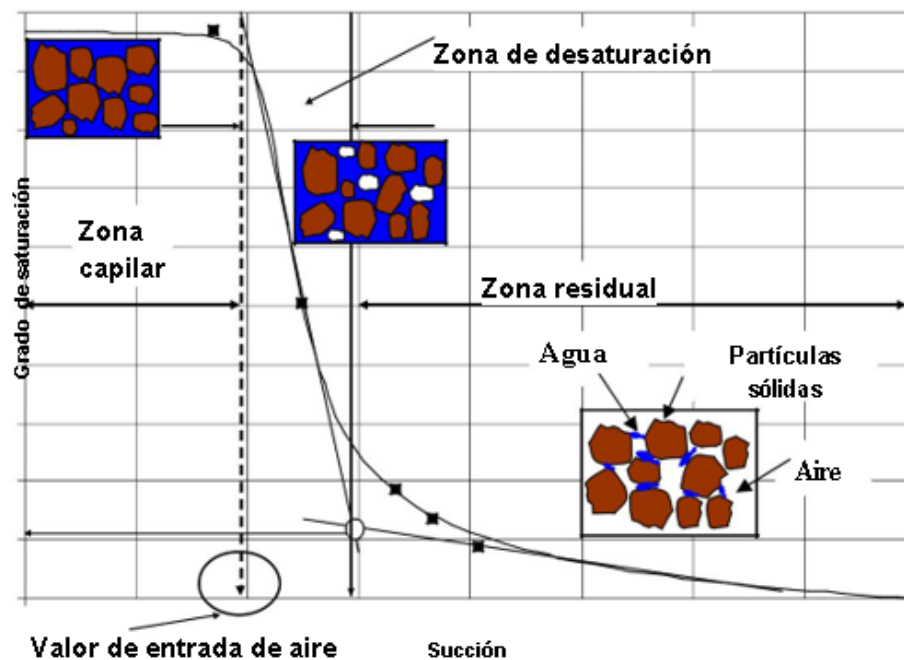


Figura No. 2.11 Regiones típicas de la curva característica.

Fuente: Pérez, N. (2008), "Determinación De Las Curvas Características En Suelos No Saturados Con Celdas De Presión". Publicación Técnica No. 313. Sanfandila, pág.8.

2.4.2.2 Modelos matemáticos para la obtención de la curva característica suelo-agua.

La curva característica suelo-agua, es fundamental para la aplicación de la mecánica de suelos no saturados en la práctica de la ingeniería geotécnica. Hay una serie de modelos matemáticos que han sido formuladas por diferentes autores para la determinación de esta, entre los que se pueden citar (ver tabla No.2.6):

Tabla No. 2.6 Modelos matemáticos para la obtención de la curva característica suelo-agua.

AUTOR	ECUACIÓN	COMPONENTES	APLICABLE
Brooks y Carey (1964)	$W_w = W_r + (W_s - W_r) \left[\frac{a_c}{\psi} \right]^{n_c}$ <p style="text-align: center;">(2.11)</p>	<p>Ww = Contenido gravimétrico de agua en cualquier succión del suelo. Ws = contenido gravimétrico de agua saturada Wr = contenido gravimétrico residual de agua ac= presión de burbujeo (kPa) nc= Índice de distribución de poros síze (adimensional) ψ= succión del suelo (kPa)</p>	Todo tipo de suelo
Gardner (1958)	$W_w = W_{rg} + (W_s - W_{rg}) \left[\frac{1}{1 + a_g \psi^{n_g}} \right]$ <p style="text-align: center;">(2.12)</p>	<p>Ws= contenido gravimétrico de agua saturada Wrg= contenido gravimétrico residual de agua ag= presión de burbujeo (kPa)</p>	Todo tipo de suelo
Van Genuchten (1980).	$W_w = W_{rvg} + (W_s - W_{rvg}) \left[\frac{1}{[1 + (a_{vg})^{n_{vg}}]^{m_{vg}}} \right]$ <p style="text-align: center;">(2.13)</p>	<p>Wrg = contenido gravimétrico residual de agua avg = parámetro de suelo que es principalmente una función del valor del aire del suelo kPa nvg = parámetro del suelo que es principalmente una función de la tasa de extracción de agua del suelo una vez que se ha excedido el valor de entrada de aire mvg = parámetro de ajuste</p>	Todo tipo de suelo
Van Genuchten (1980) y Mualem (1976)	$W_w = W_{rm} + (W_s - W_{rm}) \left[\frac{1}{[1 + (a_m \psi)^{n_m}]^{(1 - \frac{1}{n_m})}} \right]$ <p style="text-align: center;">(2.14)</p>	<p>Wrm= contenido gravimétrico residual de agua am= parámetro de suelo que es principalmente una función del valor del aire del suelo kPa nm= parámetro de suelo que es principalmente una función de la tasa de extracción de agua del suelo una vez que se ha excedido el valor de entrada de aire</p>	Todo tipo de suelo
Van Genuchten (1980) y Burdine (1953)	$W_w = W_{rb} + (W_s - W_{rb}) \left[\frac{1}{[1 + (a_b \psi)^{n_b}]^{(1 + \frac{2}{n_b})}} \right]$	<p>Wrb= contenido gravimétrico residual de agua ab= parámetro de suelo que es principalmente una función del valor del aire del suelo kPa nb= parámetro de suelo que es principalmente una función de la tasa de extracción de agua del suelo</p>	Todo tipo de suelo

	(2.15)	una vez que se ha excedido el valor de entrada de aire	
Fredlund y Xing (1994)	$W_w = W_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\left[\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right]\right]^{m_f}} \right]$ <p style="text-align: center;">(2.16)</p>	<p>hr= Succión en la que se produce el contenido de agua residual (kPa)</p> <p>af= parámetro de suelo que es principalmente una función del valor del aire del suelo kPa</p> <p>nf = parámetro de suelo que es principalmente una función de la tasa de extracción de agua del suelo una vez que se ha excedido el valor de entrada de aire</p> <p>mf = parámetro para el suelo que es principalmente una función del contenido de agua residual</p>	Todo tipo de suelo

Fuente: De los autores, con apoyo del Manual del software SVSOIL, SOILVISION SYSTEMS LTD.

2.4.2.2.3 Estimación de la curva característica suelo-agua a partir de algunos puntos.

La curva característica suelo-agua tiene dos puntos de definición principales: (1) el contenido de agua y la succión del suelo en el valor de entrada de aire en el suelo y (2) el contenido de agua y la succión en condiciones residuales. Además, hay dos puntos que definen los límites extremos de la curva: condiciones completamente saturadas bajo succión cero y condiciones completamente secas (es decir, contenido de agua cero y una succión del suelo de 1,000,000 kPa). Este ajuste permite que la curva característica del agua del suelo sea representada por puntos de inflexión físicamente significativos. Para determinar el contenido gravimétrico a cualquier succión, se usa cualquiera de las ecuaciones de la tabla No.2.6.

2.4.2.2.4 Factores que afectan la determinación de la curva característica

De igual forma que algunas otras propiedades de los suelos, la determinación de la curva característica también depende de varios factores. A continuación, en la Tabla No. 2.7, se describe el impacto de cada factor en la determinación de la curva característica.

Tabla No. 2.7 Factores que influyen en la determinación de la curva característica.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Tipo de suelo	La curva característica depende del tipo del suelo. Para suelos más plásticos, la capacidad de retención de agua es mucho mayor; además, los suelos con menos plasticidad presentan una curva más plana, ya que retienen muy poca agua
Energía de compactación	La curva característica para suelos cohesivos depende de la energía de compactación mientras que los suelos granulares son independiente de la energía de compactación.
Efecto del contenido de agua de compactación	Según diferentes estudios el contenido de agua inicial de compactación no influye de manera importante en la determinación de la curva característica.
Tipo de compactación	El tipo de compactación utilizado influye en la curva característica también. De acuerdo a diferentes estudios, los resultados obtenidos señalan que, al compactar en condiciones estáticas, la curva característica presentará mayores contenidos de agua que si se compacta en forma dinámica.
Influencia del estado de esfuerzos	Según Vanapalli (1994), y Ng y Pang (2000), señalan que las curvas características obtenidas de especímenes inicialmente cargados y descargados en un consolidómetro convencional y después ensayados en una celda de presión volumétrica, muestran una variación importante. Por ejemplo, en un espécimen que no fue sometido a ningún esfuerzo previo a la determinación de la curva característica se desatura más rápido; mientras que, para el caso del espécimen sujeto a una mayor precarga, la curva es más plana; y para un mismo valor de succión la cantidad de agua que retiene es mucho mayor.
Técnica de saturación del espécimen	Según estudios el método de saturación influye en la determinación de la curva característica. Barbosa, et al (2002), utilizó dos métodos para saturar los especímenes compactados. El primero consistía en colocar el espécimen en agua y después someterlo a vacío; mientras que el segundo era saturar el espécimen con vacío y después sumergirlo en agua. Los resultados mostraron que el espécimen que se sumergió en agua y después se le aplicó vacío, presentó un grado de saturación mayor
Histéresis	El suelo en proceso de secado retiene más agua que el que sufre humedecimiento, este fenómeno se llama "histéresis". Puede deberse al aire atrapado, la no uniformidad, y a diferentes tamaños de los poros, expansión y contracción del suelo que puede alterar la estructura del suelo

Fuente: De los autores.

En la siguiente sección, se muestra las ecuaciones de resistencia al corte de modelos constitutivos para suelos parcialmente saturados, que sirven para evaluar la estabilidad de taludes, utilizando la teoría de suelos parcialmente saturados.

2.4.3 CRITERIOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS⁷

El desencadenante más común para las fallas de estabilidad de taludes en todo el mundo son los eventos de lluvia. Tales eventos destruyen las presiones negativas del agua (succiones) en la zona superior del suelo y causan fallas. Por lo tanto, es de suma importancia que el modelo de análisis de estabilidad de taludes contemple este tipo de mecanismo de falla.

A continuación, se definen los aspectos teóricos de varios modelos de resistencia al para suelos parcialmente saturados, que utiliza el software SVSLOPE.

2.4.3.1 Criterio de resistencia de Mohr-Coulomb

Para el caso de suelos parcialmente saturados, la ecuación de Coulomb se expresa en la siguiente ecuación 2.17:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2.17)$$

Siendo:

c' = Cohesión efectiva

ϕ' = Ángulo efectivo de fricción interna.

⁷ información obtenida de: Manual del software SVSLOPE, SOILVISION SYSTEMS LTD.

ϕ^b = Ángulo que define el aumento de la resistencia al corte por succión matricial

(o presión negativa del agua de los poros)

σ_n = Esfuerzo normal total

u_a = Presión de aire de poro

u_w = Presión de agua de poro

El término $(u_a - u_w)$ se llama succión matricial y es una representación positiva de la presión negativa del agua de poro. El ángulo, ϕ^b , es una propiedad matricial. El ángulo, ϕ^b , puede ir desde cero hasta el valor ϕ' dependiendo del tipo de material y la magnitud de la succión matricial.

A diferencia de los suelos saturados, la envolvente de falla para un suelo no saturado se representa por una superficie ubicada en un sistema de ejes coordenados de tres dimensiones (Figura No.2.12). La ordenada representa el esfuerzo cortante; y las abscisas el esfuerzo normal neto y la succión matricial. El plano frontal $((\sigma - u_a) - \tau)$ representa la condición saturada del suelo, es decir, cuando la succión es cero. La intersección de la envolvente de falla con el eje de esfuerzo cortante define la cohesión efectiva c' . Los ángulos de inclinación ϕ' y ϕ^b representan la pendiente de la superficie de falla en los planos $(\sigma - u_a) - \tau$ y $(u_a - u_w) - \tau$, respectivamente.

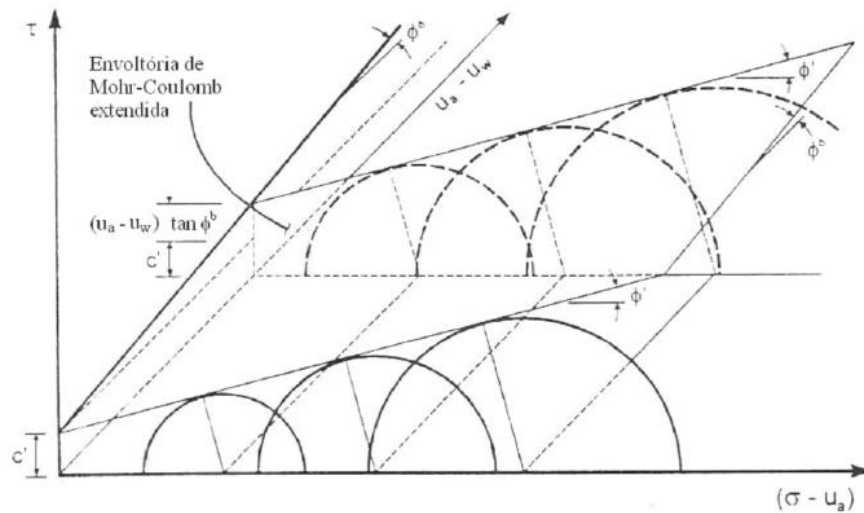


Figura No. 2.12 Envolvente de falla para suelos parcialmente saturados.

Fuente: Vanapalli (1994), Simple test procedures and their interpretation in evaluating the shear strength of an unsaturated soil.

El ángulo de fricción interna debido a la succión (ϕ^b), se determina mediante el análisis de resistencia al corte de las pruebas triaxiales:

Pruebas de compresión confinadas (asumiendo una envolvente de falla plana)

Las condiciones de falla de una prueba de compresión limitada se muestran en la Figura No.2.13. Cuando se conocen los parámetros de resistencia al corte cortante, se puede dibujar una tangente con una pendiente de ángulo de corte, ϕ^c , en la envolvente del Mohr. La intersección, OI (ecuación 2.18), obtenida de tal construcción es igual a la suma de cohesión, c' y el producto de succión matricial, $(u_a - u_w)$, y $\tan \phi^b$, como se muestra en la figura No.2.13:

$$OI = \{c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b\} \quad (2.18)$$

Dónde:

$$c_u = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \quad (2.23)$$

Si asumimos que el aire de poro se disuelve en el agua de la muestra y la presión de aire de poro, u_a , es igual a cero, de la ecuación 2.22, toma la forma:

$$\tan\phi^b = \frac{\{c_u(\cos\phi' + \operatorname{sen}\phi'\tan\phi') - (c_u + \sigma_3)\tan\phi' - c'\}}{u_a - u_w} \quad (2.24)$$

Pruebas de compresión no confinadas (asumiendo una envolvente de falla plana)

La ecuación 2.24 se puede extender para pruebas de compresión no limitadas también estableciendo u_a igual a cero. Suponiendo que la presión del aire de los poros es atmosférica para condiciones de carga no limitadas:

$$\tan\phi^b = \frac{\left\{ \frac{\sigma_1}{2} (\cos\phi' + \operatorname{sen}\phi'\tan\phi') - \frac{\sigma_1}{2} \tan\phi' - c' \right\}}{u_a - u_w} \quad (2.25)$$

2.4.3.2 Criterio de resistencia de Fredlund

La ecuación de resistencia al corte, propuesta por Fredlund fue formulada a partir de la curva característica suelo agua y parámetros de resistencia al corte en condición saturada, por lo tanto, este modelo es aplicable a cualquier suelo del que se tenga curvas características suelo-agua.

La ecuación de resistencia al corte para un suelo parcialmente saturado se puede escribir de la siguiente manera, ecuación 2.26 (Fredlund et al., 1996):

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\theta_d^k \tan\phi' \quad (2.26)$$

Siendo:

θ_d^k = contenido de agua normalizada, ecuación 2.27:

$$\theta_d^k = \frac{\theta(u_a - u_w)}{\theta_s} \quad (2.27)$$

$\theta(u_a - u_w)$ = contenido volumétrico de agua en cualquier succión;

θ_s = contenido volumétrico saturado de agua

K= Ajuste del parámetro de material que tiene un valor cercano a 1.0 para arenas, que aumenta de 2 a 3 para materiales con plasticidad media a alta (ver Figura No. 2.14).

θ_s = Contenido volumétrico de agua a la saturación.

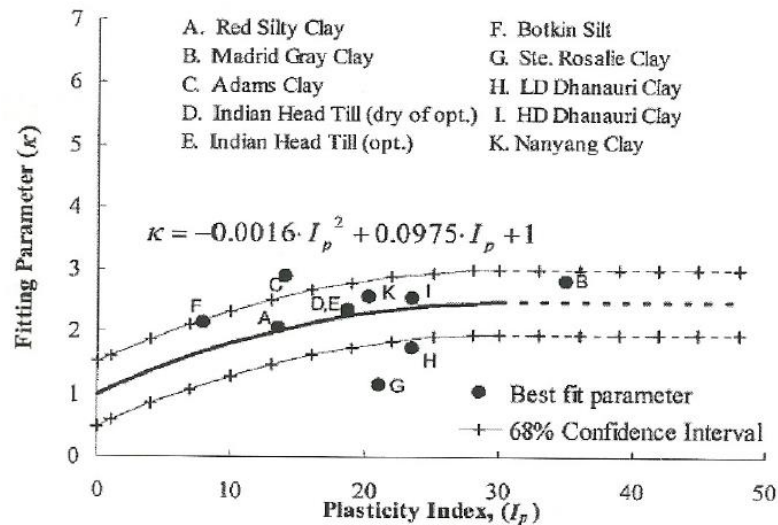


Figura No. 2.14 Variación aproximada en Kappa con la plasticidad del material.

Fuente: Manual del software SVSLOPE, SOILVISION SYSTEMS LTD. Pág.85.

2.4.3.3 Criterio de resistencia de Vanapalli

(Vanapalli et al., 1996), describe la relación entre la curva característica del agua y el suelo y la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado con respecto a la succión matricial, desarrollo un modelo empírico y analítico para predecir la resistencia al corte en términos de succión del suelo. La formulación hace uso de la curva característica

suelo-agua y los parámetros de resistencia al cortante saturado, como se muestra en la ecuación 2.28:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \theta_n \tan \phi' \quad (2.28)$$

Siendo:

θ_n = contenido de agua normalizada, ecuación 2.29 (es decir, el contenido de agua se normaliza entre el contenido de agua saturada y contenido de agua residual)

$$\theta_n = \frac{\theta(u_a - u_w) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.29)$$

$\theta(u_a - u_w)$ = Contenido volumétrico de agua en cualquier succión

θ_r = Contenido volumétrico de agua en condiciones de succión residual.

θ_s = Contenido volumétrico de agua a la saturación

2.4.3.4 Criterio de resistencia de Khalili

El modelo propuesto por Khalili y Khabbaz (1998) se basa en la ecuación de las tensiones efectivas en condiciones parcialmente saturadas propuesta por Bishop (1959). Expresando la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado en función de la succión de acuerdo con la ecuación 2.30:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) (\lambda') \tan \phi' \quad (2.30)$$

El parámetro λ' definido como una función de succión y succión de admisión de aire ($u_a - u_w$) b, como se indica en la ecuación 2.31:

$$\lambda' = \left\{ \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)b} \right\}^{-0.55} \quad (2.31)$$

2.4.3.5 Criterio de resistencia de Bao

Bao et al., (1998) formuló la ecuación de resistencia al corte, a partir del estudio de suelos expansivos, por lo que es recomendable aplicar este modelo a dichos suelos.

En la investigación asumieron que el suelo se comportaba como un suelo saturado siempre que la succión de la matriz fuera menor que el valor de entrada de aire del suelo.

Una vez que se excedió el valor de entrada de aire, la componente de succión de la resistencia al corte se redujo multiplicando la succión del suelo por la variable, ζ , como se muestra en la ecuación 2.32:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)(\zeta) \tan \phi' \quad (2.32)$$

El parámetro ζ fue definido por la ecuación 2.33:

$$\zeta = \left[\frac{\log(u_a - u_w) r - \log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w) r - \log(u_a - u_w) b} \right] \quad (2.33)$$

En este estudio, se busca comparar los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de taludes entre el modelo tradicional (Mohr-Coulomb) y el modelo de suelos parcialmente saturados, aplicados a la Tierra Blanca Joven (TBJ), por lo anteriormente mencionado, en la siguiente sección se presenta generalidades sobre el comportamiento de la TBJ.

2.5 Generalidades de la Tierra blanca Joven⁸(TBJ).

Geológicamente hablando, según se muestra en la figura No.2.15, El Salvador es un país extremadamente joven, ya que una cuarta parte del territorio nacional es de edad pleistocénica y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria, predominando la época pliocénica. Por eso, las capas de edad cretácica, que cubren aproximadamente un 5% del territorio salvadoreño no juegan un papel importante para la constitución geológica total de la República. Solamente estas últimas capas son de origen sedimentario marino, todas las demás rocas, con pocas excepciones, están originadas por fenómenos volcánicos.

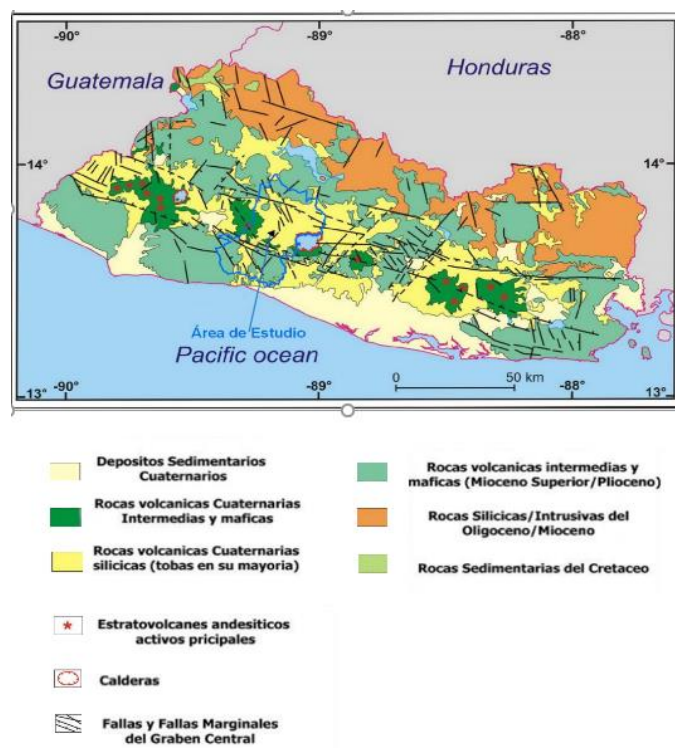


Figura No. 2.15 Esquema estructural de El Salvador.

Fuente: Hay una coincidencia espacial del arco volcánico activo y el Graben Central con dirección WNW-ESE (Modificados de Lexa et al. 2011).

⁸ se podrá encontrar más información sobre las Tierra Blanca Joven (TBJ: Hernández, E. W., "Aspectos Geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del AMSS", SNET, 2004 (Modificado, 2008).

La TBJ es el producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango, conformada por depósitos de caída, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas de composición riolítica no soldado. Las cenizas de caída cubrieron completamente todo el territorio de El Salvador y cruzaron las fronteras de Guatemala, Honduras y Nicaragua. Los flujos piroclásticos de la explosión que dio origen a la TBJ cubrieron extensas áreas de los departamentos de San Salvador, La Libertad, La Paz y Cuscatlán. Debido a este desplazamiento que tuvieron las cenizas volcánicas, el espesor de la TBJ aumenta de occidente a oriente en San Salvador, Guzmán Urbina y Melara, afirman que los espesores de los estratos de TBJ varían de 0-0.3 m en las faldas del volcán de San Salvador hasta más de 25.9 m en los alrededores del Lago de Ilopango.

El volumen estimado por Hart y McIntyre para los depósitos de TBJ como magma diferenciado fue de 20-50 km³ en Hernández et al (2008). Estudios realizados por Kutterolf et al (2008) el volumen aproximado de TBJ es de 70 km³ y cubre un área de 300,000 km². En la figura No. 2.16 se muestran los espesores de depósitos de TBJ.

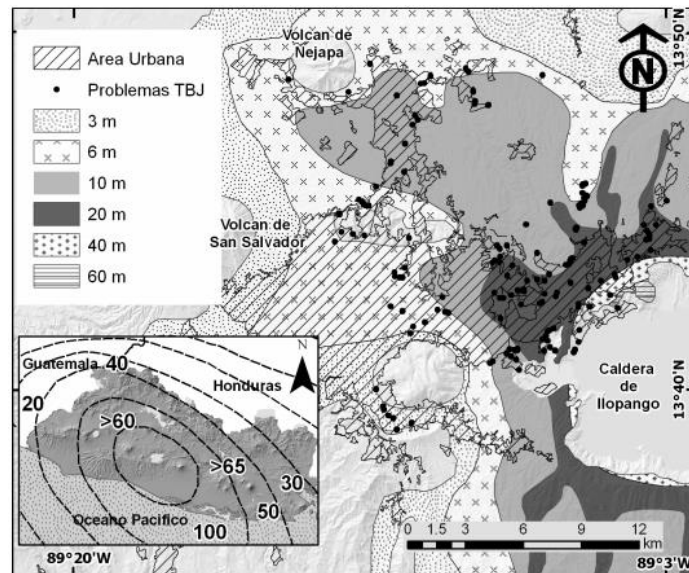


Figura No. 2.16 Espesores de flujos piroclásticos de TBJ en metros. El recuadro muestra mapa de isopacas de tefras de TBJ con espesores en cm.

Fuente: José A. Chávez (2012), Problemática y conocimiento actual de las tefras Tierra Blanca Joven". Revista Geológica de América Centra, pág. 121.

Según lo relata Hernández et al (2004) las investigaciones de la Tierra Blanca son relativamente jóvenes, su nombre actual existe desde 1953 cuando Williams y Meyer la bautizaron con este nombre por su característico color blanco, creyendo que estos depósitos procedían del Volcán Boquerón. Posteriormente fue la Misión Geológica Alemana, para la elaboración del Mapa Geológico de El Salvador a escala 1: 100,000 (Weber, S.H., et al.1978), quienes definieron a la de Ilopango como la generadora de los depósitos de Tierra Blanca haciendo una descripción geológica en dos unidades, s4 (piroclastitas acidas) y s3'a (efusivas acidas), como miembros de la formación San Salvador.

La primera unidad s4 se refiere a la última erupción pliniana de Ilopango y en la segunda unidad s3'a se agrupan los depósitos de piroclásticos TB2, G2, TB3 Y G1, TB4, los cuales

por la coloración que producen los paleosuelos entre estas unidades son llamados también “Tobas color café”.

La TBJ son las rocas volcánicas que conforman la superficie del AMSS (Área metropolitana de San Salvador) están, en su mayoría, incluidas en la formación San Salvador, producto de los volcanes pertenecientes al frente volcánico de América Central (Plioceno-Cuaternario). Hernández et al (2008) describe la estratigrafía del AMSS y sus características; los estratos más importantes son: TB4, TB3, TB2 (entre ellos existen paleosuelos) y Tierra Blanca Joven (TBJ), que son productos eruptivos de la Caldera de Ilopango. Además, G1, G2, así como, diferentes flujos de lava y tefras que pertenecen al estratovolcán de San Salvador.

En la figura No. 2.17, se muestra un talud del paquete III (Periférico) donde se observan los depósitos de caída de TBJ, TB2, TB3, G1, TB4 que yacen sobre las ignimbritas inferiores más antiguas, procedentes de la caldera de Ilopango.

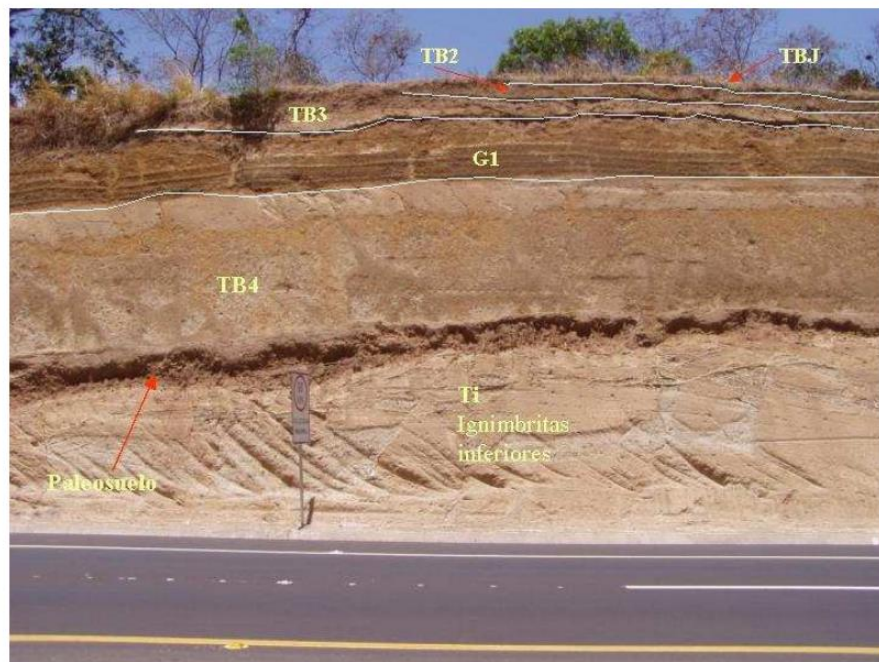


Figura No. 2.17 Talud en Periférico del tramo Paquete III mostrando distintos depósitos de Ilopango.

Fuente: Avalos R. y Castro M. (2010), "TRABAJO DE GRADUACIÓN: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DE LA UNIDAD "G" DE TIERRA BLANCA JOVEN", pág. 16.

La TBJ está compuesta por diferentes depósitos piroclásticos de caída. Hart, W., et al (1981); Hart, W. y McIntire, V. et al (1983) fueron los primeros en dar una caracterización vulcanológica de las unidades de la TBJ y luego fue desarrollada por Vallance y Houghton et al (1998), quienes llevaron a consideración realizar la caracterización geomecánica de esas mismas unidades. Estos últimos autores identificaron en los productos de la TBJ seis unidades de acuerdo a criterios y a los procesos vulcanológicos que habían operado en cada una de ellas, y las denominaron con letras de la A a la F. Para los propósitos del estudio geomecánico de los depósitos TBJ, Hernández et al (2004) introdujo la unidad G conformada por coignimbritas con intercalaciones de delgadas finas oleadas y pequeños flujos piroclásticos, que dan un aspecto bandeado.

La TBJ se compone principalmente de fragmentos de vidrio volcánico que son los que forman las cenizas (de tamaño de arena fina y limo), fragmentos de pómez y líticos (tamaños grava y arena), polvo volcánico (arcilla no plástica) y en menor cantidad de cristales (ver figura No.2.18), Hernández et al (2004: p.33).

En 1998, Vallance y Houghton, hacen una revisión de campo de estas unidades y las subdividen en 6 unidades, de las cuales el “surge basal” corresponde a la “capa guía” (Unidad E). Durante trabajos de campo realizados por Hernández et al (2004) se encontraron las Ignimbritas Alfa y Beta, que se incluyen en la secuencia completa de la TBJ. De esta forma los depósitos de TBJ se clasifican en nueve unidades de la “A” hasta la “G” incluyendo las ignimbritas alfa e ignimbritas beta. Hernández et al (2004: p.39) describe las unidades de la TBJ desde la más profunda hasta la más superficial, como se muestra en la Tabla No.2.8:

Tabla No. 2. 8 Resumen de unidades que conforman el estrato de TBJ.

TIPO DE UNIDAD	TIPO DE DEPOSICIÓN	CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES
Unidad A	Depósito de Caída	Depósito fino, granular, color café, compuesto por abundantes pómez y líticos.
Unidad B	Depósito de Caída	Cenizas gruesas basales y lapilli de caída en el techo, color amarillento.
Unidad C	Depósito de flujos y oleadas piroclásticos	Ignimbritas color gris en base, rico en líticos andesíticos, ignimbritas de color amarillento y rico en líticos hidrotermalizados, fragmentos de pómez. Presenta granulometría gruesa
Unidad D	Depósito de Caída	Ceniza de grano fino, fragmentos de líticos angulares, pómez en forma dispersa, alto contenido de lapilli acrecional, suelo poco consolidado (coignimbritas).
Unidad ignimbrita Alfa	Depósito de flujos piroclásticos	Ignimbrita masiva color rosado tenue y beige en techo, matriz rica en cenizas finas, pómez y pocos líticos, cementada en la base.

Unidad E	Depósitos de caída	Estratificación de depósitos secos color claro compuestos por ceniza gruesa con lapilli, fino pumítico y líticos andesíticos, arenas sueltas, depósitos húmedos con ceniza muy fina, bien seleccionada, color café claro, consolidados, ricos en fragmentos vítricos y cristales
Subunidad beta (Ignimbrita beta)	Depósito de flujos piroclásticos	Ignimbritas de color café y café claro, muy compacto, matriz fina con pómez y líticos en moderada presencia.
Unidad F	Depósito de flujos piroclásticos	Matriz de ceniza gruesa con abundantes fragmentos de pómez y líticos.
Unidad G	Depósitos de caída, flujos y oleadas piroclásticas	Coignimbritas poco consolidadas con material fino, líticos, pómez y gran cantidad lapilli acrecional. Ignimbritas con algún grado de consolidación.

Fuente: De los autores, apoyándose de: Hernández, E. W., "Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador".

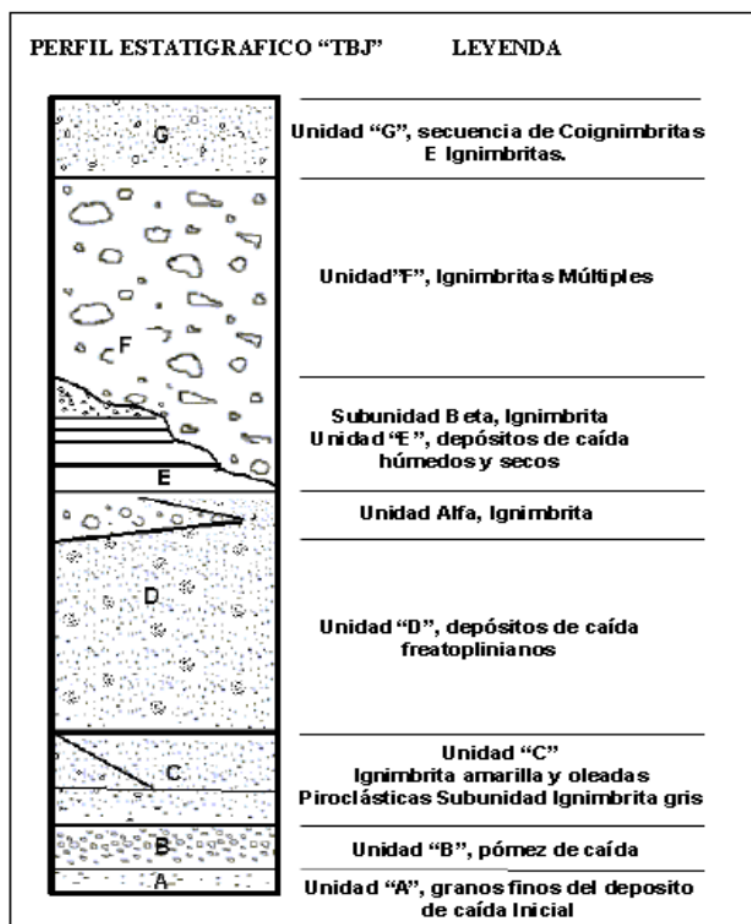


Figura No. 2. 18 Perfil estratigráfico de los depósitos de Tierra Blanca Joven.

Fuente: Hernández, E. W., "Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador", Tesis Msc., Tutor: Miguel Galera, Universidad Politécnica de El Salvador, San Salvador.

2.5.1 Composición química de la TBJ.

Un análisis cualitativo con el microscopio electrónico de barrido reveló que el Sílice (Si) es un elemento dominante en la muestra de Tierra Blanca, el contenido de Sílice es de al menos de un orden de magnitud mayor que el de los otros componentes. El Aluminio (Al) el cual es común en los suelos volcánicos, es el segundo más abundante seguido por el Calcio (Ca), Oxígeno (O) y Magnesio (Mg). Esto es coherente con el elemento dominante de la TBJ siendo vidrio volcánico riolítico (74 % de SiO₂, Mann et al). El mineral predominante en estas muestras son los paglioclasa feldespatos y hornblendas subordinadas (anfíboles). Otros minerales que incluye son ilimenita, magnetita y materiales amorfos como los iones de óxido e hidróxidos, este último podría ser un gel. Estos resultados coinciden con el análisis petrográfico y mineralógico de Amaya Dubón y Hayem Breve (2000) [R. Rolo et al, 2004: p. 5].

Según pruebas de Mavrommati et al (2000) en cuanto a la microfábrica de la TBJ los estudios muestran que es un material abierto o con gran cantidad de vacíos, los granos están empaquetados de manera suelta, no existiendo enlaces entre ellos, teniendo forma angular las partículas y con presencia importante de pómez vesicular.

2.5.2 Fallas en Taludes de Tierra Blanca.

Este tipo de material, debido a las características particulares que posee, presenta un mecanismo de falla muy particular, ya que podría decirse que falla por exfoliación y flujos. A continuación, en la tabla No. 2.9, se muestran factores que influyen en la estabilidad de la TBJ:

Tabla No. 2. 9 Factores influyentes en la estabilidad de la TBJ.

FACTORES	DESCRIPCIÓN
Intemperismo Físico	Sobre la TBJ operan los procesos de meteorización física, lo cual da paso a la exfoliación, que es el mecanismo que genera discontinuidades, que se forman debido a las contracciones y expansiones diferenciales producidas por la acción térmica diaria del sol y se caracterizan por tener superficies que separan en bloques el talud.
Efecto de la lluvia	El agua dentro de las grietas produce un aumento de la presión de poro, así como una erosión diferencial por impacto de las gotas de lluvias, lavado de las aristas de las grietas por parte de las corrientes de agua y ensanchamiento de las grietas. Este proceso repetitivo a lo largo de varios años contribuye para que la grieta se abra, facilitando la circulación del agua, la penetración y desarrollo de raíces.
Efecto de la vegetación	Las raíces se desarrollan más fácilmente penetrando a lo largo de las fisuras y grietas de los taludes. Cuando las raíces se tornan más gruesas producen una presión lateral en el interior de esas discontinuidades, siendo la porción más débil y más externa del talud la que separa la porción más fija.
Efecto sísmico	El paso de una onda sísmica de un medio más duro a otro sin consolidación, como es el caso de los depósitos de tierra blanca (TBJ), produce una disminución de la velocidad de la onda al pasar por esos materiales, tal cambio de velocidad es acompañado por una amplificación de la onda sísmica en dichos materiales; teniéndose como resultado vibraciones del suelo más fuertes, lo que eventualmente llega a acentuar la abertura de las discontinuidades.
Cohesión	Del análisis de las partículas de la distribución granulométricas, se dice que los productos piroclásticos de TBJ son no cohesivos y en este caso, $c = 0$, ya que están compuestos predominantemente por limos arenosos o arenas limosas (SM) y limos (ML). Estos suelos no poseen plasticidad, por tanto, la cohesión es nula.
Microfábrica	La microfábrica están relacionadas la distribución granulométrica, la forma de los granos, orientación, presencia o no de cemento y su empaquetadura. La empaquetadura de casi todos los suelos de TBJ no es compacta, característica que se refleja en la porosidad alta y densidad del suelo relativamente baja, lo que causa que sean fácilmente erosionables.
Succión	La succión es una fuerza activa que participa en el mantenimiento de los taludes verticales estables mientras no lleguen al punto de saturación, de lo contrario la succión desaparece por pérdida de los meniscos, los taludes entran en inestabilidad y el derrumbe puede ocurrir por el aumento de peso debido al agua
Cementación	Durante la fase eruptiva, el dióxido de azufre en la zona de difusión reacciona con el hidróxido catalizado por la energía solar, para dar lugar al ácido sulfúrico. Otro gas importante es el ácido clorhídrico que reacciona con agua para formar un ácido diluido. Ambos ácidos entran en contacto con los depósitos piroclásticos a los cuales atacan e intercambian iones. Los ácidos también reaccionan con las partículas de vidrio volcánico más finas como las arcillas y los coloides para formar minerales silicatados, que también producen un sellado de los poros donde estos se forman, dando más firmeza a los suelos.

Licuación	Este tipo de falla ocurre cuando en la zona de deslizamiento el suelo pasa rápidamente de condición más o menos firme a la correspondiente a una suspensión, con pérdida casi total de resistencia al esfuerzo cortante.
Erosión subterránea	Se da por la circulación del agua dentro de las tefras de TBJ, lo que provoca que éstas se erosionen en su interior, y lo consiguiente es la formación de cárcavas.

Fuente: De los autores, apoyándose de: Alberti, J.R., Canales, R. Sandoval, B. (2006), "Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso específico".

CAPÍTULO No.3

METODOLOGÍA DE LA

INVESTIGACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo, describe la metodología de la investigación a desarrollar, para la obtención de los parámetros necesarios en la modelación del método tradicional y el método de suelos parcialmente saturados.

La metodología en general consistirá, en la obtención de los diferentes parámetros a utilizar, que algunos serán retomados de investigaciones anteriores realizadas por OPAMSS-UES, luego se realizaran visitas de reconocimiento al área de estudio, para definir los sitios de muestreo, extracción de muestras, ejecución de ensayos de laboratorio, y con ello determinar las propiedades físicas y mecánica de las unidades de TBJ en estudio, además de definir los métodos de análisis de estabilidad de taludes, para finalizar con la realización de las modelaciones de las cuales se realizara el análisis y luego llegar a una comparación de resultados, para realizar las recomendaciones y conclusiones más pertinentes.

3.2 METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología utilizada en la realización de esta investigación, la cual comprende:

3.2.1 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se recopilará información bibliográfica, esta será obtenida por medio de diferentes libros, manuales, revistas, documentos, etc. y se realizarán consultas a expertos acerca de la geología del área de estudio, y estudios sobre Tierra Blanca Joven. Parte de la información requerida de las diferentes unidades de la Tierra Blanca Joven que constituyen los taludes en estudio para la modelación, será retomada de investigaciones realizadas por OPAMSS-UES.

De acuerdo con la información existente obtenida en investigaciones previas y la ayuda de los docentes asesores se definieron dos zonas de estudio:

- Talud ubicado en el costado norte de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador. Ver figura No.3.1



Figura No. 3. 1 Talud ubicado en el costado norte de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, San Salvador.

Fuente: De los autores, fotografía tomada por el Br. Manuel Ángel Flores.

- Talud ubicado en las cercanías del Colegio Español Padre Arrupe, Soyapango. Ver figura No.3.2



Figura No. 3. 2 Talud ubicado en las cercanías del Colegio Español Padre Arrupe, al borde poniente de autopista de Oro, Soyapango, San Salvador.

Fuente: De los autores, fotografía tomada por el Br. Manuel Ángel Flores.

3.2.2 TRABAJO DE CAMPO

Se realizará una visita general en las zonas de estudio con la finalidad de realizar la extracción de muestras alteradas e inalteradas.

Ya que se cuenta con información retomada de investigaciones anteriores de las propiedades físicas y mecánicas de algunas unidades de TBJ que constituyen los taludes en estudio, solamente se realizará ensayos de laboratorio a las unidades de las cuales no se cuente con la información requerida.

3.2.2.1 VISITAS DE CAMPO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.

Para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo en los lugares de muestreo definitivos, se realizarán visitas de campo en cada uno de ellos. Además, las visitas servirán para identificar en campo las unidades de TBJ que conforman los taludes, toma de fotografías, la extracción de muestras y realizar el levantamiento topográfico de los taludes en estudio.

Para identificar las diferentes unidades del talud se seguirá la siguiente metodología:

Identificación de la unidad E

En primer lugar, debe identificarse el estrato de unidad E de TBJ (este juega un papel muy importante como capa guía en la identificación del resto de unidades de la Tierra Blanca Joven), que presenta las características siguientes:

- Color café claro cuando está seca y café oscuro cuando está húmeda.
- Alternancia de capas de depósitos de caída secos, de granulometría gruesa suelta (grava y arena gruesa hasta fina). Ver figura No.3.3.

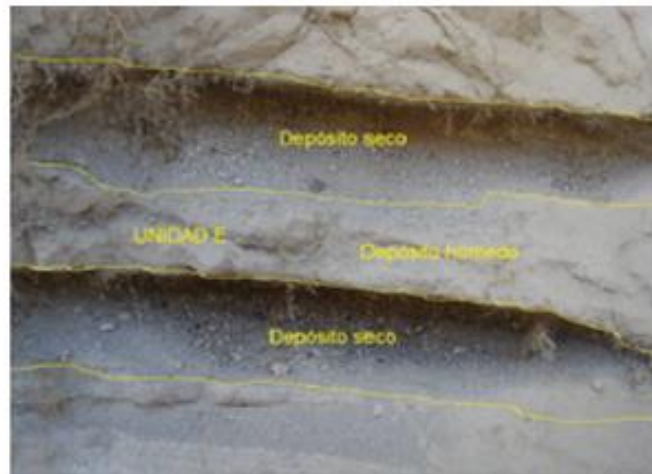


Figura No. 3.3 Unidad E de TBJ.

Fuente: Ayala O. (2013), "Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidas G". Tesis, Universidad de El Salvador.

Identificación de la unidad D

Posteriormente, se identifica la unidad D, la cual podrá encontrarse por debajo de la unidad Ignimbrita Alfa. Esta unidad presenta las siguientes características:

- Posee una textura deleznable.
- Granulometría con tamaños dominantes de partículas finas, fragmentos de líticos angulares y pómez en forma dispersa.
- Abundante presencia de lapilli acrecional, conformando coignimbritas (poco consolidadas) compuestas por cenizas finas y polvo volcánico, de color beige o grisácea al encontrarse húmeda. Ver figura No. 3.4

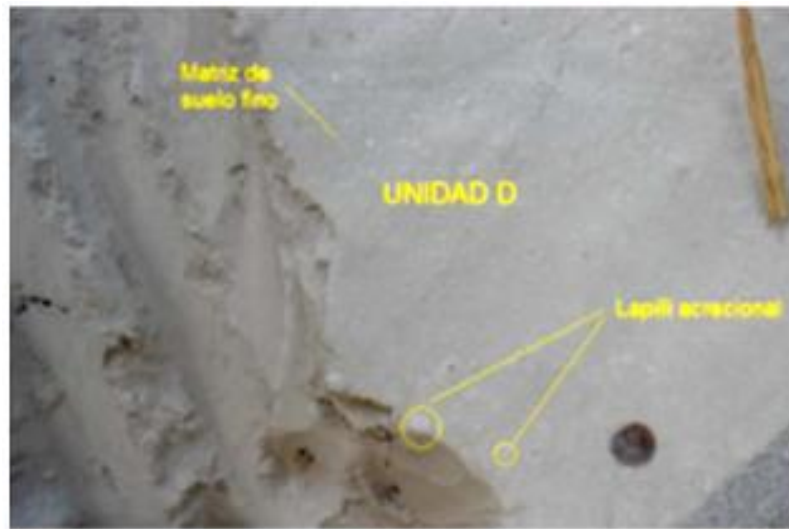


Figura No. 3.4 Unidad D de TBJ.

Fuente: Ayala O. (2013), "Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidades G". Tesis, Universidad de El Salvador.

Identificación de la unidad F

Esta podrá encontrarse por encima de la unidad Ignimbrita Beta, presenta las siguientes características:

- Se encuentra constituida de múltiples depósitos de flujos piroclásticos, masivos, isotrópicos, de coloración blanca, los cuales se conforman por una matriz de arena limosa y grava, que engloba grandes fragmentos de pómez y líticos dispersos en toda la matriz (ignimbritas).
- Tamaño de líticos y pómez hasta de 15cm de diámetro. Ver figura No.3.5.



Figura No. 3.5 Unidad F de TBJ.

Fuente: Ayala O. (2013), "Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidas G". Tesis, Universidad de El Salvador.

Identificación de la unidad G

Se podrá encontrar por encima de la unidad F. Esta unidad está formada por una secuencia compuesta por depósitos piroclásticos de caída (coignimbritas), flujos piroclásticos de textura fina (ignimbritas) y oleadas piroclásticas (surge). A continuación, se describen las características de cada una de ellos:

- Coignimbritas, se caracterizan por poseer materiales poco consolidados, de consistencia suave parecida al talco, producto de la caída por gravedad del material fino (ceniza volcánica) de la nube acompañante, con moderada presencia de lapilli acrecional.
- Ignimbritas, se caracterizan por tener una matriz de suelo fino (ceniza volcánica) consolidada, con presencia de líticos angulares y abundante pómez vesicular.

- Depósitos de oleadas piroclásticas “Surges”, se caracterizan por poseer un estrato delgado con alto grado de consolidación de color café claro. Ver figura No. 3.6.



Figura No. 3.6 Unidad G de TBJ.

Fuente: Ayala O. (2013), “Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de la Tierra Blanca Joven (TBJ), unidas G”. Tesis, Universidad de El Salvador.

Descripción de las condiciones iniciales de los taludes seleccionados.

Para cada talud seleccionado, se tomará registro en campo de las condiciones iniciales que presentan los taludes. Estos registros se pueden obtener con la inspección visual y la medición de algunas características, entre las que se pueden mencionar: ubicación, condiciones del entorno y elementos antrópicos, características físicas, materiales existentes, entre otras.

En la tabla No. 3.1 se muestra el formato que se utilizará para la recolección de la información de las condiciones iniciales que presentan los taludes en estudio.

Tabla No. 3.1 Formato de recolección de información del talud.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA		1/2
FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL ESTADO INICIAL DE TALUDES		
1.- DATOS GENERALES		
FECHA DE INSPECCIÓN: _____		NOMBRE DEL TALUD: _____
RESPONSABLE: _____		
2.- LOCALIZACIÓN		
UBICACIÓN: _____		
COORDENADAS: X(LONGITUD): _____		Y(LATITUD): _____
3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES		
TIPO DE TALUD <input type="checkbox"/> LADERA NATURAL <input type="checkbox"/> TALUD EN RELLENO <input type="checkbox"/> TALUD EN CORTE	TIPO DE VEGETACIÓN <input type="checkbox"/> ARBOLES <input type="checkbox"/> PASTO <input type="checkbox"/> ARBUSTOS <input type="checkbox"/> NINGUNO	
CONDICIÓN DE VEGETACIÓN <input type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> DISPERSA	TIPO DE PENDIENTE <input type="checkbox"/> PLANO 0-2% <input type="checkbox"/> ONDULADO 3-12% <input type="checkbox"/> ALOMADO 13- 25% <input type="checkbox"/> QUEBRADO 26- 35 % <input type="checkbox"/> ACCIDENTADO 36-70% <input type="checkbox"/> MUY ACCIDENTADO >70%	
4.- CARACTERÍSTICAS ESPECIFICAS		
GEOMETRIA ALTURA: ____ PENDIENTE: ____ LONGITUD: _____ CROQUIS DEL TALUD:	ELEMENTOS ANTRÓPICOS <input type="checkbox"/> OBRAS DE PROTECCION <input type="checkbox"/> OTRAS ESTRUCTURAS DESCRIPCIÓN: _____ _____ _____ _____	

2/2

5.- NATURALEZA DEL MATERIAL

- SUELO CON GRIETAS COHESIVO
 SIN GRIETAS FRICCIONANTE
 CON BLOQUES COHESIVO-FRICCIONANTE
 ROCA CON DIACLASAS ROCA SANA
 SIN DIACLASA POCO METEORIZADA
 CON BLOQUES METEORIZADA
- OTROS: _____

NÚMERO DE ESTRATOS VISIBLES: _____

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS

NOMBRE	ESPESOR	OBSERVACIONES

OTROS: _____

OBSERVACIONES:

3.2.2.2 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS.

El muestreo se realizará con la finalidad de estudiar las características de los suelos presentes en la zona de estudio. Para esto, se evaluarán las diferentes unidades que conforman los taludes, realizando ensayos de laboratorio de muestras alteradas como inalteradas (dependiendo de la característica a estudiar) y de esta manera obtener las propiedades físicas. El procedimiento para realizar la extracción de muestras se describe a continuación:

Extracción de muestras Alteradas.

Las muestras alteradas se extraen con la finalidad de ser utilizadas para identificación y caracterización del material que se está investigando. Para llevar a cabo la extracción de muestras alteradas se seguirá el siguiente procedimiento:

- Identificar cada estrato presente en el talud, utilizando la metodología descrita al inicio de esta sección.
- Extraer muestras alteradas de los estratos que se requieran.
- Recolectar la cantidad suficiente de material de cada estrato, según lo que indican los métodos para la realización de los ensayos de laboratorio que se pretenden realizar. Registrar la altura del estrato a donde se extrajo la muestra y tomar la respectiva fotografía como referencia visual.
- Identificar cada muestra colocando en la bolsa el nombre del talud y nombre del estrato al que pertenece el suelo extraído.

Extracción de muestras inalteradas.

Este tipo de muestra debe conservar las condiciones que el suelo poseía in situ. Por lo cual, la obtención de esta debe seguir el siguiente procedimiento:

- Identificar los estratos presentes en el talud de los cuales se requiera extraer muestras, utilizando la metodología descrita anteriormente.
- Se descubre la capa de material que se pretende tomar la muestra.
- Se procede a alisar la superficie.
- Se excava una pequeña zanja alrededor de la marca, dejando entre el borde de la muestra y el borde interno de la zanja unos 10cm, de manera que esta pequeña excavación no afecte la muestra. La zanja deberá ser suficientemente ancha para permitir las operaciones de tallado, parafinado in situ y corte.
- Con las herramientas adecuadas, se le dará una forma aproximadamente cúbica y se tallará hasta que tenga el tamaño final que se requiere, cuidando la muestra a medida que el proceso de tallado se acerque a la cara superior y a las cuatro caras.
- Una vez que la zanja está suficientemente profunda y las caras de la muestra estén perfiladas, se procederá a extraer la muestra utilizando cuchillos, paletas o sierras, y se retira cuidadosamente.
- Se Introduce la muestra en bolsas.

- Se debe colocar a la muestra una etiqueta con la siguiente información: procedencia, especificando con marcas las caras superior e inferior, y ubicación dentro; se cierra la caja y se coloca exteriormente otra etiqueta con los mismos datos, indicando adicionalmente advertencias de las precauciones requeridas para el transporte de la misma.
- Registrar la altura del estrato a donde se extrajo la muestra y tomar fotografías para tener referencia visual.
- La altura a la que se extrajo la muestra se registrará a partir del pie del talud hasta el lugar de la extracción, y si fuese posible, desde la corona del talud hacia la misma.

3.2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Se realizarán ensayos de laboratorio a muestras extraídas de unidades de TBJ de las cuales no se tenga información, que permitan caracterizar los estratos presentes en los taludes en estudio (peso volumétrico, granulometría, gravedad específica, corte directo, entre otros).

- **Contenido de humedad**

Para poder relacionar la estabilidad con los rangos de humedad, será necesario conocer el contenido inicial de humedad de algunas muestras debido a que el contenido de humedad afecta significativamente la curva retención del suelo, curva de succión, etc. Obteniendo estos resultados se podrá modular para más condiciones de estabilidad en

los taludes, específicamente en taludes Padre Arrupe y el talud de la Escuela de Ingeniería Civil

- **Análisis granulométrico**

La naturaleza de la curva característica está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo, ya que la relación cambia dependiendo del tipo de suelo, de manera que con el ensayo se busca clasificar el suelo de manera apropiada y relacionar tanto sus propiedades hidráulicas como mecánicas.

Además, las curvas granulométricas de las diferentes unidades que conforman las TBJ, se utilizarán para la estimación de la curva característica de suelo-agua representativa de cada unidad.

- **Gravedad específica**

La gravedad específica nos posibilita poder obtener más propiedades y parámetros de los materiales que componen el talud, además de poder comparar si los resultados se acercan a los valores obtenidos teóricos obtenido por estudios realizados anteriormente.

- **Corte directo**

Mediante este ensayo se podrá caracterizar el tipo de falla por cada unidad, en la cual con este ensayo se podrán obtendrán los parámetros de ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c), densidad del suelo (γ).

Un resumen de los ensayos a realizar se muestra en la Tabla No. 3.2:

Tabla No. 3. 2 Resumen de los ensayos a realizar en esta investigación.

ENSAYO	NORMA	PROPIEDAD O PARÁMETRO DETERMINADO
Contenido de Humedad	ASTM D-2216	Contenido de humedad (ω)
Análisis Granulométrico	ASTM D-422	Tamaño de partículas
Gravedad Específica	ASTM D-854	Gravedad específica (Gs)
Corte Directo	ASTM D-3080	Ángulo de fricción interna (ϕ) y cohesión(C)

Fuente: De los Autores.

3.2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS TALUDES EN ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS.

Al obtener la información proporcionada por OPAMSS-UES, y los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para la obtención de los parámetros que sean requeridos para la modelación de los taludes, se procederá a realizar un análisis y validación de la información, posteriormente, se realizará la caracterización de los taludes en estudio, y se presentará de manera clara y ordenada toda la información requerida para representar la curva característica suelo-agua.

3.2.5 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

Se determinarán los métodos de análisis de estabilidad de taludes que se incluirán en la investigación, ya sea para el método tradicional como para el método de suelos parcialmente saturados, ya que los métodos de equilibrio límite empleados en el análisis

de estabilidad de taludes resultan una herramienta muy útil para el uso práctico, sin embargo, se debe de entender las ventajas y limitaciones que conlleva emplear determinado método de análisis.

3.2.6 DEFINICIÓN DE MÉTODOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA.

La representación de la curva característica de suelo-agua de la TBJ, se realizará de dos formas:

- Representación de la curva característica con datos reales de succión, definiendo el método de ajuste de la curva más adecuado.
- Estimación de la curva característica a partir de curvas granulométricas de las diferentes unidades de TBJ.

3.2.7 MODELACIÓN

La modelación será realizada con el apoyo del paquete de software especializado denominado SVOFFICE, del cual se utilizarán los softwares SVSOIL para representar la curva característica de suelo-agua representativa de la TBJ, y el software SVSLOPE con el cual se realizará el análisis de estabilidad de taludes para el modelo tradicional (Mohr-Coulomb para suelos saturados) y el modelo para suelos parcialmente saturados, para ambos casos se evaluarán las condiciones gravedad y gravedad más sismo.

El programa SVSLOPE está diseñado especialmente para el análisis de estabilidad de taludes. Se basa, principalmente, en el uso del método de equilibrio límite y permite modelar suelos homogéneos y estratificados, con superficies geométricas complejas. El

software permite analizar la estabilidad del talud bajo diferentes modelos, tales como los propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, Spencer y Morgenstem-Price, entre otros. El software SVSOIL está diseñado específicamente para la estimación y representación matemática de modelos constitutivos del suelo para el modelado numérico posterior. Las propiedades de los suelos saturados y parcialmente saturados pueden estimarse basándose en la extensa base de datos existente o estimarse con uno de los muchos métodos de estimación presentes en el software.

CAPÍTULO No.4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo muestra el procedimiento utilizado para describir la aplicación de la metodología mencionada en el capítulo anterior (capítulo III),

En primer lugar, se presenta de manera ordenada la información bibliográfica utilizada para obtener algunos parámetros necesarios para el análisis de estabilidad, luego se presenta el trabajo que se realizó en campo, que consistió en la extracción de muestras (alteradas e inalteradas) de las posibles unidades de TBJ que constituyen los taludes, la elaboración de los ensayos de laboratorio y el levantamiento topográfico llevado a cabo para obtener la geometría de los taludes en estudio.

Posteriormente se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio los cuales son: humedad natural, gravedad específica, análisis granulométrico y corte directo; posteriormente se realizó la validación de los resultados obtenidos y se definieron las unidades de TBJ presentes en los taludes, para realizar posteriormente la caracterización de dichos taludes.

Se definieron los métodos y criterios de resistencia al corte, así como el método de ajuste de la curva característica suelo-agua, que se utilizaron para realizar el análisis de estabilidad, finalmente se describe las condiciones y consideraciones que se tomaron para realizar los análisis de estabilidad de taludes.

4.2 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la investigación bibliográfica se logró obtener teoría básica sobre la estabilidad de taludes, en la que se logró determinar que la mayor parte del tiempo los taludes se encuentran húmedos y que cuando se analiza su estabilidad, se aplican leyes de resistencia en estado saturado (Mohr-Coulomb), que no refleja la verdadera condición que presentan los suelos que constituyen los taludes. Además, se ha determinado que la evaluación de la seguridad de los taludes depende en gran medida de la resistencia al corte del suelo, por lo que, es necesario a partir del comportamiento real de estos, aplicar leyes constitutivas que tomen en cuenta las condiciones que experimenta; es decir el suelo se encuentra en condiciones parcialmente saturadas. Al estudiar el comportamiento de los taludes en AMSS, se determinó que este material cuando es sometido ante mecanismos de activación como son la lluvia, sismo, etc., han demostrado que generan fallas provocando diferentes problemáticas (movimientos de ladera, erosión, colapso de calles, etc.). Los parámetros de resistencia al corte efectivos (cohesión y ángulo de fricción interna) se emplean para describir su comportamiento. Sin embargo, cuando el suelo presenta una condición parcialmente saturada, y dado su estado de presión de poro negativa (succión), tanto los parámetros de resistencia al corte como la ley de resistencia al corte para suelos saturados generalmente dejan de ser válidos.

Por lo tanto, es de suma importancia, proporcionar información sobre el efecto que tiene el fenómeno de succión en la ley de resistencia al corte, en suelos parcialmente

saturados, para una mejor comprensión del comportamiento de estos; su evaluación requiere conocer la curva característica suelo-agua. La relevancia de la curva característica en la mecánica de suelos parcialmente saturados se debe a que contiene información valiosa para estimar las propiedades mecánicas (conductividad hidráulica, resistencia al corte, comportamiento volumétrico). Además de lo mencionado, se determinó la importancia de evaluar la influencia que tiene la succión, en la estabilidad de los taludes constituidos por TBJ.

Los taludes seleccionados para esta investigación se detallaron en el capítulo No.3, apartado 3.2.1:

- Talud ubicado en el costado norte de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, identificado como talud Civil FIA-UES.
- Talud ubicado en las cercanías del Colegio Español Padre Arrupe, al lado poniente de la Autopista Este-Oeste (conocida como carretera de Oro), en la Ciudad de Soyapango, San Salvador, El Salvador, identificado como talud Padre Arrupe.

Parte de los parámetros requeridos para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, fueron retomados de investigaciones realizadas previamente, por lo que a continuación, se detallan los parámetros tomados:

- Análisis granulométricos de unidades de las unidades G y F de Talud Civil, y las unidades F, G, E (húmedo), E (seco) y D de Talud Padre Arrupe de TBJ.

Los resultados fueron tomados del trabajo de graduación: W. Bautista y K. Cruz (2016),

“DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR

MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

(AMSS)". En este trabajo se investigaron las zonas cercanas al Talud Padre Arrupe y Talud Civil FIA-UES conteniendo información sobre características físicas de TBJ.

En la tabla No.4.1 se presentan los resultados promedios del análisis granulométrico de las unidades de TBJ (G y F) que constituyen el Talud Civil FIA-UES, en la figura No.4.1 se muestran las curvas granulométricas de dichas unidades.

De igual manera en la tabla No.4.2 se presenta los resultados promedios del análisis granulométrico de las unidades de TBJ que constituyen el Talud Padre Arrupe y en la figura No.4.2 se muestran las curvas granulométricas de dichas unidades.

Tabla No. 4.1 Resultados promedios del análisis granulométrico de las unidades G y F del talud Civil FIA-UES.

No. DE MALLA	UNIDAD G		UNIDAD F	
	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa
3/8"	9.53	99.95	9.53	98.99
N°4	4.75	99.25	4.75	97.54
N°8	2.36	97.36	2.36	95.13
N° 10	2	96.75	2	94.36
N° 16	1.18	95.25	1.18	92.34
N° 30	0.6	92.52	0.6	87.14
N° 50	0.3	84.5	0.3	77.61
N° 100	0.15	75.39	0.15	66.54
N° 200	0.075	64.11	0.075	56.95
HIDROMETRÍA	0.02994	34.35	0.02994	24.91
	0.02002	29.05	0.02002	19.66
	0.01221	22.94	0.01221	14.85
	0.00896	18.45	0.00896	11.94
	0.00651	15.2	0.00651	9.32
	0.00331	9.91	0.00331	4.66
	0.00142	6.76	0.00142	3.19

Fuente: W. Bautista y K. Cruz (2016), DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

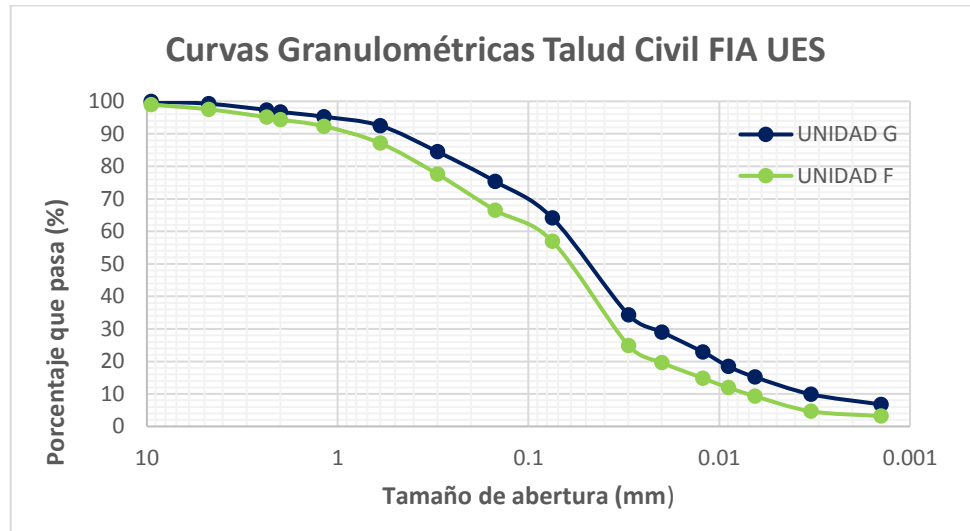


Figura No.4.1 Curvas granulométricas de las unidades G y F del Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores con información recopilada de W. Bautista y K. Cruz (2016), DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

Tabla No. 4.2 Resultados promedios del análisis granulométrico de unidades del talud Padre Arrupe.

No. DE MALLA	UNIDAD D		UNIDAD E (SECO)		UNIDAD E (HUMEDO)		UNIDAD F		UNIDAD G	
	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa
3/8"	9.53	100	9.53	99.69	9.53	100	9.53	98.65	9.53	99.57
N°4	4.75	99.91	4.75	97.08	4.75	99.96	4.75	95.88	4.75	99.2
N°8	2.36	99.6	2.36	86.15	2.36	99.6	2.36	90.98	2.36	98.69
N° 10	2	99.42	2	82.31	2	99.39	2	89.85	2	98.54
N° 16	1.18	98.56	1.18	64.56	1.18	98.3	1.18	85.85	1.18	97.87
N° 30	0.6	96.8	0.6	35.52	0.6	93.33	0.6	77.84	0.6	97.14
N° 50	0.3	92.88	0.3	11.44	0.3	77.01	0.3	65.97	0.3	94.76
N° 100	0.15	85.24	0.15	7.36	0.15	58.52	0.15	54.19	0.15	91.07
N° 200	0.075	74.76	0.075	6.79	0.075	50.07	0.075	44.7	0.075	84.91
HIDROMETRÍA	0.029	41.79	-	-	0.029	23.49	0.029	16.97	0.029	60.6
	0.02	33.27	-	-	0.02	20.68	0.02	14.06	0.02	50.88
	0.012	23.8	-	-	0.012	17.25	0.012	11.15	0.012	37.4
	0.009	18.27	-	-	0.009	14.44	0.009	9.11	0.009	29.46
	0.007	13.53	-	-	0.007	11.94	0.007	7.46	0.007	23.53
	0.003	7.57	-	-	0.003	7.79	0.003	5.24	0.003	15.27
	0.001	3.93	-	-	0.001	5.49	0.001	3.09	0.001	11.33

Fuente: W. Bautista y K. Cruz (2016), DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

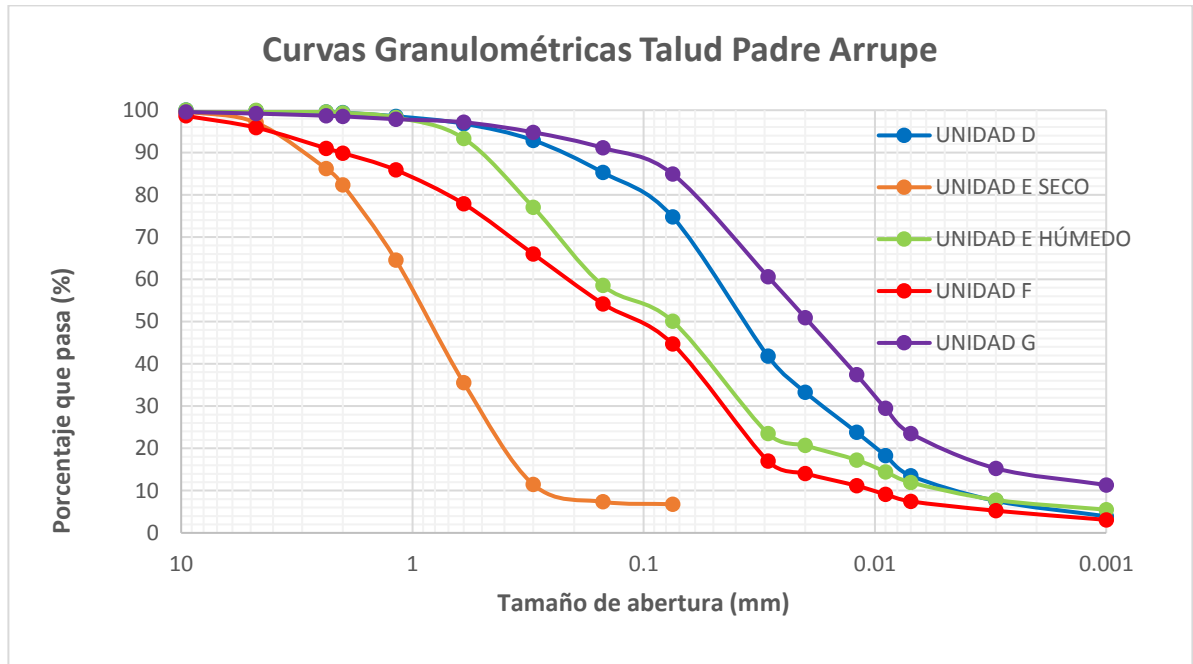


Figura No.4.2 Curvas granulométricas de unidades del Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores con información recopilada W. Bautista y K. Cruz (2016), DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

- **Resultados de gravedad específica de Talud Civil (unidades G y F), densidad húmeda y densidad seca para el Talud Padre Arrupe (unidad E húmeda).**

Para el Talud Civil (unidades G y F) se tomaron los resultados gravedad específica del trabajo de graduación: W. Bautista y K. Cruz (2016), **“W. Bautista y K. Cruz (2016), DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).”**, (Ver Tabla No. 4.3).

Tabla No. 4.3 Resultados de gravedad específica de las unidades G y F del talud Civil.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD G	UNIDAD F
Gravedad específica promedio	2.38	2.41

Fuente: W. Bautista y K. Cruz (2016), DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

Para el Talud Padre Arrupe (unidad E húmeda) se tomaron los resultados de densidad húmeda y seca de la investigación: **E. Hernández (2004), CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y VULCANOLÓGICAS DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN, CALDERA DE ILOPANGO**, (Ver Tabla No. 4.4).

Tabla No. 4.4 Resultados de densidad húmeda y seca de las unidades E (húmedo) del talud Padre Arrupe.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD E (HUMEDO)
Densidad húmeda a (kN/m³)	15.788
Densidad seca (kN/m³)	13.091

Fuente: E. Hernández (2004), CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y VULCANOLÓGICAS DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN, CALDERA DE ILOPANGO.

- **Resultados de propiedades de resistencia al corte: cohesión y ángulo de fricción interna.**

Para el Talud Padre Arrupe (unidad E húmeda) se tomaron los resultados de la investigación: **E. Hernández (2004), CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y VULCANOLÓGICAS DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN, CALDERA DE ILOPANGO**, (Ver Tabla No. 4.5).

Tabla No. 4.5 Resultados de parámetros de resistencia (Angulo de fricción interna y Cohesión) de la unidad E (húmedo) del talud Padre Arrupe.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD E (HUMEDO)
Ángulo de fricción interna	25.8
Cohesión (kPa)	15.788

Fuente: E. Hernández (2004), CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y VULCANOLÓGICAS DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN, CALDERA DE ILOPANGO.

- **Resultados de succión de unidades de TBJ.**

Los resultados fueron tomados de la investigación: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), **“Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador”**, así como para el Talud Civil FIA-UES se tomó información de la unidad G (ASTM D5298: método del papel filtro), que se detalla en la tabla No.4.6 y figura No.4.3. Del talud Padre Arrupe se tomó información de las unidades G (ver tabla No. 4.7 y Figura No.4.4) y D (ver tabla No.4.8 y Figura No.4.5).

Tabla No. 4.6 Valores de succión de unidad G talud Civil FIA-UES.

UNIDAD G TALUD CIVIL FIA-UES												
Contenido de humedad (%)	2.50	4.55	5.41	6.39	8.07	9.32	10.77	11.80	13.81	17.60	20.00	22.68
Succión (kPa)	104980.82	4118.53	1646.50	1782.12	642.46	464.02	318.70	204.56	92.07	46.56	33.26	25.93

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), **“Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador”**.

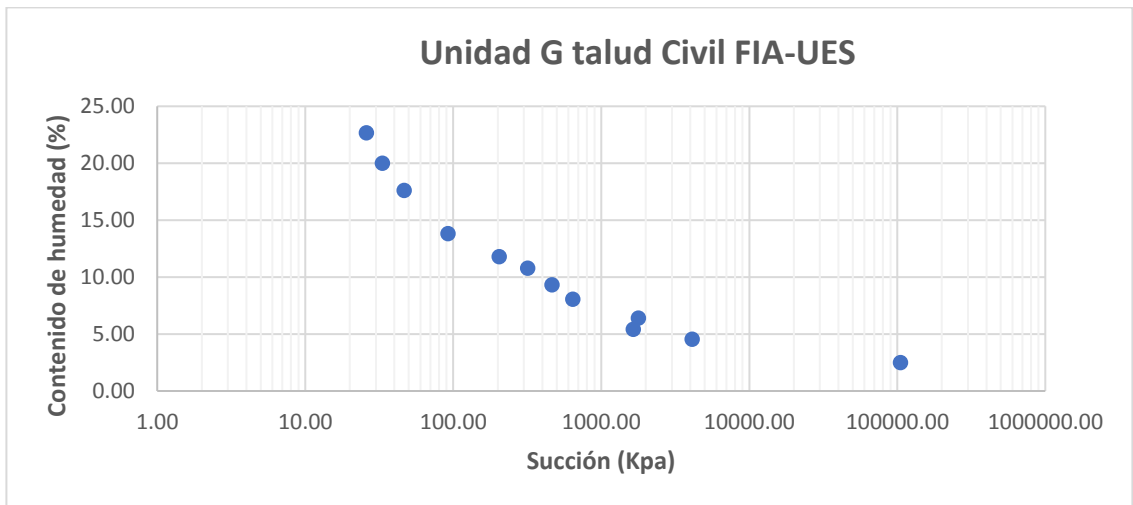


Figura No.4.3 Curva característica suelo-agua de unidad G talud Civil FIA-UES.

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

Tabla No. 4.7 Valores de succión de unidad G talud Padre Arrupe.

UNIDAD G TALUD PADRE ARRUPE										
Contenido de humedad (%)	4.02	17.23	19.09	23.22	29.95	36.55	34.76	29.66	10.12	14.41
Succión (kPa)	74609.97	67.78	47.95	29.51	6.39	4.41	2.33	7.51	1012.52	120.57

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

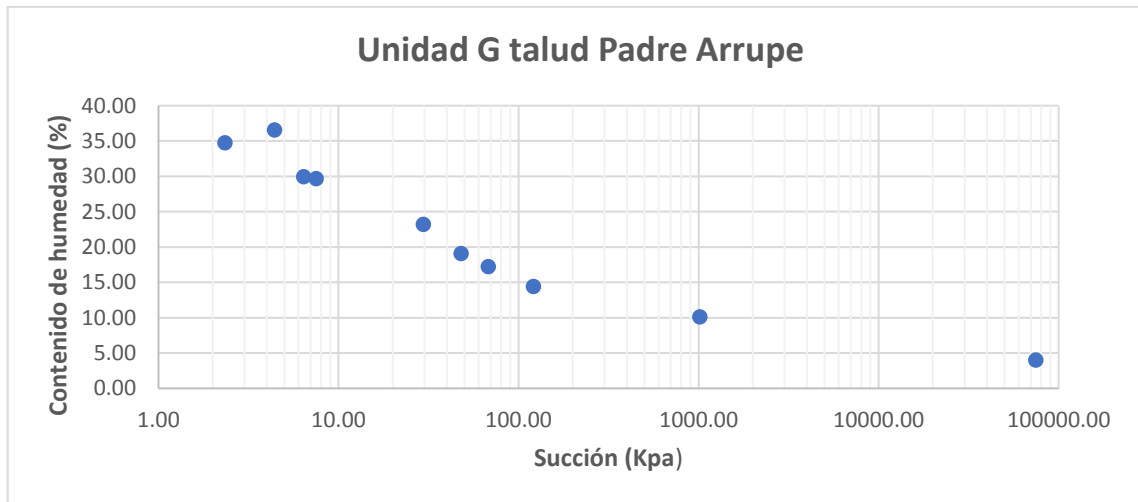


Figura No.4.4 Curva característica suelo-agua de unidad G talud Padre Arrupe.

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

Tabla No. 4.8 Valores de succión de unidad D talud Padre Arrupe.

UNIDAD D TALUD PADRE ARRUPE								
Contenido de humedad (%)	27.80	9.61	14.76	23.22	1.35	4.03	14.05	16.68
Succión (kPa)	1.44	156.98	59.14	21.49	52678.69	1904.39	62.20	53.73

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

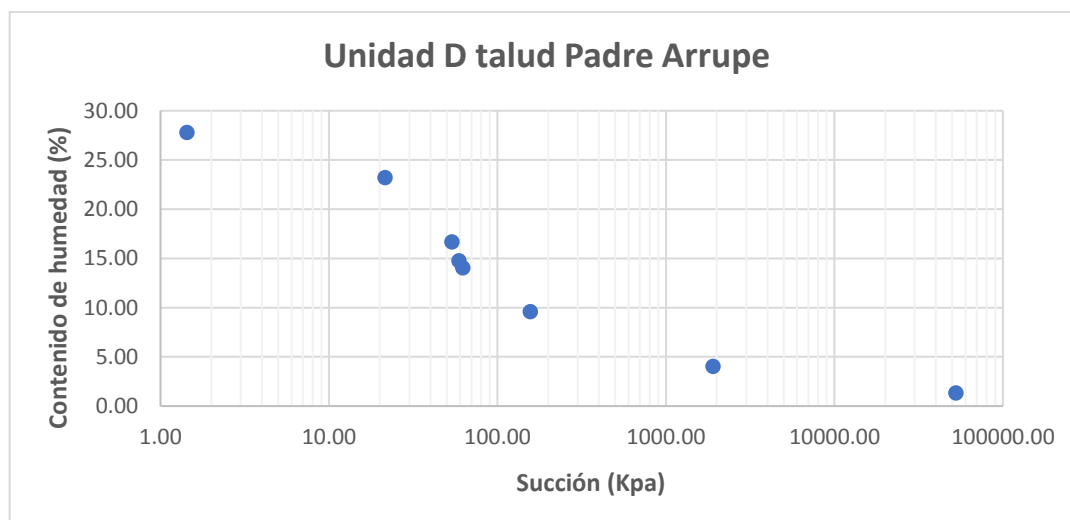


Figura No.4. 5 Curva característica suelo-agua de unidad D talud Padre Arrupe.

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

4.3 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo realizado consistió en las visitas a los taludes en estudio para la identificación de unidades, características topográficas para obtener la geometría de estos, la extracción de muestras (alteradas e inalteradas), para realizar posteriormente los diferentes ensayos de laboratorio descritos en la sección 3.2.3 del capítulo III.

A continuación, se muestra una descripción general de los taludes que fueron seleccionados tomando en cuenta la información existente obtenida en investigaciones previas y la ayuda de los docentes asesores (Ver desde tablas No. 4.9 y No. 4.10). Los taludes evaluados son los siguientes:

Tabla No. 4.9 Información de Talud Civil FIA-UES.

TALUD CIVIL FIA-UES



Figura No.4. 6 Estratigrafía Talud Civil.

Fuente: De los autores.

Posible Estratigrafía presente (ver figura No.4.6):

Desde la cabeza al pie.

UNIDAD G
UNIDAD F

Fuente: De los autores.

Ubicación: Costado norte de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. (Ver figura No.4.7)

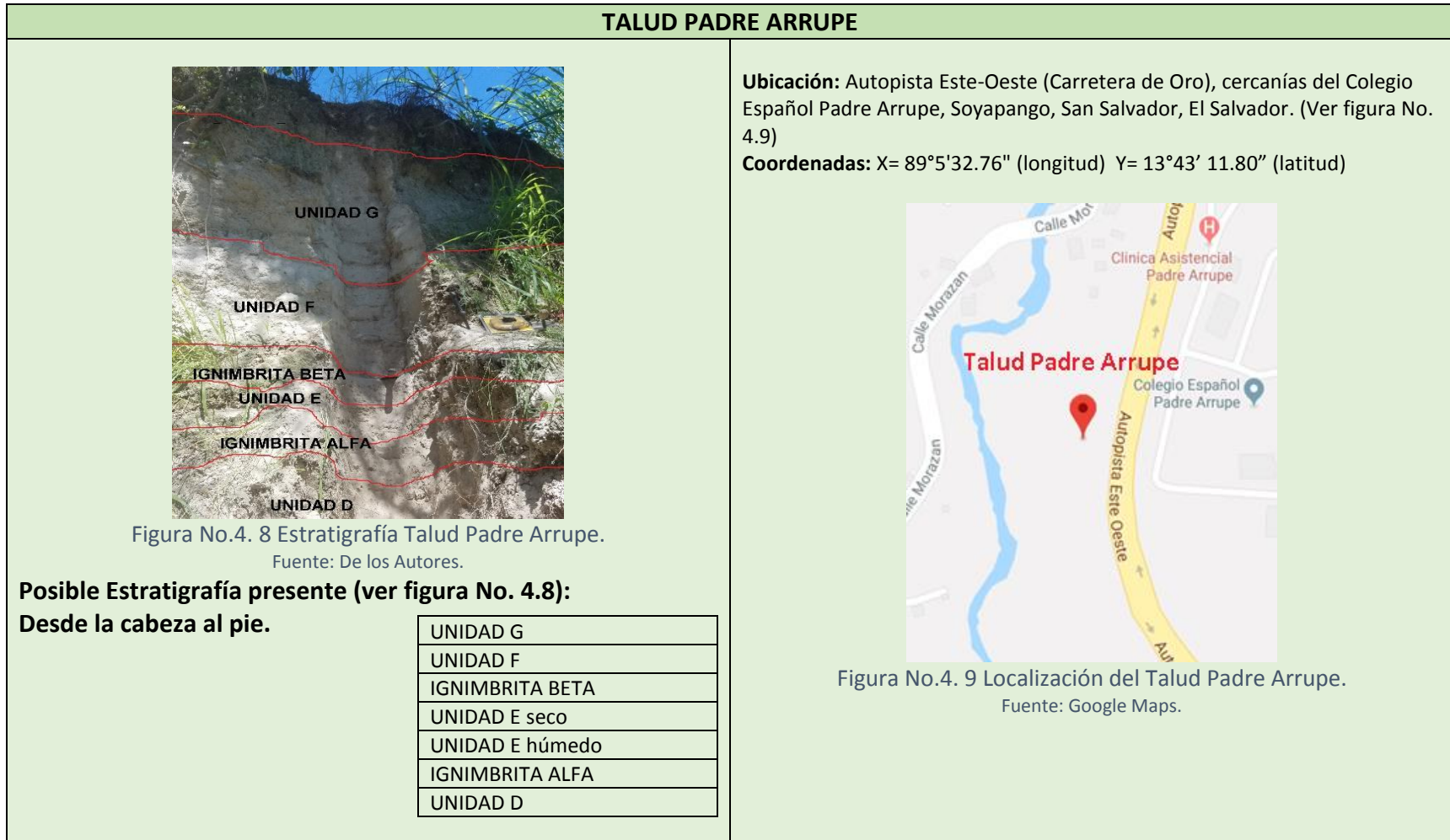
Coordenadas: X= 89°12'04" (longitud) Y= 13°43' 15.40" (latitud)



Figura No.4. 7 Localización Talud Civil FIA-UES.

Fuente: Google Maps.

Tabla No. 4.10 Información de Talud Padre Arrupe.



Fuente: De los autores.

4.3.1 VISITAS DE CAMPO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.

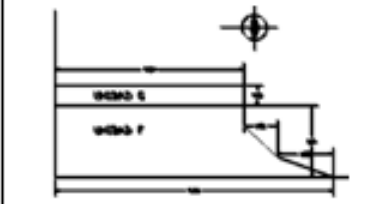
El objetivo principal de realizar estas visitas de campo es la de identificar de forma detallada cada uno de los estratos que conforman los taludes en estudio, tomar fotografías ilustrativas y realizar el levantamiento topográfico de los taludes en estudio, extraer muestras alteradas e inalteradas, que se utilizaron para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas necesarias para el análisis de estabilidad de taludes (gravedad específica, ángulo de fricción interna, cohesión, granulometría), de cada uno de los estratos que constituyen los taludes. Además, en esta visita de campo es necesario que se describan condiciones de los taludes en estudio.

Descripción de las condiciones iniciales de los taludes seleccionados.

Las condiciones iniciales de cada talud se registraron en fichas de recolección de información presentadas en la sección 3.2.2.1, Tabla No. 3.1 Formato de recolección de información del talud, del Capítulo III. A continuación, se presenta la ficha de recolección con la información del Talud Civil FIA-UES (Ver figura No. 4.10).

Para ver la ficha de recolección con la información del Talud Padre Arrupe (ver anexo No.1).

Figura No.4.10 Ficha de recolección de información del talud Civil FIA-UES.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA		1/2
FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL ESTADO INICIAL DE TALUDES		
1.- DATOS GENERALES FECHA DE INSPECCIÓN: <u>02/09/2019</u> NOMBRE DEL TALUD: <u>Civil FIA-UES</u> RESPONSABLE: <u>Luis Figueroa, Ángel Flores</u>		
2.- LOCALIZACIÓN UBICACIÓN: <u>Costado Norte de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.</u> COORDENADAS: X(LONGITUD): <u>89°5'32.76"</u> Y(LATITUD): <u>13°43'11.80"</u>		
3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES		
TIPO DE TALUD <input type="checkbox"/> LADERA NATURAL <input type="checkbox"/> TALUD EN RELLENO <input checked="" type="checkbox"/> TALUD EN CORTE	TIPO DE VEGETACIÓN <input checked="" type="checkbox"/> ARBOLES <input checked="" type="checkbox"/> PASTO <input type="checkbox"/> ARBUSTOS <input type="checkbox"/> NINGUNO	
CONDICIÓN DE VEGETACIÓN <input type="checkbox"/> ALTA <input checked="" type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> DISPERSA	TIPO DE PENDIENTE <input type="checkbox"/> PLANO 0-2% <input type="checkbox"/> ONDULADO 3-12% <input type="checkbox"/> ALOMADO 13- 25% <input type="checkbox"/> QUEBRADO 26- 35 % <input type="checkbox"/> ACCIDENTADO 36-70% <input checked="" type="checkbox"/> MUY ACCIDENTADO >70%	
4.- CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS		
GEOMETRIA ALTURA: <u>4.74 m.</u> PENDIENTE: <u>Aproximadamente del 90%</u> LONGITUD: <u>18 m.</u> CROQUIS DEL TALUD: 	ELEMENTOS ANTRÓPICOS <input type="checkbox"/> OBRAS DE PROTECCION <input checked="" type="checkbox"/> OTRAS ESTRUCTURAS DESCRIPCIÓN: <u>Edificio de la Escuela Ingeniería Civil de dos plantas y dimensiones aproximadas de 18x40m a la cabeza del talud.</u>	

2/2

5.- NATURALEZA DEL MATERIAL

- SUELO CON GRIETAS COHESIVO
 SIN GRIETAS FRICCIONANTE
 CON BLOQUES COHESIVO-FRICCIONANTE
- ROCA CON GRIETAS ROCA SANA
 SIN GRIETAS POCO METEORIZADA
 CON BLOQUES METEORIZADA
- OTROS: _____

NÚMERO DE ESTRATOS VISIBLES: 2

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS

NOMBRE	ESESOR (m)	OBSERVACIONES
UNIDAD G	0.60	Material conformado de ceniza de matriz fina de color Beige claro, y se observa poca presencia de lapilli acrecional.
UNIDAD F	2.14	Se presenta material consolidado de ceniza gruesa de color Beige, y se observa abundante presencia de pómez y líticos.

OTROS: _____

OBSERVACIONES:

El talud presenta las unidades de TBJ G y F, las cuales son materiales del tipo cohesivo-friccional.

4.3.2 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS.

A continuación se presenta una descripción del procedimiento que se llevó a cabo para la extracción de muestras alteradas e inalteradas, en cada punto establecido de muestreo.

- **Muestras Alteradas.**

Con ayuda de asesores de la Universidad de El Salvador, se identificaron los distintos estratos que están presentes en cada uno de los taludes que fueron seleccionados para esta investigación, después se procedió a la extracción de muestras en el lugar más adecuado, de cada estrato, las que posteriormente fueron identificadas e introducidas en bolsas plásticas y cerradas herméticamente, para ser transportadas al laboratorio (Ver figura No. 4.11).

Se extrajeron muestras de las siguientes posibles unidades de TBJ:

- Talud Padre Arrupe: Unidad G, Unidad F, Unidad Ignimbrita beta, Unidad Ignimbrita alfa y Unidad D.

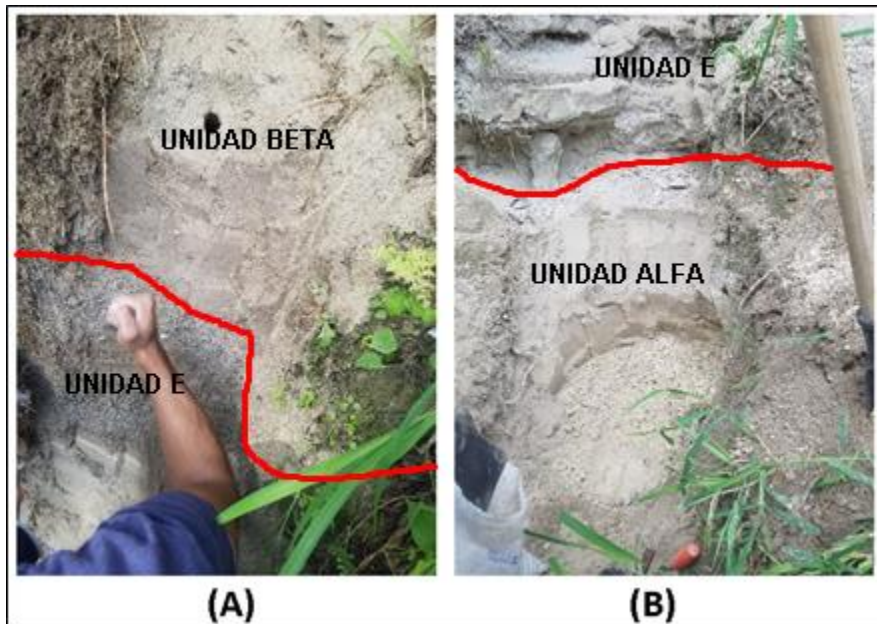


Figura No.4.11 Extracción de muestras en talud Padre Arrupe. (A) Elaboración de perfil para identificación de posible ignimbrita Beta. (B) extracción de muestras alteradas de posible unidad ignimbrita alfa

Fuente: De los autores.

- **Muestras inalteradas.**

Con ayuda de ingenieros asesores de la UES y OPAMSS, se determinó el lugar adecuado y representativo en los taludes seleccionados para poder realizar la extracción de muestras inalteradas. Este muestreo, se realizó en ambos taludes, la extracción fue llevada a cabo de la siguiente manera: Primero se identificaron los estratos de las unidades de TBJ de las cuales se realizaría la extracción, posteriormente, se extrajeron las muestras evitando en lo posible que sufran alteraciones y pérdida de humedad, se introdujeron en bolsas plásticas, luego se etiquetaron con la información general de la muestra especificando con marcas las caras superior e inferior y fueron cerradas herméticamente para su transporte. (ver figura No.4.12).

Se debe colocar a la muestra una etiqueta con la siguiente información: procedencia, especificando con marcas las caras superior e inferior, y ubicación dentro; se cierra la caja y se coloca exteriormente otra etiqueta con los mismos datos,

Se extrajeron muestras de las siguientes posibles unidades de TBJ:

- Talud Civil FIA-UES: Unidad G y Unidad F.
- Talud Padre Arrupe: Unidad G, Unidad F, Unidad Ignimbrita beta, Unidad Ignimbrita alfa y Unidad D.

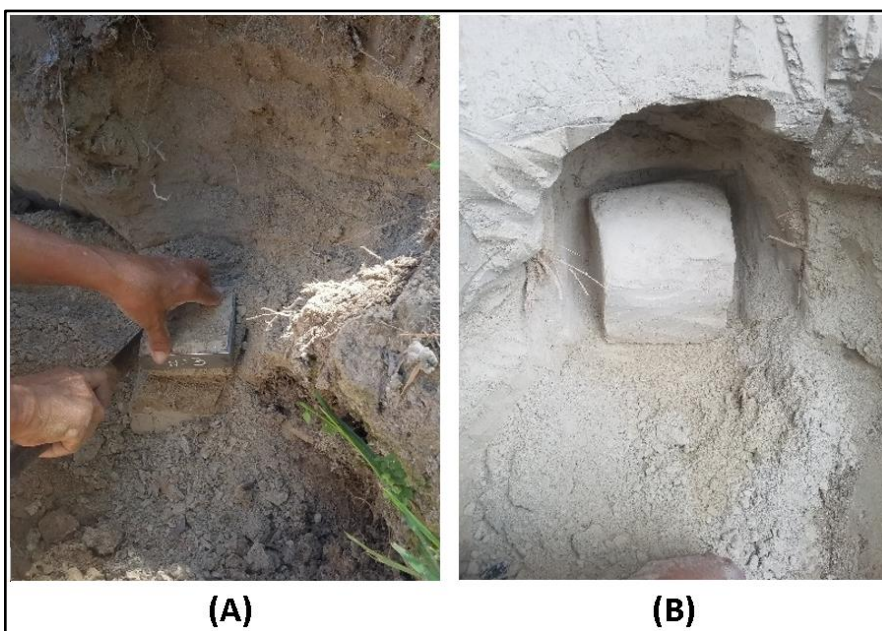


Figura No.4.12 Extracción de muestras inalteradas: (A) Espécimen inalterado para ensayo de corte directo, unidad G del talud Civil FIA-UES, (B) Muestra inalterada en bloque de unidad D del Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

4.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

Para realizar el análisis de estabilidad de los taludes en estudio, fue necesario la realización de los siguientes ensayos de laboratorio que permitieran obtener los

parámetros requeridos para el análisis de estabilidad de taludes: contenido de humedad, análisis granulométrico, gravedad específica y corte directo.

Resultados de ensayos de laboratorio.

Contenido de Humedad ASTM D-2216

Para obtener la humedad natural en cada unidad de TBJ de los taludes en estudio, se tomaron dos porciones de material, las que luego se promediaron para obtener la humedad natural promedio. A continuación, en la Tabla No.4.11, se presentan los resultados promedios de humedad natural de las unidades de TBJ del Talud Civil FIA-UES y del Talud Padre Arrupe.

Tabla No. 4.11 Resultados promedios de humedad natural de unidades de TBJ del Talud Civil y Talud Padre Arrupe.

UNIDAD	ω_1	ω_2	ω_{prom}
TALUD CIVIL FIA-UES			
G	16.9	16.7	16.8
F	14.3	13.8	14.1
TALUD PADRE ARRUPE			
G	8.3	7.9	8.1
F	10.2	10.5	10.4
Ignimbrita Beta	7.6	7.4	7.5
Ignimbrita Alfa	13.2	13.0	13.1
D	9.1	8.8	9.0

Fuente: De los autores.

Análisis Granulométrico ASTM D-422.

Se realizaron dos ensayos granulométricos por tamizado y sedimentación del suelo para cada unidad posible (ignimbrita beta e ignimbrita alfa) del talud Padre Arrupe en colaboración con el trabajo de graduación "**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES**

FÍSICAS DE LAS DIFERENTES UNIDADES DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)", K. Henríquez, J. Rodríguez, L. Cuellar.

(ver figura No.4.13).



Figura No.4.13 Toma de lecturas del hidrómetro, de posibles unidades ignimbrita alfa e ignimbrita beta de TBJ, talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

A continuación, se presentan los resultados de los análisis granulométricos:

- ✓ Unidad ignimbrita beta (ver tabla No. 4.12 y figura No.4.14).
- ✓ Unidad ignimbrita alfa (ver tabla No. 4.13 y figura No.4.15).

Tabla No. 4.12 Análisis granulométrico de posible unidad ignimbrita beta, talud Padre Arrupe.

No. DE MALLA	UNIDAD IGNIMBRITA BETA				
	Muestra 1-B		Muestra 2-B		Promedio
	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	% que pasa
Nº10	2	100	2	100	100
Nº16	1.18	98.62	1.18	98.23	98.43
Nº30	0.6	92.99	0.6	91.5	92.24
Nº50	0.3	75.83	0.3	72.2	74.01
Nº100	0.15	54.64	0.15	52.45	53.55

Nº200	0.075	47.06	0.075	45.85	46.45
Hidrometría	0.0295	24.21	0.03153	20.56	22.38
	0.01899	22.12	0.02036	18.39	20.26
	0.01143	17.94	0.01203	15.5	16.72
	0.00824	15.85	0.00867	13.34	14.6
	0.00598	13.07	0.00616	10.74	11.9
	0.00308	9.25	0.00313	7.43	8.34
	0.00127	7.63	0.00134	4.67	6.15

Fuente: De los autores.

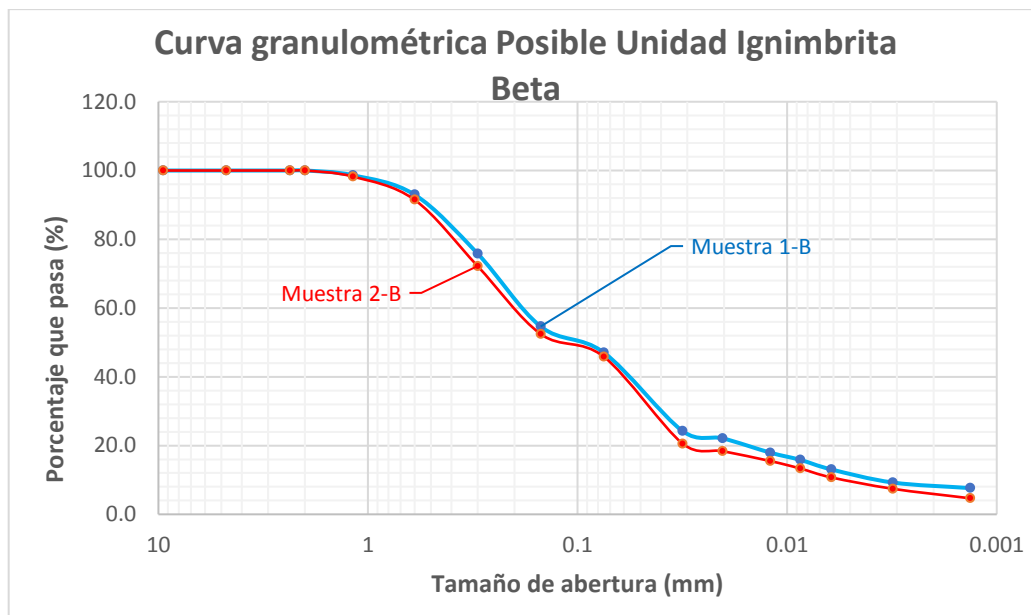


Figura No.4.14 Curvas Granulométricas de posible unidad ignimbrita beta.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.13 Análisis granulométrico de posible unidad ignimbrita alfa.

No. DE MALLA	UNIDAD IGNIMBRITA ALFA				
	Muestra 1-A		Muestra 2-A		Promedio
	Tamaño (mm)	% que pasa	Tamaño (mm)	% que pasa	% que pasa
Nº10	2	100	2	100	100
Nº16	1.18	99.87	1.18	99.92	99.90
Nº30	0.6	98.66	0.6	99.56	99.11
Nº50	0.3	96.63	0.3	97.69	97.16
Nº100	0.15	90.25	0.15	91.78	91.02

Nº200	0.075	80.65	0.075	82.45	81.55
Hidrometría	0.02860	55.71	0.02971	55.31	55.51
	0.01930	45.76	0.02011	44.57	45.16
	0.01189	34.56	0.01231	32.48	33.52
	0.00878	25.85	0.00900	24.79	25.32
	0.00632	22.11	0.00652	19.42	20.77
	0.00319	15.89	0.00325	13.82	14.86
	0.00134	13.63	0.00139	8.68	11.16

Fuente: De los autores.

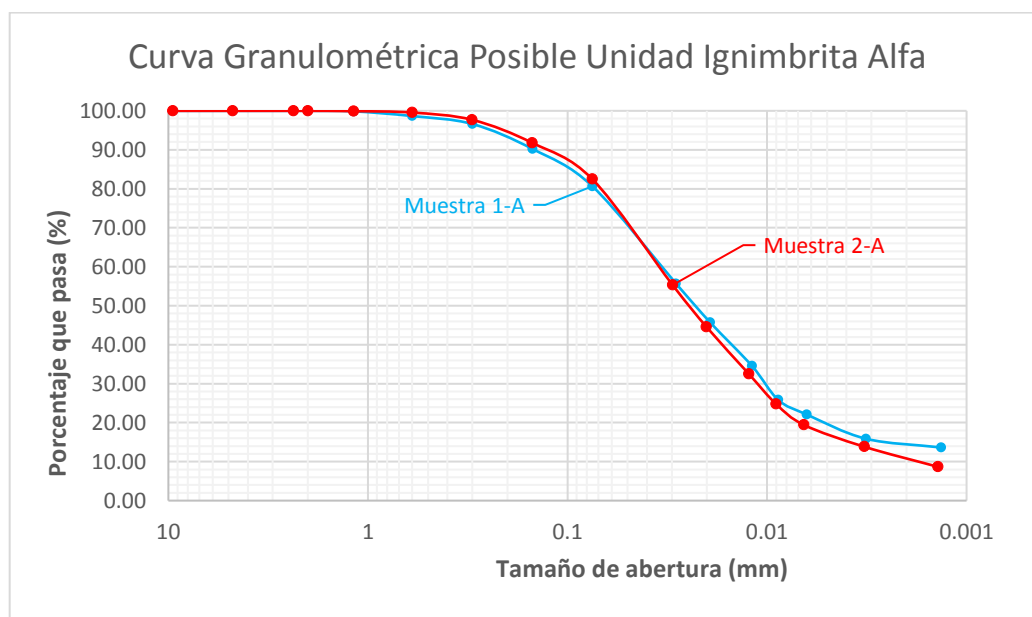


Figura No.4.15 Curvas Granulométricas de posible unidad ignimbrita alfa.

Fuente: De los autores.

Gravedad Específica ASTM D-854

Para obtener gravedad específica del suelo en estudio, se utilizó el método del picnómetro con agua (ver figuras No.16 y No.17), este ensayo de laboratorio se realizó en colaboración con el trabajo de graduación "**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS DIFERENTES UNIDADES DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**", K. Henríquez, J. Rodríguez, L. Cuellar.

Se realizó el ensayo para obtener la gravedad específica del suelo de las siguientes unidades de TBJ del talud Padre Arrupe: unidad G, unidad F, unidad ignimbrita beta, unidad ignimbrita alfa y unidad D.



Figura No.4.16 Ejecución de ensayo de gravedad específica, picnómetros con lechadas correspondientes a las unidades G y F del talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.



Figura No.4.17 Ejecución de ensayo de gravedad específica, desaireación de las lechadas de las unidades G y F correspondientes al talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

A continuación, en la tabla No. 4.14 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla No. 4.14 Resultados de ensayos de gravedad específica de unidades de TBJ del Talud Padre Arrupe.

UNIDAD	G _{s1}	G _{s2}	G _{s prom}
TALUD PADRE ARRUPE			
G	2.45	2.45	2.45
F	2.49	2.53	2.51
Ignimbrita Beta	2.33	2.57	2.45
Ignimbrita Alfa	2.44	2.47	2.45
D	2.38	2.38	2.38

Fuente: De los autores.

Corte Directo ASTM D-3080

Se realizó el ensayo siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D-3080 (ver figura No.18), prueba no consolidada-no drenada, obteniendo los parámetros de resistencia al corte de los taludes, el ángulo de fricción interna (ϕ) y la Cohesión (C) de las siguientes unidades de TBJ del talud Civil FIA-UES: unidad G, unidad F y del talud Padre Arrupe: unidad G, unidad F, unidad ignimbrita beta, unidad ignimbrita alfa y unidad D.

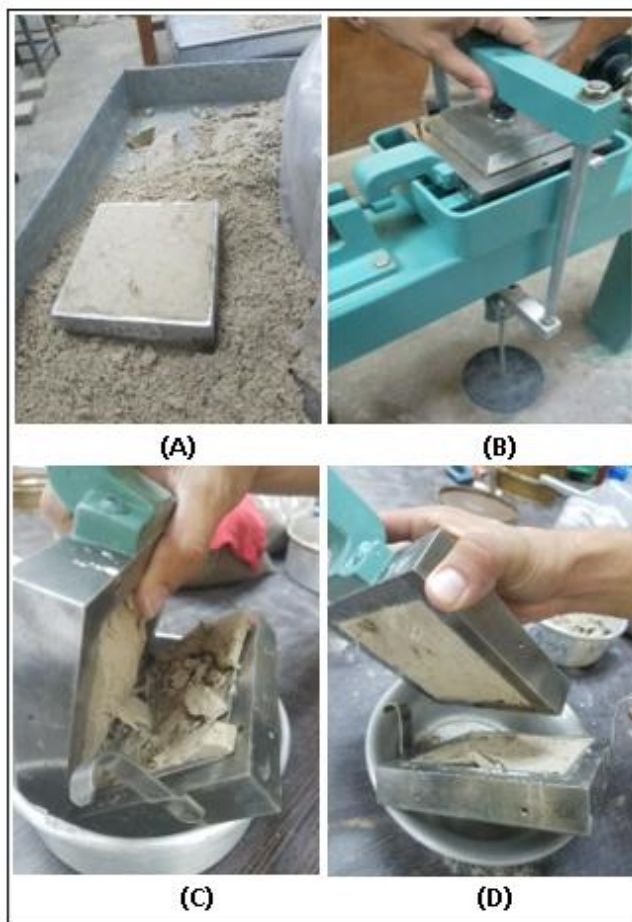


Figura No.4.18 Procedimiento de ensayo de corte directo de la unidad G de Talud Civil FIA-UES: A) Espécimen inalterado dentro del molde para colocación en el dispositivo, B) Dispositivo para ejecución del ensayo, C) y D) muestra ensayada.

Fuente: De los autores.

- **Corte Directo Talud Civil FIA-UES.**

A continuación, se muestran los valores de los esfuerzos cortantes máximos, esfuerzos normales, para cada ensayo realizado, además, se muestra la envolvente esfuerzo cortante-esfuerzo normal con la que se obtuvo la Ley de Resistencia al Corte correspondientes a la unidad G (ver tabla No.4.15 y figura No.4.19) y unidad F (ver tabla No.4.16 y figura No.4.20).

Tabla No.4.15 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad G, Talud Civil FIA-UES.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	16.90	16.70	15.60
Peso Volumétrico Húmedo (KN/m ³)	9.777	9.581	10.198
Peso Volumétrico Seco (KN/m ³)	8.371	8.203	8.731
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	23.536	25.988	29.420
Esfuerzo Normal (kPa)	14.710	19.613	24.517

Fuente: de los autores.

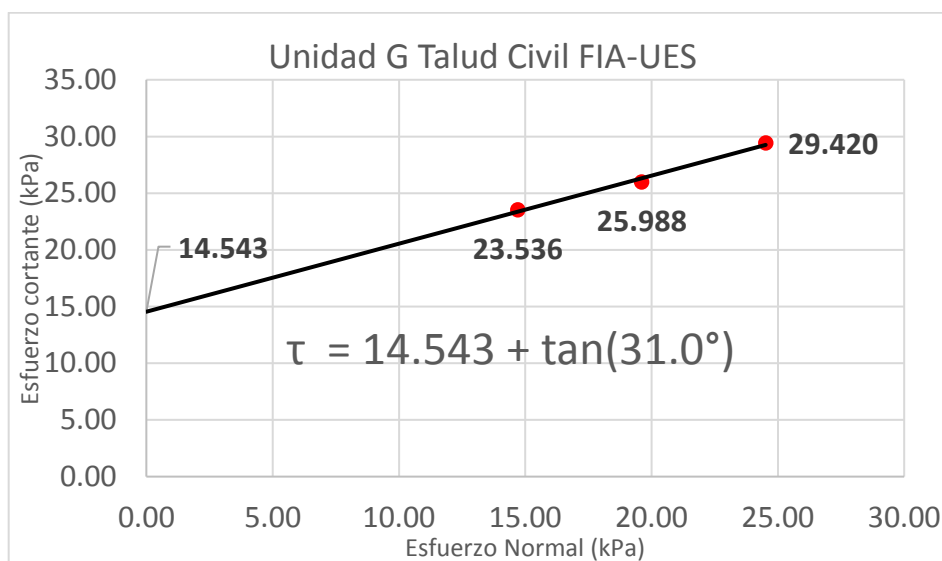


Figura No.4.19 Envolvente de esfuerzo cortante – esfuerzo normal de unidad G, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.16 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad F, Talud Civil FIA-UES.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	14.30	13.80	13.10
Peso Volumétrico (kN/m ³)	9.414	9.463	9.394
Peso Volumétrico Seco (kN/m ³)	8.251	8.102	8.043
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	21.575	24.026	27.459
Esfuerzo Normal (kPa)	10.787	14.710	19.613

Fuente: De los autores

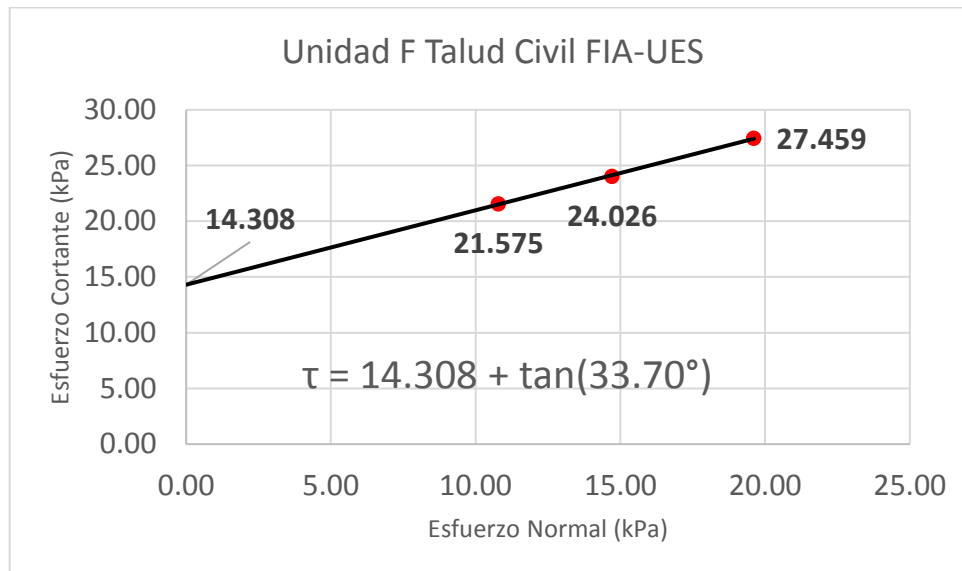


Figura No.4.20 Envoltura de esfuerzo cortante - esfuerzo normal de unidad F, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: de los autores.

- **Corte Directo Talud Padre Arrupe**

A continuación, se muestran los valores de los esfuerzos cortantes máximos, esfuerzos normales, para cada ensayo realizado, además, se muestra la envoltura esfuerzo cortante-esfuerzo normal con la que se obtuvo la Ley de Resistencia al Corte correspondientes a las siguientes unidades de TBJ:

- ✓ Unidad G (ver tabla No.4.17 y figura No.4.21)
- ✓ Unidad F (ver tabla No.4.18 y figura No.4.22)
- ✓ Unidad Ignimbrita Beta (ver tabla No.4.19 y figura No.4.23)
- ✓ Unidad Ignimbrita Alfa (ver tabla No.4.20 y figura No.4.24)
- ✓ Unidad D (ver tabla No.4.21 y figura No.4.25)

Tabla No. 4.17 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad G, Talud Padre Arrupe.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	8.28	7.56	5.37
Peso Volumétrico (kN/m ³)	8.786	8.825	8.257
Peso Volumétrico Seco (kN/m ³)	8.128	7.556	7.069
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	24.517	28.960	31.259
Esfuerzo Normal (kPa)	14.710	19.613	24.517

Fuente: De los Autores.

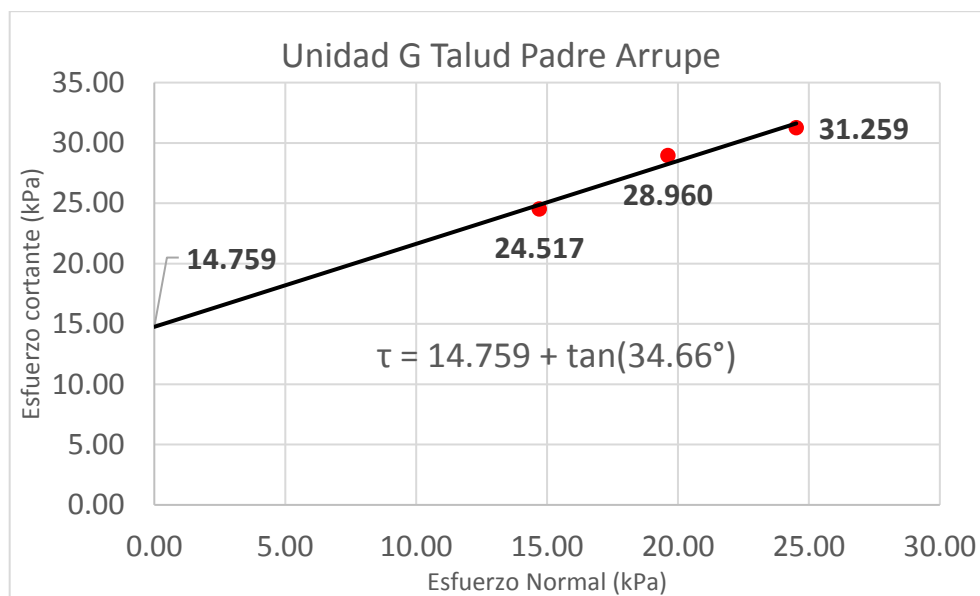


Figura No.4.21 Envolvente de esfuerzo cortante - esfuerzo normal de unidad G, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.18 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad F, Talud Padre Arrupe.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	11.02	10.65	10.60
Peso Volumétrico (kN/m ³)	10.10	9.610	10.003
Peso Volumétrico Seco (kN/m ³)	9.149	8.228	8.564
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	27.949	30.891	34.814
Esfuerzo Normal (kPa)	14.710	19.613	24.517

Fuente: De los autores.

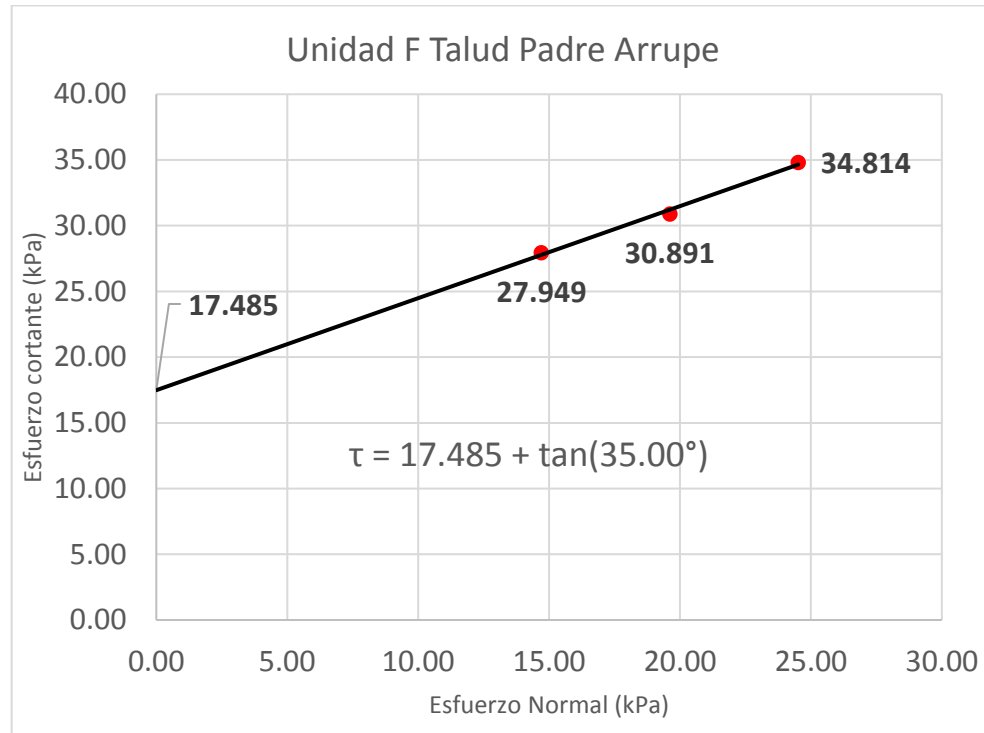


Figura No.4.22 Envolvente de esfuerzo cortante - esfuerzo normal de unidad F, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.19 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad Ignimbrita Beta, Talud Padre Arrupe.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	13.27	12.85	12.66
Peso Volumétrico (kN/m³)	12.454	12.258	13.043
Peso Volumétrico Seco (kN/m³)	11.585	10.495	11.167
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	28.930	33.343	36.285
Esfuerzo Normal (kPa)	14.710	19.613	24.517

Fuente: De los autores.

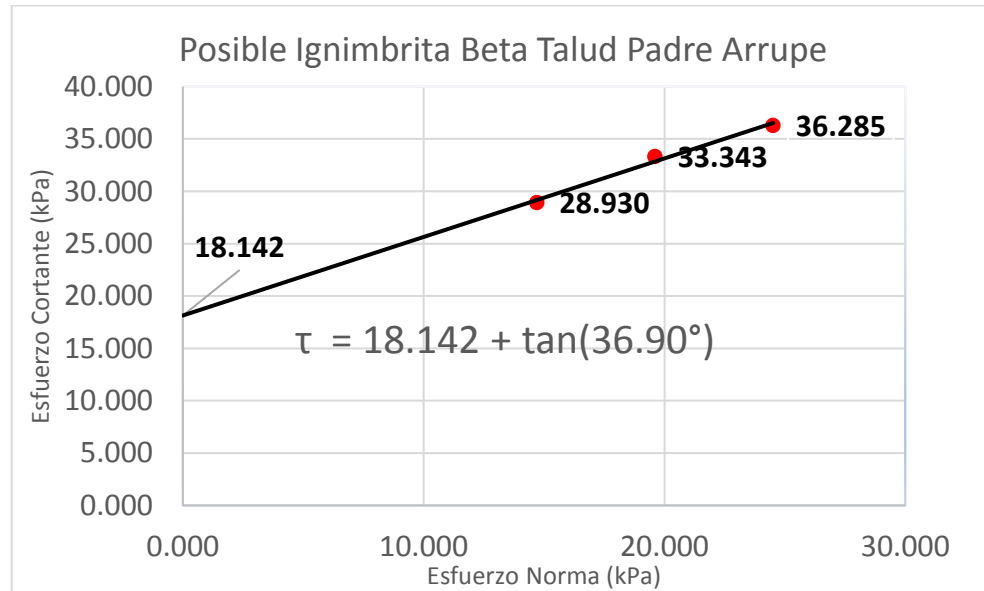


Figura No.4.23 Envoltorio de esfuerzo cortante - esfuerzo normal de unidad Ignimbrita Beta, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.20 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad Ignimbrita Alfa, Talud Padre Arrupe.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	12.69	12.39	12.30
Peso Volumétrico (kN/m^3)	9.081	9.463	9.355
Peso Volumétrico Seco (kN/m^3)	8.029	8.102	8.009
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	15.200	18.142	21.084
Esfuerzo Normal (kPa)	10.787	14.710	19.613

Fuente: De los autores.

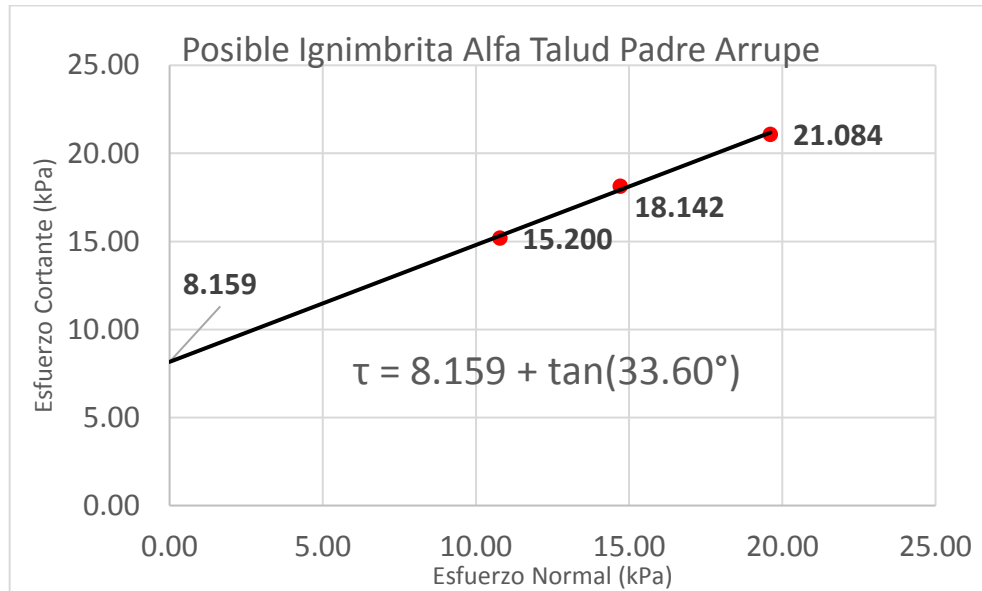


Figura No.4.24 Envolvente de esfuerzo cortante - esfuerzo normal de unidad Ignimbrita Alfa, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.21 Resultados de ensayos de corte directo de la unidad D, Talud Padre Arrupe.

ENSAYO	1	2	3
Humedad (%)	9.06	7.47	7.01
Peso Volumétrico Húmedo (kN/m ³)	8.453	8.483	8.492
Peso Volumétrico Seco (kN/m ³)	7.755	7.263	7.271
Esfuerzo Cortante Máx. (kPa)	15.016	18.847	25.497
Esfuerzo Normal (kPa)	14.710	19.613	29.420

Fuente: De los autores.

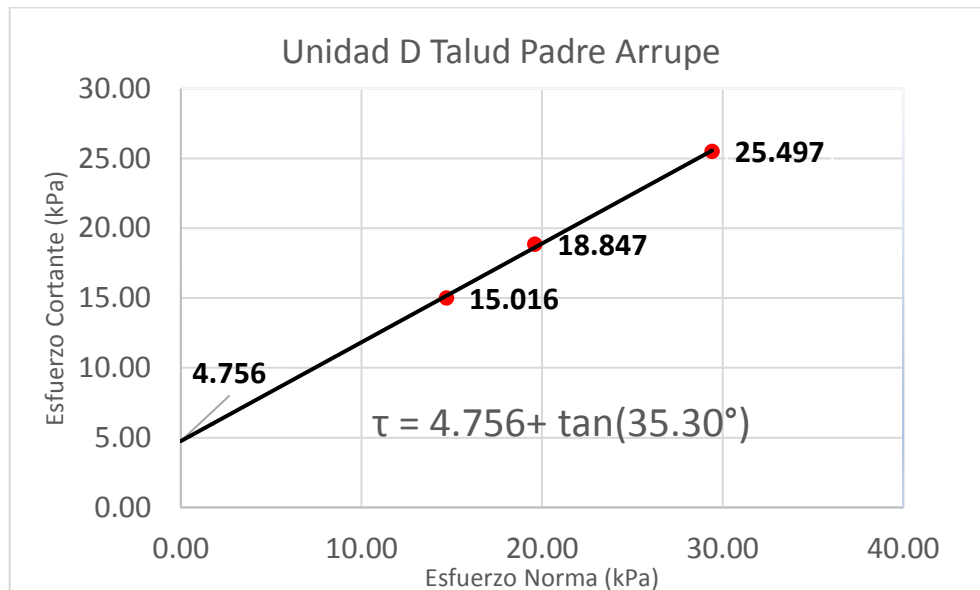


Figura No.4.25 Envoltura de esfuerzo cortante - esfuerzo normal de unidad D, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

A continuación, se presenta en la tabla No. 4.22, resumen de los resultados obtenidos de ángulo de fricción interna y cohesión de las diferentes unidades de TBJ que constituyen los taludes en estudio.

Tabla No. 4.22 Resumen de parámetros obtenidos de ensayos de corte directo del Talud Civil FIA-UES y Talud Padre Arrupe.

UNIDAD	ϕ (°)	C (kPa)
TALUD CIVIL FIA-UES		
G	31.00	14.543
F	33.70	14.308
TALUD PADRE ARRUPPE		
G	34.70	14.759
F	35.00	17.485
Ignimbrita Beta	36.90	18.142
Ignimbrita Alfa	33.60	8.159
D	35.30	4.756

Fuente: De los autores.

Obtención de otros parámetros necesarios para el análisis de estabilidad.

Para realizar la modelación de los taludes en estudio es necesario la determinación de algunas relaciones volumétricas y gravimétricas, las cuales son las siguientes:

- **Peso volumétrico seco (γ_d):** el peso volumétrico seco es obtenido a partir de la relación de peso volumétrico húmedo y la humedad de la muestra, y se define según la ecuación 4.1:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + \omega)} \quad (4.1)$$

- **Porosidad (n):** representa la proporción del volumen total de la masa ocupada por el espacio; puede variar desde $0\% \leq n \leq 100\%$, y se define según la ecuación 4.2:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s} \quad (4.2)$$

- **Relación de vacíos (e):** expresa la relación entre el volumen del espacio y el volumen de sólidos dentro del volumen de la masa total; puede variar $0 < e < \infty$, y se define según la ecuación 4.3:

$$e = \frac{n}{(1 - n)} \quad (4.3)$$

A continuación, se presenta en la tabla No. 4.23, resumen de los resultados obtenidos de los parámetros descritos anteriormente, de las diferentes unidades de TBJ que constituyen los taludes en estudio.

Tabla No. 4.23 Resumen de resultados obtenidos de relaciones volumétricas y gravimétricas, de los taludes Civil FIA-UES y Padre Arrupe.

UNIDAD	γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	n	e
TALUD CIVIL FIA-UES				
G	9.852	8.435	0.636	1.750
F	9.424	8.132	0.651	1.861
TALUD PADRE ARRUPE				
G	8.623	7.584	0.668	2.013
F	9.904	8.647	0.636	1.744
Ignimbrita Beta	12.581	11.699	0.513	1.053
E(húmedo)	15.788 ⁽¹⁾	13.091	0.438	0.778
Ignimbrita Alfa	9.297	8.218	0.627	1.684
D	8.476	7.429	0.667	2.003

Fuente: De los autores.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS TALUDES EN ESTUDIO Y VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS.

Con la información proporcionada por OPAMSS-UES, y los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para la obtención de los parámetros que son requeridos para la modelación de los taludes, se procedió a realizar un análisis y validación de la información, luego, se realizó la caracterización de los taludes en estudio.

- **Comparación y validación de presencia de unidad Beta en Talud padre Arrupe**

Para asegurar la identificación de las unidades estudiadas, A continuación, se presenta la metodología a aplicar para lograr este propósito:

- Preliminarmente se conoce en función de lo visto en campo, que posiblemente es la unidad Beta.
- De investigaciones hechas se seleccionaron los resultados de la unidad estudiada, tomando en cuenta la cercanía con los puntos de estudio.
- Para identificar la unidad se compararon las curvas granulométricas de otras investigaciones correspondiente a diferentes unidades de TBJ, según el siguiente detalle:

- Ignimbrita Beta (Valores promedio) se tomó de R. Lima, E. Miranda, G. Quintanilla, “DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE ILOPANGO” para su comparación será llamada “UNIDAD BETA: (E. Miranda)”.
- Unidad F, y Unidad E (húmedo) se tomó de W. Bautista y K. Cruz (2016), “DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)”, para su comparación se llamarán “UNIDAD F: (Bautista)” y “UNIDAD E HUMEDO: (Bautista)”

- Y las muestras proporcionadas de los autores con apoyo del trabajo de graduación de K. Henríquez, J. Rodríguez, L. Cuellar "CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS DIFERENTES UNIDADES DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)", mostrado en tabla No 4.24. identificadas como "Muestra 1-B" y "Muestra 2-B".

Tabla No. 4.24 Resultados de curvas granulométrica de posible Unidad Beta (Muestra 1-B y Muestra 2-B) y comparación de resultados de la investigación de E. Miranda para la Ignimbrita Beta y Bautista (2016) para Unidad F y Unidad E (húmedo), Talud Padre Arrupe.

No DE MALLA	UNIDAD E HUMEDO: (Bautista)		UNIDAD BETA: (E. Miranda)		UNIDAD F: (Bautista)		DIÁMETRO (mm)	MUESTRA 1-B	MUESTRA 2-B
	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa		% que pasa	% que pasa
1"	25	-	25	-	25	100	25	-	-
3/4"	19	-	19	-	19	100	19	-	-
1/2"	12.7	-	12.7	-	12.7	100	12.7	-	-
3/8"	9.53	100	9.5	-	9.53	98.65	9.5	-	-
No 4	4.75	99.96	4.75	-	4.75	95.88	4.75	-	-
No 8	2.36	99.6	2.36	-	2.36	90.98	2.36	-	-
No 10	2	99.39	2	100	2	89.85	2	100.0	100
No 16	1.18	98.3	1.18	99.68	1.18	85.85	1.18	98.6	98.2
No 30	0.6	93.33	0.6	98.7	0.6	77.84	0.6	93.0	91.5
No 50	0.3	77.01	0.3	95.23	0.3	65.97	0.3	75.8	72.2
No 100	0.15	58.52	0.15	86.72	0.15	54.19	0.15	54.6	52.5
No 200	0.075	50.07	0.075	69.04	0.075	44.7	0.075	47.1	45.9
HIDROMETRÍA	0.029	23.49	0.03142	40.93	0.029	16.97	0.031540	24.2	20.6
	0.02	20.68	0.02091	29.83	0.02	14.06	0.020362	22.1	18.4
	0.012	17.25	0.01261	17.93	0.012	11.15	0.012037	17.9	15.5
	0.009	14.44	0.00914	13.19	0.009	9.11	0.008674	15.9	13.3
	0.007	11.94	0.00652	8.45	0.007	7.46	0.006162	13.1	10.7
	0.003	7.79	0.00325	3.25	0.003	5.24	0.003133	9.3	7.4
	0.001	5.49	0.00139	0.46	0.001	3.09	0.001341	7.6	4.7
Gruesos	49.93		30.96		55.3		53.55		
% grava	0.04		0		4.12		0		
% arena	49.89		30.96		51.18		53.55		
Finos	50.07		69.04		44.7		46.45		
% limos	42.28		65.79		39.46		38.11		
% arcillas	7.79		3.25		5.24		8.34		

Total	100	100	100	100
Clasificación	Limo Arenoso	Limo Arenoso	Arena Limosa	Arena Limosa
Símbolo del grupo	ML	ML	SM	SM

Fuente: De los autores con apoyo de: R. Lima, E. Miranda, G. Quintanilla, "DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE ILOPANGO", y W. Bautista y K. Cruz (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

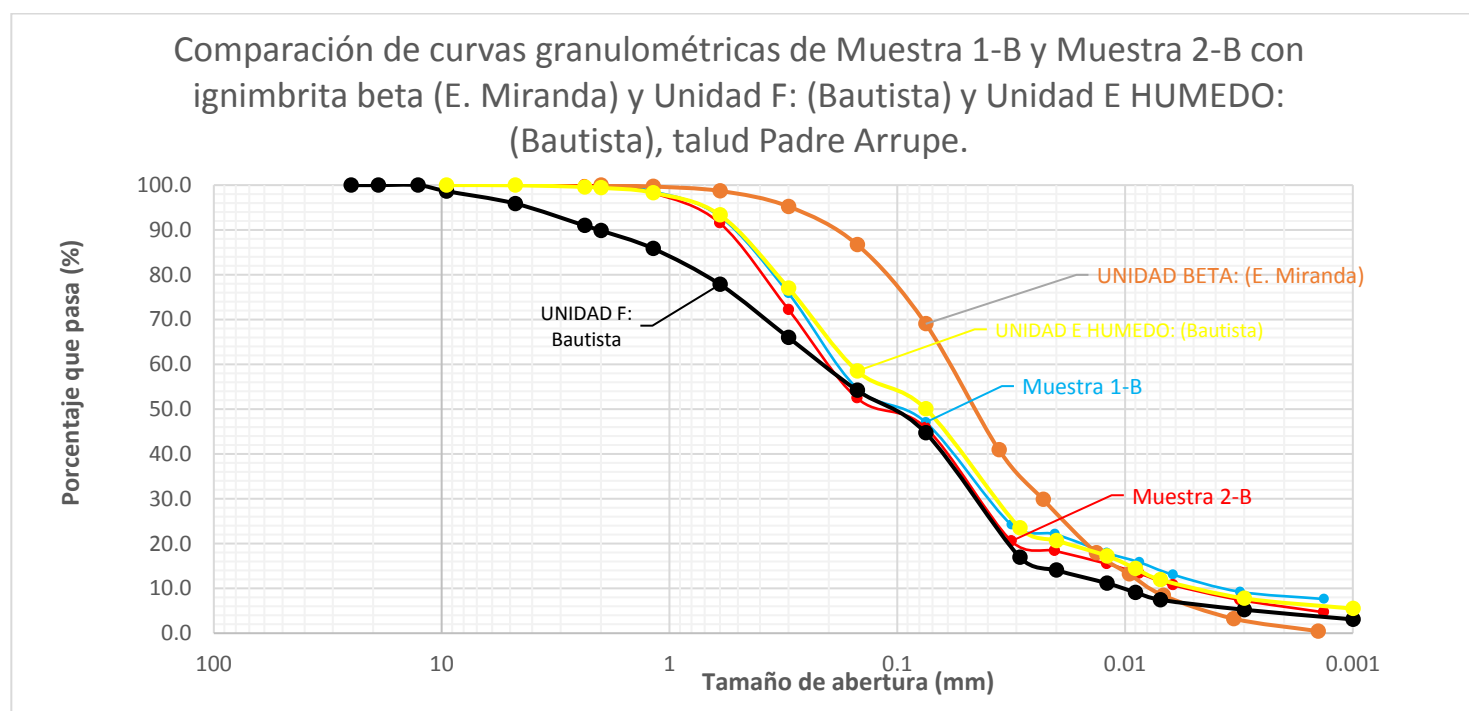


Figura No.4.26 Comparación de curvas Granulométricas promedio de Muestra 1-B y Muestra 2-B con ignimbrita beta: (E. Miranda) y Unidad F: (Bautista) y Unidad E húmedo: (Bautista), de Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores con apoyo de: R. Lima, E. Miranda, G. Quintanilla, "DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE ILOPANGO", y W. Bautista y K. Cruz (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

La curva granulométrica Muestra 1-B y Muestra 2-B, identificadas preliminarmente como Unidad Ignimbrita Beta, es clasificada como arena limosa, cuya tendencia de la curva se asemejan a las características generales de la Unidad E húmedo: (Bautista) (ver figura No.4.26), por tanto, La unidad Ignimbrita beta no está presente en talud Padre Arrupe y las Muestra 1-B y Muestra 2-B, corresponden al mismo estrato de **Unidad E (húmedo)**.

- **Comparación y validación de presencia de unidad Alfa en Talud padre Arrupe.**

De la misma manera se hace la comparación para la Unidad Alfa de talud Padre Arrupe, A continuación. Para identificar la unidad se compararon las curvas granulométricas de otras investigaciones correspondiente a diferentes unidades de TBJ, según el siguiente detalle:

- Ignimbrita alfa (Valores promedio), se tomó de R. Lima, E. Miranda, G. Quintanilla, “DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE ILOPANGO” para comparación será llamada “UNIDAD ALFA (E. Miranda)”.
- Unidad D y E húmedo se tomó de W. Bautista y K. Cruz (2016), “DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)”, en la comparación se llamará “UNIDAD D: (Bautista)”.

- Además de las muestras proporcionadas de los autores con apoyo del trabajo de graduación de K. Henríquez, J. Rodríguez, L. Cuellar "CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS DIFERENTES UNIDADES DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)", mostrado en tabla No 4.25. identificadas como "Muestra 1-A" y "Muestra 2-A".

Tabla No. 4.25 Resultados granulométricos de las Muestras 1-A y Muestras 2-A, y comparación de resultados de la Investigación de E. Miranda para la Ignimbrita Alfa y Bautista (2016) para unidad D.

No. DE MALLA	UNIDAD ALFA: (E. MIRANDA)		UNIDAD D: (BAUTISTA)		MUESTRA 1-A		MUESTRA 2-A	
	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% promedio que pasa	Tamaño promedio (mm)	% que pasa	Tamaño promedio (mm)	% que pasa
1"	25	100	25	-	25	-	25	
3/4"	19	99.76	19	-	19	-	19	
1/2"	12.7	98.98	12.7	-	12.7	-	12.7	
3/8"	9.5	96.85	9.5	100	9.5	-	9.5	
No 4	4.75	92.84	4.75	99.91	4.75	-	4.75	
No 8	2.36	-	2.36	99.6	2.36	-	2.36	
No 10	2	84.9	2	99.42	2	100.00	2	100.00
No 16	1.18	77.87	1.18	98.56	1.18	99.87	1.18	99.92
No 30	0.6	63.04	0.6	96.8	0.6	98.66	0.6	99.56
No 50	0.3	45.78	0.3	92.88	0.3	96.63	0.3	97.69
No 100	0.15	31.47	0.15	85.24	0.15	90.25	0.15	91.78
No 200	0.075	20.7	0.075	74.76	0.075	80.65	0.075	82.45
HIDROMETRÍA	0.03578	13.92	0.029	41.79	0.028606	55.71	0.029720	55.31
	0.02288	10.47	0.02	33.27	0.019303	45.76	0.020107	44.57
	0.01337	7.3	0.012	23.8	0.011900	34.56	0.012319	32.48
	0.00959	5.73	0.009	18.27	0.008786	25.85	0.009002	24.79
	0.00681	4.08	0.007	13.53	0.006328	22.11	0.006529	19.42
	0.00334	1.84	0.003	7.57	0.003200	15.89	0.003250	13.82
	0.00142	0.81	0.001	3.93	0.001341	13.63	0.001392	8.68
Gruesos	79.29		25.24		18.45			
% grava	7.16		0.09		0			
% arena	72.13		25.15		18.45			
Finos	20.73		74.76		81.55			
% limos	18.87		67.19		66.69			
% arcillas	1.84		7.57		14.86			
Total	100		100		100			

Clasificación	Arena con limo	Limo con Arena	Limo con Arena	Limo con Arena
Símbolo de grupo	SM	ML	ML	ML

Fuente: De los autores con apoyo de: R. Lima, E. Miranda, G. Quintanilla, "DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE ILOPANGO", y W. Bautista y K. Cruz (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

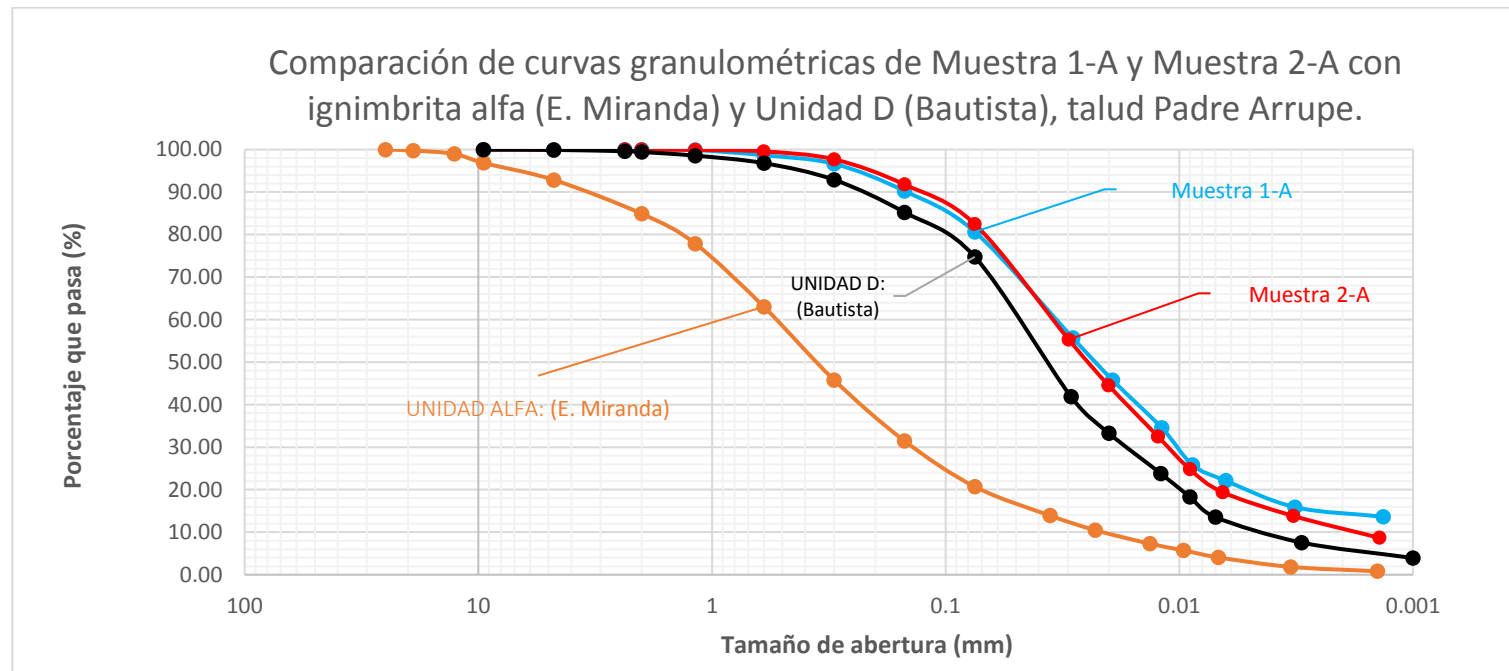


Figura No.4.27 Comparación de curvas Granulométricas promedio de Muestra 1-A y Muestra 2-A con ignimbrita alfa (E. Miranda) y Unidad D (Bautista).

Fuente: De los autores con apoyo de: R. Lima, E. Miranda, G. Quintanilla, "DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE, GRADO Y POTENCIAL DE COLAPSO DE LA TIERRA BLANCA JOVEN EN EL AREA PROXIMAL Y DISTAL DE LA CALDERA VOLCÁNICA DE ILOPANGO", y W. Bautista y K. Cruz (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

La curva granulométrica de Muestra 1-A y Muestra 2-A identificadas preliminarmente como Unidad Ignimbrita Alfa, es clasificada como Limo con Arena, cuya curva granulométrica y propiedades se asemejan a la **Unidad D: (Bautista)** (ver figura No.4.27), por tanto, la Unidad ignimbrita alfa no está presente en el talud Padre Arrupe y las muestras que fueron extraídas (Muestra 1-A y Muestra 2-A) corresponden al mismo estrato de **Unidad D.**

El resumen de las propiedades físicas y mecánicas de las unidades de TBJ que constituyen los taludes: Civil FIA-UES y Padre Arrupe, se muestran en las tablas No.4.26 y No.4.27.

Tabla No. 4.26 Resumen de propiedades físicas y mecánicas de las unidades de TBJ del talud Civil FIA-UES.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD G	UNIDAD F
Gruesos	43.05	35.89
% grava	2.46	0.75
% arena	40.59	35.14
Finos	56.95	64.11
% limos	52.3	54.2
% arcillas	4.65	9.91
Total	100	100
Color	Beige claro	Beige claro
Clasificación	Limo arenoso	Limo arenoso
Símbolo del grupo	ML	ML
Gravedad específica promedio	2.38 ⁽⁹⁾	2.41 ⁽¹⁰⁾
Ángulo de fricción interna	31.00	33.70
Cohesión (kPa)	14.543	14.308
Porosidad	0.636	0.651
Índice de vacíos	1.75	1.861
Densidad Húmeda (kN/m³)	9.852	9.424
Densidad Seca (kN/m³)	8.435	8.132
Humedad natural (%)	16.80	14.10
Espesor de unidad (m)	0.60	2.14

Fuente: De los autores, análisis granulométrico de las unidades G y F fue retomado de la investigación: *W. Bautista y K. Cruz* (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

⁽⁹⁾ y ⁽¹⁰⁾ Información obtenida de: *W. Bautista y K. Cruz* (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

Tabla No. 4.27 Resumen de propiedades físicas y mecánicas de las unidades de TBJ del talud Padre Arrupe.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD G	UNIDAD F	UNIDAD E (HUMEDO)	UNIDAD E (SECO)	UNIDAD D
Grosos	15.1	55.3	49.93	93.2	25.24
% grava	0.8	4.12	0.04	2.92	0.09
% arena	14.3	51.18	49.89	90.28	25.15
Finos	84.9	44.7	50.07	6.8	74.76
% limos	69.63	39.46	42.28	6.8	67.19
% arcillas	15.27	5.24	7.79	-	7.57
Total	100	100	100	100	100
Color	Beige claro	Beige claro	Beige oscuro	Gris claro	Beige amarillo
Clasificación	Limo con arena	Arena Limosa	Limo arenoso	Arena mal graduada con limo	Limo con arena
Símbolo del grupo	ML	SM	ML	SP-SM	ML
Gravedad específica	2.45	2.51	2.58	2.59	2.38
Ángulo de fricción interna	34.70	35.00	25.80 ⁽¹¹⁾	-	35.30
Cohesión (kPa)	14.759	17.485	15.788 ⁽¹²⁾	-	4.756
Porosidad	0.668	0.636	0.438	-	0.667
Índice de vacíos	2.013	1.744	0.778	-	2.003
Densidad Húmeda (kN/m³)	8.623	9.904	15.788 ⁽¹³⁾	-	8.476
Densidad Seca (kN/m³)	7.584	8.647	13.091	-	7.429
Humedad natural (%)	8.10	10.40	20.60	18.00	9.00
Espesor de unidad (m)	1.55	1.40	0.51	0.20	0.90

Fuente: De los autores, análisis granulométrico de las unidades G, F, E(húmedo), E(seco) y D, fue retomado de la investigación: W. Bautista y K. Cruz (2016), "DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS).

⁽¹¹⁾, ⁽¹²⁾ y ⁽¹³⁾ Información obtenida de: E. Hernández (2004), CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS Y VULCANOLÓGICAS DE LAS TEFRAS TIERRA BLANCA JOVEN, CALDERA DE ILOPANGO, EL SALVADOR.

- **Definición de la geometría de taludes en estudio.**

Para definir la geometría se realizó un levantamiento topográfico en campo, con el cual se establecieron los espesores de las posibles unidades de TBJ, la forma y las coordenadas en el plano que se utilizaron en la modelación de los taludes. En las figuras No.4.28 y No.4.29 se muestra los perfiles de los taludes:

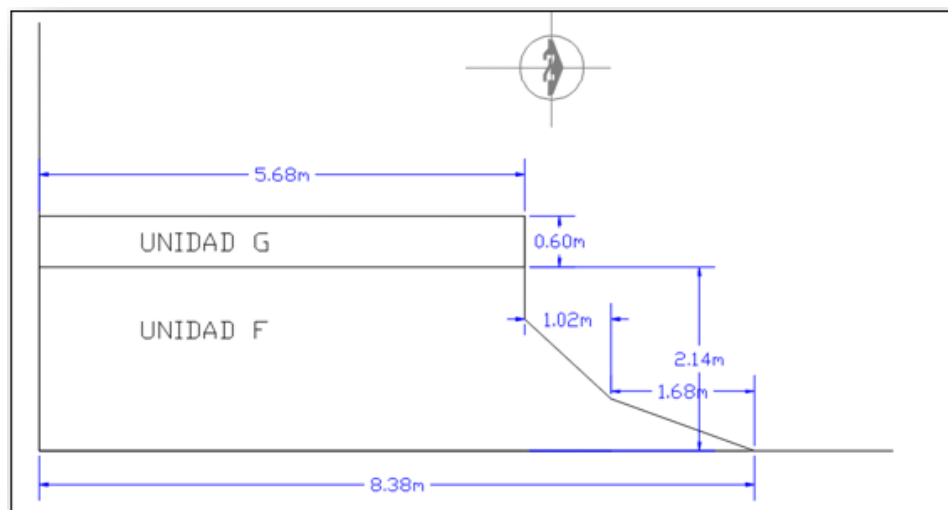


Figura No.4.28 Perfil Topográfico medido en campo del talud Civil FIA-UES.
Fuente: De los autores.

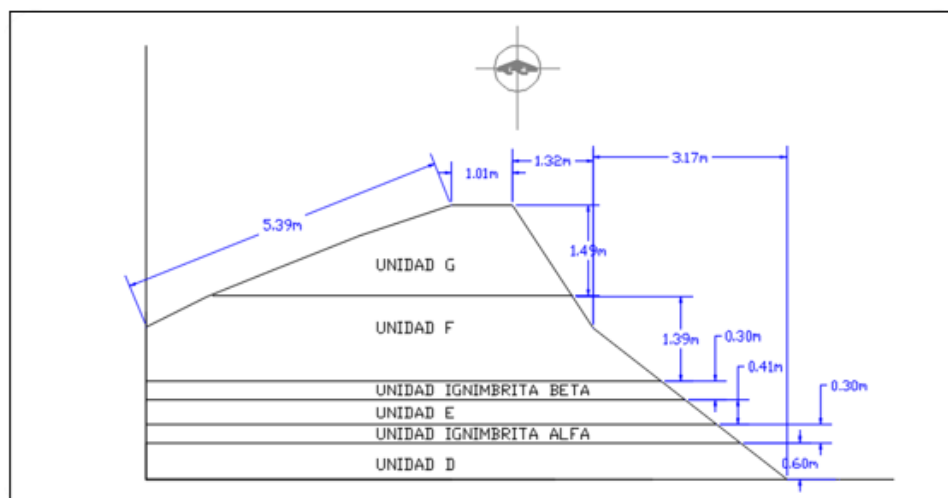


Figura No.4.29 Perfil Topográfico medido en campo del talud Padre Arrupe.
Fuente: De los autores.

A continuación, se muestran la geometría de los taludes en estudio, se asumió una inclinación de capas horizontal, debido a la limitante de no contar con sondeos que muestren la estratigrafía presente en los taludes, también se ha dividido en un conjunto de regiones para representar las unidades de TBJ, que constituyen los taludes seleccionados para esta investigación:

- Talud Civil FIA-UES (ver tabla No.4.28)
- Talud Padre Arrupe (ver tabla No.4.29), la unidad E (seco) se asumió como E(húmedo) debido a la imposibilidad de realizar ensayos de corte directo.

Tabla No. 4.28 Geometría de talud Civil FIA-UES.

GEOMETRIA DEL TALUD CIVIL FIA-UES			
Unidad G		Unidad F	
X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
0.00	2.14	0.00	0.00
0.00	2.74	0.00	2.14
5.68	2.74	5.68	2.14
5.68	2.14	5.68	1.48
		6.68	0.53
		8.38	0

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.29 Geometría de talud Padre Arrupe.

GEOMETRIA DEL TALUD PADRE ARRUPE			
Unidad G		Unidad E (húmedo)	
X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
1.10	3.01	0.00	0.9
2.00	3.44	0.00	1.61
3.50	3.91	8.40	1.61
5.00	4.18	9.30	0.90
6.00	4.56	Unidad D	

7.00	3.01	0.00	0.00
Unidad F		0.00	0.90
X(m)	Y(m)	9.30	0.90
0.00	1.61	10.47	0.00
0.00	2.52		
1.10	3.01		
7.00	3.01		
7.33	2.48		
8.40	1.61		

Fuente: De los autores.

4.6 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

En la presente sección se definirá los criterios de resistencia al corte que se utilizará para el análisis de estabilidad de taludes para suelos parcialmente saturados, además se definirán los métodos de análisis de estabilidad de taludes tanto para el criterio tradicional como el criterio de suelo parcialmente saturado que serán tomados en cuenta en la presente investigación.

- **Criterio de resistencia al corte de suelo parcialmente saturado**

En esta investigación se hace especial énfasis en el criterio propuesto por **Vanapalli**, ecuación (2.28) que se fundamenta en la normalización de la curva característica suelo-agua, y en el criterio de **Fredlund**, ecuación (2.25) el cual utiliza un factor k , dicho factor está relacionado con el índice de plasticidad del suelo. Los criterios de suelos parcialmente saturados seleccionados, son aplicables a cualquier tipo de suelo.

- **Métodos de análisis de estabilidad de taludes**

Para la presente investigación, se analizará la estabilidad de los taludes en estudio empleando tres métodos de análisis precisos para efectos de comparación entre métodos, los cuales son los siguientes:

- ✓ Métodos precisos: **Morgenstern y Price, Sarma y Spencer.**

4.7 DEFINICIÓN DE MÉTODOS PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA.

A continuación, se definirá el método de ajuste y el método de estimación de las curvas características suelo-agua, que serán empleados en la presente investigación.

- **Método de ajuste de la curva característica suelo-agua.**

Se empleará el método de ajuste de **Fredlund y Xing (1994)**, para la representación de la curva característica suelo-agua (con datos reales de succión y estimación a partir de curvas granulométricas), ya que proporciona una representación realista de la curva a altas succiones, y presenta una ecuación (2.16) de tres parámetros con mayor flexibilidad para adaptarse a una amplia gama de suelos.

- **Estimación de la curva característica suelo-agua.**

Para realizar la estimación a partir de curvas granulométricas se seleccionó la **estimación de Torres** de la curva característica suelo-agua (SWCC) utiliza las propiedades del tamaño de grano del suelo para estimar los parámetros de ajuste a , n , m , h de la ecuación de **Fredlund y Xing**. Para la utilización de este método de estimación solamente se requiere

como entrada de datos: el diámetro efectivo (es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10 % en peso del suelo) y utilizar el sistema unificado de clasificación de suelos.

4.8 MODELACION.

Para la revisión de la estabilidad de los taludes en estudio bajo los criterios establecidos, se emplearon los softwares especializados SVSoils y SVSlope (guía de uso de ambos softwares se muestran en anexo No.2), que se utilizaron para la representación de la curva característica suelo-agua y realizar el análisis de estabilidad de taludes respectivamente.

Se considero para la representación de la curva característica suelo-agua de cada una de las unidades de TBJ que constituyen los taludes, lo siguiente:

- Para la representación de la curva característica suelo-agua a partir de medición directa de succión, se empleó el método de ajuste de Fredlund y Xing.

Para lo cual, fue necesario la obtención de las siguientes propiedades del suelo de cada unidad de TBJ que constituyen los taludes en estudio:

Propiedades índices: Gravedad específica, porosidad, índice de vacíos, densidad húmeda.

Resultados de succión: Los valores de succión que se muestran en la sección 4.2 del presente capítulo, fueron retomados de la investigación:

A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of

unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador”, (ASTM D5298: método del papel filtro).

- Para la estimación indirecta a partir de granulometría de la curva característica suelo-agua, se empleó el método de ajuste de Fredlund y Xing y se establece el método de estimación de Torres.

Para lo anterior se retomaron los resultados obtenidos del análisis granulométrico de las unidades de TBJ que constituyen el Talud Padre Arrupe y Talud Civil del trabajo de graduación: W. Bautista y K. Cruz (2016), “DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DETERIORO EN TALUDES CONSTITUIDOS POR MATERIALES PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)”, y se realizaron los ensayos granulométricos del suelo para las unidades ignimbrita beta e ignimbrita alfa del talud Padre Arrupe en colaboración con el trabajo de graduación "CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS DIFERENTES UNIDADES DE LA TIERRA BLANCA JOVEN (TBJ) EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)", K. Henríquez, J. Rodríguez, L. Cuellar.

Consideraciones a tomar en cuenta para el análisis dinámico de la estabilidad de taludes:

Para el análisis dinámico se consideró el Método Seudo estático, tal como lo recomienda la Norma Técnica Para Diseño De Cimentaciones y Estabilidad de Taludes de El Salvador, donde las cargas del sismo son simuladas como cargas estáticas horizontales y verticales,

para dichas cargas se les aplicó el factor de 0.16 en sentido horizontal y 0.0 en sentido vertical correspondiente a zona I.

Para cumplir con los objetivos planteados, a continuación, se presentan serie de comparaciones bajo las condiciones: gravedad y gravedad más sismo, que se detallan a continuación:

1. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes considerando fallas de tipo circular y no circular.

Se determinó la influencia que presenta en un talud la succión considerando diferentes formas de falla, bajo el criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados, con el fin de conocer como varia el factor de seguridad:

- a. Falla circular sin considerar succión y falla circular considerando succión como presión de poros.
- b. Falla no circular sin considerar succión y falla no circular considerando succión como presión de poros.

Para determinar la incidencia de la succión como presión de poros de agua, se realizó la modelación del criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados asumiendo una superficie de falla: circular y no circular, sin considerar la succión ($\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$, se usara $u_w = 0$) y comparando los resultados obtenidos con la modelación del criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb asumiendo una superficie de falla: circular y no circular, considerando puntos de succión ($\tau = c' +$

$(\sigma - u_w) \tan \phi'$, se usara $u_w = \text{succión}$), dichos puntos fueron obtenidos de la investigación: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador". Para la obtención de los puntos de succión como presión de poros a utilizados en el análisis se procedió de la siguiente manera:

- a) Se consideraron los contenidos de humedad del suelo correspondiente a la época lluviosa debido a que, representa la temporada en la cual los taludes presentan mayor grado de susceptibilidad, por lo tanto, representa la condición más desfavorable para realizar el análisis de estabilidad, se utilizaron los registros del día 18 de junio para ambos taludes (ver figura No.4.30 y figura No.4.31), registradas por los dispositivos TMS3⁽¹⁴⁾ instalados en diferentes puntos del talud.

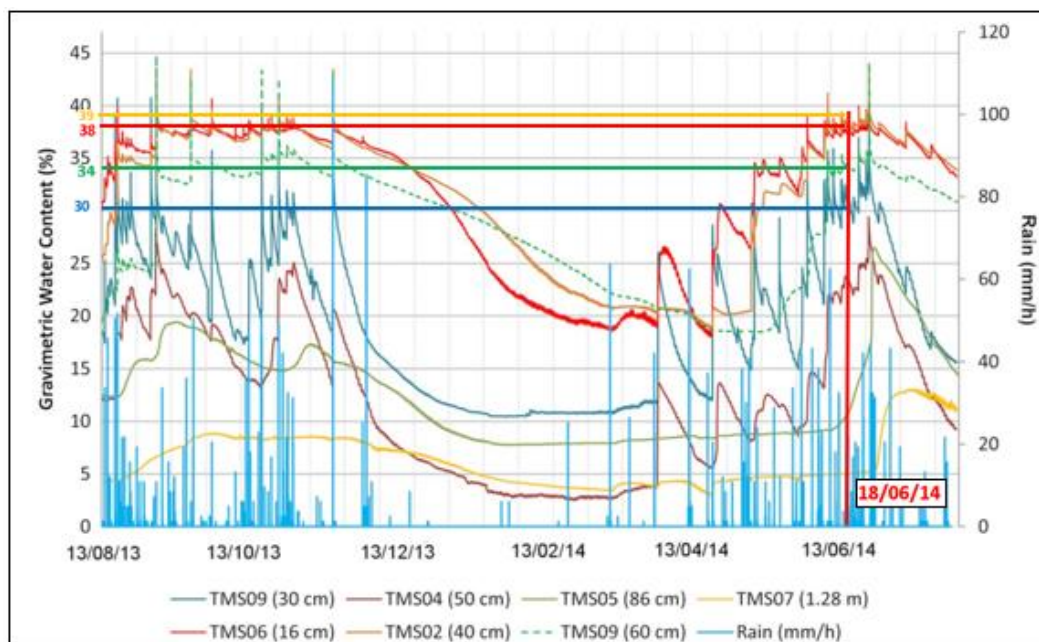


Figura No.4.11 Registro de Contenidos gravimétricos de agua, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

⁽¹⁴⁾ si se requiere más información sobre los dispositivos TMS3, consulta: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador", pág.6.

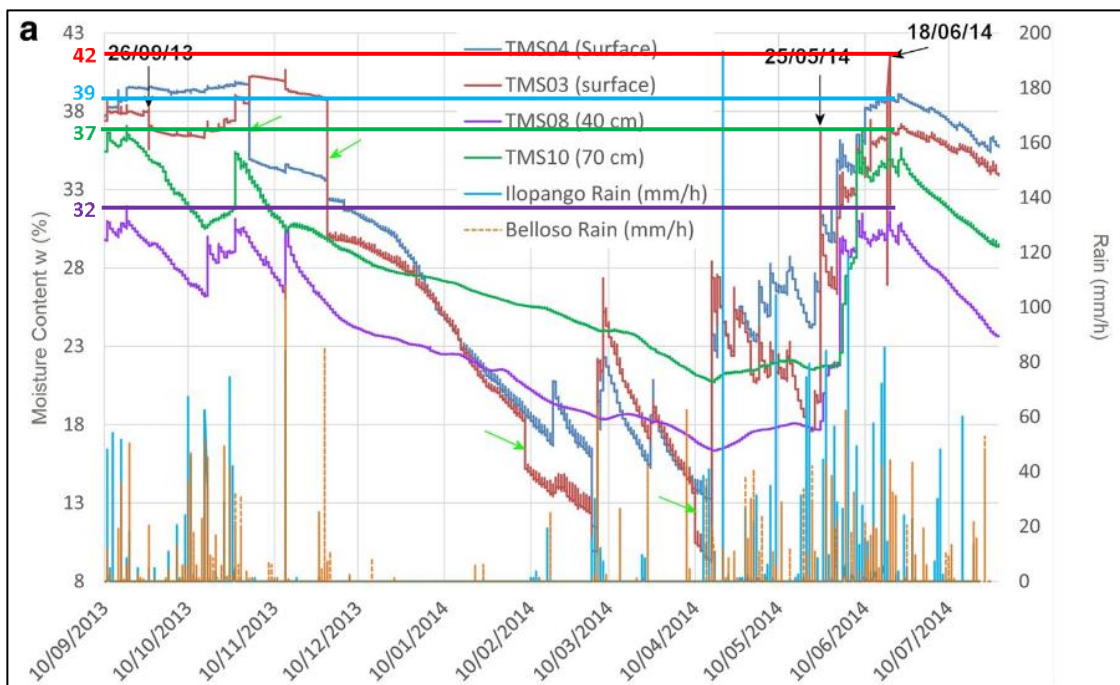


Figura No.4.12 Registro de Contenidos gravimétricos de agua, Talud Padre Arrupe.

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

- b) Se utilizó las curvas características suelo-agua generadas a partir de los datos obtenidos con el tensiómetro (Chávez 2016) para obtener los valores de los puntos de succión correspondientes a cada humedad, lo anterior se realizó de la siguiente manera: con los registros de humedad, en el eje de las ordenadas se ubica el valor de humedad, luego se trazó una línea horizontal hasta interceptar la curva característica suelo-agua, en el punto donde se intercepta, se trazó una línea vertical hasta interceptar el eje de las abscisas de esta forma se obtiene el valor de succión correspondiente al contenido de humedad de dicho punto (ver figura No.4.32).

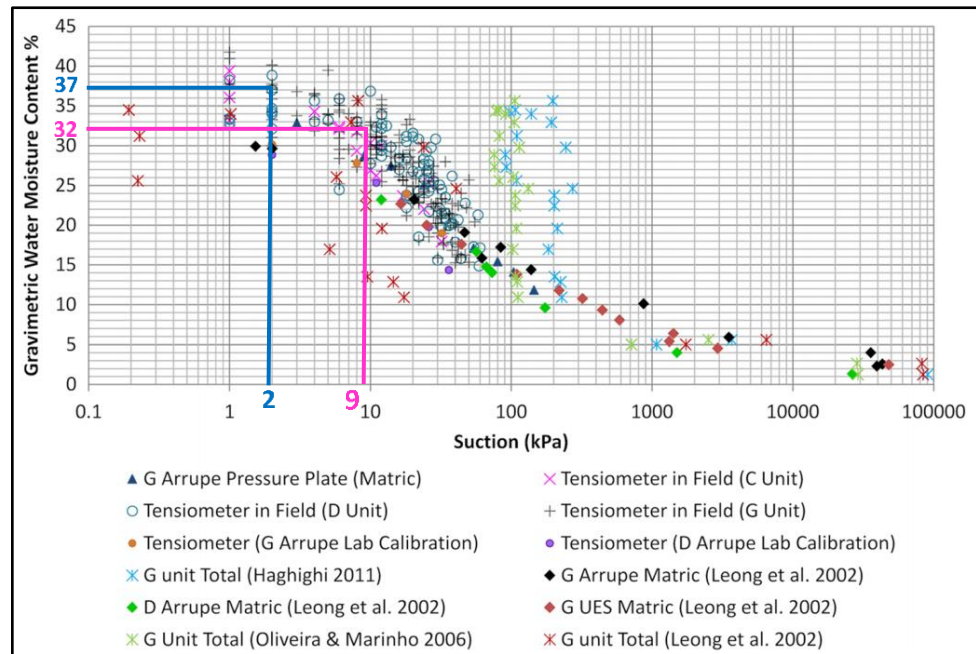


Figura No.4.13 Las mediciones de succión matricial y total para TBJ modificadas de Chávez et al. (2013).

Fuente: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

Los valores de humedad y succión utilizados para cada talud, se muestran en la tabla No.4.30, así como la ubicación medida desde la cabeza al pie del talud y en la figura No.4.33 se muestra la ubicación de dispositivos TMS3 en los taludes:

TALUD CIVIL				TALUD PADRE ARRUPE			
Ubicación (Y)	Unidad	Humedad (%)	Succión (Kpa)	Ubicación (Y)	Unidad	Humedad (%)	Succión (Kpa)
0.16	G	38.0	4.0	0.40	G	32.0	9.0
0.40	G	39.0	1.0	0.70	G	37.0	2.0
0.60	G	34.0	8.0	1.00	G	42.0	0.0
1.74	F	30.0	15.0	1.25	G	38.0	2.0
				2.26	F	30.0	10.0
				4.26	D	28.0	16.0

Tabla No. 4.30 Valores de succión utilizados.

Fuente: De los autores con apoyo de la investigación: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

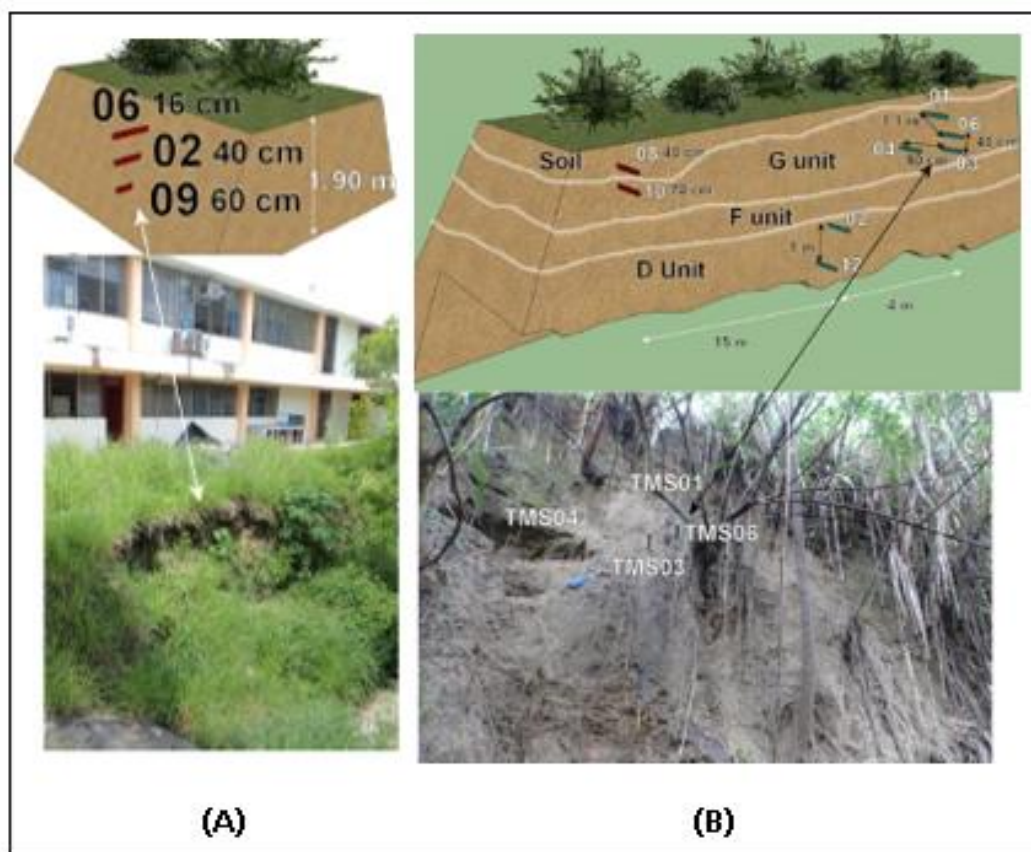


Figura No.4.14 Ubicación de dispositivos TMS3 en los taludes: (A) Talud Civil FIA-UES, (B) Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores con apoyo de la investigación: A. Chávez, J. Landaverde, R. López (2016), "Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador".

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los taludes en estudio:

- **Talud Civil FIA-UES.**

En la tabla No.4.31, se muestran los valores de factor de seguridad de los diferentes métodos de análisis, considerando una superficie de falla circular, bajo las condiciones de gravedad y gravedad más sismo. La figura No.4.34, se muestran las superficies de falla críticas circulares generadas por el método de Morgenstern y Price: (A) sin considerar

puntos de succión como presión de poros y (B) considerando los puntos de succión como presión de poros.

Tabla No. 4.31 Factores de seguridad considerando una superficie de falla circular, Talud Civil FIA-UES.

MÉTODOS	FACTOR DE SEGURIDAD (FALLA CIRCULAR)			
	Gravedad		Gravedad más Sismo	
	Sin Puntos de Succión	Con Puntos de Succión	Sin Puntos de Succión	Con Puntos de Succión
Morgenstern y Price	6.143	1.899	4.810	1.889
Sarma	6.145	1.912	4.810	1.898
Spencer	6.230	3.576	4.810	3.551

Fuente: De los autores.

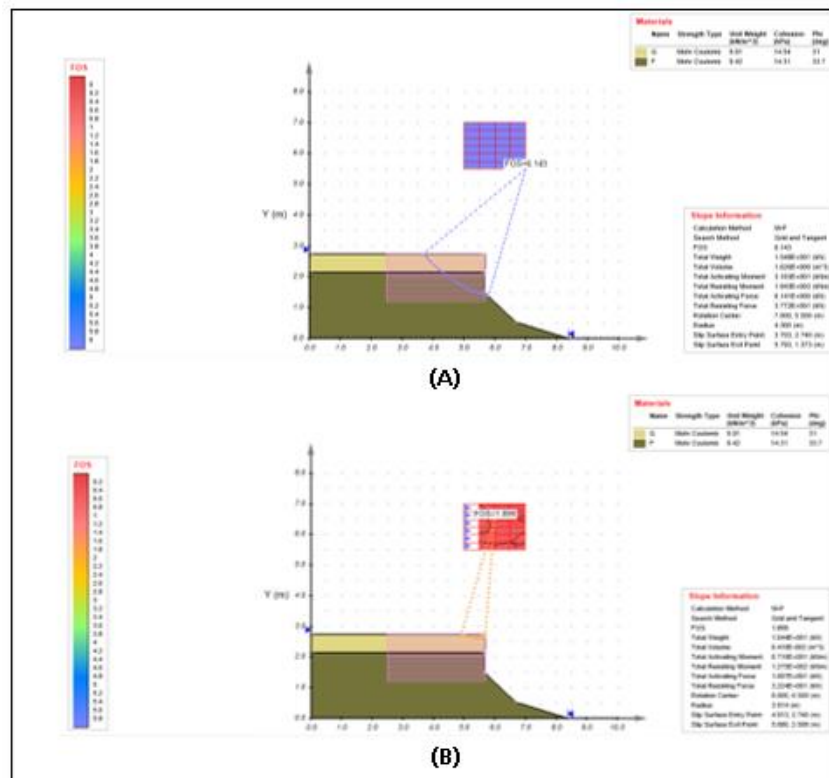


Figura No.4. 15 Superficie de falla crítica circular generada por el método de Morgenstern y Price, (A) sin considerar puntos de succión y (B) considerando puntos de succión, condición gravedad, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

En la tabla No.4.32, se muestran los valores de factor de seguridad de los diferentes métodos de análisis, considerando una superficie de falla no circular, bajo las condiciones de gravedad y gravedad más sismo.

De las figuras No.4.35 y No.4.36, se observan las superficies de falla no circulares generadas por el método de Morgenstern y Price, para la condición de gravedad.

Tabla No. 4.32 Factores de seguridad, superficie de falla no circular, Talud Civil FIA-UES.

MÉTODOS	FACTOR DE SEGURIDAD (FALLA NO CIRCULAR)			
	Gravedad		Gravedad más Sismo	
	Sin Puntos de Succión	Con Puntos de Succión	Sin Puntos de Succión	Con Puntos de Succión
Morgenstern y Price	5.190	1.543	4.313	1.535
Sarma	5.060	1.404	4.271	1.396
Spencer	5.476	2.341	4.401	2.328

Fuente: De los autores.

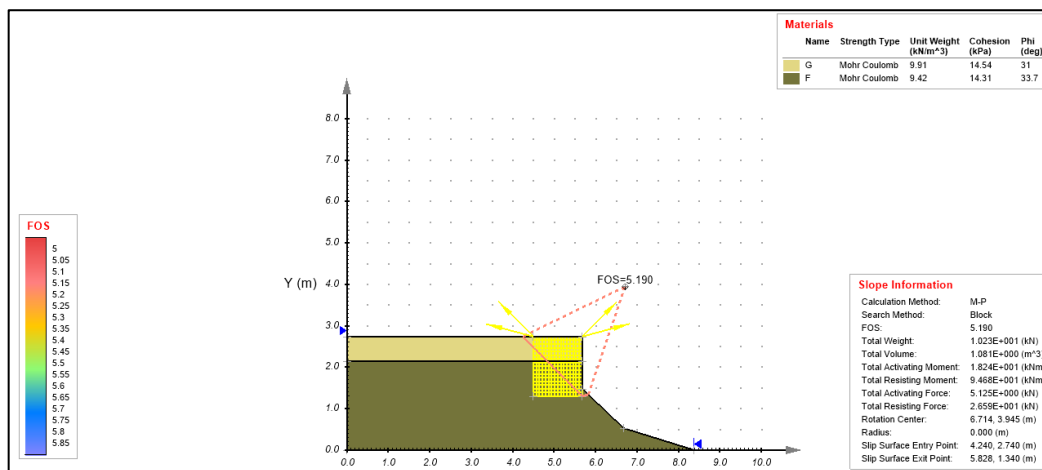


Figura No.4. 16 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Morgenstern y Price, sin considerar puntos de succión, condición gravedad, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

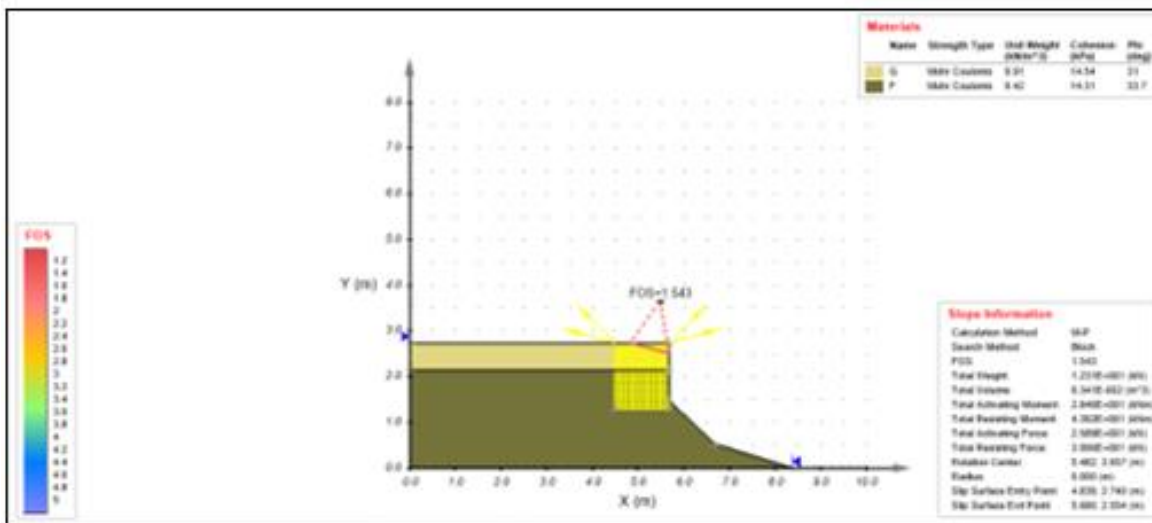


Figura No.4.17 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Morgenstern y Price, considerando puntos de succión, condición gravedad, Talud Civil FIA-UES.
Fuente: De los autores.

- **Talud Padre Arrupe**

En las tablas No.4.33 y No.4.34, se muestran los resultados obtenidos de factor de seguridad, asumiendo superficies de falla circular y no circular, para ambos casos considerando las condiciones: gravedad y gravedad más sismo.

En las figuras No.4.37 y No.4.38, se presenta las superficies de falla críticas circular y no circular generadas por el método de Sarma para la condición de gravedad más sismo.

Tabla No. 4.33 Factores de seguridad considerando una superficie de falla circular, Talud Padre Arrupe.

MÉTODOS	FACTOR DE SEGURIDAD (FALLA CIRCULAR)			
	Gravedad		Gravedad más Sismo	
	Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros	Sin Puntos de Succión presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros
Morgenstern y Price	5.159	2.287	4.175	2.232
Sarma	5.156	2.405	4.165	2.351
Spencer	5.162	2.997	4.556	2.826

Fuente: De los autores.

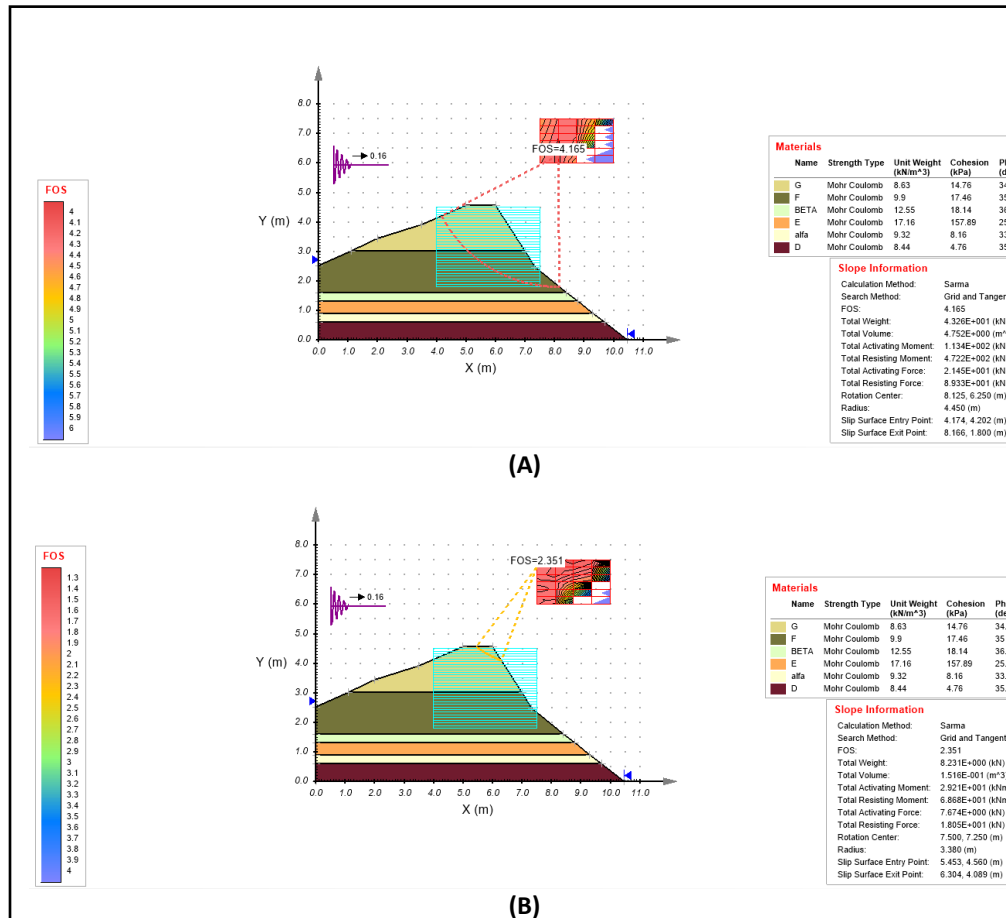


Figura No.4.18 Superficie de falla crítica circular generada por el método de Sarma, (A) sin considerar puntos de succión como presión de poros y (B) considerando puntos de succión como presión de poros, condición gravedad más sismo, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

Tabla No. 4.44 Factores de seguridad considerando una superficie de falla no circular, Talud Padre Arrupe.

MÉTODOS	FACTOR DE SEGURIDAD (FALLA NO CIRCULAR)			
	Gravedad		Gravedad más Sismo	
	Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros	Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros
Morgenstern y Price	5.120	1.953	3.956	1.923
Sarma	5.090	2.059	3.981	1.018
Spencer	5.135	2.479	4.367	2.410

Fuente: De los autores.

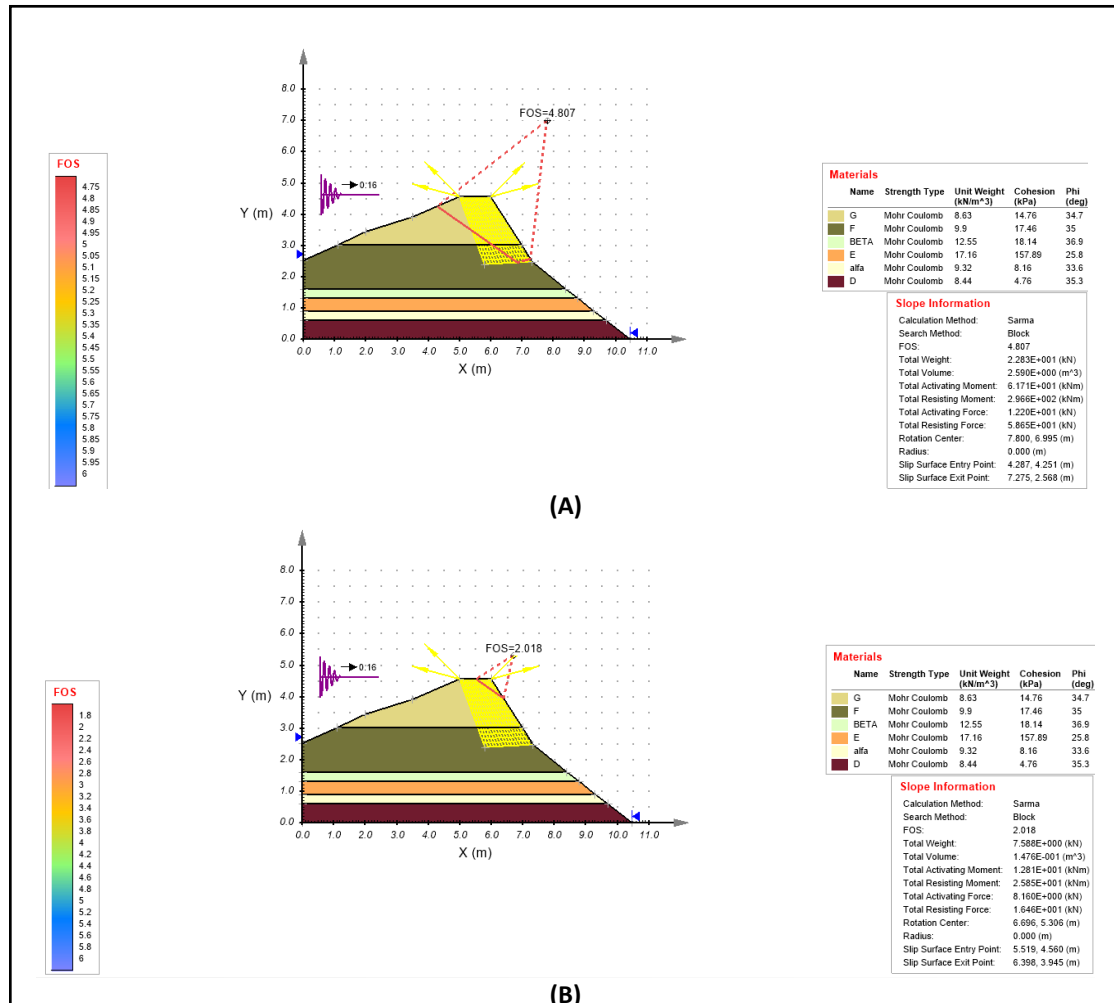


Figura No.4.19 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Sarma, (A) sin considerar puntos de succión como presión de poros y (B) considerando puntos de succión como presión de poros, condición gravedad más sismo, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

2. Determinación de la influencia de los criterios de resistencia al corte de Suelos

Parcialmente Saturados contra el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados.

Se realizó las modelaciones utilizando los criterios de resistencia al corte de suelos

parcialmente saturados: de Fredlund $\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \theta_d^k \tan \phi'$

(2.26) y de Vanapalli $\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \theta_n \tan \phi'$ (2.28) (para estos análisis se utilizó la curva característica suelo-agua obtenida indirectamente a partir de estimaciones) comparando los resultados obtenidos con la modelación del criterio de resistencia al corte de Mohr-coulomb para suelos saturados $\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$, se usara la succión = u_w , para las modelaciones bajo las condiciones antes descritas, se asumió una superficie de falla no circular y se consideraron los puntos de succión como presión de poros empleados en la etapa anterior para todos los análisis.

A continuación, se presentan los resultados de factor de seguridad obtenidos de cada talud:

- **Talud Civil FIA-UES.**

En la tabla No.4.35, se muestran los valores de factor de seguridad obtenidos a partir de las modelaciones de los criterios de resistencia al corte: Mohr-Coulomb para suelos saturados y Suelos Parcialmente saturados, considerando una superficie de falla no circular, bajo las condiciones de gravedad y gravedad más sismo.

De la figura No.4.39, se observa las superficies de falla no circulares generadas por el método de Sarma, para la condición de gravedad más sismo.

Tabla No. 4.55 Factores de seguridad con criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados y suelos parcialmente saturados, considerando una superficie de falla no circular, Talud Civil FIA-UES.

CRITERIO DE RESISTENCIA AL CORTE	FACTOR DE SEGURIDAD					
	GRAVEDAD			GRAVEDAD MÁS SISMO		
		Sarma	Spencer		Sarma	Spencer

	Morgenstern y Price			Morgenstern y Price		
Mohr-Coulomb	1.543	1.404	2.341	1.535	1.396	2.328
Vanapalli	1.562	1.484	2.512	1.554	1.477	2.498
Fredlund	1.559	1.449	2.447	1.551	1.442	2.434

Fuente: De los autores.

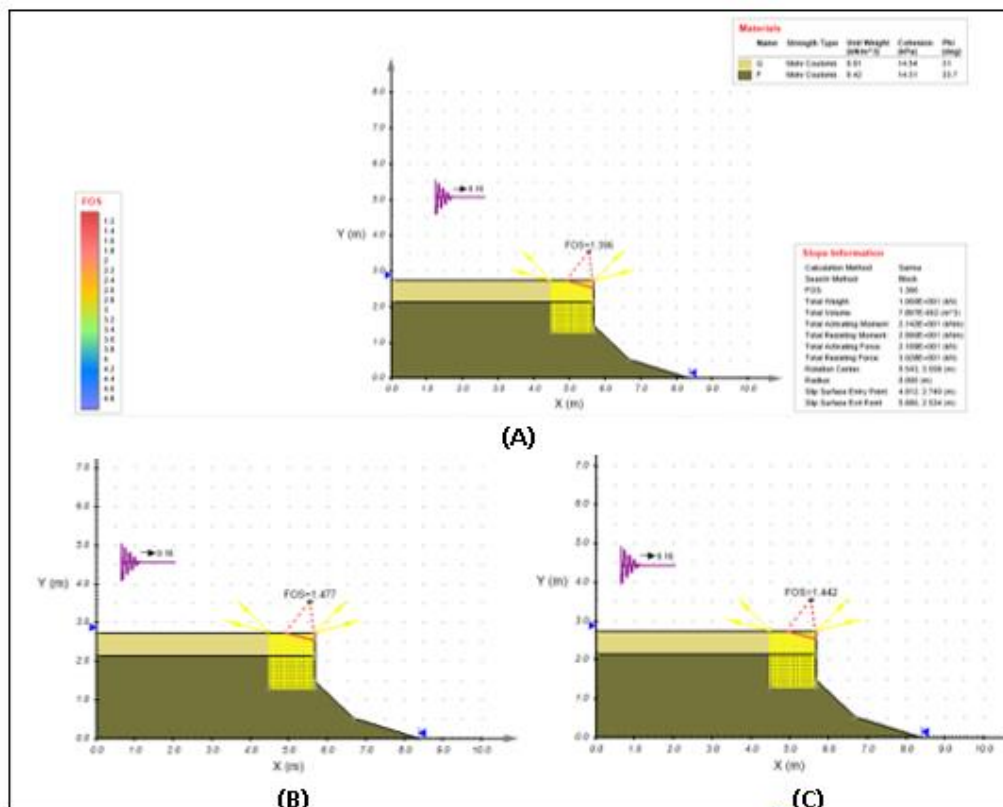


Figura No.4.20 Superficies de falla crítica no circular generadas por el método de Sarma, (A) Criterio Mohr-Coulomb, (B) Criterio de Fredlund y (C)Criterio de Vanapalli, condición gravedad más sismo, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

- **Talud Padre Arrupe**

En la tabla No.4.36, se muestran los valores de factor de seguridad obtenidos a partir de las modelaciones de los criterios de resistencia al corte: Mohr-Coulomb para suelos

saturados y Suelos Parcialmente saturados, y en la figura No.4.40, se presentan las superficies de falla críticas generadas por el método de Sarma.

Tabla No. 4.66 Factores de seguridad con criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados y suelos parcialmente saturados, considerando una superficie de falla no circular, Talud Padre Arrupe.

CRITERIO DE RESISTENCIA AL CORTE	FACTOR DE SEGURIDAD					
	GRAVEDAD			GRAVEDAD MÁS SISMO		
	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer
Mohr-Coulomb	1.953	2.059	2.479	1.923	2.018	2.410
Vanapalli	2.712	2.947	3.361	2.608	2.877	3.288
Fredlund	2.649	2.889	3.206	2.504	2.820	3.137

Fuente: De los autores.

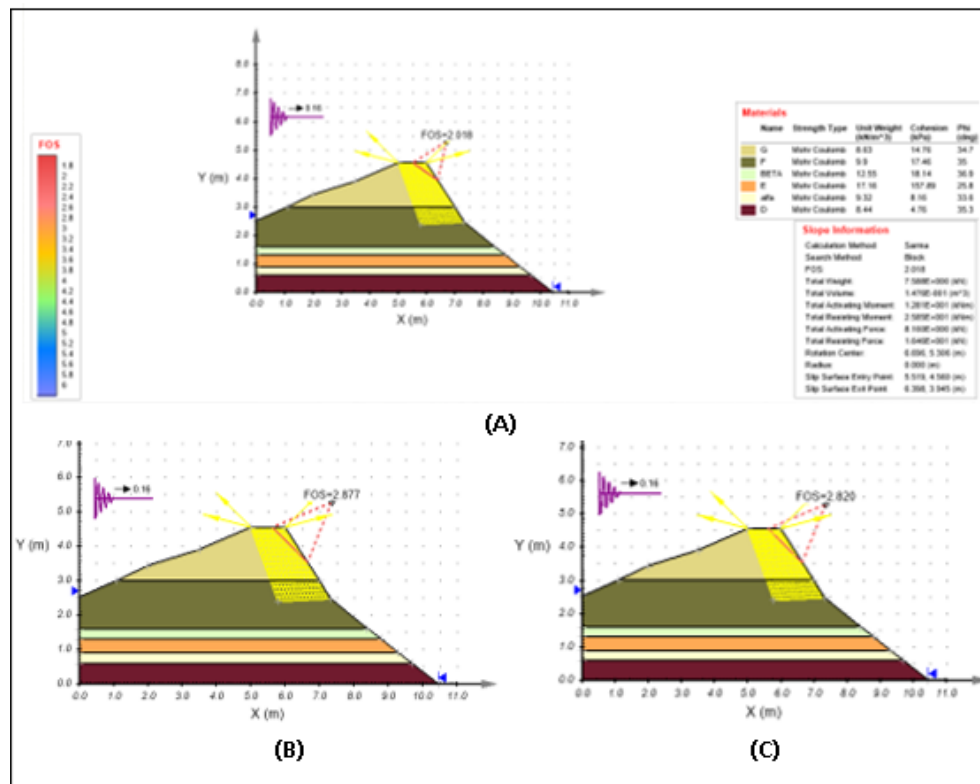


Figura No.4.21 Superficies de falla críticas no circular generadas por el método de Sarma, (A) Criterio de Mohr-Coulomb, (B) Criterio de Fredlund y (C) Criterio de Vanapalli, condición gravedad más sismo, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

3. Determinación de la influencia del procedimiento empleado para la obtención de la curva característica suelo-agua utilizados en los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados.

Se realizó la modelación de los criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados: Fredlund $\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\theta_d^k \tan\phi'$ (2.26) y Vanapalli $\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\theta_n \tan\phi'$ (2.28), se asumió una superficie de falla no circular y se consideraron los puntos de succión como presión de poros antes descritos en el numeral No 1, utilizando el procedimiento de medición directa de succión y de estimación indirecta a partir de granulometría para obtener la curva característica suelo-agua.

Para realizar la comparación de factores de seguridad entre procedimientos de obtención de dicha curva y definir la opción más recomendable para realizar el análisis de estabilidad de taludes.

En el caso del talud Civil FIA-UES se asumió que estaba constituido por la unidad G de TBJ en todo el cuerpo del talud (ver Figura No.4.41), debido a que se cuenta solamente con curvas características suelo-agua de la unidad G de la TBJ.

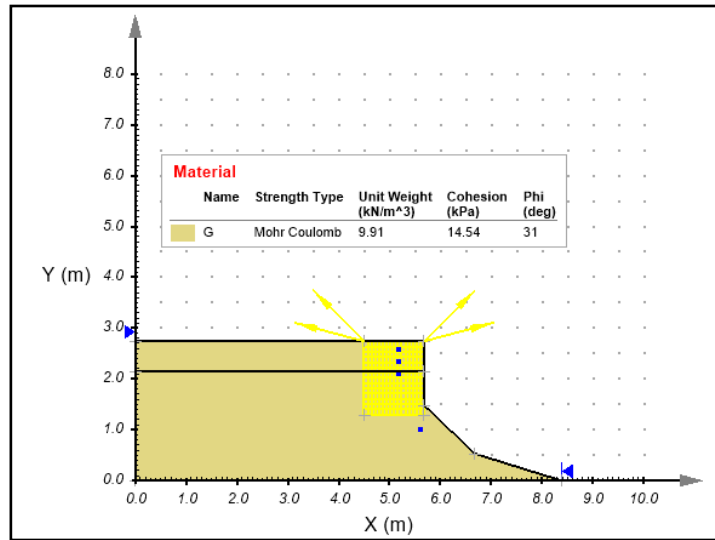


Figura No.4.22 Condición inicial del Talud Civil FIA-UES para la modelación con criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados.
Fuente: De los autores.

Para el talud Padre Arrupe se asumió que estaba constituido por dos unidades de TBJ (unidad G y Unidad D), ya que se contaban únicamente con curvas características suelo-agua de dichas unidades. En la figura No.4.42, se muestra la condición inicial del talud al realizar las modelaciones.

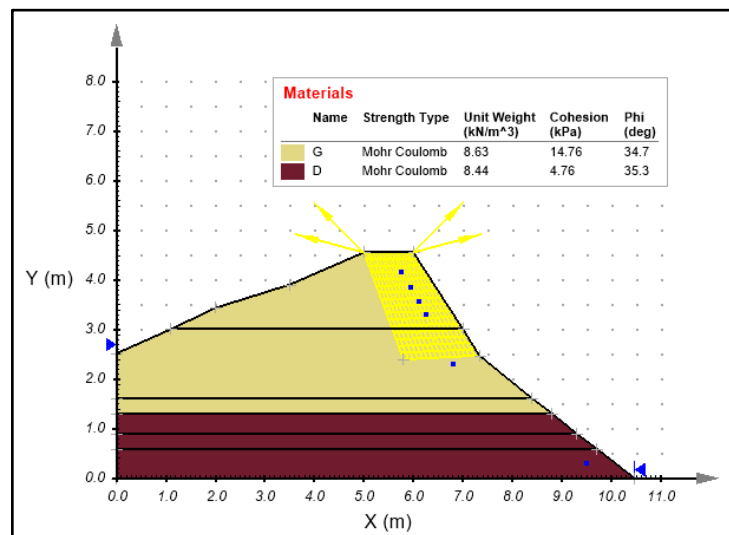


Figura No.4.23 Condición inicial del Talud Padre Arrupe para la modelación con criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados.
Fuente: De los autores.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

- **Talud Civil FIA-UES.**

En la tabla No.4.37, se muestran los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas de los criterios de resistencia al corte para suelos parcialmente saturados, utilizando los procedimientos de obtención de la curva característica suelo-agua: medición indirecta y directa de succión. Y en las figuras No 4.43 y No.4.44, se muestran superficies de falla críticas generadas por el método de Morgenstern y Price, utilizando medición directa de succión, para condición de gravedad.

Tabla No. 4.77 Factores de seguridad de modelaciones con criterios de suelos parcialmente saturados, considerando curva característica suelo-agua a partir de estimación y medición directa de succión, Talud Civil FIA-UES.

CRITERIO DE RESISTENCIA AL CORTE	FACTOR DE SEGURIDAD					
	GRAVEDAD			GRAVEDAD MÁS SISMO		
	Medición Indirecta: Estimación					
	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer
Vanapalli	1.562	1.484	2.512	1.554	1.477	2.498
Fredlund	1.559	1.449	2.447	1.551	1.442	2.434
	Medición Directa de Succión					
Vanapalli	1.569	1.549	2.637	1.561	1.541	2.623
Fredlund	1.569	1.547	2.635	1.561	1.539	2.621

Fuente: De los autores.

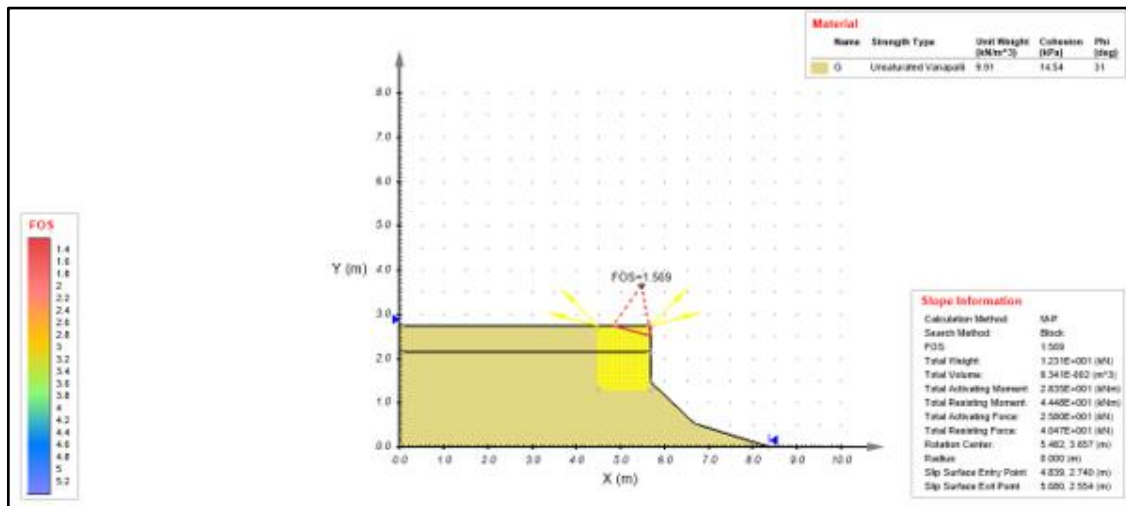


Figura No.4.24 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Morgenstern y Price, para el criterio de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados de Fredlund, utilizando medición directa de succión, condición gravedad, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

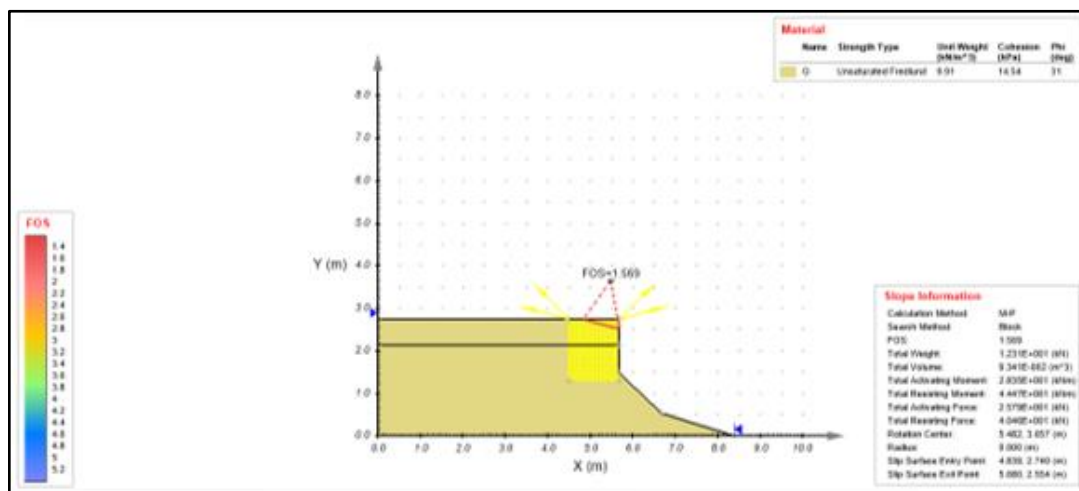


Figura No.4.25 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Morgenstern y Price, para el criterio de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados de Vanapalli, utilizando medición directa de succión, condición gravedad, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

- **Talud Padre Arrupe**

En la tabla No.4.38, se muestran los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas de los criterios de resistencia al corte para suelos parcialmente saturados.

En las figuras No 4.45 y No.4.46, se muestran superficies de falla críticas generadas por el método de Sarma, utilizando medición directa de succión, para condición de gravedad más sismo.

Tabla No. 4.88 Factores de seguridad de modelaciones con criterios de suelos parcialmente saturados, considerando curva característica suelo-agua a partir de estimación y medición directa de succión, Talud Padre Arrupe.

CRITERIO DE RESISTENCIA AL CORTE	FACTOR DE SEGURIDAD					
	GRAVEDAD			GRAVEDAD MÁS SISMO		
	Medición Indirecta: Estimación					
	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer
Fredlund	2.712	2.967	3.361	2.608	2.877	3.288
Vanapalli	2.649	2.889	3.206	2.504	2.821	3.137
Medición Directa de Succión						
Fredlund	2.820	3.055	3.634	2.720	2.982	3.555
Vanapalli	2.717	3.053	3.625	2.587	2.980	3.546

Fuente: De los autores.

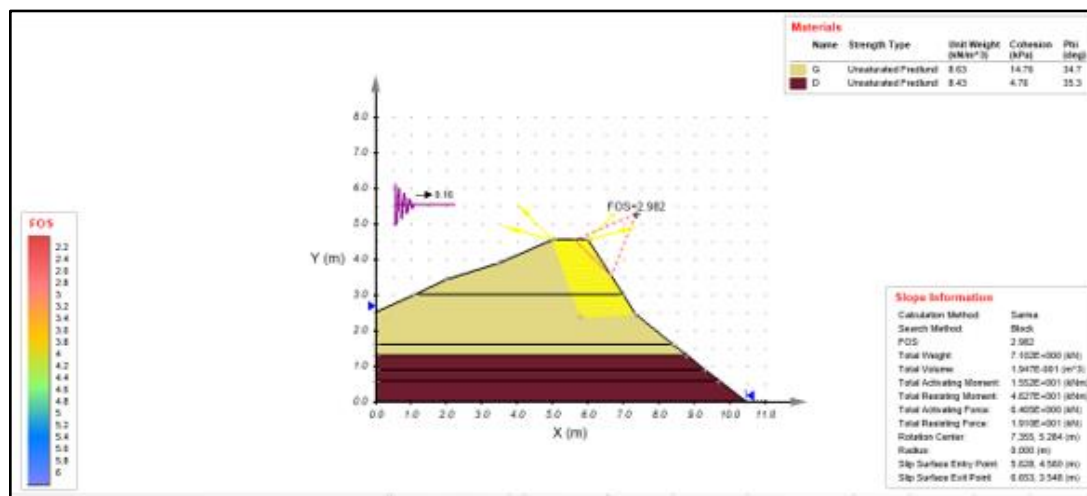


Figura No.4.26 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Sarma, para el criterio de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados de Fredlund, utilizando medición directa de succión, condición gravedad más sismo, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

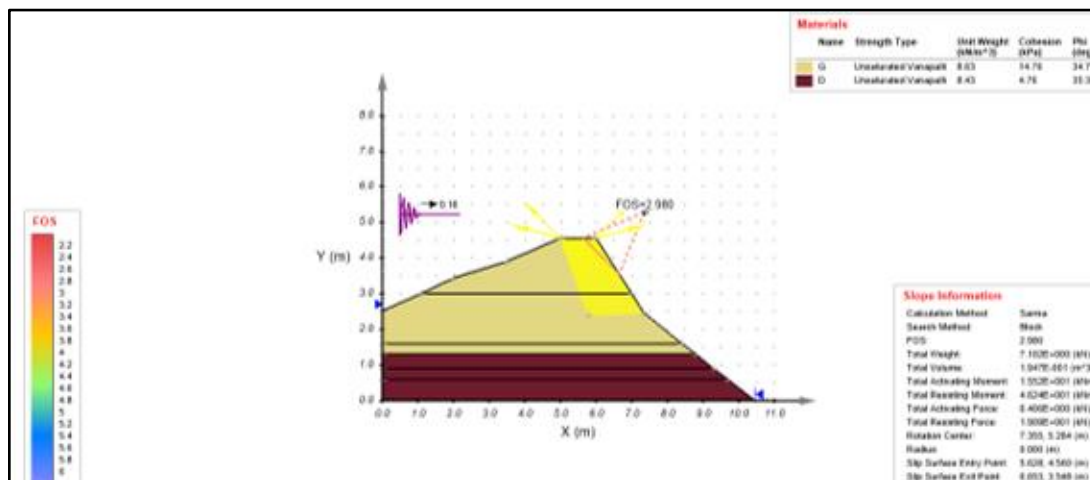


Figura No.4.27 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Sarma, para el criterio de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados de Vanapalli, utilizando medición directa de succión, condición gravedad más sismo, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

4. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes de acuerdo a la estación del año: época lluviosa contra época seca.

Adicionalmente, se realizó la modelación del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados $\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi'$, se usara la succión = μ , asumiendo una superficie de falla no circular y considerando la condición de gravedad más sismo, utilizando los puntos de succión como presión de poros correspondientes a la época lluviosa descritos en el numeral No 1 y puntos de succión correspondientes a la época seca, dichos puntos se muestran en la tabla No.4.39, esta modelación se realizó solamente para el talud Civil FIA-UES.

Tabla No.4.39 Valores de succión utilizados, talud Civil FIA-UES.

TALUD CIVIL			
UBICACIÓN (Y)	UNIDAD	HUMEDAD (%)	SUCCIÓN (kPa)
0.16	G	18.0	30.0
0.40	G	20.0	25.0
0.60	G	20.0	25.0
1.74	F	12.0	300.0

Fuente: De los autores.

A continuación, en la tabla No.4.40, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla No.4.40 Factores de seguridad de modelaciones con criterio de Mohr-Coulomb, considerando puntos de succión como presión de poros para la época lluviosa y época seca, para la condición de gravedad más sismo, talud Civil FIA-UES.

MÉTODOS	FACTOR DE SEGURIDAD	
	Gravedad más sismo	
	Época Lluviosa	Época Seca
Morgenstern y Price	1.535	5.404
Sarma	1.396	8.219
Spencer	2.328	6.905

Fuente: De los autores.

CAPÍTULO No.5

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se presenta el análisis e interpretación de los resultados obtenidos a partir de los diversos análisis de estabilidad de taludes realizados.

El análisis de estabilidad propuesto se realizó con el programa SVSLOPE. Se consideró un talud bidimensional de sección típica, se realizó el análisis de los diferentes criterios descritos en el capítulo No.4, dichos criterios son los siguientes:

1. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes considerando fallas de tipo circular y no circular, para el cual se utilizó el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados.
2. Determinación de la influencia de los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados contra el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados.
3. Determinación de la influencia del procedimiento empleado para la obtención de la curva característica suelo-agua utilizados en los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados.
4. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes de acuerdo a la estación del año: época lluviosa contra época seca.

5.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis e interpretación de los resultados de cada uno de los factores considerados en el análisis de estabilidad realizados, para evaluar la influencia que tiene la succión en la estabilidad de taludes:

1. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes considerando fallas de tipo circular y no circular.

En la Tabla No.5.1, se muestran los factores de seguridad obtenidos de los análisis realizados, para estos se utilizó el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados, considerando una superficie de falla circular, sin tomar en cuenta puntos de succión y considerando puntos de succión como presión de poros; este análisis se realizó tanto para la condición de gravedad como gravedad más sismo.

Tabla No.5.1 Factores de seguridad considerando una superficie de falla circular, Talud Civil FIA-UES.

		■ Talud Civil FIA-UES		■ Talud Padre Arrupe	
		FACTOR DE SEGURIDAD (FALLA CIRCULAR)			
		Gravedad		Gravedad más Sismo	
MÉTODOS		Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros	Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros
	Spencer		6.230	3.576	4.810
		5.162	2.997	4.556	2.826
Sarma		6.145	1.912	4.810	1.898
		5.156	2.405	4.165	2.351
Morgenstern y Price		6.143	1.899	4.810	1.889
		5.159	2.287	4.175	2.232

Fuente: De los autores.

Nota: los valores color rojo corresponden al talud Civil FIA-UES y color azul corresponden al talud Padre Arrupe.

- Con respecto a los factores de seguridad obtenidos, de la tabla No.5.1, considerando que el análisis se realizó en la época lluviosa, se verifica lo siguiente:
 - Que, al asumir una superficie de falla circular, considerando puntos de succión como presión de poros del suelo, en ambos taludes se obtuvieron menores factores de seguridad respecto con los obtenidos al no considerar dichos puntos de succión.
- En la figura No.5.1, se muestran las variaciones porcentuales de los factores de seguridad obtenidos por diferentes métodos de análisis considerando puntos de succión como presión de poros y sin considerarlos, correspondientes a los taludes en estudio para una superficie de falla circular:
 - Talud Civil FIA-UES, presenta los siguientes resultados:
 - **Condición de gravedad:** Morgenstern y Price -69%, Sarma -68.9% y Spencer -42.6%.
 - **Condición de gravedad más sismo:** Morgenstern y Price -60.7%, Sarma -60.5% y Spencer -26.2%.
 - Talud Padre Arrupe, presenta los siguientes resultados:
 - **Condición de gravedad:** Morgenstern y Price del -55.7%, Sarma del -53.4% y Spencer del -41.9%.

- **Condición de gravedad más sismo:** Morgenstern y Price del -46.5%, Sarma del -43.3% y Spencer del -38%.
- De los métodos de análisis de estabilidad de taludes, se tiene:
 - Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** con una superficie de falla circular considerando puntos de succión como presión de poros, los menores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Morgenstern y Price: 1.899 y 1.889; los mayores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Spencer: 3.576 y 3.551 respectivamente.
 - Talud Padre Arrupe
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** los menores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Morgenstern y Price: 2.287 y 2.232; los mayores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Spencer: 2.997 y 2.826 respectivamente.

Nota: el cálculo de la variación porcentual se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100$$

Donde:

V_1 = Factor de seguridad sin puntos de succión como presión de poros.

V_2 = Factor de seguridad con puntos de succión como presión de poros.

- Ejemplo de cálculo de variación porcentual: talud Padre Arrupe, método de Morgenstern y Price, condición de gravedad.

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{2.287 - 5.159}{5.159} \right) \times 100 = -55.7\%$$

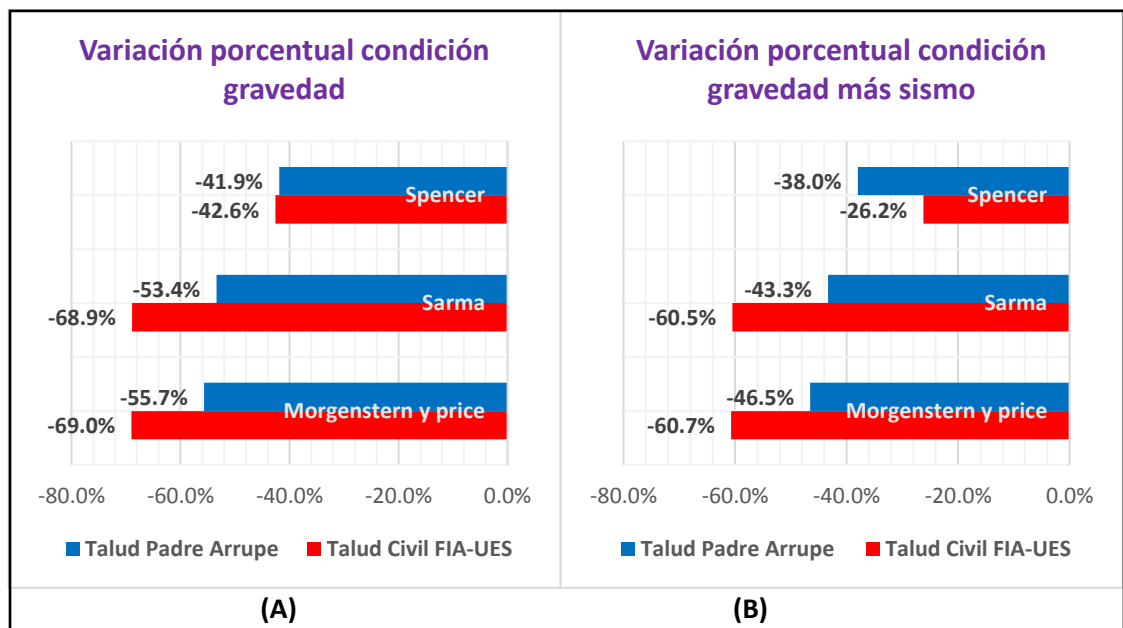


Figura No.5. 1 Variación porcentual de métodos de análisis utilizando el criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados, sin incluir puntos de succión como presión de poros e incluyéndolos, considerando una superficie de falla circular: (A) condición gravedad y (B) condición gravedad más sismo.

Fuente: De los autores.

En la tabla No.5.2, se presentan los factores de seguridad obtenidos aplicando el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados, asumiendo una superficie de falla no circular.

Tabla No.5.2 Factores de seguridad considerando una superficie de falla no circular, Talud Civil FIA-UES y Talud Padre Arrupee.

■ Talud Civil FIA UES ■ Talud Padre Arrupee				
MÉTODOS	FACTOR DE SEGURIDAD (FALLA NO CIRCULAR)			
	Gravedad		Gravedad más Sismo	
	Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros	Sin Puntos de Succión como presión de poros	Con Puntos de Succión como presión de poros
Spencer	5.476	2.341	4.401	2.328
	5.135	2.479	4.367	2.410
Sarma	5.060	1.404	4.271	1.396
	5.090	2.059	3.981	2.018
Morgenstern y Price	5.190	1.543	4.313	1.535
	5.120	1.953	3.956	1.923

Fuente: De los autores.

Nota: los valores color rojo corresponden al talud Civil FIA-UES y color azul corresponden al talud Padre Arrupee.

- Al realizar el análisis los factores de seguridad obtenidos de los taludes en estudio, asumiendo una superficie de falla no circular, se presenta una tendencia similar que, al asumir una superficie de falla circular, se obtienen menores factores de seguridad si se consideran puntos de succión respecto con los obtenidos al no considerarlos.
- En la figura No.5.2, se muestran las variaciones porcentuales de los factores de seguridad obtenidos con diferentes métodos de análisis considerando puntos de succión como presión de poros y sin considerarlos, correspondientes a los taludes en estudio con una superficie de falla no circular:

- Talud Civil FIA-UES presenta los siguientes resultados:
 - **Condición de gravedad:** Morgenstern y Price -70.3%, Sarma -72.3% y Spencer -57.2%.
 - **Condición de gravedad más sismo:** Morgenstern y Price -64.4%, Sarma -67.3% y Spencer -47.1%.
- Talud Padre Arrupe presenta los siguientes resultados:
 - **Condición de gravedad:** Morgenstern y Price del -61.9%, Sarma del -59.5% y Spencer del -51.97.
 - **Condición de gravedad más sismo:** Morgenstern y Price del -51.4%, Sarma del -49.3% y Spencer del -44.8%.
- Con respecto a los métodos de análisis de estabilidad de taludes, se tiene:
 - Talud Civil FIA-UES:
 - **Para la Condición de gravedad y gravedad más sismo:** con una superficie de falla no circular considerando puntos de succión como presión de poros, los menores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Sarma: 1.404, y 1.396 y los mayores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Spencer: 2.341 y 2.328 respectivamente.
 - Talud Padre Arrupe:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** los menores factores de seguridad se obtuvieron con el método de

Morgenstern y Price: 1.953 y 1.923, los mayores factores de seguridad se obtuvieron con el método de Spencer: 2.479 y 2.410 respectivamente.

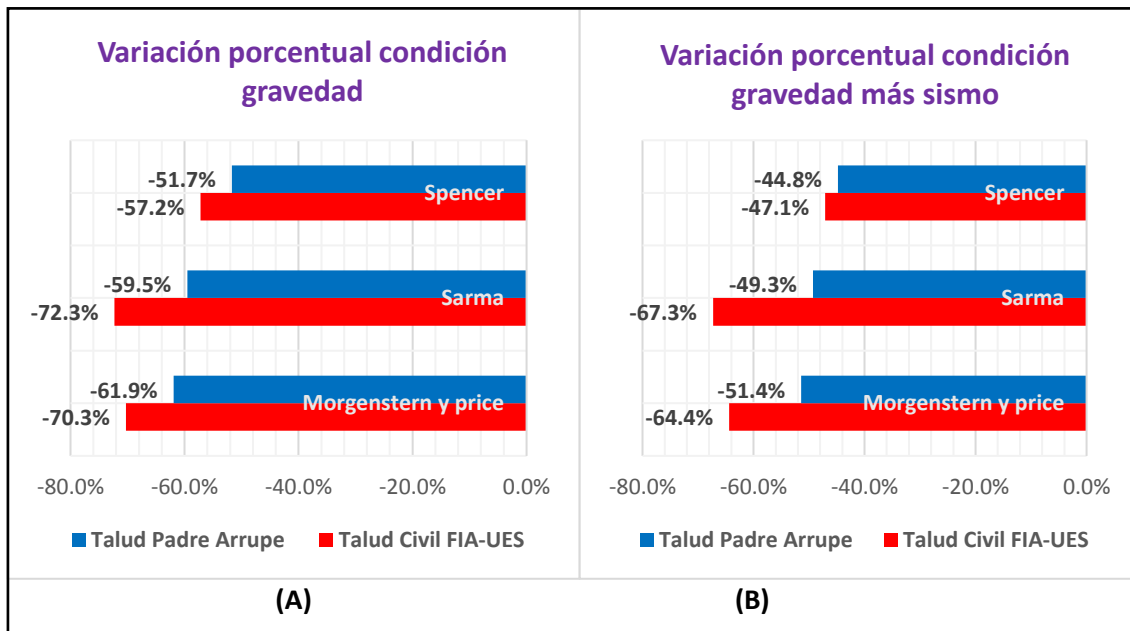


Figura No.5. 2 Variación porcentual de métodos de análisis utilizando el criterio de Mohr-Coulomb, sin incluir puntos de succión como presión de poros e incluyéndolos, considerando una superficie de falla no circular: (A) condición gravedad y (B) condición gravedad más sismo.

Fuente: De los autores.

- Al analizar las superficies de falla críticas obtenidas (circular y no circular), considerando puntos de succión, para ambos taludes, las superficies de falla no circulares reflejan menores valores de factores de seguridad que en las superficies de falla circulares
- Al evaluar la ubicación de la superficie de falla crítica cuando se analiza el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados con puntos de succión como presión de poros muestra superficies de falla más superficiales

con factores de seguridad menores, en cambio cuando se evalúa no considerar succión como presión de poros la superficie de falla tiende a desarrollarse a mayor profundidad, presentando factores de seguridad mayores como se muestran en las figuras No.5.3 y No.5.4.

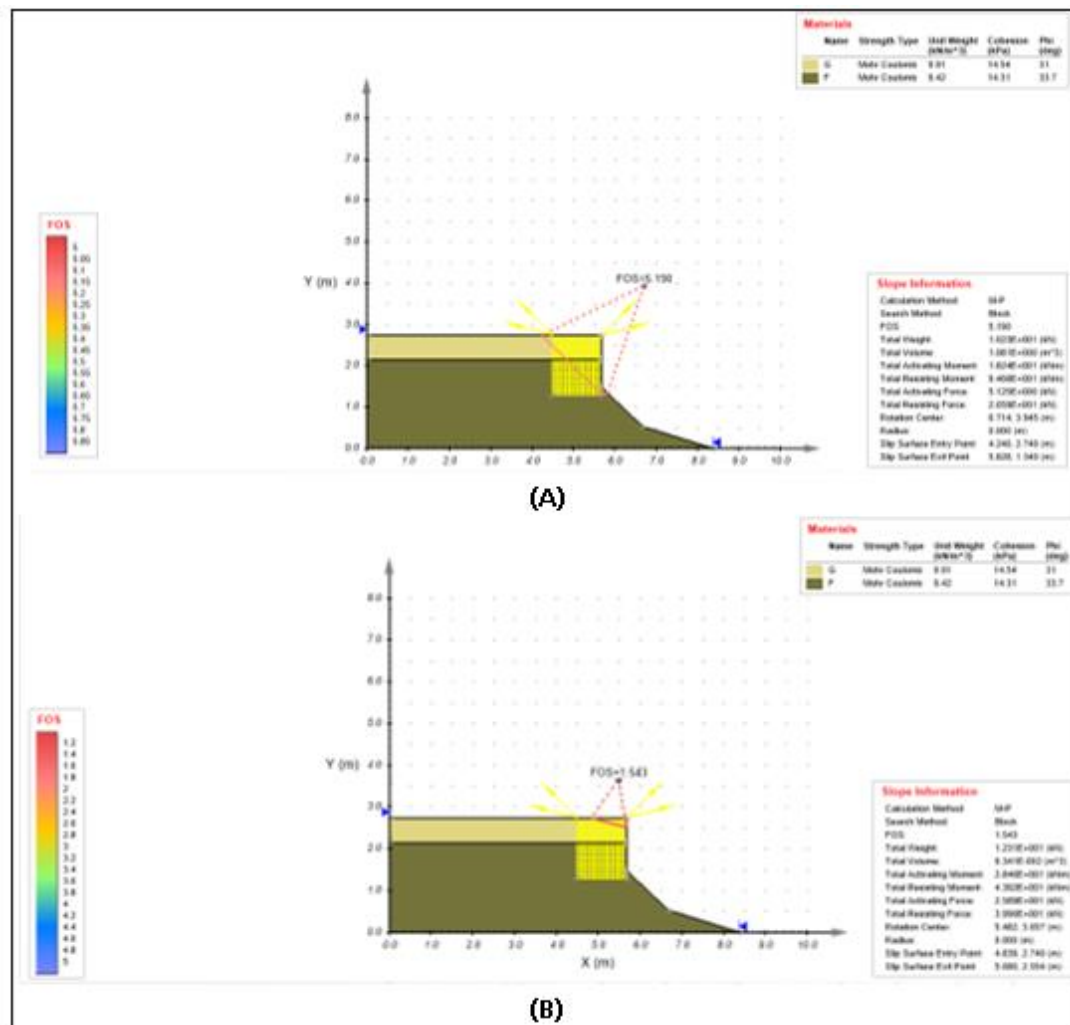


Figura No.5. 3 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Morgenstern y Price, (A) sin considerar puntos de succión y (B) considerando puntos de succión, condición gravedad, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

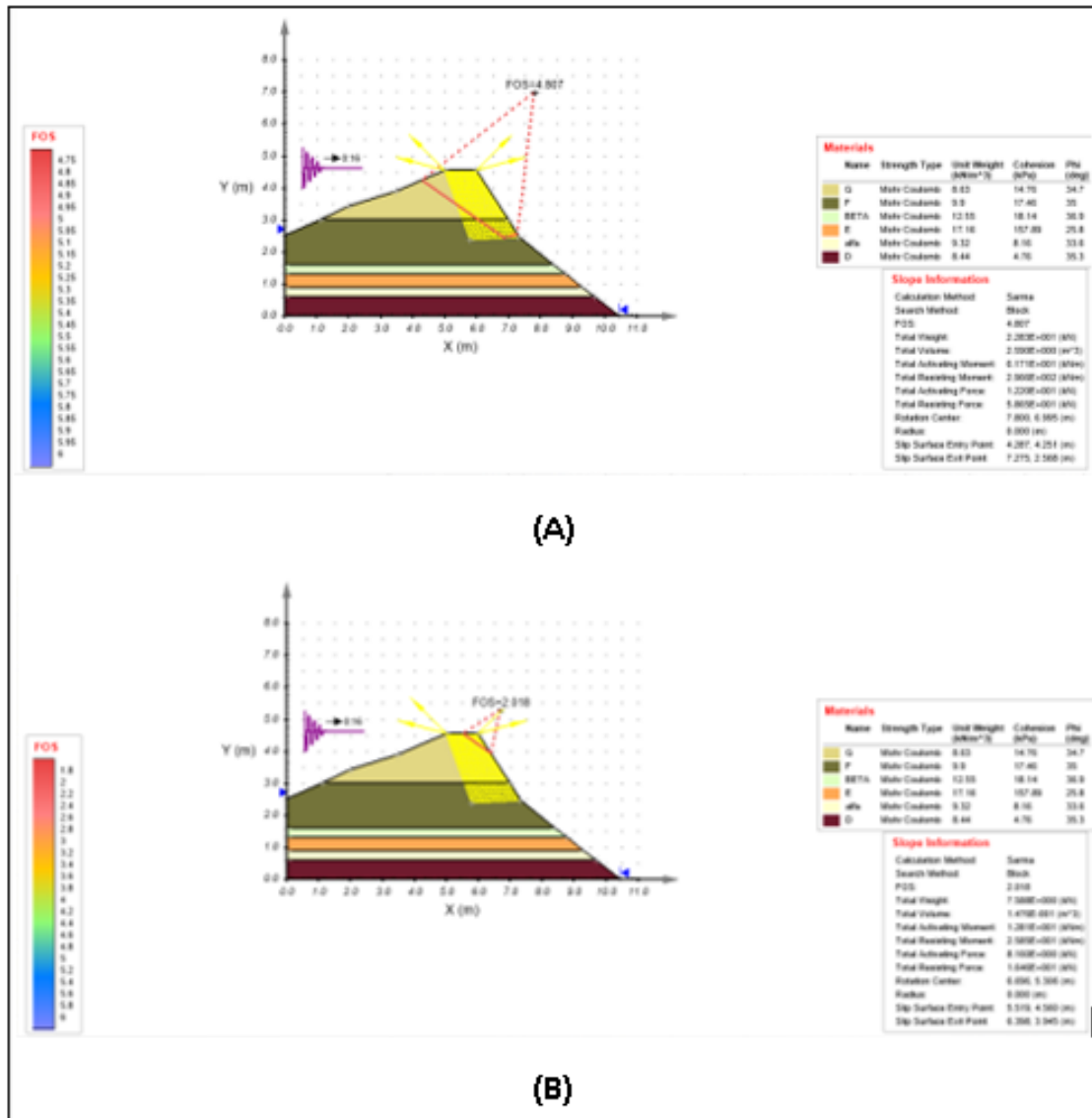


Figura No.5. 4 Superficie de falla crítica no circular generada por el método de Sarma, (A) sin considerar puntos de succión y (B) considerando puntos de succión, condición gravedad más sismo, Talud Padre Arrupe.

Fuente: De los autores.

2. Determinación de la influencia de los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados contra el criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb para suelos saturados.

A continuación, en la tabla No.5.3, se presenta los resultados obtenidos a partir de las modelaciones considerando puntos de succión y asumiendo una superficie de falla no circular, con el criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados y los criterios de suelos parcialmente saturados: Fredlund y Vanapalli, utilizando estimaciones de la curva característica suelo-agua a partir de la curva granulométrica.

Tabla No.5.3 Factores de seguridad con criterio de resistencia al corte de Mohr-Coulomb y suelos parcialmente saturados, considerando una superficie de falla no circular, Talud Civil FIA-UES y Talud Padre Arrupe.

■ Talud Civil FIA-UES ■ Talud Padre Arrupe						
CRITERIO DE RESISTENCIA AL CORTE	FACTOR DE SEGURIDAD					
	GRAVEDAD			GRAVEDAD MÁS SISMO		
	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer
Mohr-Coulomb	1.543	1.404	2.341	1.535	1.396	2.328
	1.953	2.059	2.479	1.923	2.018	2.410
Vanapalli	1.562	1.484	2.512	1.554	1.477	2.498
	2.712	2.947	3.361	2.608	2.877	3.288
Fredlund	1.559	1.449	2.447	1.551	1.442	2.434
	2.649	2.889	3.206	2.504	2.820	3.137

Fuente: De los autores.

Nota: los valores color rojo corresponden al talud Civil FIA-UES y color azul corresponden al talud Padre Arrupe.

Nota: el cálculo de la variación porcentual se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100$$

Donde:

V_1 = Factor de seguridad de criterio de Mohr-Coulomb.

V_2 = Factor de seguridad de criterios de suelos parcialmente saturados.

- Ejemplo de cálculo de variación porcentual: talud Civil FIA-UES, método de Morgenstern y Price, condición de gravedad.

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{1.562 - 1.543}{1.543} \right) \times 100 = 1.23\%$$

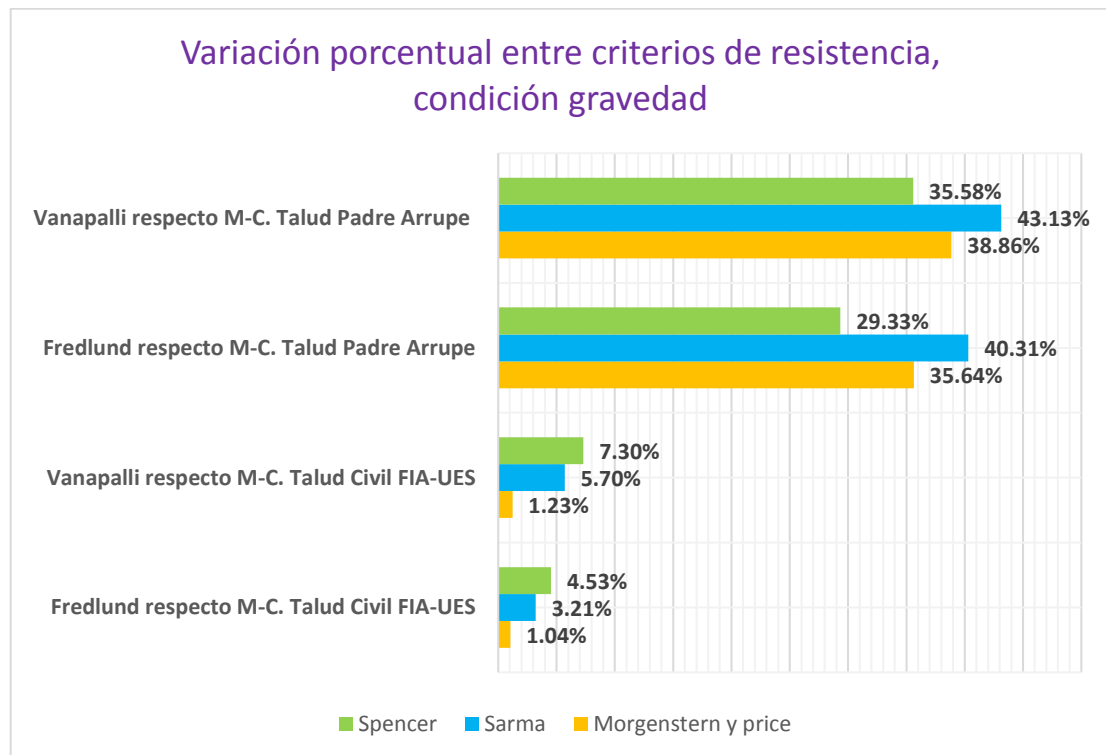


Figura No.5. 5 Variación porcentual entre criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados respecto al criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados, condición gravedad.

Fuente: De los autores.

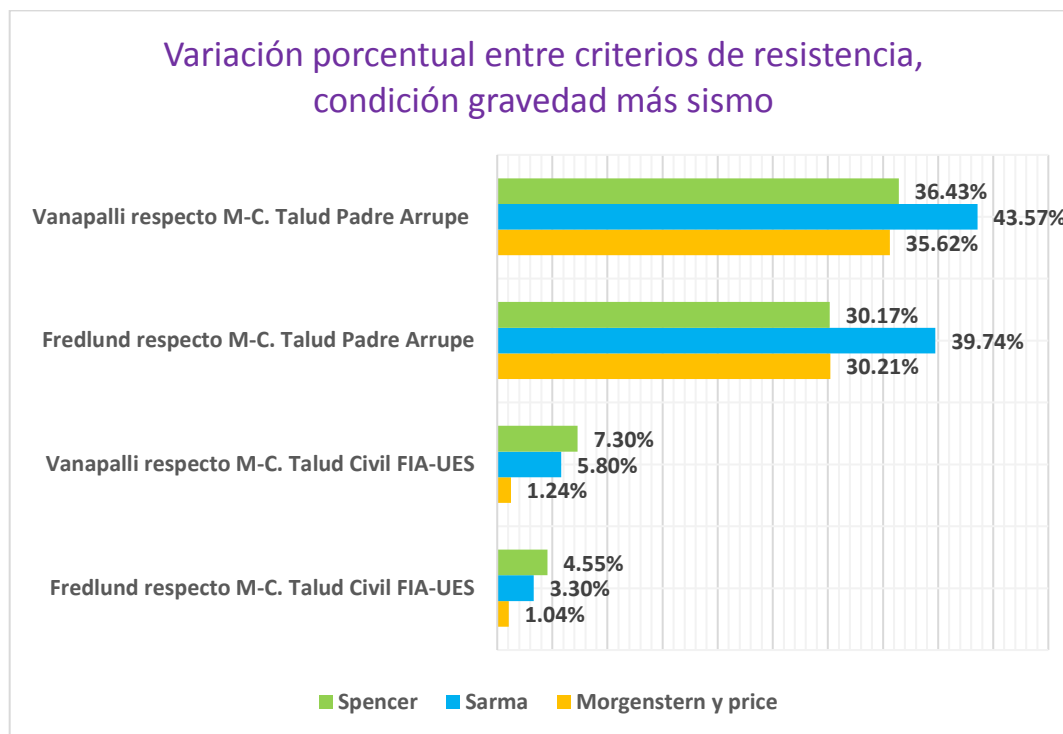


Figura No.5. 6 Variación porcentual entre criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados respecto al criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados, condición gravedad más sismo.

Fuente: De los autores.

- De acuerdo con la tabla No.5.3, la magnitud del factor de seguridad varía según el criterio de resistencia al corte empleado en el análisis. Según el siguiente detalle:
 - Para el talud Civil FIA-UES, el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados proporciona factores de seguridad levemente menores comparados con los obtenidos con criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados. Sin embargo, para el talud Padre Arrupe presentaron mayores diferencias según se explica en las figuras No.5.5 y No.5.6.

- En la figura No.5.5 y figura No.5.6, se observan las variaciones porcentuales que presentan los factores de seguridad de los diferentes métodos de análisis, tomando como referencia los criterios de suelos parcialmente saturados respecto al criterio de resistencia de Mohr-Coulomb para suelos saturados. El comportamiento de los resultados se presenta según el siguiente detalle:
 - Talud Civil FIA-UES: para este talud las variaciones son pequeñas, presentando los siguientes resultados:
 - **Condición de gravedad (G) y gravedad más sismo (G+S):**
 - **Tanto para Fredlund como Vanapalli:**
 - las mayores variaciones las obtuvimos con el método de Spencer: **Fredlund** 4.53% (G) y 4.55% (G+S); **Vanapalli** 7.30% para ambas condiciones (G) y (G+S).
 - Los valores intermedios los presento Sarma: **Fredlund** 3.21% (G) y 3.30% (G+S) y **Vanapalli** 5.70% (G) y 5.80% (G+S) respectivamente.
 - Los menores valores se obtuvieron con el método de Morgenstern y Price: **Fredlund** 1.04% para ambas condiciones (G) y (G+S). **Vanapalli** 1.23% (G) y 1.24% (G+S) respectivamente.

- Para el talud Padre Arrupe, se obtuvieron incrementos importantes (mayores al talud Civil FIA-UES), según el siguiente detalle:
 - **Condición de gravedad (G) y gravedad más sismo (G+S).**
 - **Tanto para Fredlund como Vanapalli, el comportamiento de los resultados fueron los siguientes:**
 - Las mayores variaciones se obtuvieron con el método de Sarma: **Fredlund** 40.31 % (G) y 39.74% (G+S) y **Vanapalli** 43.13% (G) y 42.57% (G+S).
 - Los valores intermedios se obtuvieron con el método de Morgenstern y Price para el criterio de resistencia de **Fredlund** 35.64% (G) y 30.21% (G+S). mientras para **Vanapalli**: para la condición de gravedad se obtuvo con el método de Morgenstern y Price 38.86% y para la condición de gravedad más sismo se obtuvo con el método de Spencer 36.43%.
 - Los menores valores se obtuvieron con el método de Spencer para el criterio de resistencia de **Fredlund** 29.33% (G) y 30.17% (G+S). mientras para el criterio de **Vanapalli** para la condición de gravedad se obtuvo con el método de Spencer 35.58% y para la condición de gravedad más sismo

se obtuvo con el método de Morgenstern y Price
35.62%.

- De acuerdo, a lo antes expuesto se puede decir:
 - Talud Civil FIA-UES:
 - Para las condiciones de gravedad y gravedad más sismo, el criterio de **Vanapalli**, con el método de análisis de estabilidad de taludes de **Spencer** fue el que presentó las mayores variaciones entre los factores de seguridad (7.30%) y **Fredlund** las menores para el método de **Morgenstern y Price** (1.04%).
 - Talud Padre Arrupe:
 - Para las condiciones de gravedad y gravedad más sismo, el criterio de **Vanapalli**, con el método de análisis de estabilidad de taludes de **Sarma** fue el que presentó las mayores variaciones entre los factores de seguridad (43.13 y 42.57% respectivamente) y **Fredlund** las menores para el método de **Spencer** (29.33 y 30.17% respectivamente).
- Por lo tanto, para ambos taludes se puede decir:
 - El criterio de **Vanapalli** con los métodos de **Spencer** (con poca contribución de la succión) y **Sarma** (con mayor contribución de la succión), refleja mejor la influencia de los criterios de resistencia al corte

de Suelos Parcialmente Saturados versus el criterio de resistencia al corte de Mohr- Coulomb para suelos saturados

- Es importante notar que las mayores diferencias entre los criterios de resistencia, fueron obtenidos para el talud Padre Arrupe, que es el talud que se modelo considerando varios estratos (unidades G, F, E, y D), demostrándose de esta forma la contribución de la curva característica suelo-agua (succión) en el incremento de resistencia al corte del suelo, que se ve reflejado en la obtención de mayores factores de seguridad en los criterios de suelos parcialmente saturados.
- En cuanto a los métodos de análisis, es posible constatar que el método de análisis de estabilidad de taludes que proporciona los factores de seguridad mayores es el método de Spencer con el criterio de resistencia de Vanapalli, para ambos taludes, según lo siguiente:
 - Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición gravedad y gravedad más sismo:** Criterio de Vanapalli: 2.512 y 2.498 respectivamente.
 - Talud Padre Arrupe:
 - **Condición gravedad y gravedad más sismo:** Criterio de Vanapalli: 3.361 y 3.288 respectivamente.

Mientras, los menores factores de seguridad encontrados para los taludes analizados, presentaron el siguiente comportamiento:

- Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición gravedad y gravedad más sismo:** se obtuvieron con el método de Sarma, para el criterio de Mohr-Coulomb: 1.404 y 1.396 respectivamente.
- Talud Padre Arrupe:
 - **Condición gravedad y gravedad más sismo:** se obtuvieron con el método de Morgenstern y Price, para el criterio de Mohr-Coulomb: 1.953 y 1.923 respectivamente.
- En base a los resultados obtenidos tanto para el cálculo de los factores de seguridad y las diferencias entre los métodos, se puede determinar que:
 - La contribución que tiene la curva característica suelo-agua (succión) en el incremento de resistencia al corte del suelo, que se ve reflejado en un incremento en la magnitud de los factores de seguridad obtenidos a partir de los criterios de resistencia de suelos parcialmente saturados.
 - Se obtuvo la máxima contribución para Vanapalli, (para el talud Padre Arrupe) por el método de análisis de Sarma (43.13%) en la condición de gravedad más sismo y la menor con el criterio de Fredlund, para el método Spencer (29.33%) para la condición gravedad.
 - El método de Spencer es el método de análisis de estabilidad que presenta los resultados más conservadores proporcionando los mayores valores de factor de seguridad, esto se puede explicar debido a que es uno

de los métodos que más simplificaciones considera para el cálculo del factor de seguridad y comparando los resultados obtenidos con los demás métodos se puede decir que es el método que más se aleja de la realidad.

3. Determinación de la influencia del procedimiento empleado para la obtención de la curva característica suelo-agua utilizados en los criterios de resistencia al corte de Suelos Parcialmente Saturados.

En la tabla No.5.4, se muestran los resultados obtenidos de las modelaciones de los criterios de resistencia de Fredlund y Vanapalli, utilizando para la obtención de la curva característica suelo-agua el procedimiento de medición directa de succión y estimación indirecta a partir de la curva granulométrica. Para ambos casos se consideran puntos de succión y una superficie de falla no circular.

Tabla No.5.4 Factores de seguridad de modelaciones con criterios de suelos parcialmente saturados, considerando curva característica suelo-agua a partir de estimación y medición directa de succión, Talud Civil FIA-UES y Talud Padre Arrupe.

■ Talud Civil FIA-UES ■ Talud Padre Arrupe						
CRITERIO DE RESISTENCIA AL CORTE	FACTOR DE SEGURIDAD					
	GRAVEDAD			GRAVEDAD MÁS SISMO		
	Medición Indirecta: Estimación					
	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer	Morgenstern y Price	Sarma	Spencer
Vanapalli	1.562	1.484	2.512	1.554	1.477	2.498
	2.712	2.947	3.361	2.608	2.877	3.288
Fredlund	1.559	1.449	2.447	1.551	1.442	2.434
	2.649	2.889	3.206	2.504	2.820	3.137
Medición Directa de Succión						
Vanapalli	1.569	1.549	2.637	1.561	1.541	2.623
	2.820	3.055	3.634	2.720	2.982	3.555
Fredlund	1.569	1.547	2.635	1.561	1.539	2.621

	2.717	3.053	3.625	2.587	2.980	3.546
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fuente: De los autores.

Nota: los valores color rojo corresponden al talud Civil FIA-UES y color azul corresponden al talud Padre Arrupe.

Nota: el cálculo de la variación porcentual se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100$$

Donde:

V_1 = Factor de seguridad obtenido con curva característica suelo-agua obtenida a partir de medición directa de succión.

V_2 = Factor de seguridad obtenido con curva característica suelo-agua obtenida de estimación a partir de la curva granulométrica.

- Ejemplo de cálculo de variación porcentual: talud Civil FIA-UES, método de Morgenstern y Price, condición de gravedad.

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{1.562 - 1.569}{1.569} \right) \times 100 = -0.45\%$$

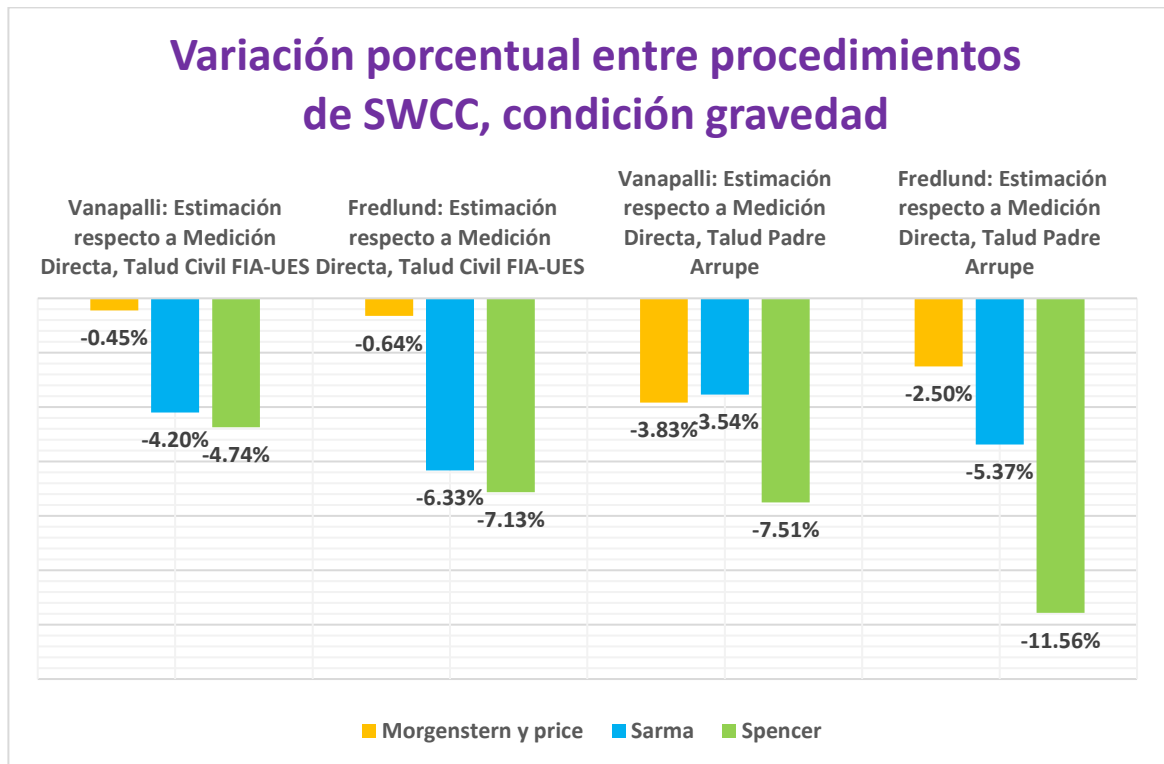


Figura No.5. 7 Variación porcentual entre criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, condición gravedad.

Fuente: De los autores.

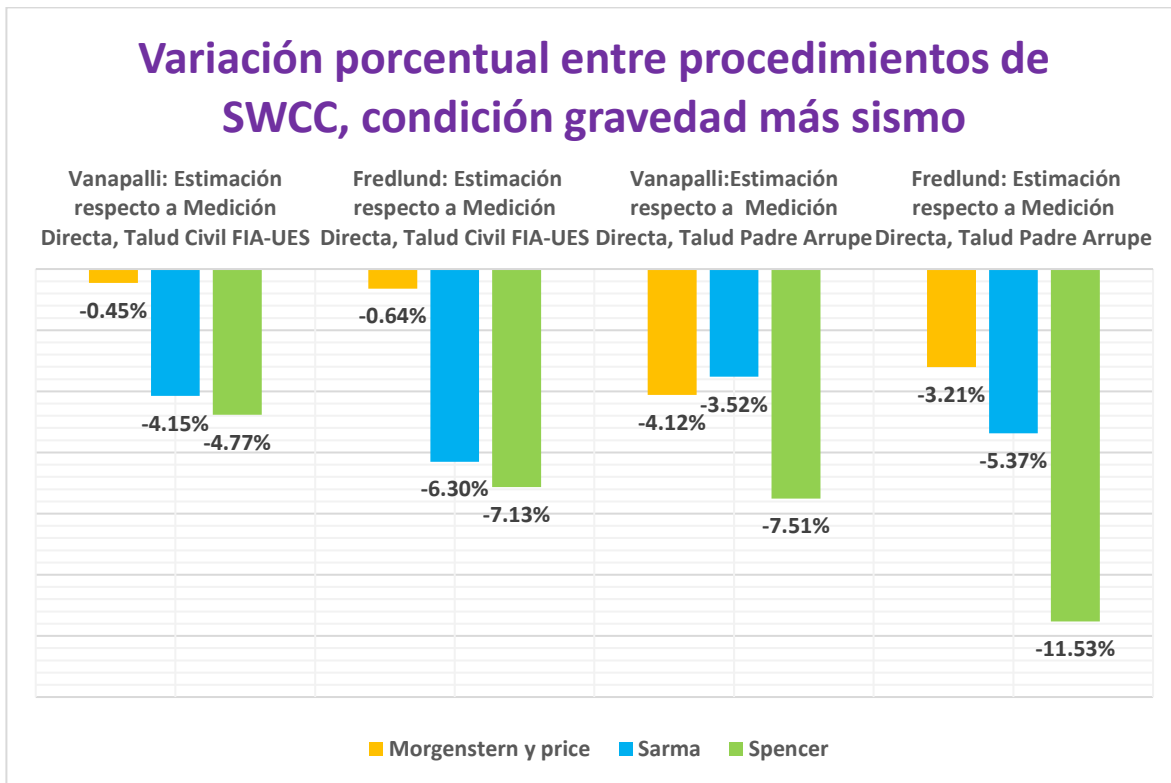


Figura No.5. 8 Variación porcentual entre criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, condición gravedad más sismo.

Fuente: De los autores.

- De los resultados presentados en la tabla No.5.4, se comprueba que al utilizar el procedimiento de medición directa de succión para representar la curva característica suelo-agua, se obtienen factores de seguridad mayores, comparados con los obtenidos utilizando estimación a partir de la granulometría, para ambos taludes.
- En las figuras No.5.7 y No.5.8, se muestran las variaciones porcentuales entre procedimientos de obtención de la curva característica suelo-agua: condición gravedad y condición gravedad más sismo, respectivamente, es posible constatar que las variaciones entre los métodos utilizados para la obtención de la curva

característica suelo-agua (procedimientos de medición directa de succión y medición indirecta de estimación a partir de la curva granulométrica), son poco significativas:

- Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:**
 - **Fredlund:** las mayores diferencias la obtuvimos con el método de Spencer (-4.74% y -4.77%); le sigue el método de Sarma (-4.20% y -4.15%) y las menores diferencia las obtuvimos con el método de Morgenstern y Price (-0.45% para ambas condiciones) respectivamente.
 - **Vanapalli:** las mayores diferencias las obtuvimos con el método de Spencer (-7.13% para ambas condiciones) le sigue Sarma (-6.33% y -6.30%) y las menores diferencias las obtuvimos con el método de Morgenstern y Price (-0.64% para ambas condiciones) respectivamente.
- Talud Padre Arrupe:
 - **Condición de gravedad:**
 - **Fredlund** la mayor diferencia la obtuvimos con el método de Spencer con -7.51%, le sigue el método de Morgenstern y Price -3.83% y la menor diferencia la obtuvimos con el método de Sarma -3.54%.

- **Vanapalli:** la mayor diferencia la obtuvimos con el método de Spencer con -11.56%, le sigue el método de Morgenstern y Price con -2.50%, y la menor diferencia la obtuvimos con el método de Sarma -5.37%.
- **Condición de gravedad más sismo:**
 - **Fredlund:** la mayor diferencia la obtuvimos con el método de Spencer con -7.51%, le sigue el método de Sarma -4.12% y la menor diferencia la obtuvimos con el método de Morgenstern y Price -3.52%.
 - **Vanapalli:** la mayor diferencia le corresponde al método de Spencer -11.53%, le sigue el método de Sarma -5.37% y la menor diferencia la obtuvimos con el método de Morgenstern y Price -3.21%.
- Para el tercer criterio en estudio se puede decir:
 - Talud Civil FIA-UES:
 - Para las condiciones de gravedad y gravedad más sismo, el criterio de **Vanapalli**, con el método de análisis de estabilidad de taludes de **Spencer** fue el que presentó las mayores variaciones entre los factores de seguridad (-7.13%) y **Fredlund** las menores para el método de **Morgenstern y Price** (-0.45%)
 - Talud Padre Arrupe:

- Para las condiciones de gravedad y gravedad más sismo, el criterio de **Vanapalli**, presento las mayores variaciones entre los factores de seguridad, con el método de análisis de estabilidad de taludes de **Spencer** (11.56 y 11.53% respectivamente); Y las menores variaciones fueron presentadas por **Fredlund** para el método de **Sarma en condición de gravedad** (-3.54%) y **Morgenstern y Price para condición de gravedad más sismo** (-3.20%).
- El criterio de resistencia de **Vanapalli** con el método de **Spencer de análisis de estabilidad de taludes**, refleja un pequeño incremento en los factores de seguridad del orden del 11.56% (G) y 11.53% (G+S) cuando se emplea en el análisis los resultados de la medición directa de la succión, en comparación de los empleados por estimación de la succión.
- De los criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, se verifica que tanto, para el procedimiento de medición directa de succión como para la estimación a partir de la granulometría de la curva característica suelo-agua, el criterio que presenta mayores factores de seguridad es el criterio de Fredlund, para los taludes en estudio.
- Con respecto a los métodos de análisis, es posible verificar que el método de análisis de estabilidad de taludes que proporciona los factores de seguridad

mayores es el método de Spencer con el criterio de resistencia de Fredlund en ambos taludes, para el procedimiento de medición directa de succión:

- Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** Criterio de Fredlund: 2.637 y 2.623 respectivamente.
- Talud Padre Arrupe:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** Criterio de Fredlund: 3.634 y 3.555 respectivamente.

Mientras, los menores factores de seguridad obtenidos fueron los los siguientes:

- Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** se obtuvo con el método de Sarma, para el criterio de Vanapalli: 1.547 y 1.539 respectivamente.
- Talud Padre Arrupe:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** se obtuvo con el método de Morgenstern y Price, para el criterio de Vanapalli: 2.717 y 2.587 respectivamente.
- Para el procedimiento de estimación de la curva característica suelo-agua a partir de la granulometría, el método de análisis de estabilidad que presenta los mayores factores de seguridad es el método de Spencer con el criterio de resistencia de fredlund, en ambos taludes:

- Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** Criterio de Fredlund: 2.512 y 2.498 respectivamente.
- Talud Padre Arrupe:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** Criterio de Fredlund: 3.361 y 3.288 respectivamente.

Mientras, los menores factores de seguridad son los siguientes:

- Talud Civil FIA-UES:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** método de Sarma, para el criterio de Vanapalli: 1.449 y 1.442 respectivamente.
- Talud Padre Arrupe:
 - **Condición de gravedad y gravedad más sismo:** método de Morgenstern y Price, para el criterio de Vanapalli: 2.649 y 2.504 respectivamente.
- En base a los resultados obtenidos, el procedimiento de medición indirecta de estimación a partir de la curva granulométrica es el que presenta los resultados más conservadores en ambos taludes; es posible mencionar que tanto la medición directa como indirecta proporcionan factores de seguridad aproximadamente iguales, con diferencias máximas con el método de Spencer de (7.13%) para el Talud Civil FIA-UES, y (11.56%) para el talud Padre

Arrupe, con el criterio de Vanapalli, para la condición de gravedad para ambos taludes.

- Por lo que se puede estimar en base a los resultados que el efecto del método de obtención de la curva característica suelo-agua en el cálculo del factor de seguridad, es pequeño y no es posible asegurar cuál procedimiento sería más conveniente aplicar para el análisis de estabilidad de taludes. Aunque se deja claro que el criterio de Vanapalli con el método de Spencer refleja un pequeño incremento en el cálculo del factor de seguridad.

4. Determinación de la influencia de la succión como presión de poros en el análisis de estabilidad de taludes de acuerdo a la estación del año: época lluviosa contra época seca.

En la tabla No.5.5, se presentan los resultados obtenidos de las modelaciones del criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados, utilizando puntos de succión para la época lluviosa y seca, considerando una superficie de falla no circular, para la condición de gravedad más sismo, Talud Civil FIA-UES:

Tabla No.5.5 Factores de seguridad de modelaciones con criterio de Mohr-Coulomb, considerando puntos de succión para la época Lluviosa y época seca, para la condición de gravedad más sismo, talud Civil FIA-UES.

	FACTOR DE SEGURIDAD	
	Gravedad más sismo	
MÉTODOS	Época Lluviosa	Época Seca
Morgenstern y Price	1.535	5.404
Sarma	1.396	8.219

Spencer	2.328	6.905
----------------	--------------	--------------

Fuente: De los autores.

- De acuerdo a la tabla No.5.5, se observa que, al utilizar puntos de succión en la modelación, correspondientes a la época seca, se obtienen mayores factores de seguridad en comparación a la época lluviosa.
- En la figura No.5.9, se muestran variaciones porcentuales entre los resultados obtenidos, cuando el análisis se realiza en época seca y época lluviosa, resaltando lo siguiente:
 - El Método de Spencer proporciono la menor variación: -66.30%.
 - El Método de Morgenstern y Price proporciono una variación intermedia de -71.60%.
 - El Método de Sarma proporciono la mayor variación: -83%.

Nota: para el cálculo de la variación porcentual se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right) \times 100$$

Donde:

V_1 = Factor de seguridad correspondiente a época seca.

V_2 = Factor de seguridad correspondiente a época lluviosa.

- Ejemplo de cálculo de variación porcentual: talud Civil FIA-UES, método de Morgenstern y Price, condición de gravedad.

$$\text{Variación Porcentual} = \left(\frac{1.535 - 5.404}{5.404} \right) \times 100 = -71.6\%$$

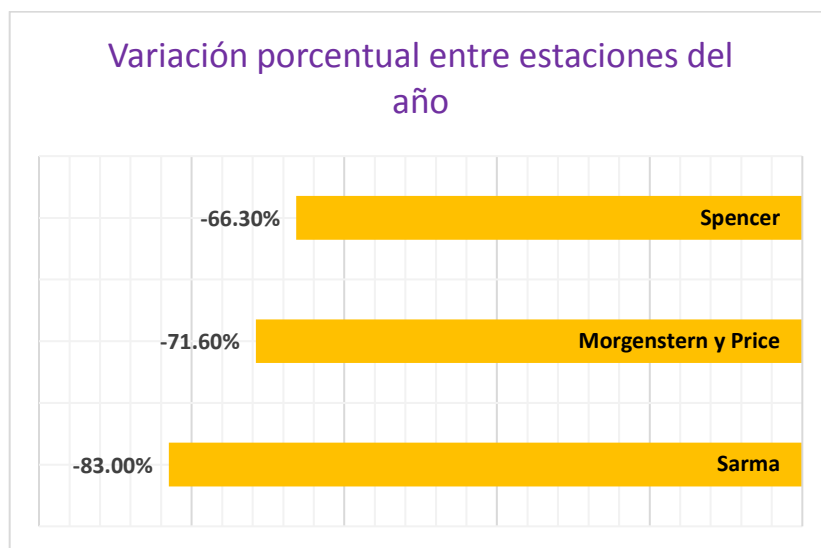


Figura No.5. 9Variación porcentual entre estaciones del año: época seca y época lluviosa, Talud Civil FIA-UES.

Fuente: De los autores.

Por lo que se puede decir:

- El método de análisis de estabilidad que presenta el mayor factor de seguridad para la época seca es el método de Sarma: 8.219, mientras el método que presenta el menor factor de seguridad es el método de Morgenstern y Price: 5.404.
- La época lluviosa debido a que, representa la temporada en la cual los taludes presentan mayor presión de poros, representa la estación del año con mayor grado de susceptibilidad (presenta menor resistencia al corte y menor contribución de la succión), debido a lo anterior resultan factores de seguridad muchos menores comparados a la estación seca.
- En base a los resultados obtenidos se puede decir que es recomendable realizar el análisis de estabilidad de taludes utilizando valores de succión como presión

de poros correspondientes a la época lluviosa ya que esta presenta los menores factores de seguridad, siendo esta la estación del año en la cual los taludes presentan las condiciones más desfavorables.

CAPÍTULO No.6
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas, de la presente investigación, cuyo objetivo fue determinar el efecto que tiene el uso del fenómeno de succión en la ley de resistencia al corte, en suelos parcialmente saturados, contra las leyes de resistencia en estado saturado (Mohr-Coulomb), en el análisis de estabilidad de taludes, aplicando los criterios de resistencia al corte del suelo: tradicional (Mohr-Coulomb) y parcialmente saturado, en taludes constituidos por Tierra Blanca Joven (TBJ).

Con base en los análisis realizados en el capítulo No.5, se concluye lo siguiente:

- En base a los resultados obtenidos, se refleja en los factores de seguridad una disminución de la resistencia al corte cuando es aplicado en la modelación, el efecto sísmico (condición gravedad más sismo) en todos los criterios y condiciones de análisis a los que fueron sometidos los taludes en estudio.
- La succión como presión de poros impacta directamente la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado, que, aplicada al análisis de estabilidad de taludes, presenta menores factores de seguridad; por lo tanto, el factor de seguridad se sobreestima cuando se desprecia el efecto de la succión.
- El porcentaje máximo de variación entre los factores de seguridad al considerar versus no considerar, puntos de succión como presión de poros del suelo, se presentó en fallas no circulares.

- Se determina que la adopción de la superficie de falla no circular en el análisis de estabilidad de taludes presenta menores factores de seguridad, teniéndose correspondencia con el comportamiento real de los taludes constituidos por TBJ los cuales fallan de forma no circular.
- Los menores factores de seguridad obtenidos al comparar las teorías de suelos parcialmente saturados (Fredlund y Vanapalli usadas en este trabajo), correspondieron a la teoría de resistencia al corte de Fredlund.
- La máxima variación porcentual de factor de seguridad se presentó con el criterio de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados de Vanapalli al compararla con el criterio de Mohr-Coulomb.
- Cuando se emplean los criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, presentan mayores valores de factores de seguridad respecto a los obtenidos empleando el criterio de Mohr-Coulomb para suelo saturado, por lo tanto, el factor de seguridad se subestima cuando se desprecia el efecto de la succión (curva característica suelo-agua).
- Los menores factores de seguridad fueron obtenidos con la teoría de resistencia al corte de Fredlund, utilizando el procedimiento de estimación indirecta haciendo uso de la curva granulométrica para obtener la curva característica suelo-agua.
- El uso de valores de medición directa, es el procedimiento que presenta la mayor contribución de la succión, en la resistencia del suelo, lo que se refleja a través

de la obtención de mayores factores de seguridad, en el análisis estabilidad de taludes, por lo que dicho procedimiento se debe utilizar en el análisis de estabilidad de taludes.

- El uso de la estimación de la curva característica suelo-agua a partir de las curvas granulométricas representa una técnica válida para diseños preliminares que empleen los criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, ya que, la variación porcentual de los factores de seguridad es pequeña respecto al uso de valores de medición directa.
- Se determinó que en invierno (época lluviosa), se obtuvieron factores de seguridad menores, respecto a la época seca, por lo tanto, es la época del año en que se deberían evaluar los parámetros del suelo de los taludes para realizar el análisis de su estabilidad, ya que representa la época más crítica con mayor probabilidad que los taludes sufran fallas.
- Se determinó que al realizar el análisis de estabilidad de taludes constituidos por TBJ, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:
 - Considerar la succión como presión de poros de agua.
 - Realizar el análisis considerando tipo de superficie de falla no circular.
 - Considerar la condición de gravedad más sismo.
 - Utilizar criterios de resistencia al corte del suelo correspondientes a las teorías de suelos parcialmente saturados: Criterio de Fredlund, criterio de Vanapalli.

- Los métodos de análisis de estabilidad de taludes, deben ser métodos rigurosos como los: método de Sarma, método de Morgenstern y Price.
- El análisis de estabilidad se debe realizar con parámetros obtenidos a partir de ensayos de laboratorio utilizando muestras extraídas en época lluviosa, ya que los taludes presentan mayor susceptibilidad en dicha época.

6.2 RECOMENDACIONES

- En el estudio de la estabilidad de taludes, se debe incluir los efectos de la succión y fallas de tipo no circulares, ya que se acerca a la representación del comportamiento real de los taludes constituidos por TBJ, por lo que, al omitir dicha condición, se sobrestima la resistencia al corte del suelo, obteniéndose resultados de factor de seguridad superiores a los obtenidos si se toma en cuenta la succión como presión de poros.
- Se recomienda tomar en cuenta el efecto de las raíces de la vegetación presente en los taludes de TBJ ya que, las raíces se desarrollan más fácilmente penetrando a lo largo de las fisuras y grietas de los taludes. Cuando las raíces se tornan más gruesas producen una presión lateral en el interior de esas discontinuidades, siendo la porción más débil y más externa del talud la que se separa de la porción más fija, permitiendo que la discontinuidad quede más abierta y facilitando la infiltración de agua meteórica.

- La estabilidad en taludes constituidos por TBJ con pendientes excesivamente inclinadas, además de los parámetros de resistencia al corte, está influenciada principalmente por la resistencia que proporciona la succión. Por tanto, resulta recomendable realizar estos análisis bajo los conceptos de criterios de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados. Análisis que, con criterios de resistencia al corte tradicionales, no proporcionan resultados representativos.
- Se recomienda utilizar el criterio de resistencia al corte para suelo parcialmente saturado de Fredlund al realizar el análisis de estabilidad, ya que, proporciona los menores factores de seguridad, y así se evita el sobredimensionamiento al diseñar los taludes.
- La curva característica suelo-agua es una relación conveniente para estimar de forma aproximada la resistencia al corte de un suelo parcialmente saturado. No obstante, se debe tener presente que la curva característica suelo-agua depende del tipo de material, por lo tanto, cualquier curva característica que no ha sido obtenida mediante medición y ha sido estimada de forma arbitraria tendrá una influencia directa en la estimación de la resistencia al corte del suelo.
- En el análisis de estabilidad de taludes es recomendable aplicar el procedimiento de obtención de la curva característica suelo-agua, a través de la medición directa de succión, para ser usada junto con las teorías de resistencia al corte de suelos parcialmente saturados, ya que de esta forma se refleja mejor el comportamiento de los taludes constituidos por TBJ.

- Es recomendable realizar los estudios de medición de la succión durante el año (época seca y lluviosa) en los taludes constituidos por TBJ, para construir las curvas características suelo-agua; además, utilizar parámetros obtenidos a partir de ensayos de laboratorio utilizando muestras extraídas en época lluviosa para realizar el análisis de estabilidad de taludes, ya que, representa la estación del año con mayor grado de susceptibilidad, siendo esta la estación más desfavorable del año.
- Se recomienda al momento de realizar el análisis de estabilidad de taludes utilizar métodos de análisis rigurosos: Sarma, Morgenstern y Price, los cuales presentan resultados más precisos. y finalmente, tomar en cuenta el grado de peligrosidad que representaría, el empleo de los factores de seguridad obtenidos por dichos métodos, considerando el potencial de falla que puede darse en el talud.
- En esta investigación se destacó el efecto de la succión como producto de la distribución de presiones hidrostáticas, sin embargo, su evolución puede ocurrir como resultado de distintas condiciones medio-ambientales, entre ellas: precipitación pluvial, evaporación, cubiertas vegetales, evapotranspiración, etc.; condiciones que deben ser objeto de estudio en investigaciones posteriores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

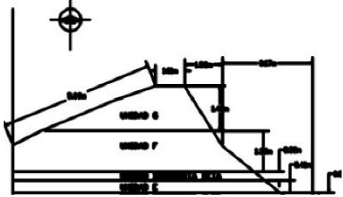
- Alberti, J.R., Canales, R. Sandoval, B., (2006), “Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso específico”.
- Alfaro Soto, M. A., (2008), Geotecnia en Suelos no Saturados. Volumen XXXII.
- Amaya, C., & Hayem, E., (2000), “Introducción al estudio de suelos parcialmente saturados e inicio de la caracterización de la Tierra Blanca del AMSS”, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), Tesis de Lic., El Salvador.
- Avalos, J.R. y Castro R.M., (2010), “Caracterización Geológica y Geotécnica de la unidad “G” de Tierra Blanca Joven”. Trabajo de graduación presentado para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.
- Bautista, W., Cruz, K., (2016), “Determinación de la tasa de deterioro en taludes constituidos por materiales piroclásticos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)”.
- Chávez, J., Hernández, W., & Kopecky, L., (2012), “Problemática y conocimiento actual de las tefras tierra blanca joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador”, Revista Geológica de América Central.
- Chávez, J., Landaverde, J., & Lopez, R., (2016), “monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador”.

- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., & Fredlund M.D., (2012), “Unsaturated Soils Mechanics in Engineering Practice”. Ed. John Wiley & Song.
- Hernández, W., (2008), “Aspectos Geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del Área Metropolitana de San Salvador. San Salvador, El Salvador”.
- Hernández, W., (2004), “Características Geotécnicas y Vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, de Ilopango, El Salvador”, Proyecto final presentado para optar al grado de master en tecnologías geológicas en la Universidad Politécnica de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Kutterolf, S., Freundt A., Perez W., Schmincke H.U., (2008), The Pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America, part 2: Distal tephras from volcanoes in Guatemala and El Salvador, as well as along-arc eruption chronology.
- Manual del software SVSOILS, SOILVISION SYSTEMS LTD.
- Manual del software SVSLOPE, SOILVISION SYSTEMS LTD.
- Meza Ochoa, V., (2012),” Suelos parcialmente saturados de la investigación universitaria”, Universidad Nacional de Colombia.
- MOP. (1993), Norma técnica para diseño por sismo. El Salvador.
- MOP. (1997), Norma técnica para diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes de El Salvador.

- MURRAY, E., & SIVAKUMAR, V., (2010), "Unsaturated soils: a fundamental interpretation of soil behavior". Ed. Wiley- Blackwell.
- Pérez, N., (2008), "Determinación de las curvas características en suelos no saturados con celdas de presión". Publicación Técnica No. 313. Sanfandila.
- Rolo R., Bommer J.J., Houghton B.F., Vallance J.W., Berdousis P., Mavrommati C. y Murphy W., (2004), "Geologic and Engineering Characterization of Tierra Blanca Pyroclastic Ash Deposits". Special paper 375, Geological Society of America.
- Suarez Díaz, (2009), "Deslizamiento: Análisis Geotécnico", Volumen 1.
- Suarez Díaz, (1998), "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales", Publicaciones UIS.
- Vanapalli, (1994), Simple test procedures and their interpretation in evaluating the shear strength of an unsaturated soil.

ANEXOS

ANEXO No.1: FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL TALUD PADRE ARRUPE.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA		1/2
FICHA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL ESTADO INICIAL DE TALUDES		
1.- DATOS GENERALES FECHA DE INSPECCIÓN: <u>02/09/2019</u> NOMBRE DEL TALUD: <u>Padre Arrupe</u> RESPONSABLE: <u>Luis Figueroa, Ángel Flores</u>		
2.- LOCALIZACIÓN UBICACIÓN: <u>Km 21, Carretera de Oro, Cercanías Colegio Español Padre Arrupe, Soyapango, San Salvador, El Salvador.</u> COORDENADAS: X(LONGITUD): <u>89°9'34.29"</u> Y(LATITUD): <u>13°43'5.28"</u>		
3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES		
TIPO DE TALUD <input checked="" type="checkbox"/> LADERA NATURAL <input type="checkbox"/> TALUD EN RELLENO <input type="checkbox"/> TALUD EN CORTE	TIPO DE VEGETACIÓN <input checked="" type="checkbox"/> ARBOLES <input checked="" type="checkbox"/> PASTO <input checked="" type="checkbox"/> ARBUSTOS <input type="checkbox"/> NINGUNO	
CONDICIÓN DE VEGETACIÓN <input checked="" type="checkbox"/> ALTA <input type="checkbox"/> MEDIA <input type="checkbox"/> DISPERSA	TIPO DE PENDIENTE <input type="checkbox"/> PLANO 0-2% <input type="checkbox"/> ONDULADO 3-12% <input type="checkbox"/> ALOMADO 13- 25% <input type="checkbox"/> QUEBRADO 26- 35 % <input type="checkbox"/> ACCIDENTADO 36-70% <input checked="" type="checkbox"/> MUY ACCIDENTADO >70%	
4.- CARACTERÍSTICAS ESPECIFICAS		
GEOMETRIA ALTURA: <u>4.56 m.</u> PENDIENTE: <u>Aproximadamente del 90%</u> LONGITUD: <u>4.70 m.</u> CROQUIS DEL TALUD: 	ELEMENTOS ANTRÓPICOS <input type="checkbox"/> OBRAS DE PROTECCION <input type="checkbox"/> OTRAS ESTRUCTURAS DESCRIPCIÓN: _____	

2/2

5.- NATURALEZA DEL MATERIAL

- SUELO CON GRIETAS COHESIVO
 SIN GRIETAS FRICCIONANTE
 CON BLOQUES COHESIVO-FRICCIONANTE
 ROCA CON GRIETAS ROCA SANA
 SIN GRIETAS POCO METEORIZADA
 CON BLOQUES METEORIZADA
 OTROS: _____

NÚMERO DE ESTRATOS VISIBLES: 7

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTRATOS

NOMBRE	ESPESOR (m)	Observaciones
UNIDAD G	1.55	Esta unidad Presenta ceniza de estructura fina color Beige claro, y poca presencia de lapilli acrecional.
UNIDAD F	1.40	Se observa una matriz de ceniza gruesa con abundante presencia de pómez de color Beige.
IGNIMBRITA BETA	0.30	Material conformado de matriz fina con presencia moderada de pómez de color Café claro.
UNIDAD E(SECO)	0.20	Se presenta depósitos de caída secos de granulometría gruesa de color gris claro.
UNIDAD E(HUMEDO)	0.21	Se observa depósitos de caída de granulometría fina de color Beige oscuro.
IGNIMBRITA ALFA	0.30	Se presenta una matriz de ceniza fina, moderada presencia de pómez y líticos de color Beige claro.
UNIDAD D	0.30	Material de matriz fina, con presencia de lapilli acrecional de color Beige a amarillo.

OTROS: _____

OBSERVACIONES:

El talud presenta las siguientes unidades de TBJ G, F, Ignimbrita Beta, E (Seco y húmedo), Ignimbrita Alfa, y D del tipo cohesivo-friccionante.

ANEXO No.2: GUÍA DE USO DE SOFTWARE SVSOILS Y SVSLOPE.

Software SVSoils, para representar la curva característica suelo-agua.

1. Agregar un proyecto nuevo.
 - Hacer clic en SVSoils luego clic en el botón **Open DATABASE**, clic derecho > **Add one Project**. Como se muestra en la figura A.2.1.

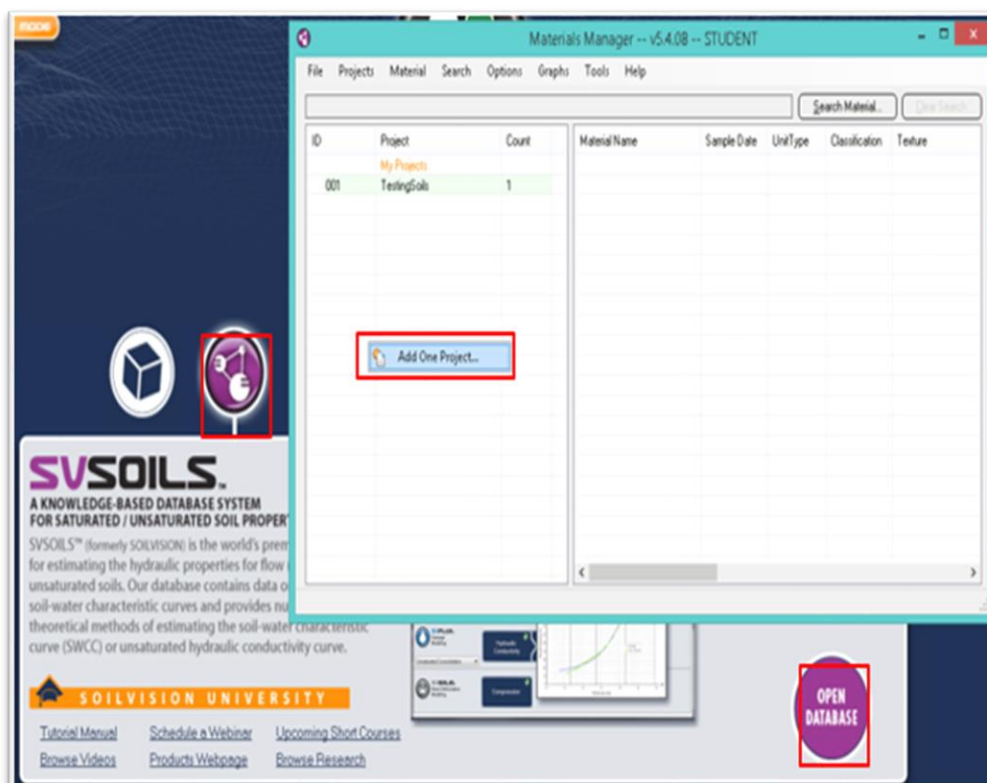


Figura A.2. 1 Interfaz inicial programa SVSoils.

Fuente: SVsoils.

- Luego se elige la ruta donde se guardará nuestro proyecto de SVSoils, clic en **aceptar**, (ver figura A.2.2).

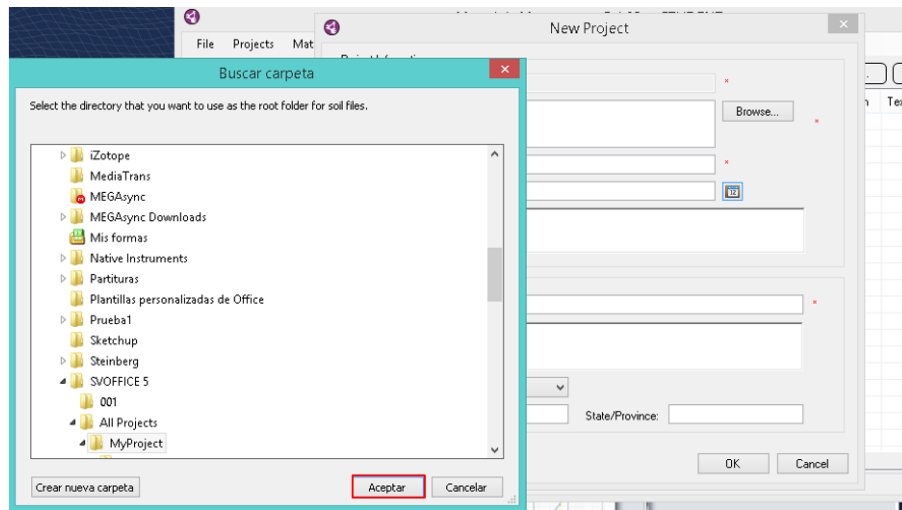


Figura A.2. 2 Pestaña donde se muestra la ruta donde se guardará nuestro proyecto.
Fuente: SVsoils.

- Se desplegará la pestaña **New Project** de opciones para la identificación de nuestro proyecto, como se muestra en la figura A.2.3, se completan los campos obligatorios, clic en **OK** y se desplegará la pestaña de confirmación, clic en **aceptar**.

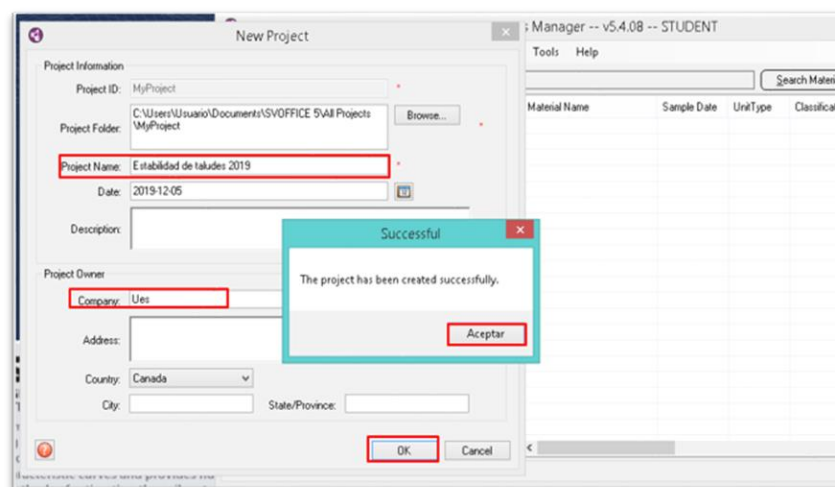


Figura A.2. 3 Pestaña identificación del proyecto.
Fuente: SVsoils.

2. Crear un nuevo material.

- Clic en el botón **Material**, luego seleccionamos el botón **New Material For This Project** (ver figura A.2.4).

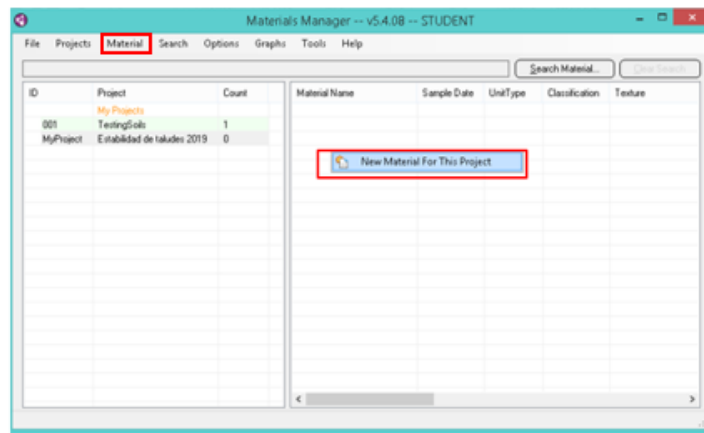


Figura A.2. 4 Interfaz de programa SVSoils.
Fuente: SVSoils.

- Se desplegará la ventana **New Material** (ver figura A.2.5), se completa la información del material: nombre del material, sistema de clasificación, propiedades del material, etc.

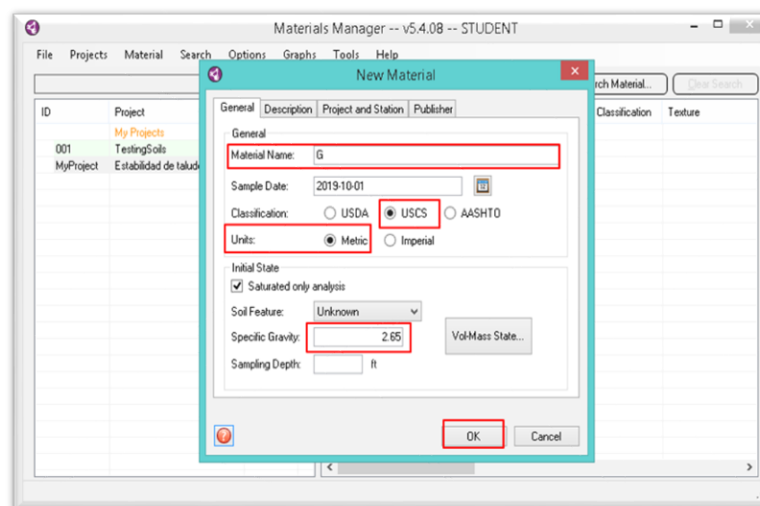


Figura A.2. 5 Pestaña New Material.
Fuente: SVSoils.

- Se desplegará la interfaz para el nuevo material, luego hacer clic en el botón **Grain-size**, y se desplegará la pestaña **Grain-size**, como se muestra en la figura A.2.6, introducimos los datos del análisis granulométrico.

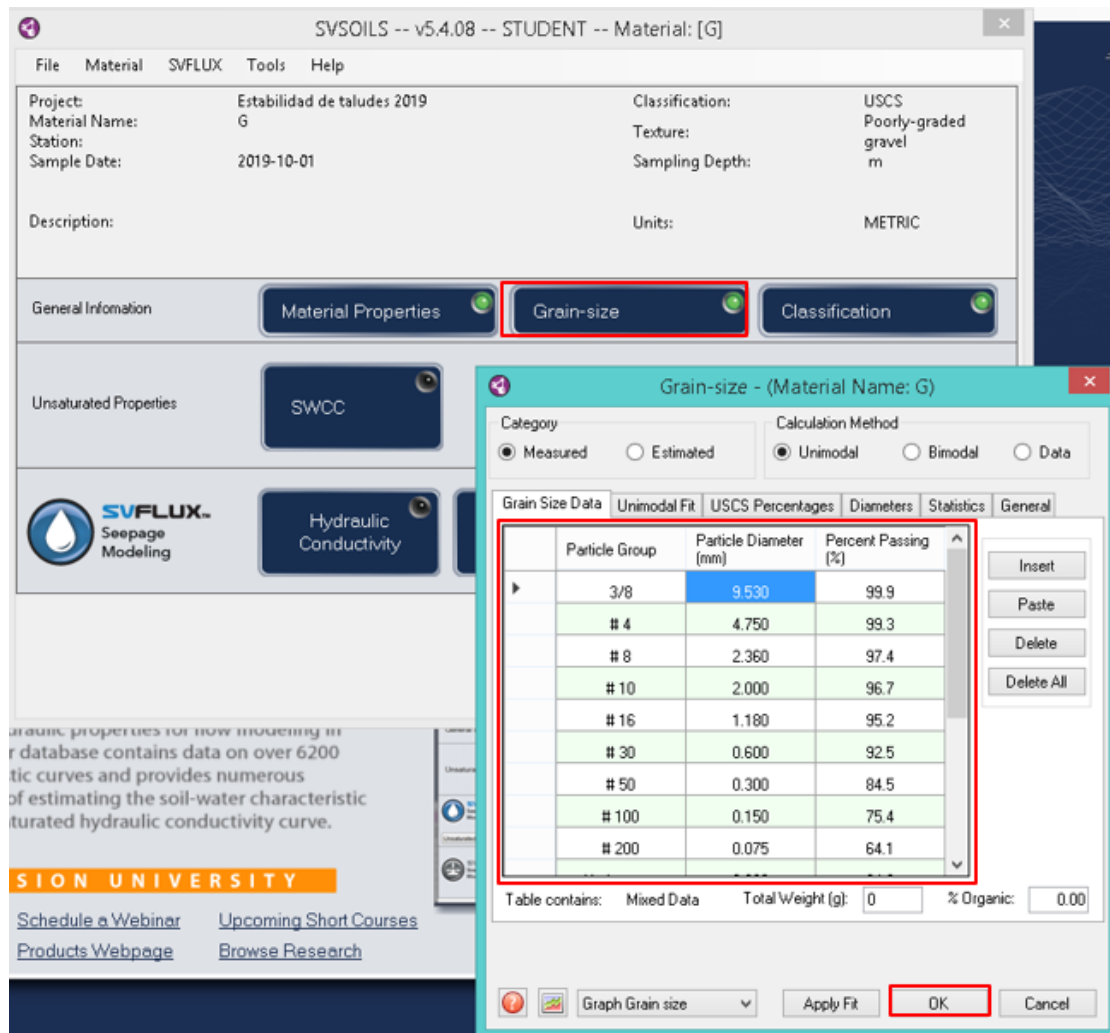


Figura A.2. 6 Pestaña Grain-size.

Fuente: SVSolis.

- Luego hacer clic en el botón **Classification**, y se desplegará la pestaña **Classification**, como se muestra en la figura A.2.7, introducimos valores de limite

líquido y límite plástico, luego clic en **Classify** y se genera la clasificación del material, luego clic en **aceptar**.

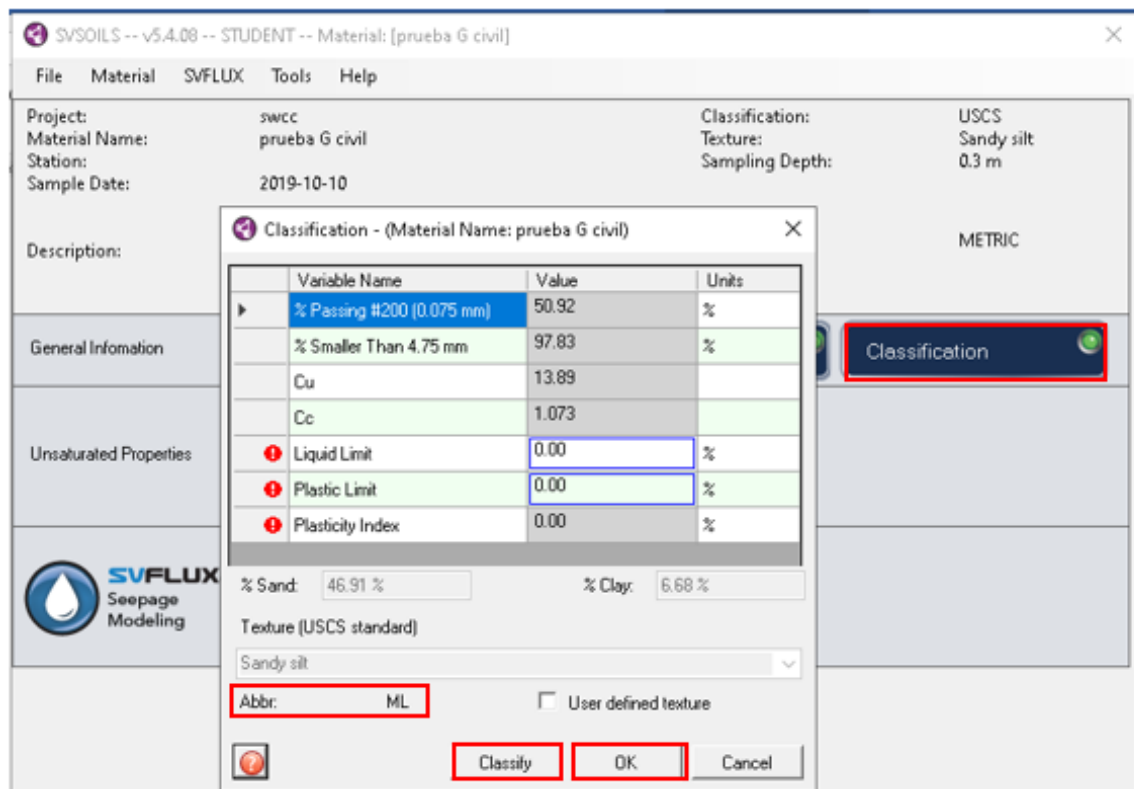


Figura A.2. 7 Pestaña Classification.
Fuente: SVSolis.

- Luego hacer clic en el botón **SWCC**, se desplegará la ventana **Drying SWCC** como se muestra en la figura A.2.8.

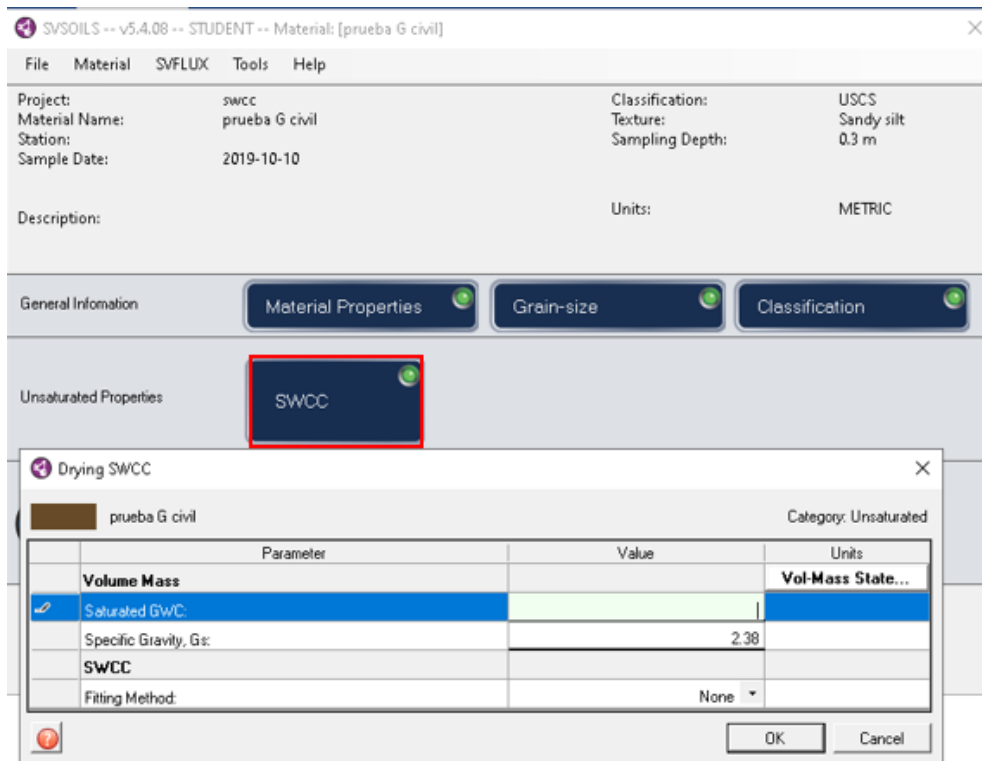


Figura A.2. 8 Pestaña Drying SWCC.
Fuente: SVSolis.

- En el caso de **procedimiento de medición indirecta de estimación de la curva característica suelo-agua**, clic en el botón **fiting method > Fredlund y Xing Fit > Estimation > Torres**, el valor **D10** se genera automáticamente del análisis granulométrico anteriormente introducido. Ver figura A.2.9.
- Luego clic en el botón **Apply Fit**, el programa genera los valores de ajuste a,m,n,h, luego clic **OK**.
- Para observar la curva característica suelo-agua generada (ver figura A.10), hacer clic en la opción **Graph SWCC**, ver figura A.2.9, parte inferior.

SVSOILS -- v5.4.08 -- PROFESSIONAL -- Material: [G civil estimacion]

File Material SVFLUX SVSLOPE SVHEAT SVCHEM Tools Help

Project: Prueba Classification: USCS

Material: Drying SWCC

Source: G civil estimacion Category: Unsaturated

Parameter	Value	Units
Volume Mass		
Saturated GWC:	0.167	Vol-Mass State...
Specific Gravity, Gs:	2.38	
SWCC		
Fitting Method:	Fredlund and Xing Fit	Apply Fit
Source Type:	Estimation	
Source:	Torres	
D10:	0.003366228	mm
af:	1.2800	kPa
nf:	1.0427	
mf:	0.7282	
hr:	100.00	kPa
Fit:	<input checked="" type="checkbox"/>	
Error:		R ²
Residual VWC:	0.0936	
Residual Percentage:	32.89	%
Wilting Point:	0.0464	(w/c)
AEV:	0.47	kPa
Max. Slope:	0.0000	
Saturation Conditions		
Saturation Suction:	0.1000	kPa
Fit VWC at Saturation Suction:	0.2792	
Fit mw at Saturation Suction:	5.227E-002	1/kPa

Graph SWCC

OK Cancel

Figura A.2. 9 Ventana Drying SWCC para estimación a partir de granulometría.

Fuente: SVSolis.

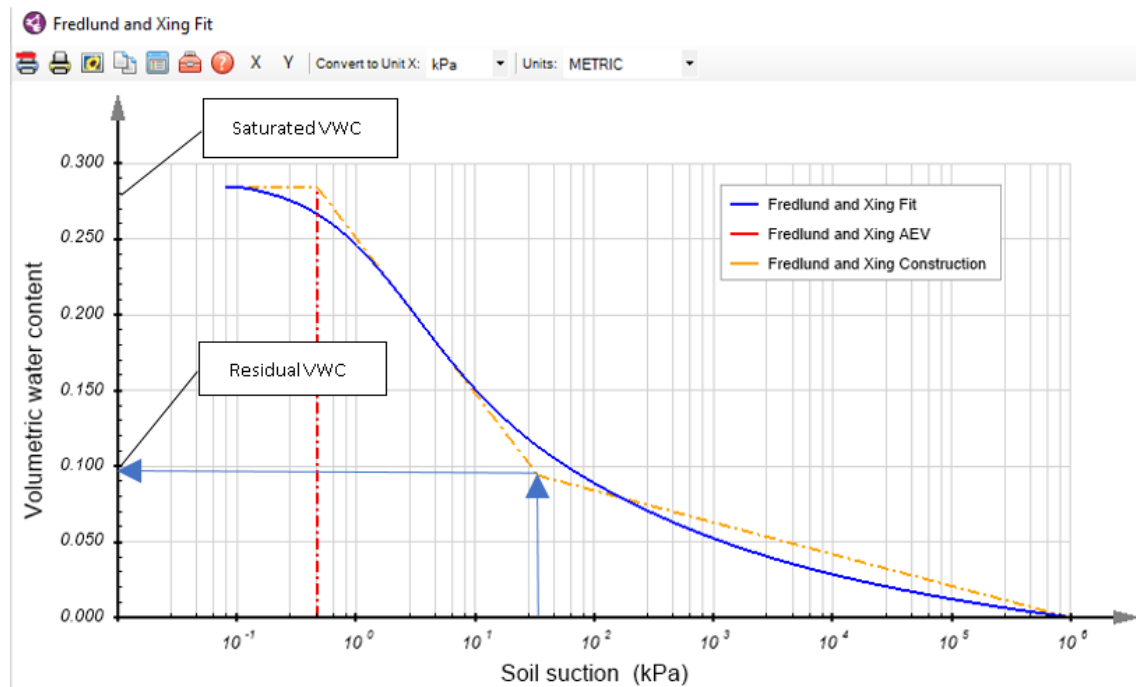


Figura A.2. 10 curva característica suelo-agua, generada por estimación de Torres a partir de granulometría y ajustada por método de Fredlund y Xing.

Fuente: SVSsolis.

- **Para generar la curva característica suelo-agua a partir de la medición directa de succión**, hacer clic en el botón **Vol-Mass State**, se desplegará la pestaña **Volume mass**, introducimos tres propiedades del suelo, clic en **Calculate**, clic **OK**. Como se muestra en la figura A.2.11.

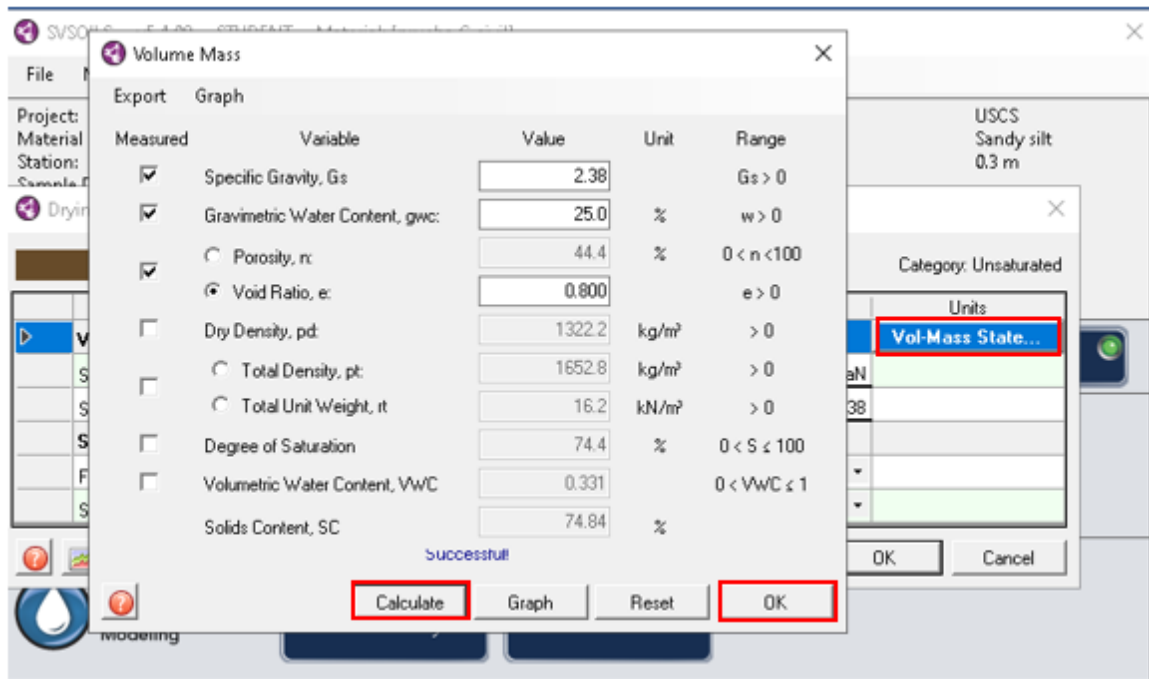


Figura A.2. 11 Pestaña Volume Mass, se muestra las propiedades del suelo.

Fuente: SVSoils.

- Luego se selecciona el método de ajuste de **Fredlund y Xing > Laboratory Data** (ver figura A.2.12), hacer clic en el botón **Data**.

Drying SWCC

Category: Unsaturated

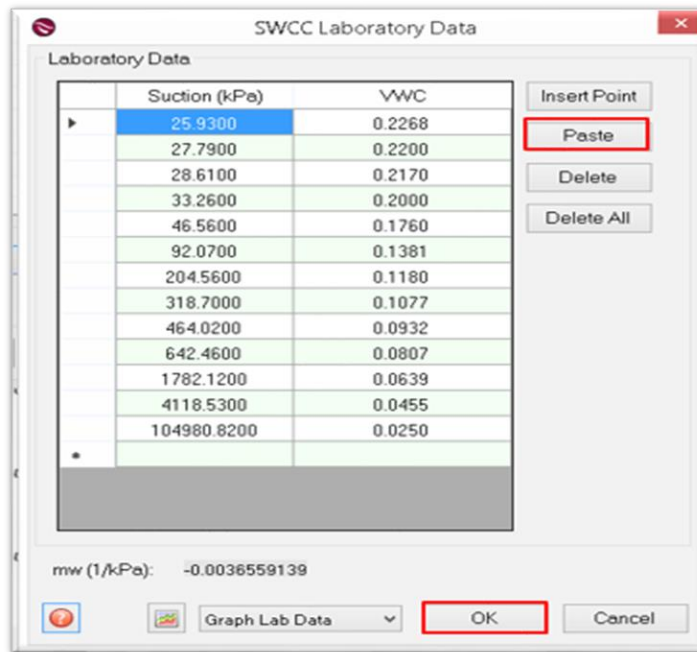
Parameter	Value	Units
Volume Mass		
Saturated GWC:	NeuN	
Specific Gravity, Gs:	2.65	
SWCC		
Fitting Method:	Fredlund and Xing Fit	Apply Fit
Source Type:	Data	
Source:	Laboratory data	Data...
af:		kPa
nf:		
mf:		
hr:		kPa
Fit:	<input type="checkbox"/>	
Error:		R ²
Residual VWC:		
Residual Percentage:		%
Wilting Point:		(w/c)
AEV:		kPa
Max. Slope:	0.0000	
Saturation Conditions		
Saturation Suction:	0.1000	kPa
Fit VWC at Saturation Suction:	0.0000	
Fit mw at Saturation Suction:	0.000E+000	1/kPa

Graph SWCC

OK Cancel

Figura A.2. 12 Ventana Drying SWCC para datos de succión.
Fuente: SVSoils.

- Luego de hacer clic en el botón **Data**, se desplegará la pestaña para introducir los datos de succión (ver figura A.2.13), clic en **OK**. Hacer clic en **Apply Fit** y se generaran los valores de los parámetros a,m,n,h, mostrados en la figura A.2.14.



777778

Figura A.2. 13 Pestaña SWCC Laboratory Data.

Fuente: SVSoils.

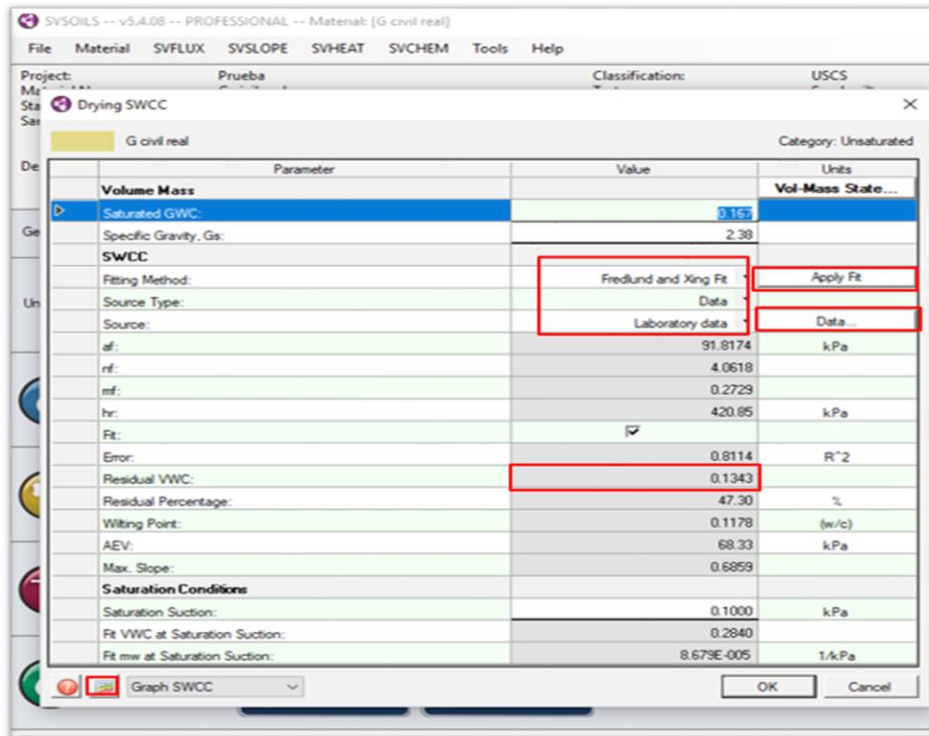


Figura A.2. 14 Valores generados a partir de datos de succión.

Fuente: SVSoils.

- Para observar la curva característica suelo-agua hacer clic en el botón **Graph SWCC**, en la figura A.2.15, se puede observar dicha curva generada a partir de datos de succión.

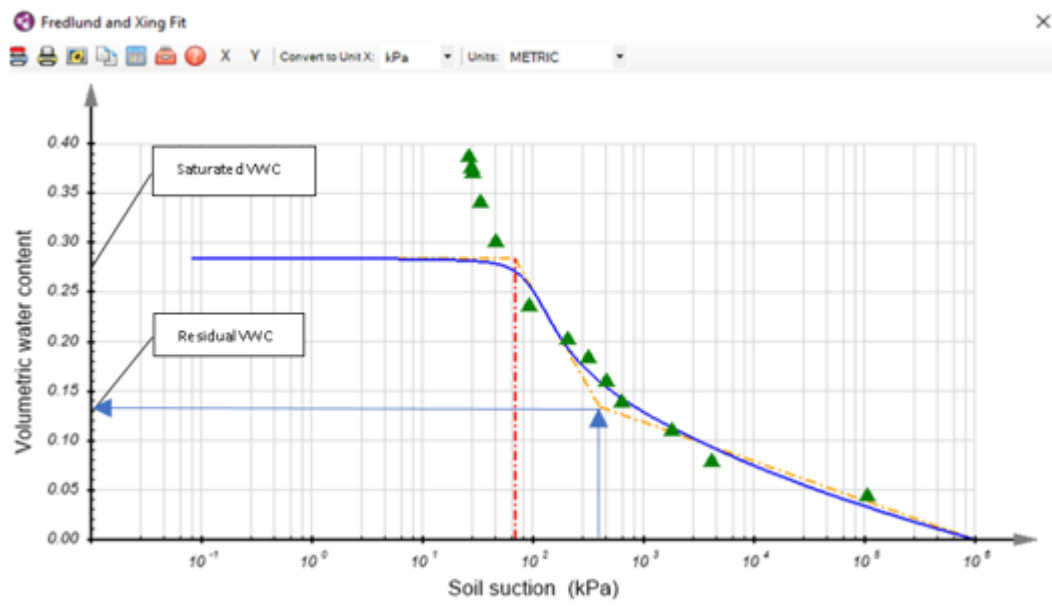


Figura A.2. 15 curva característica suelo-agua, generada por estimación de Torres a partir de granulometría y ajustada por método de Fredlund y Xing.

Fuente: SVSoils.

A continuación, se describe el procedimiento general utilizado con el software SVSLOPE, para realizar las diferentes modelaciones que comprenden la presente investigación:

1. Crear un nuevo modelo
 - Hacer clic en el botón de **SVSLOPE**, luego clic en el botón **New Model**, y se desplegará la pestaña de **Create New Model**, se introduce el nombre del modelo, la dirección del deslizamiento, unidad, etc, clic en **OK**. Ver figura A.2.16.

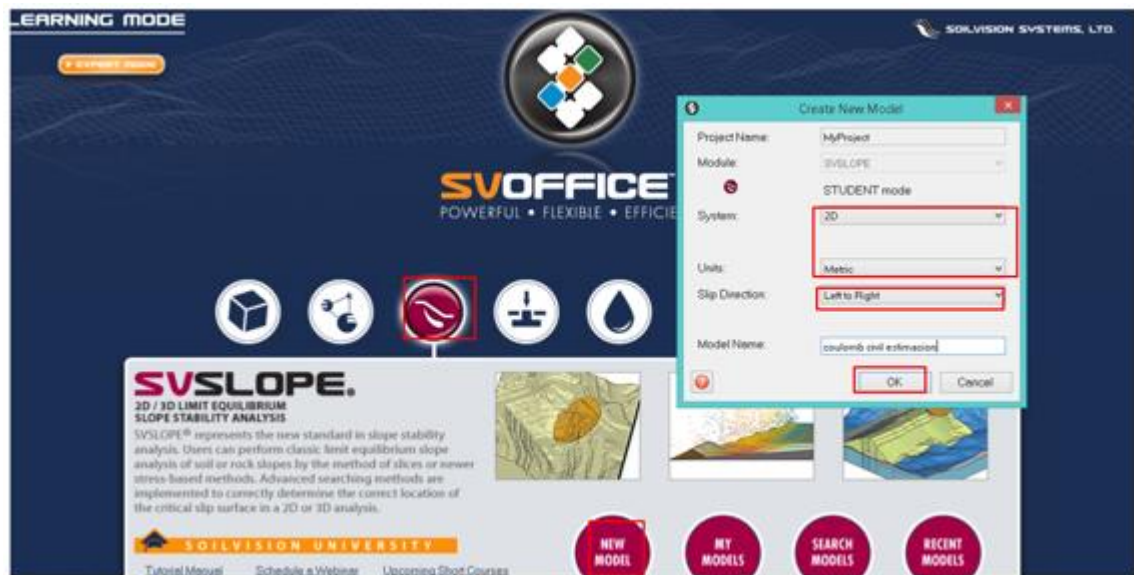


Figura A.2. 16 Pestaña Create New Model.

Fuente: SVSlope.

2. Hacer clic en la pestaña **View**, luego se selecciona la opción **World Coordinate System**, se desplegará la pestaña **World Coordinate System**, introducimos los datos para delimitar el área de trabajo de SVSlope, clic en **OK**, ahora ya se tiene es espacio de trabajo configurado. Ver figura A.2.17.

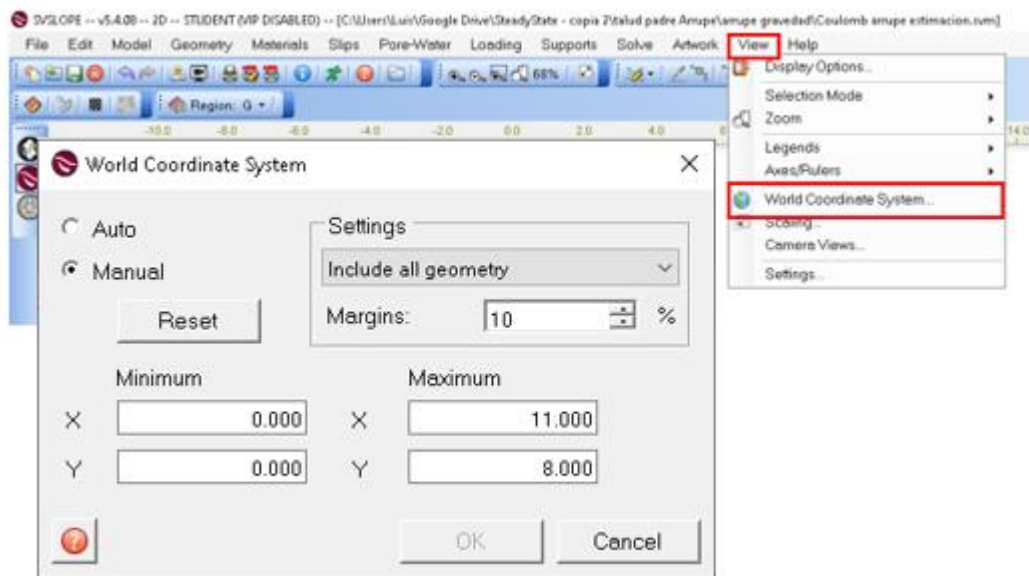


Figura A.2. 17 Ventana World Coordinate System.

Fuente: SVSlope.

3. Continuamos haciendo clic en la pestaña **Model** y se selecciona la opción **Setting**.

Ver figura A.2.18.

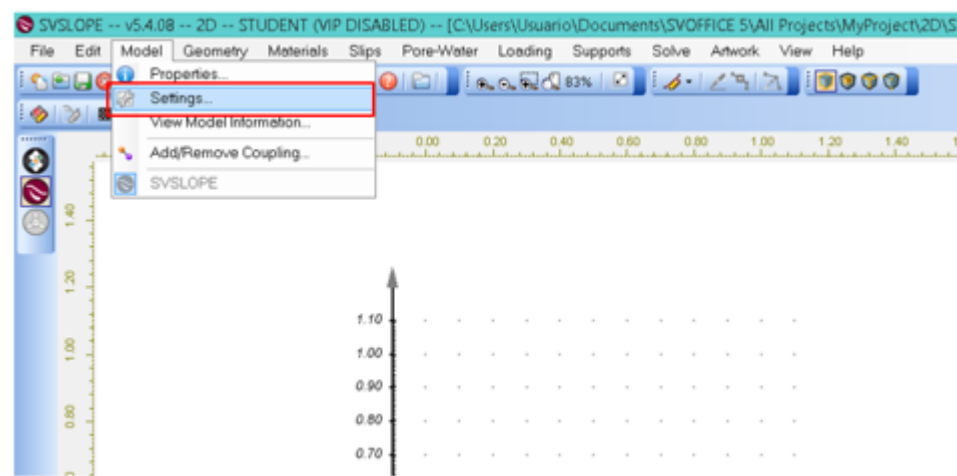


Figura A.2. 18 pestaña Model en barra inicial del menú.

Fuente: SVSlope.

4. Luego se desplegará la ventana **Settings**, la cual se configurará de la siguiente manera:

- Para la modelación usando el modelo Mohr-Coulomb sin considerar puntos de succión, se selecciona la dirección del deslizamiento: **Left to Right**, forma de deslizamiento: **Circular** y se selecciona el método de búsqueda: **Grid and Tangent**. ver figura A.2.19 A.
- Para la modelación usando el criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados y criterios de suelos parcialmente saturados considerando puntos de succión como presión de poros, se selecciona la dirección del deslizamiento: **Left to Right**, forma de deslizamiento: **Nom-Circular** y se selecciona el método de búsqueda: **Block**. ver figura A.2.19 B.

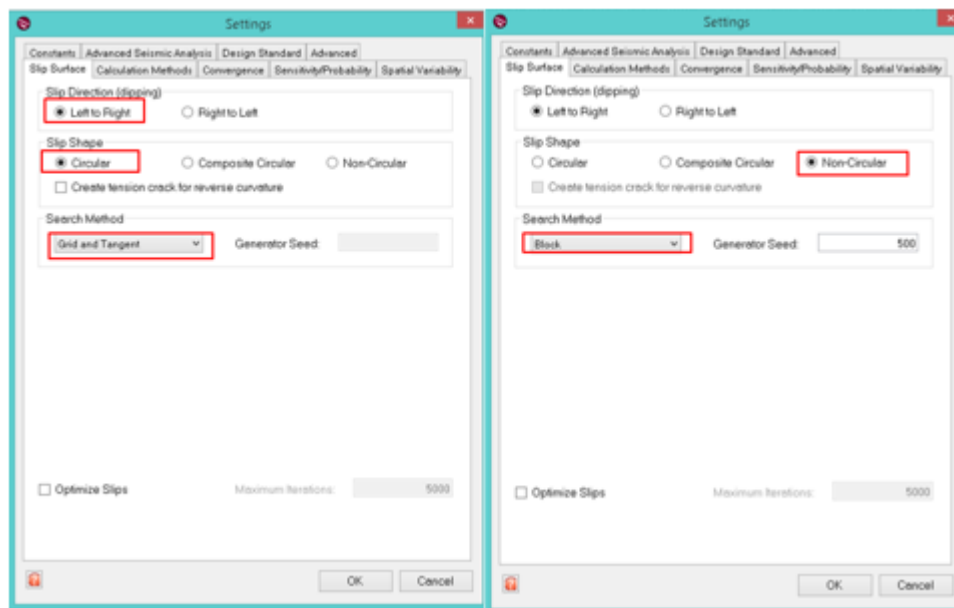


Figura A.2. 19 ventana Settings opción Slip Surface: (A) falla circular, (B) falla no circular.

Fuente: SVSlope.

5. Luego seleccionamos la opción **Calculation Methods**, para la presente investigación se seleccionaron los métodos: Spencer, Morgenstern y Price, y

Sarma, para las diferentes modelaciones, como se muestra en Figura A.2.20 y clic en **OK**.

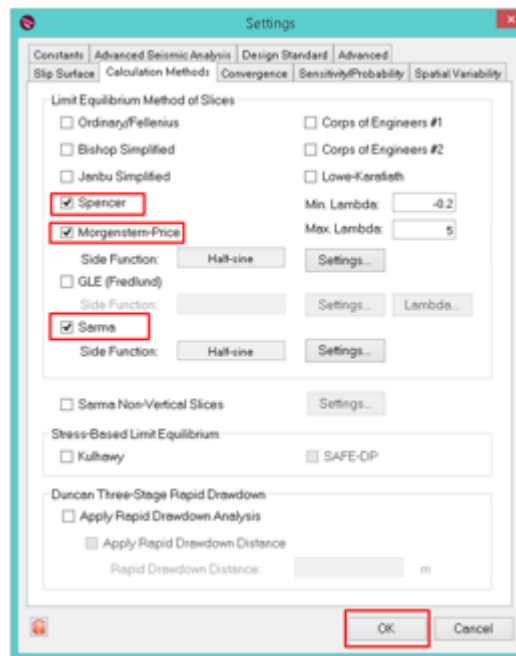


Figura A.2. 20 Ventana Setting opción Calculation Methods.
Fuente: SVSlope.

- Introducción de la topografía del talud: se selecciona la pestaña **Geometry**, clic en la opción **Regions**. Ver figura A.2.21.

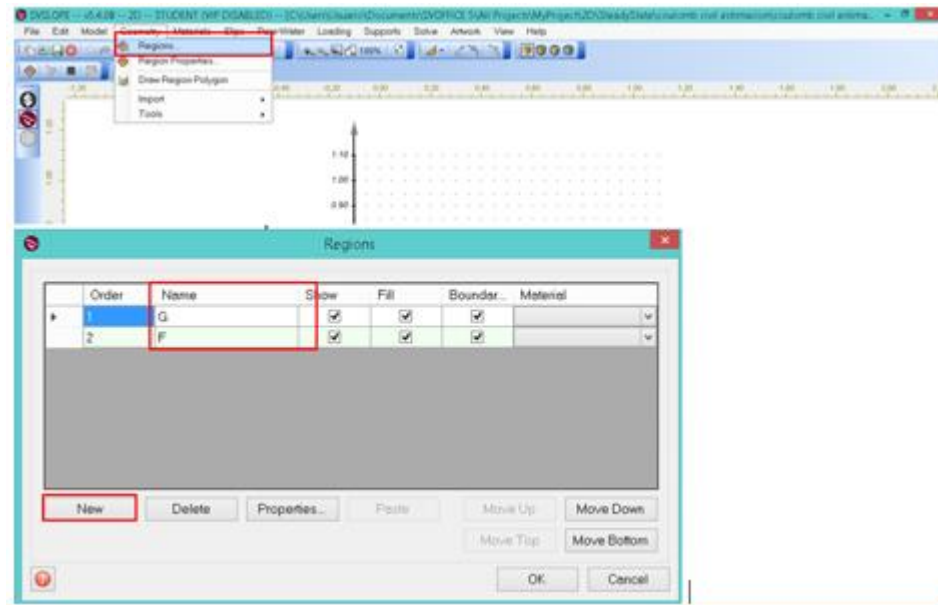


Figura A.2. 21 Pestaña Geometry, opción Ventana Regions.

Fuente: SVSlope.

Luego después de desplegada la ventana **regions**, clic en **New** y se nombra cada una de las capas, luego clic en el botón **Properties**, se desplegará la ventana **Region Properties**, se introducen datos topográficos de cada una de las regiones y clic en **OK**. Ver figura A.2.22.

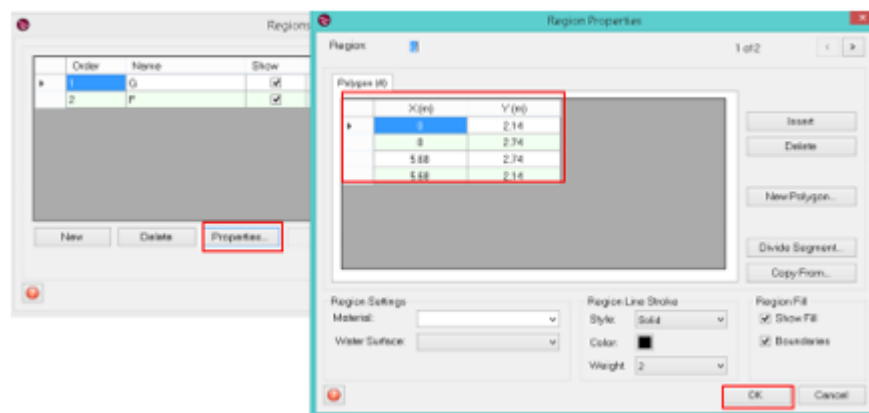


Figura A.2. 22 Ventana Regions Properties, introducción de topografía del talud.

Fuente: SVSlope.

7. Crear los materiales: clic en la pestaña **Materials** (ver figura A.2.23), se selecciona la opción **Manager**, se desplegará la ventana **Materials Manager**, en la cual introduciremos las propiedades de los materiales, haciendo clic en **New** y se desplegará la ventana **New Material**. Ver figura A.2.24.

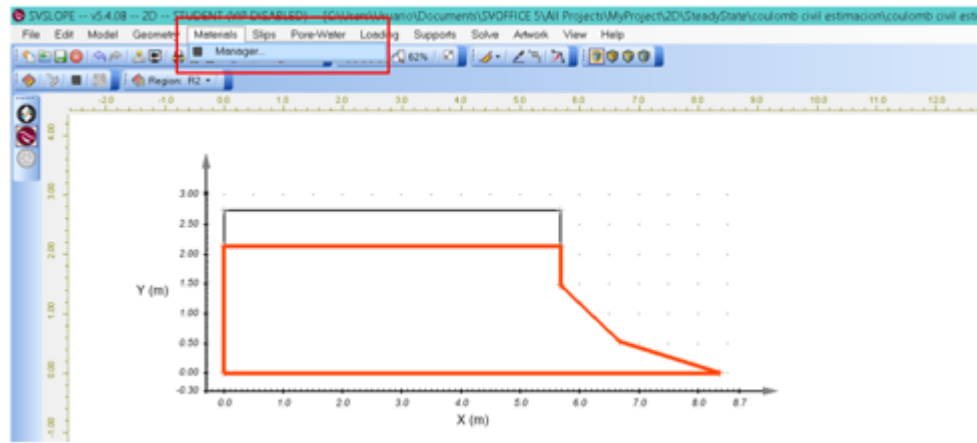


Figura A.2. 23 Pestaña Materials en barra de menú.
Fuente: SVSlope.

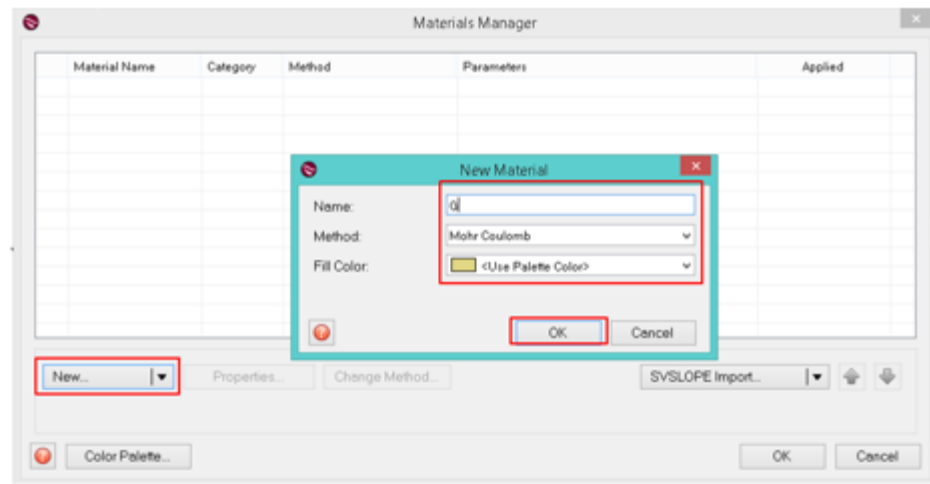


Figura A.2. 24 Opción Materials Manager, Ventana New Material.
Fuente: SVSlope.

Luego de desplegada la ventana **New Material**, se selecciona el Modelo a utilizar:

- Al seleccionar el modelo Mohr-Coulomb, se desplegará la ventana **Material Properties**, en la cual se introduce los valores de cohesión y ángulo de fricción interna del material (ver figura A.2.25), luego clic en **OK**.

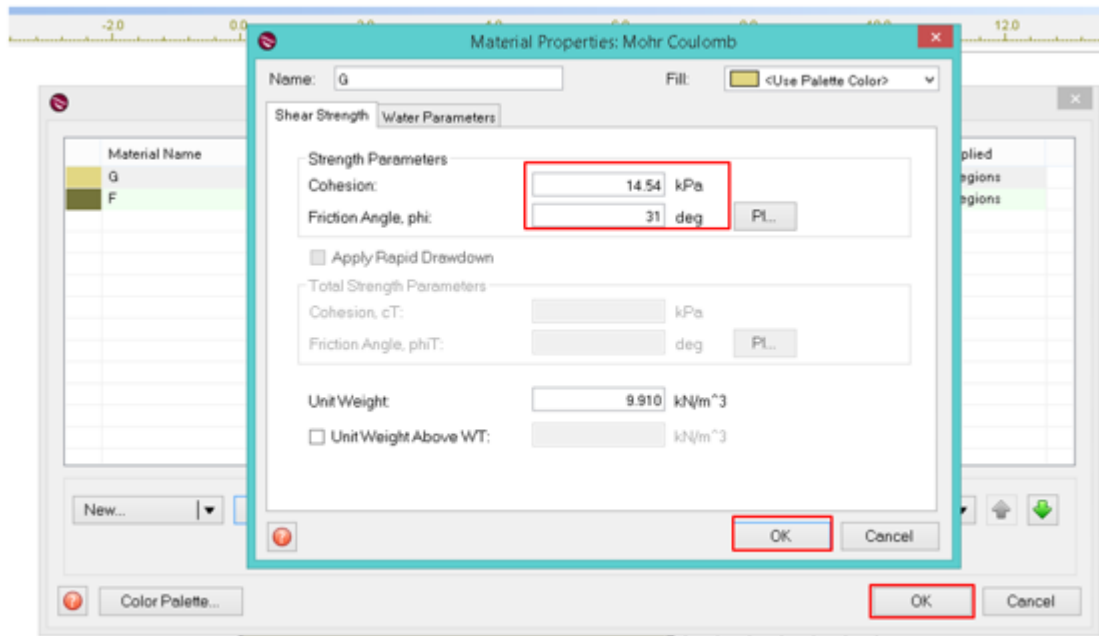


Figura A.2. 25 Ventana Material Properties, criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados.
Fuente: SVSlope.

- Al seleccionar el criterio de Fredlund (ver figura A.2.26), se desplegará la ventana **Material Properties**, en la opción **Shear Strength**, se introduce los valores de cohesión y ángulo de fricción interna y peso específico del material (ver figura A.2.27), luego clic en **OK**. Mismos pasos se siguen al seleccionar el criterio de Vanapalli.

depende del índice plástico del material, para los materiales constituyentes de los taludes en estudio se utilizó un valor de $K=1$, debido a las características de los materiales.

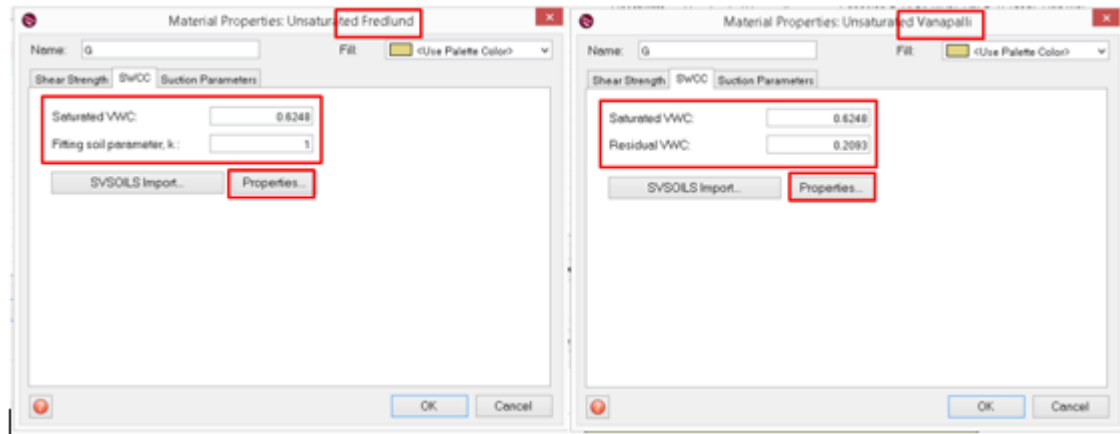


Figura A.2. 28 introducción de parámetros de curva característica suelo agua para Fredlund y Vanapalli.

Fuente: SVSlope.

- Luego, clic en el botón **Properties...**, para el caso de las modelaciones utilizando estimaciones, se selecciona la opción **Estimacion**, luego **Torres**, Introducimos valor de **D10** obtenido de SVSoils, clic en **Apply**, clic **OK**. Ver figura A.2.29.

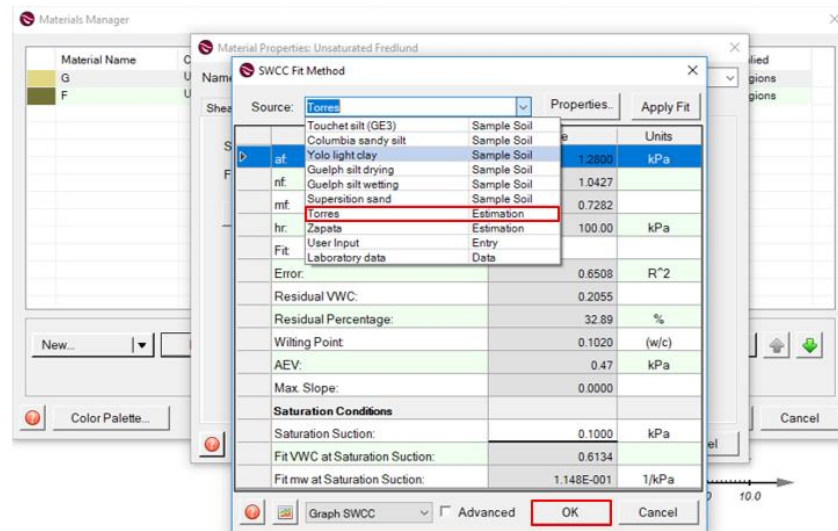


Figura A.2. 29 Selección de método para estimación de curva característica suelo-agua.
Fuente: SVSlope.

- Para el caso de las modelaciones utilizando datos de succión real, se selecciona la opción **Laboratory Data** (Ver figura No.4.30 A), luego clic en **Data**, Introducimos valores de succión (ver figura No.4.30 B), clic en **Apply**, clic **OK**.

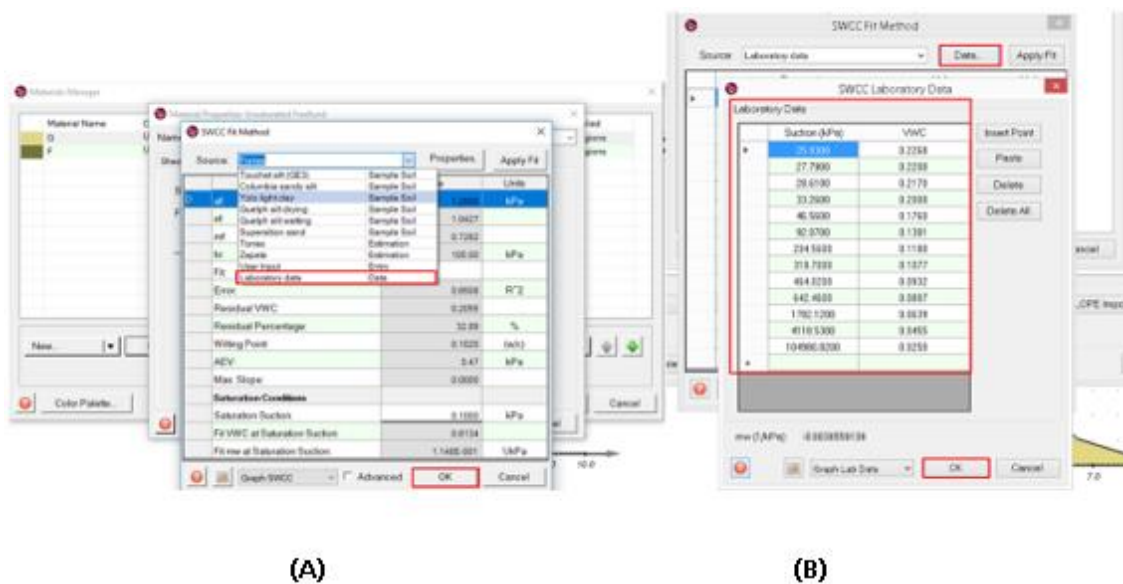


Figura A.2. 30 Selección de método de obtención de curva característica suelo-agua: (A) opción Datos de laboratorio, (B) introducción de valores de succión.

Fuente: SVSlope.

8. Definir la superficie de falla:

- para el caso del modelo Mohr-Coulomb para suelos saturados: clic en la pestaña **Slips**, luego seleccionar **Grid and Tangent**, se desplegará la ventana **Grid and Tangent**, se selecciona la opción **Grid** e introducimos las coordenadas de la ubicación de la cuadrícula, luego seleccionar la opción **Tangent** e introducimos las coordenadas de los radios de giro. Ver figura A.2.31.

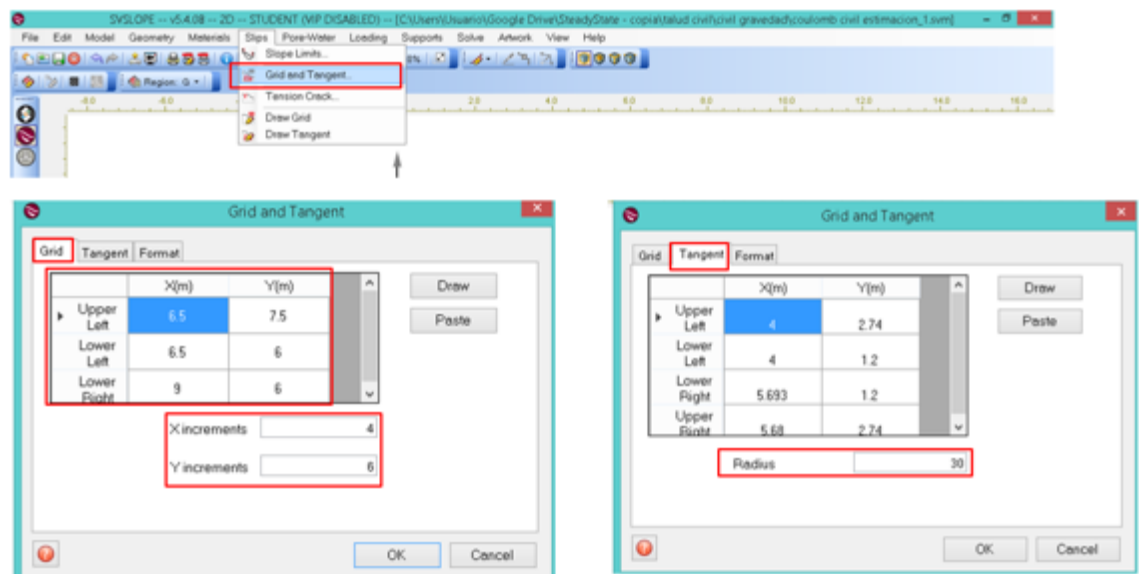


Figura A.2. 31 introducción de coordenadas de cuadrícula y de radios de giro.

Fuente: SVSlope.

- para el caso del criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados y los criterios de suelos parcialmente saturados considerando puntos de succión: clic en la pestaña **Slips**, luego seleccionar **Block Search**, se desplegará la ventana **Block Search**, se seleccionó la opción usar puntos fijos definidos por el usuario **Use user-defined fixed points** y utilizaron los valores definidos por defecto del programa,

luego seleccionar la opción **Block**, clic en el botón **New** e introducimos las coordenadas del bloque que delimitará las superficies de falla, luego clic en **OK**.
Ver figura A.2.32.

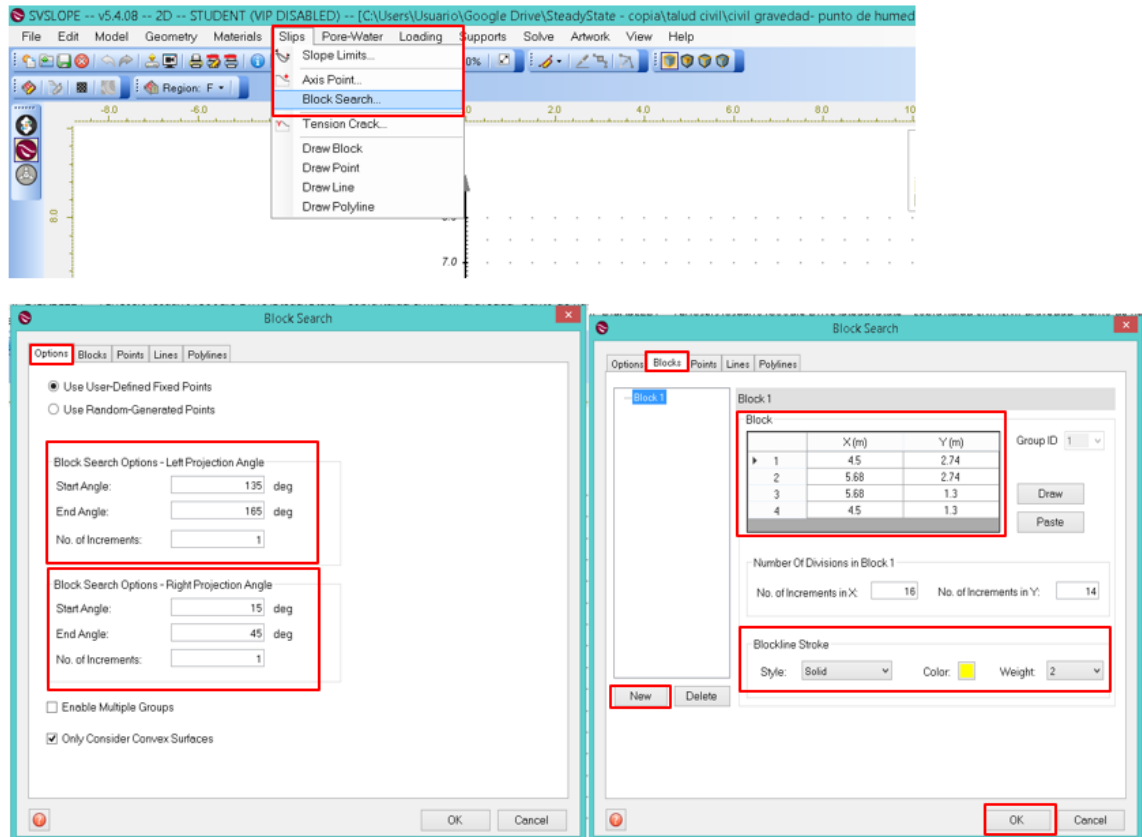


Figura A.2. 32 introducción de coordenadas de bloque para la generación de superficies de falla.

Fuente: SVSlope.

9. Definir condición de presión de poros de agua:

- Para criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados sin considerar puntos de succión: clic en la pestaña **Pore-Water**, luego seleccionar la opción **Settings**, se desplegará la ventana **pore-water pressure**, y se selecciona la opción **None**, clic en **OK**. Ver figura A.2.33

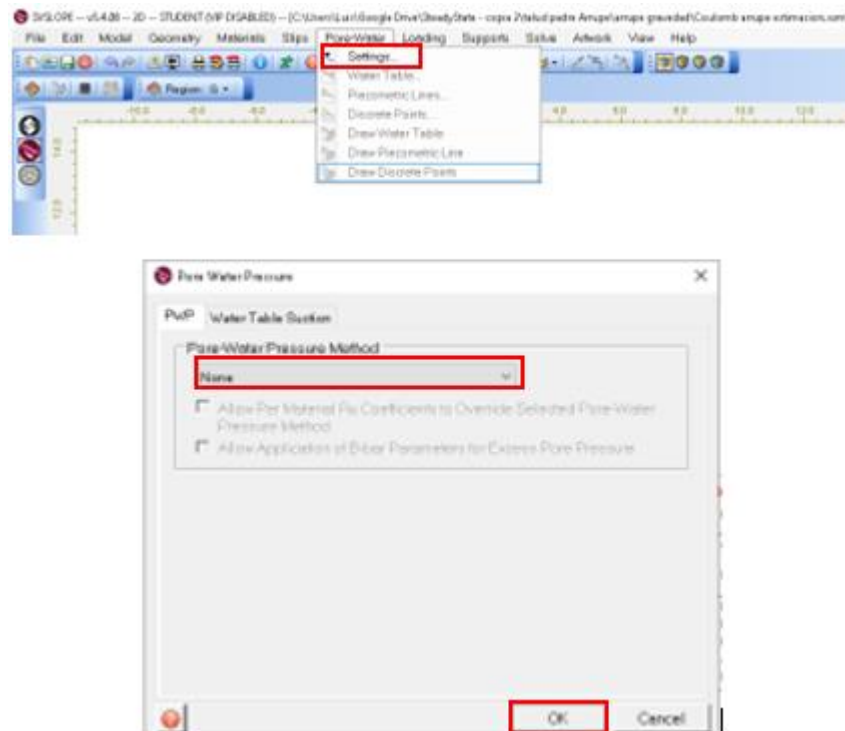


Figura A.2. 33 Configuración de presión de poros para el criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados sin considerar puntos de succión.

Fuente: SVSlope.

- En el caso del criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados y los criterios de suelos parcialmente saturados considerando puntos de succión: clic en la pestaña **Pore-Water**, luego seleccionar la opción **Settings**, se desplegará la ventana **Pore-Water measure**, seleccionar la opción **Discrete Points (Succión)**, para el método de interpolación de los puntos discretos se selecciona la opción **Spline Method**, luego en la opción **Water Table Succion** se selecciona **No Maximum**, luego clic en **OK**. Ver figura A.2.34.

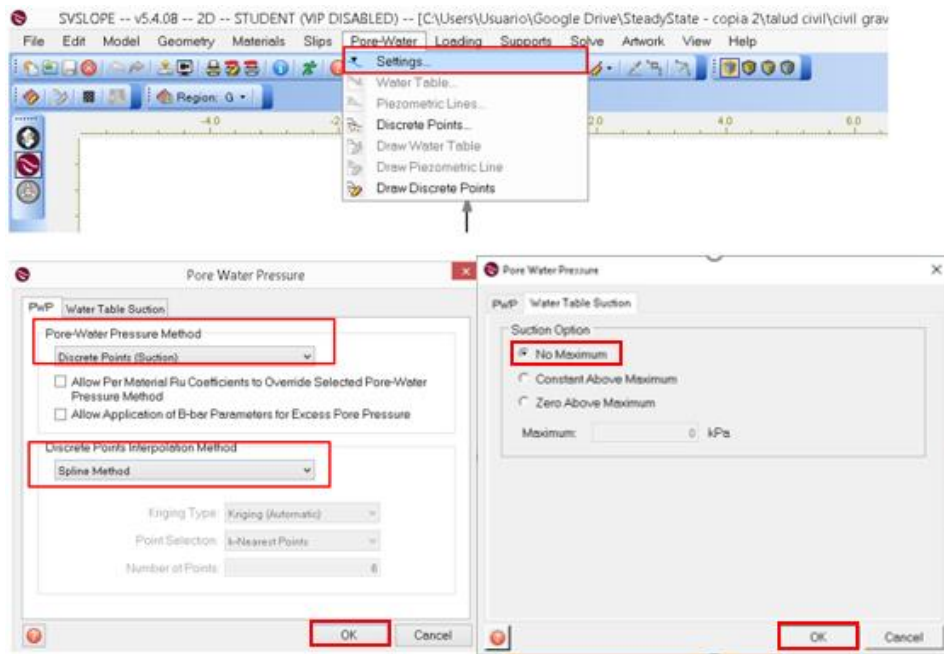


Figura A.2. 34 Configuración de presión de poros, utilizando puntos de succión.
Fuente: SVSlope.

Luego, clic en **Draw Discrete Point** e introducimos las coordenadas de los puntos específicamente, en **points Format**, podemos dar el formato visual. Ver figura A.2.35.

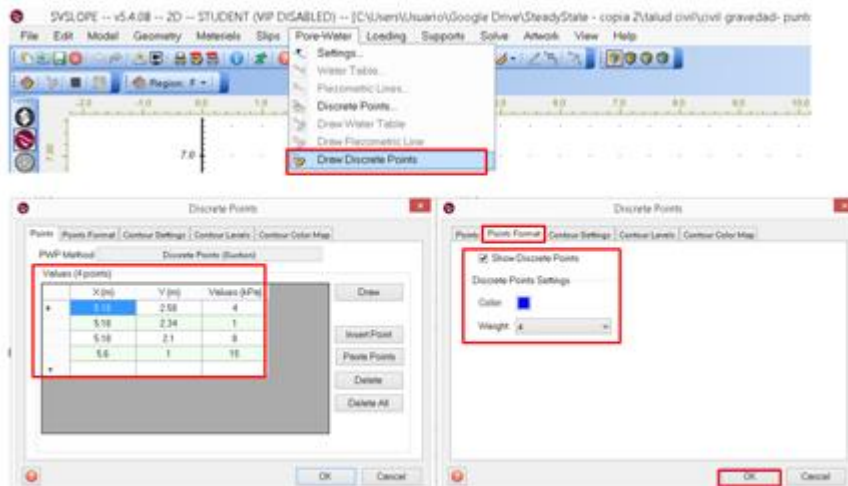


Figura A.2. 35 Introducción de valores de succión en puntos específicos.
Fuente: SVSlope.

10. Definir cargas aplicadas:

- Para la condición gravedad se omite este paso.
- Para la condición gravedad más sismo, el procedimiento es el siguiente: seleccionar la pestaña **Loading**, luego la opción **Seismic Load**, se desplegará la ventana **Seismic Load** y seleccionamos la opción **Constant Pseudo-Static Load**, e introducimos los coeficientes sísmicos: horizontal y vertical, luego clic en **OK**. Ver figura A.2.36.

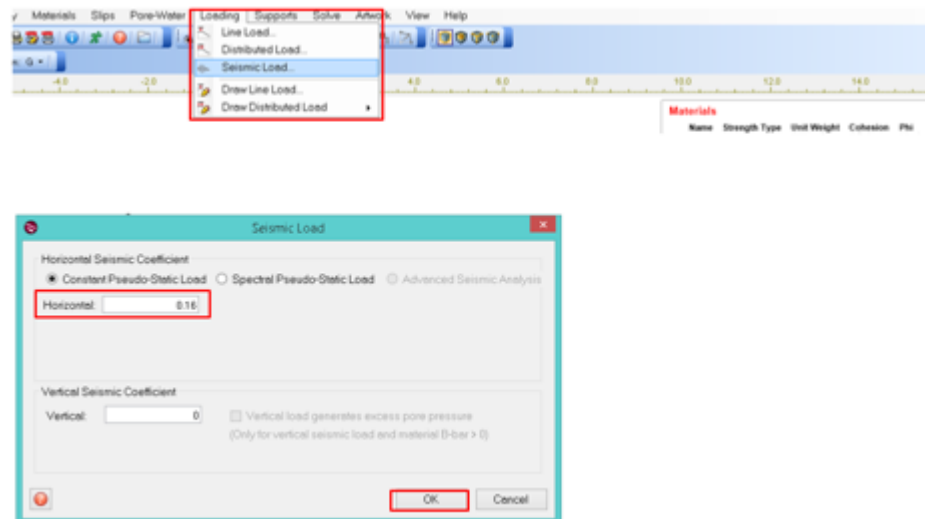


Figura A.2. 36 Procedimiento para asignar cargas sísmicas.

Fuente: SVSlope.

11. Corrida del software: seleccionar la pestaña **Solve**, luego clic en **analyze**, y se ejecuta el análisis. Ver figura A.2.37.

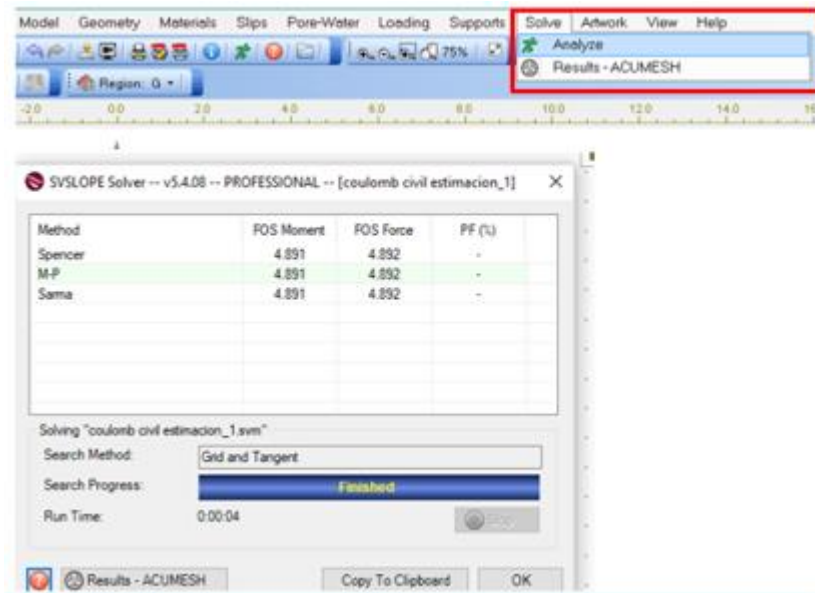


Figura A.2. 37 Corrida para obtención de factores de seguridad.

Fuente: SVSlope.

12. Visualización de superficies de falla: se selecciona la pestaña **Solve**, luego clic en **Results-ACUMESH** y generándose las superficies de falla. Ver figura A.2.38.

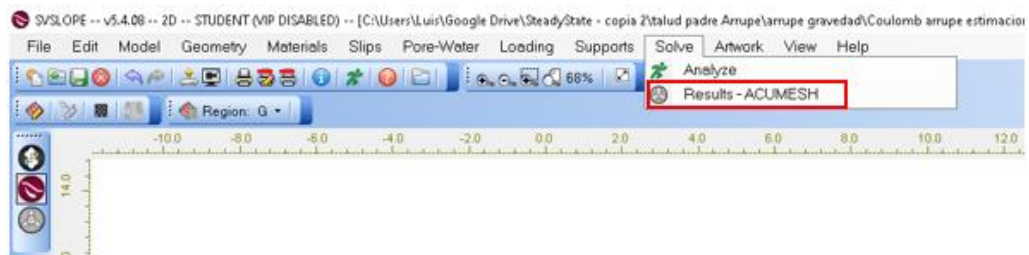


Figura A.2. 38 Visualización las superficies críticas de falla.

Fuente: SVSlope.

En las figuras A.2.39 y A.2.40 se muestran las superficies de falla críticas del talud Civil FIA-UES de la modelación del criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados asumiendo una superficie de falla circular, sin considerar puntos de succión y la modelación del criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados considerando puntos de succión y asumiendo una superficie de falla no circular.

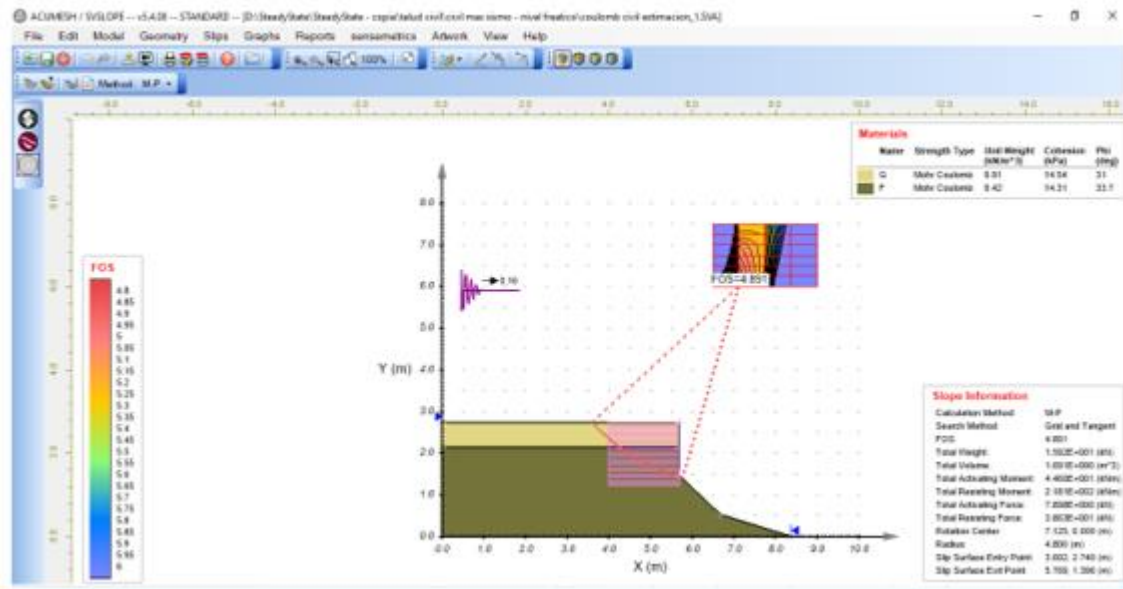


Figura A.2. 39 Superficie de la falla crítica, método Morgenstern y Price, Talud Civil FIA-UES, no considerando puntos de succión, condición gravedad más sismo.

Fuente: SVSlope.

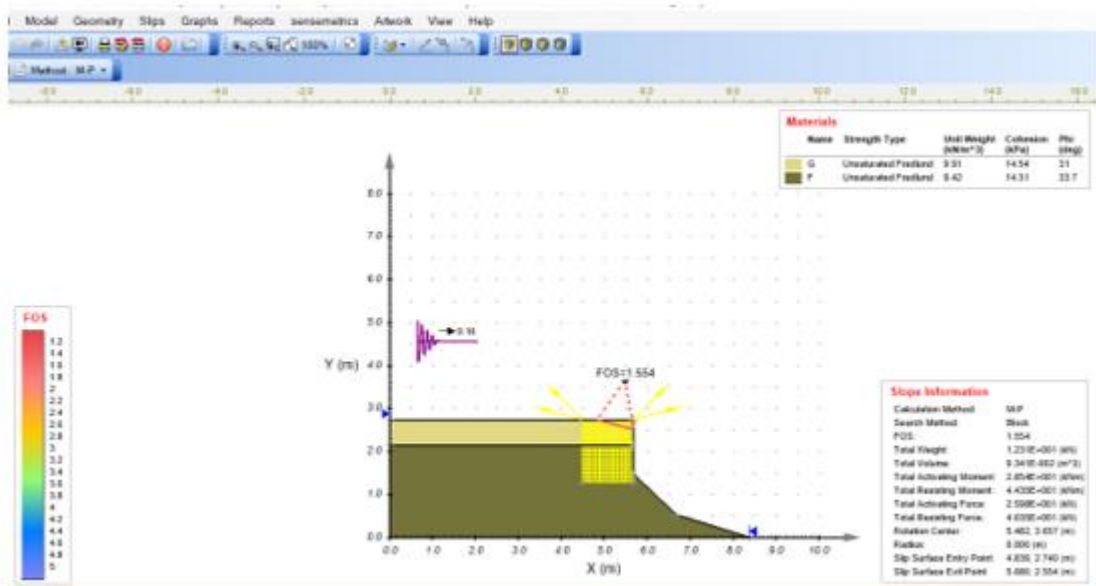


Figura A.2. 40 Superficie de la falla crítica, método Morgenstern y Price, Talud Civil FIA-UES, considerando puntos de succión, condición gravedad más sismo.

Fuente: SVSlope.