

**Viabilidad del uso del sensor
SoilVUE™10 de la empresa
Campbell Scientific para la
instrumentación y análisis de
estabilidad de taludes de suelos
plásticos**

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Viabilidad del uso del sensor SoilVUE™ 10 de la empresa Campbell Scientific para instrumentación y análisis de estabilidad de taludes de suelos plásticos

Llevado a cabo por la estudiante:

Fernández Brizuela María José

Carné: 2018145135

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el miércoles 24 de julio de 2024 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

MAURICIO
ESTEBAN ARAYA
RODRIGUEZ
(FIRMA)

Firmado digitalmente por MAURICIO ESTEBAN ARAYA RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2024.07.29 12:52:43 -06'00'

Ing. Mauricio Araya Rodríguez
Representante Director de la Escuela

WILLIAM
ALONSO POVEDA
MONTROYA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por WILLIAM ALONSO POVEDA MONTROYA (FIRMA)
Fecha: 2024.07.26 10:03:21 -06'00'

Ing. Alonso Poveda Montoya, MSc.
Profesor Guía

IVANNIA MARIA
SOLANO
AGUILAR (FIRMA)

Firmado digitalmente por IVANNIA MARIA SOLANO AGUILAR (FIRMA)
Fecha: 2024.07.29 07:56:27 -06'00'

Ing. Ivannia Solano Aguilar MSc.
Profesora Lectora

MILTON ANTONIO
SANDOVAL QUIROS
(FIRMA)

Firmado digitalmente por MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2024.07.26 09:39:23 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Observador

Resumen

Cada vez son más las empresas que destinan su conocimiento a la creación de tecnologías simples que permiten obtener parámetros del suelo y así, predecir su comportamiento ante la acción de factores externos como el agua; un ejemplo de esto es el perfilador SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific. Por tanto, se planteó el objetivo de determinar la viabilidad del uso del perfilador SoilVUE™10 como parte de la instrumentación en el análisis de estabilidad de taludes de suelos plásticos. Para ello, se construyó un modelo físico y un modelo computacional de taludes con suelo plástico y pendientes de 60° y 90°, aproximadamente; a los cuales se incluyó agua para identificar su efecto en la estabilidad de dichos taludes por medio de la toma de mediciones con el perfilador. Adicionalmente, se ejecutaron pruebas de laboratorio para la caracterización del suelo y la obtención de parámetros geotécnicos que contribuyeron a la conclusión de que el SoilVUE™10 consiste en una herramienta fácil de utilizar y efectiva para la predicción de un deslizamiento superficial en suelos plásticos, siempre y cuando se utilice en conjunto con otros instrumentos de monitoreo gracias a sus mediciones precisas de humedad en el material.

Palabras clave: deslizamientos, estabilidad de taludes, humedad, modelo, Slide 2.0, SoilVUE™10, suelos plásticos.

Abstract

More and more companies are devoting their knowledge to the creation of simple technologies that allow obtaining soil parameters and thus, predict their behavior under the action of external factors such as water; an example of this is the SoilVUE™10 profiler of Campbell Scientific. Therefore, the objective was to determinate the feasibility of using the SoilVUE™10 profiler as part of the instrumentation in the slope stability analysis of plastic soils. For this purpose, a physical model and a computational model of slopes with plastic soils and slopes of approximately 60° and 90° were built; water was included to identify its effect on the stability of these slopes by taking measurements with the profiler. In addition, laboratory tests were carried out to characterize the soil and obtain geotechnical parameters that contributed to the conclusion that the SoilVUE™10 is an easy-to-use and effective tool for predicting a surface landslide in plastic soils, provided it is used in conjunction with other monitoring instruments due to its accurate measurements of moisture in the material.

Key words: landslides, moisture, model, plastic soils, SoilVUE™10, Slide 2.0, slope stability.

Viabilidad del uso del sensor SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific para la instrumentación y análisis de estabilidad de taludes de suelos plásticos

MARÍA JOSÉ FERNÁNDEZ BRIZUELA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio de 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	VII
INTRODUCCIÓN	11
<i>Antecedentes</i>	12
<i>Objetivos</i>	12
<i>Alcance y limitaciones</i>	13
<i>Agradecimientos</i>	14
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	16
1.1. SENSOR SOILVUE™10	16
1.1.1. <i>Descripción técnica</i>	17
1.1.2. <i>Especificaciones</i>	18
1.1.3. <i>Usos</i>	18
1.2. ESTABILIDAD DE TALUDES	19
1.2.1. <i>Factores influyentes en la estabilidad de taludes</i>	21
1.2.2. <i>Tipos de falla y mecanismos de ruptura</i>	26
1.2.3. <i>Análisis de estabilidad de taludes</i>	30
1.2.4. <i>Métodos de cálculo</i>	37
1.3. ENSAYOS DE LABORATORIO	45
1.3.1. <i>ASTM D2216</i>	45
1.3.2. <i>ASTM D1140</i>	45
1.3.3. <i>ASTM D4318</i>	47
1.3.4. <i>ASTM D1557</i>	50
1.3.5. <i>ASTM D3080</i>	51
1.3.6. <i>ASTM D2166</i>	52
1.3.7. <i>ASTM D2573</i>	52
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	54
2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
2.2. VARIABLES	54
2.3. FUENTES DE INFORMACIÓN	55
2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	55
2.4.1. <i>Sensor SoilVUE™10</i>	55
2.4.2. <i>Muestreo y preparación del material</i>	56
2.4.3. <i>Ensayos «in situ» y laboratorio</i>	58
2.4.4. <i>Modelo físico de taludes</i>	61
2.4.5. <i>Modelado en software Slide 2.0</i>	68
2.5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	73
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS	74

3.1.	RESULTADOS	74
3.2.	ANÁLISIS	85
3.2.1.	<i>SoilVUE™10</i>	85
3.2.2.	<i>Ensayos de laboratorio</i>	85
3.2.3.	<i>Modelo físico</i>	88
3.2.4.	<i>Modelos computacionales</i>	93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		95
	CONCLUSIONES.....	95
	RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS.....		98
APÉNDICES		101
1.	MANUAL DE USO DEL SOILVUE™10.....	101
2.	CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN UTILIZADO PARA LA TOMA DE MEDICIONES	102
3.	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SOILVUE™10.....	105
4.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA.....	106
5.	MODELOS COMPUTACIONALES DEL TALUD CON PENDIENTE 60°	107
6.	MODELOS COMPUTACIONALES DEL TALUD CON PENDIENTE 90°	108
ANEXOS.....		109
1.	FICHA TÉCNICA DEL SOILVUE™10	109
2.	TUTORIAL DEL PROGRAMA SLIDE 2.0	110

Resumen ejecutivo

Los deslizamientos de tierra constituyen uno de los desastres naturales cuya probabilidad de ocurrencia se relaciona con factores internos como las propiedades geotécnicas del suelo y geometría del terreno, así como factores externos, entre ellos, la acción del agua y la aplicación de fuerzas sobre los taludes y laderas. Además, estos movimientos masivos de material representan una amenaza latente hacia las personas y su entorno; razón por la cual se han implementado los sistemas de monitoreo en zonas propensas a sufrir este tipo de desastre dentro del país y a nivel mundial.

Existen diversas herramientas empleadas en conjunto para realizar estos monitoreos, como drones, inclinómetros, pozos piezométricos, entre otros. En este caso, el presente proyecto plantea la idea de utilizar el perfilador SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific, generalmente empleado en el área de la agricultura para monitorear sistemas de riego, como una alternativa para obtener parámetros del suelo que permiten la identificación anticipada de la posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento superficial.

Con este proyecto se busca aportar en el área de la investigación e innovación para la Escuela de Ingeniería en Construcción, además de contribuir con los objetivos 9 y 11 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los cuales están orientados al aumento en la investigación científica y las mejoras tecnológicas; además, a la reducción del número de pérdidas ocasionadas por desastres naturales respectivamente.

Dicho esto, se estableció como objetivo general del proyecto determinar la viabilidad del uso del perfilador SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific como parte de la instrumentación en el análisis de estabilidad de taludes de suelos plásticos, por medio de pruebas de laboratorio y en modelos tanto físicos como computacionales.

Para el cumplimiento del objetivo, en primer lugar, fue necesario realizar un estudio exhaustivo de la información existente acerca del perfilador, para identificar las características, especificaciones y usos que pueden ser utilizados en la determinación de propiedades del suelo asociadas a los deslizamientos. Además, acerca de la estabilidad de los taludes, desde los factores que la afectan hasta los diferentes métodos de cálculo empleados para determinar el factor de seguridad.

El SoilVUE™10 consiste en un perfilador que utiliza la tecnología TrueWave™TDR de Campbell para tomar mediciones *in situ* de la humedad, conductividad eléctrica, permisividad dieléctrica y temperatura del suelo de una manera sencilla. Esto gracias a los 10 circuitos TDR conectados en una serie de nueve guías de ondas helicoidales que forman parte del diseño roscado general, el cual asemeja un tornillo para mejorar el contacto del sensor con el suelo al momento de estar instalado y así evitar el error potencial de los espacios de aire que afectan las mediciones de los diferentes parámetros.

Seguidamente, se procedió con la construcción de un modelo físico que contuvo dos taludes con pendientes aproximadas de 60° y 90° que estarían afectados únicamente por la acción del agua. Este se compuso de una estructura principal en tarimas de madera con dimensiones de 1.50 m de largo, 1.00 m de ancho y 1.20 m de altura; en la parte frontal se colocó una lámina de acrílico transparente que permitió la visualización activa del comportamiento de los taludes ante la aplicación del agua.

El suelo empleado para confeccionar los taludes fue obtenido de un apilamiento de material resultante de la excavación del proyecto vial de La Galera (aproximadamente 3 m³), al cual se le aplicaron una serie de ensayos de laboratorio, así como procesos de secado y humedecimiento previos a su inserción dentro del modelo físico. Se tomaron diferentes muestras del material para ejecutar pruebas de granulometría, límites de plasticidad, Proctor modificado, compresión inconfiada, permeabilidad con carga variable y corte directo.

Se obtuvo una curva granulométrica donde el 6% del material correspondió a gravas, 45% fueron arenas y 49% representaba la presencia de suelos finos (limos y arcillas); lo cual contribuyó a las mediciones obtenidas con el sensor, ya que este resulta ser más efectivo en arenas, limos y arcillas dada su forma. Además, el material se clasificó como un limo de alta plasticidad gracias a la prueba de límites de Atterberg.

Asimismo, gracias a la prueba de Proctor modificado, se obtuvo la densidad del material con un valor de 1410 kg/m³; por medio del ensayo de compresión inconfiada, se determinó el esfuerzo máximo de compresión de 266.08 kPa, con la cual, al dividirla entre dos, se obtiene la resistencia al corte no drenada del material con un valor de 133.04 kPa; el coeficiente de permeabilidad (k) estimado en la prueba de permeabilidad con carga variable fue de 1.895×10^{-07} cm/s. Finalmente, se realizó el ensayo de corte directo drenado consolidado para obtener un ángulo de fricción efectivo de aproximadamente 44.83° para una cohesión efectiva aproximada de 0 kPa.

Mientras tanto, el material restante se extendió sobre un plástico y se dejó secar al aire para humedecerlo controladamente y facilitar el proceso de compactación por capas de 15 cm dentro del modelo físico, ya que se buscaba tener la máxima densidad en el suelo para disminuir los espacios vacíos y obtener un contacto completo entre el material circundante y las ondas sensoriales del SoilVUE™10. Para ello, se adicionaron 200 mL de agua por cada cubeta de material que se agregaba al modelo; el cual, a su vez, fue llenado mientras se le daba forma a cada una de las pendientes propuestas de taludes y se tomaban mediciones de la densidad por medio del densímetro nuclear de la Escuela de Ingeniería en Construcción con ayuda de los técnicos del laboratorio. Dicha información resultó aproximarse considerablemente a la densidad determinada mediante la prueba de Proctor modificado, donde la que más se alejó fue la capa superior con un valor de 1056 kg/m³, el cual corresponde a un 75% de la densidad máxima.

Adicionalmente, al finalizar el proceso de llenado y compactado del material, se realizó la prueba de corte con veleta en suelos saturados de grano fino, con la finalidad de obtener valores *in situ* de la resistencia al corte del suelo. No obstante, estos fueron descartados del análisis debido a la dispersión de los resultados registrados por la veleta y su notable diferencia entre los datos obtenidos de la prueba de compresión inconfiada; además, se detectaron partículas grandes de suelo que pudieron afectar las mediciones.

Para simular la caída de diferentes intensidades de lluvia sobre el modelo, se determinaron tres caudales aproximados: 0.016 L/s, 0.078 L/s y 0.122 L/s; siendo este último el más intenso y el que provocó gran parte de los desplazamientos en el material para ambos taludes durante la toma de mediciones con el perfilador. La implementación del agua se realizó por medio de una manguera con pequeños agujeros a lo largo de ella, simulando un aspersor alargado que cubrió la totalidad del ancho de los taludes; se instaló una estructura metálica de aproximadamente 20 cm de altura que sirvió de soporte para movilizar manualmente la manguera sobre el material y simular la caída de lluvia sobre los taludes.

Con respecto a la instalación del perfilador, cabe destacar que no se instaló como indica el manual de uso proporcionado por la empresa Campbell Scientific, por el contrario, se buscó enterrar el SoilVUE™10 conforme se iban agregando las capas del material. Esto con el fin de evitar desplazamientos inesperados del material y asegurar el contacto entre el suelo y el sensor.

A pesar de ello, las mediciones obtenidas a los 5 cm de profundidad se descartaron del análisis, debido a que las ondas sensoriales del SoilVUE™10 no quedaron bajo el nivel del suelo. Al obtener los resultados por parte del perfilador, estos se mantuvieron en un rango considerablemente bajo (entre 0-3% de humedad), por tanto, las mediciones a esta profundidad se consideraron falsas.

Adicionalmente, se generaron modelos computacionales a través del programa Slide 2.0 para ambos taludes, con los cuales se pretendió verificar el comportamiento observado en el modelo físico al momento de la falla, así como calcular los factores de seguridad (FS) según las condiciones de drenaje del suelo, el caudal implementado y el método de cálculo. Para la modelación, se utilizaron las propiedades obtenidas en los ensayos de laboratorio como el peso unitario y la permeabilidad. Se utilizó la cohesión de 133.04 kPa para analizar la condición no drenada; así como el ángulo de fricción efectivo y la cohesión efectiva para estudiar la condición drenada en los modelos computacionales.

Cabe destacar que, en la modelación digital, es posible simular la condición drenada fácilmente, por el contrario, para el modelo físico se propone la hipótesis de que el material se encontraba en estado consolidado drenado gracias al proceso de compactación y el estado suelto del material.

Dadas estas condiciones para ambos taludes, se calcularon factores de seguridad críticos que van desde 0.3 a 0.5 y superficies de falla en las zonas intermedias y superiores para el talud de pendiente 60° y 90°, respectivamente. Dicho comportamiento fue observado en el modelo físico de ambos taludes, donde se presentaron fallas considerables que implicaron el desplazamiento del material en el talud de pendiente 60° y el desprendimiento de bloques de suelo en el talud crítico de pendiente 90°. En cambio, al aplicar el caso de condición no drenada con una cohesión de 133.04 kPa, según la prueba de compresión inconfiada, se obtuvieron taludes muy estables con factores de seguridad que superaron la unidad cuyos valores van desde 25 hasta 41.

Con base en los diferentes resultados mencionados anteriormente, se concluyó que el SoilVUE™10 representa una herramienta de gran utilidad en el área de la geotecnia, cuando se trata de la obtención del parámetro de la humedad de forma precisa en suelos de limos plásticos, mas no resulta suficiente para detectar de forma anticipada un deslizamiento por sí solo. Para esto se puede complementar el sensor con

otros equipos como inclinómetros, extensómetros, radares de penetración en el suelo (GPR), sensores de movimiento o cualquier otra herramienta que permita la detección de movimientos en el suelo. Además, se obtuvieron mediciones de humedad que correspondían al comportamiento esperado, es decir, conforme se fue agregando agua al material, el sensor registró datos cada vez mayores según las condiciones temporales para las cuales se programó.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y en el modelo físico, se generaron modelos computacionales por medio del programa Slide con los cuales se verificó el comportamiento observado durante la toma de mediciones en el modelo físico, además de estimar los diferentes factores de seguridad según la condición de drenaje, el caudal y el método de cálculo.

Para la obtención de resultados más precisos y acertados se recomienda utilizar el método establecido por la empresa Campbell Scientific para la instalación del SoilVUE™10; realizar la toma de mediciones de forma continua por un periodo tiempo prolongado; estudiar el efecto de los demás parámetros que mide el perfilador sobre un suelo propenso a sufrir un deslizamiento; emplear múltiples sensores para generar un perfil completo del talud a monitorear; y estudiar el comportamiento de los taludes en modelos físicos separados.

Introducción

Los deslizamientos superficiales representan una amenaza significativa para la seguridad de las personas, las infraestructuras y el medioambiente según sea su magnitud, ya que se caracterizan por incurrir en un desplazamiento de masa de suelo o roca a lo largo de la superficie terrestre. Estos eventos tienen múltiples causas que van desde la saturación del suelo debido a lluvias de gran intensidad hasta la actividad humana, como la construcción y la deforestación. Por lo tanto, es de esperar que sea un desastre natural frecuente a nivel mundial; por ejemplo, durante el año 2015 en Colombia se categorizó que aproximadamente el 24% del territorio tiene una alta amenaza por deslizamientos, traduciéndose a más de 40 millones de personas que podrían verse afectadas tras la ocurrencia de este fenómeno natural (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2020).

Por su parte, Costa Rica no es la excepción, ya que, según la Comisión de Emergencias (CNE) (2022): “al menos el 60% del territorio es vulnerable a deslizamientos”. Lo cual se debe a que en el país predomina la época lluviosa y durante esta temporada aumenta considerablemente la probabilidad de que ocurran estos desastres naturales por factores como la topografía, sismicidad del país, altas dosis de agua en los terrenos y la mala planificación urbana.

Existen zonas que, gracias a sus características, son más susceptibles a la ocurrencia de un deslizamiento y resulta conveniente monitorearlas constantemente por medio de puestos de vigilancia permanentes. El CNE tiene personal técnico encargado de evaluar constantemente los terrenos propensos a estos eventos por medio de visitas periódicas en campo y sobrevuelos de drones, que permiten la identificación de advertencias como rupturas en la superficie, inclinación de árboles o tendido eléctrico, ruptura de tuberías, etc. (CNE, 2022).

Ahora bien, considerando que el agua presente en el suelo es un parámetro relevante en el país y puede ser un detonante de un deslizamiento superficial, se plantea la necesidad de utilizar equipos sencillos que permitan mantener un control en tiempo real de las condiciones del suelo relacionadas con el agua, siendo una alternativa el uso del SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific.

Dicho perfilador utiliza la tecnología del Reflectómetro de Dominio del Tiempo (TDR, por sus siglas en inglés), para recolectar datos de humedad, temperatura, conductividad eléctrica y permisividad dieléctrica en suelos finos, con una profundidad máxima de un metro. Además, su sencilla instalación y facilidad de recopilar información sin necesidad de estar en sitio, a través de un registrador de datos, hace que resulte conveniente verificar la posibilidad de darle uso dentro del campo de la ingeniería.

Adicionalmente, se procuró contribuir con dos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los cuales son el número 9 que consiste en

construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación; así como el objetivo 11, que procura lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.

Por un lado, el objetivo 9 presenta la meta de “aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo” (ONU, s.f.), por tanto, al utilizar un dispositivo para realizar pruebas que verifiquen si puede tener usos adicionales en el sector de la ingeniería, se pone en práctica la parte investigativa y tecnológica, aportando a la meta indicada por la ONU.

Por otro lado, el objetivo 11 cuenta con la meta de “reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres (...) y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial” (ONU, s.f.); al probarse que el SoilVUE™10 es capaz de contribuir a la predicción de deslizamientos, se abriría la posibilidad de generar sistemas de alerta temprana para así disminuir o evitar la pérdida de vidas humanas y materiales en zonas amenazadas por estos desastres naturales.

Antecedentes

No se encontraron registros que evidencien el uso del sensor SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific en el ámbito de la Ingeniería en Construcción, no obstante, se han realizado comparaciones con otros sensores como el Drill&Drop y el SMT500. Un estudio realizado en Alemania demostró que, de los tres equipos, el SoilVUE™10 fue el que tuvo menor desempeño; ya que en las mediciones de contenido de agua alcanzó únicamente el 65-81% a 20 cm de profundidad, mientras que los otros sensores midieron alrededor de 82-99% de contenido de agua a tan solo 10 cm de profundidad. Se indica que su bajo rendimiento fue producto de una mala instalación del sensor, debido a que se dejaron vacíos entre el suelo y los electrodos, provocando alteraciones en las mediciones (Wilson et al., 2022).

Adicionalmente, Nieberding et al. (2023) realizaron la comparación de los mismos sensores utilizando un suelo de arena fina, y obtuvieron un desempeño similar para los tres equipos. De esta manera, se evidencia la importancia de limitar el estudio para suelos finos y entender el funcionamiento del sensor, desde los parámetros que registra hasta su correcta instalación en sitio para evitar falsas mediciones.

Objetivos

Se estableció como objetivo general determinar la viabilidad del uso del perfilador SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific como parte de la instrumentación en el análisis de estabilidad de taludes de suelos plásticos, por medio de pruebas de laboratorio y en modelos tanto físicos como computacionales. Además, se plantearon los siguientes objetivos específicos.

- i. Identificar las características, especificaciones y usos del sensor SoilVUE™10 que pueden ser utilizadas en la determinación de propiedades del suelo asociadas a los deslizamientos, utilizando el sensor y analizando la documentación existente sobre el equipo.

- ii. Obtener datos de humedad con el perfilador y parámetros geotécnicos por medio de la construcción de un modelo físico de dos taludes con pendientes aproximadas de 60° y 90°, y ensayos de laboratorio para el análisis de la estabilidad de los taludes ante la presencia de agua.
- iii. Analizar los parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio junto con los registros recopilados por el SoilVUE™10 para el establecimiento de posibles correlaciones entre ellos.
- iv. Validar el análisis generado mediante la elaboración de modelos computacionales de estabilidad de taludes por medio del programa Slide 2.0 para verificar la utilidad del SoilVUE™10 en la predicción de un deslizamiento superficial en suelos plásticos.

Alcance y limitaciones

Para el presente proyecto se realizó un estudio sobre el funcionamiento del perfilador SoilVUE™10 en el cual se contemplaron las partes que lo componen, los cuatro parámetros que mide del suelo, los requisitos de instalación en sitio, así como las conexiones con el registrador de datos CR310 y la obtención de información a través de este; lo que dio como resultado el manual de uso adjunto en el Apéndice 1.

A partir de dicho estudio, se estableció que únicamente se considerarían las mediciones de humedad para el proyecto, ya que este parámetro representa uno de los principales factores desencadenantes de un deslizamiento. Cabe destacar que no se consideró el efecto de cargas estáticas ni dinámicas. Igualmente, considerando las características y el funcionamiento del SoilVUE™10, se delimitó el estudio a suelos plásticos, es decir, suelos compuestos en su mayoría por partículas de arena, limos o arcillas con índices de plasticidad iguales o mayores a 10%.

Se construyó un modelo físico estático con medidas preestablecidas según las dimensiones del perfilador, de manera que se pudiera verificar el correcto funcionamiento del equipo en cuanto a la toma de mediciones. Así, este modelo tuvo dimensiones de 1.50 m de largo, 1.00 m de ancho y 1.20 m de altura.

Para la obtención de resultados más certeros, se empleó material de tipo fino que tuviera mayor contacto con las ondas sensoriales del SoilVUE™10. Se ejecutaron seis ensayos de laboratorio para caracterizar el suelo y obtener propiedades físicas y mecánicas que posteriormente serían utilizadas para hacer el análisis sobre la estabilidad de los taludes.

Utilizando dicho material se generaron dos taludes con geometrías distintas que potenciaran la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento superficial a pequeña escala. Razón por la cual las pendientes preestablecidas fueron de 60° y 90° aproximadamente; los cuales fueron sometidos a la acción aleatoria de tres caudales que simulaban distintas intensidades de lluvias, aplicados uniformemente sobre el material.

Adicionalmente, se crearon modelos computacionales utilizando el *software* Slide 2.0, de modo que se dibujaron ambas geometrías por separado, implementando las mismas propiedades físicas y mecánicas obtenidas a partir de las pruebas de laboratorio, además de las condiciones de humedad a las cuales se sometió el material para, finalmente, obtener la superficie de falla y el factor de seguridad de los taludes en estudio. De esta manera, sería posible realizar una comparación entre lo acontecido durante las pruebas del modelo físico y lo esperado según los modelos computacionales. Cabe resaltar que, para efectos de la

modelación computacional, no se consideró la totalidad de tiempo transcurrido durante la toma de mediciones en el modelo físico al momento de incluir las condiciones de flujo de agua en el programa Slide 2.0.

Finalmente, se elaboró un informe detallado que documentó los hallazgos del estudio, incluyendo conclusiones, recomendaciones y posibles áreas de investigación futura. Se espera que este informe sea de utilidad para profesionales del campo de la ingeniería civil y la geotecnia, así como para empresas y organismos involucrados en la gestión de riesgos asociados a la estabilidad de taludes.

Algunas de las principales limitaciones que se presentaron durante el desarrollo del proyecto fueron: las pruebas realizadas al suelo fueron las posibles de acuerdo con la disponibilidad y capacidad del laboratorio; no se consideró la influencia de la succión del suelo en la resistencia al corte para el caso específico de taludes, se contó con un solo perfilador por parte de la empresa para realizar la toma de mediciones; las características del equipo en cuanto a longitud y toma de datos precisos en suelos de alta densidad fueron un factor determinante, ya que, al tener como máximo un metro de largo y tener semejanzas con un tornillo convencional, presenta dificultades para instalarse en suelos de tipo grava, al no mantener contacto directo y continuo a lo largo de todo el perfilador con el terreno. Por ello, únicamente fue posible estudiar la falla por deslizamiento superficial en suelos finos de mediana-alta plasticidad dadas las características del SoilVUE™10. Para este proyecto en específico, se considera como deslizamiento superficial cualquier movimiento en el suelo a menos de un metro de profundidad debido a las dimensiones del perfilador y el modelo físico.

Adicionalmente, por disponibilidad de recursos como tiempo, materiales y suelo, solo se construyó un modelo dentro del cual se implementaron ambos taludes para su análisis en simultáneo. Por último, cabe la posibilidad de que los modelos de estabilidad no permitieran determinar la aplicabilidad del sensor en el ámbito geotécnico relacionado con la ocurrencia de un deslizamiento superficial en suelos finos.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia por haberme apoyado desde el primer momento en que decidí estudiar Ingeniería en Construcción, sabían que no sería un proceso fácil, por lo que siempre se mostraron dispuestos a alentarme para culminarlo. También, le agradezco a mis amigos cercanos y compañeros de carrera por cada palabra de motivación y momento de felicidad y estrés que pasamos, principalmente a Luis Fernando Quesada y Gerald Sandí por acompañarme a altas horas de la noche para cumplir con las entregas mientras aprendíamos juntos y nos formábamos como profesionales.

De igual manera, le agradezco profundamente a mi pareja por ser mi apoyo incondicional, por ayudarme a sacar siempre lo mejor de mí en cada uno de los cursos, por escucharme y entenderme cuando más lo necesité y, principalmente, por no dejarme renunciar hasta obtener el tan anhelado título de ingeniera.

Además, me gustaría agradecer a los profesores y técnicos que formaron parte de este proceso por su buena disposición y transmisión de conocimientos para culminarlo y formarme como profesional bajo los lineamientos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Deseo extender el agradecimiento al ingeniero Osvaldo Cubero de la empresa Campbell Scientific por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y estar anuente a ayudarme con respecto al uso del sensor SoilVUE™10. Al ingeniero Eduardo Ortiz, por enseñarme a utilizar el equipo y atender mis dudas al respecto. Finalmente, a mi profesor tutor e ingeniero Alonso Poveda, a quien le agradezco profundamente toda la paciencia y ayuda brindada durante la realización del proyecto final de graduación, desde la solicitud de materiales hasta los comentarios constructivos sobre el proyecto y las palabras de aliento en los momentos de mayor frustración y estrés.

Capítulo 1: Marco teórico

En el presente capítulo se describe el contexto conceptual y los fundamentos teóricos necesarios para el entendimiento de la problemática planteada. Por consiguiente, se consideró la temática del perfilador SoilVUE™10, la estabilidad de taludes y algunos ensayos de laboratorio relevantes para el desarrollo del proyecto.

1.1. Sensor SoilVUE™10

La empresa Campbell Scientific se caracteriza por proporcionar sistemas y componentes listos para llevar el control geotécnico de un área determinada; esto se logra por medio de mediciones de propiedades del suelo como la humedad presente en este, por ejemplo.

Uno de los dispositivos que distribuyen es el SoilVUE™10, un sensor de perfil de contenido de agua que utiliza la tecnología del reflectómetro de dominio temporal para registrar datos de humedad, conductividad eléctrica, permisividad dieléctrica y temperatura del suelo, el cual se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific.



Fuente: Campbell Scientific, 2022.

Su forma es semejante a la de un tornillo y se ofrece en presentaciones de 50 cm y 100 cm, por lo que no requiere de maquinaria pesada para su instalación, la cual resulta muy sencilla y práctica. Para ello, se debe realizar un agujero de cinco centímetros de diámetro con una barrena manual, la profundidad dependerá del sensor seleccionado y, seguidamente, el SoilVUE™10 se atornilla dentro de él; para lo cual se recomienda humedecer las paredes del agujero, a fin de evitar la aplicación de fuerza excesiva que podría dañar el sensor y mejorar el contacto de los circuitos TDR presentes en la rosca con el suelo que lo rodea.

Una vez que se ha introducido el sensor en el suelo, se procede con la conexión hacia el *datalogger*, es decir, el dispositivo encargado de recolectar los datos brindados por el SoilVUE™10 y almacenarlos en el programa ShortCut, brindado igualmente por la empresa Campbell Scientific. Para hacer la conexión, el cable cuenta con un conector M12 con clasificación IP67 que se conecta en la parte superior del sensor, mientras que en el otro extremo cuenta con cuatro líneas de diferentes colores, las cuales se conectan al *datalogger* seleccionado según se indica, a continuación:

- Blanca: SDI-12
- Café: 9 a 36 VDC
- Negro: tierra
- Transparente: protección

Acorde con la empresa Campbell Scientific (2020), algunas de las ventajas que presenta el SoilVUE™10, primeramente, son la facilidad con la que se instala en sitio, además de su bajo impacto hacia el medioambiente; es capaz de medir cuatro propiedades relevantes del suelo (humedad, conductividad eléctrica, permisividad dieléctrica y temperatura) para llevar el control geotécnico en un área determinada a diferentes profundidades de manera rápida y efectiva, ya que toda la información se almacena constantemente en tiempo real, según el rango de tiempo que se indique entre cada medición, y puede consultarse cuando se requiera utilizando únicamente una computadora. Además, la salida digital del sensor es compatible con la mayoría de los registradores o *dataloggers* de la empresa; y está diseñado para funcionar por períodos largos de tiempo en la intemperie.

1.1.1. Descripción técnica

El sensor consta de circuitos TDR conectados a una serie de seis o nueve guías de ondas helicoidales que forman parte del diseño roscado general. Este tipo de configuración hace que el contacto con el suelo sea prácticamente total, disminuyendo el error potencial en las mediciones a causa de los espacios vacíos dentro del suelo.

Estos circuitos están diseñados a partir de la tecnología TrueWave™TDR patentada por Campbell Scientific, la cual combina el mejor tiempo de subida de su clase con una técnica avanzada de análisis de forma de onda que permite determinar el verdadero tiempo de recorrido de un pulso de alta frecuencia. Dicho proceso consigue una señal suave y de alta resolución para mediciones que son defendibles y comparables universalmente con otras mediciones TDR.

De esta manera, los circuitos TDR del sensor generan un impulso electromagnético de corta duración que se aplica a las guías de ondas helicoidales, con el cual es posible calcular la permitividad dieléctrica del medio circundante y determinar el contenido volumétrico de agua mediante un modelo de mezcla.

Figura 2. Circuitos TDR conectados a las guías de ondas helicoidales del diseño roscado del SoilVUE™10.



Fuente: Campbell Scientific, 2020.

1.1.2. Especificaciones

Según la ficha técnica del SoilVUE™10, adjunta en la sección de Anexos, el dispositivo realiza cuatro mediciones en el suelo: contenido volumétrico de agua (VWC), permitividad, conductividad eléctrica y temperatura; a diferentes profundidades que van desde 5 cm hasta 50 cm en su versión de 50 cm, y de 5 cm a 100 cm para la opción del sensor de un metro.

Algunas consideraciones previas a tomar en cuenta para utilizar el sensor según la empresa Campbell Scientific son la temperatura de funcionamiento, la cual debe encontrarse en un rango de -40°C a 60°C; el torque máximo de instalación es de 54 N m; el voltaje de operación debe estar contenido entre 9 y 36 Vdc (voltios de corriente directa); la longitud máxima del cable es de 304.8 m; y el peso del sensor varía según su longitud, siendo 1.9 kg el de 50 cm y 3.6 kg el de 100 cm.

Además, en la ficha técnica se presenta la precisión de las diferentes mediciones que realiza el sensor, de manera que, para la conductividad eléctrica, la precisión es de $\pm 2\%$ en un rango de 0 a 2.5 dS/m y de $\pm 5\%$ en el rango completo. La permisividad eléctrica se mide en un rango de 1 a 80 con precisión de ± 1 unidad de permitividad (entre 4 y 42 de permitividad); el contenido volumétrico de agua se mide en un rango de 0 a 100% con $\pm 1.5\%$ de precisión en la mayoría de suelos y las mediciones de temperatura cuentan con una precisión de ± 0.15 °C en un rango de temperaturas entre -30 °C y +40 °C.

1.1.3. Usos

Desde un principio, este sensor se diseñó pensando en los investigadores medioambientales y las redes de monitoreo asociadas, gracias a sus características y facilidad de uso, se ha empleado en estudios que

verifican su desempeño en contraste con otros sensores de perfil para la toma de mediciones en el área de la agricultura.

Según indican Nieberding et al. (2023), en el ámbito de la agricultura este tipo de sensores presentan un gran potencial gracias a su fácil manejo y su capacidad para realizar mediciones de forma simultánea a diferentes profundidades. Son utilizados, principalmente, para monitorear la cantidad de agua presente en el suelo y determinar, a partir de las mediciones, la necesidad de utilizar sistemas de riego que garanticen la seguridad alimentaria de los cultivos a largo plazo.

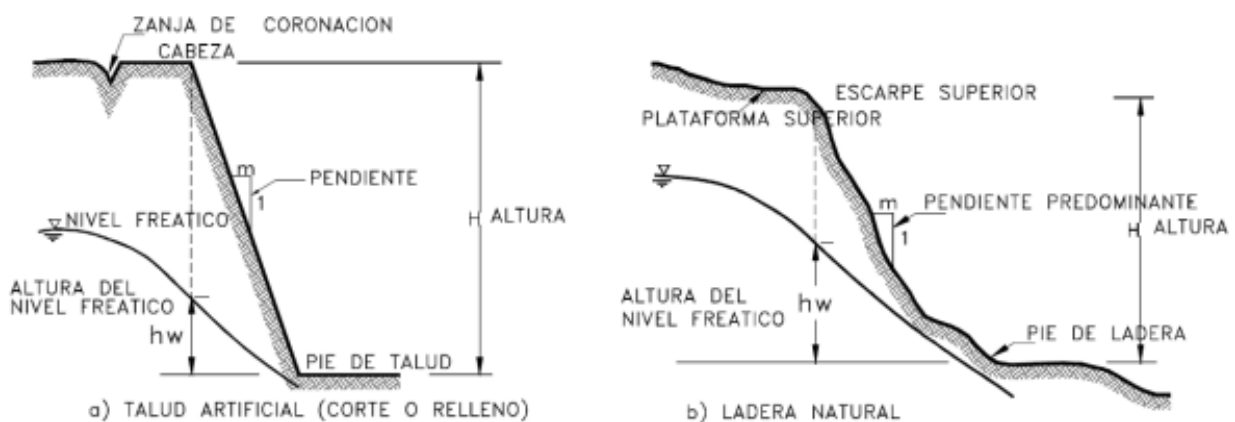
Ahora bien, en el área de la ingeniería civil o en construcción, no se tienen registros de información obtenidos a partir del SoilVUE™10; no obstante, al ser un sensor empleado para llevar el control de los diferentes parámetros del suelo mencionados previamente, se pretende que pueda funcionar para llevar el control de la humedad en un talud y así tener la posibilidad de generar un sistema de alerta temprana contra deslizamientos superficiales, de esta manera, tomar las medidas de prevención apropiadas ante estos eventos.

1.2. Estabilidad de taludes

Un talud puede definirse como una superficie de suelo vertical o inclinada con respecto a la horizontal que se encuentra en contacto directo con aire o agua, las cuales pueden clasificarse como natural o artificial (García, 2020). Por su parte, un talud natural no requiere de la intervención humana, ya que es el resultado de procesos erosivos a lo largo de la historia geológica y el cálculo de sus dimensiones resulta complicado debido a su irregularidad.

En contraparte, la formación de los taludes artificiales depende del desarrollo de obras ingenieriles y, por lo tanto, requieren la intervención del hombre para realizar cortes, como consecuencia de excavaciones o terraplenes que ayuden a nivelar el terreno. Además, al ser diseñados, resultan estar bien definidos y, por tanto, el cálculo de sus dimensiones se simplifica. Dichas diferencias pueden apreciarse en la Figura 3.

Figura 3. Tipos de taludes.



Fuente: Arcila, Guerra y Bergaño, 2019.

Igualmente, en la Figura 4, se muestran las partes generales de un talud o ladera, las cuales son descritas detalladamente según indican Corrales et al. (2013):

- Pie, pata o base: corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. Generalmente su forma es cóncava.
- Cabeza, cresta, cima o escarpe: se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semivertical o de alta pendiente, se le denomina escarpe y este puede coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa.
- Altura: es la distancia vertical entre el pie y la cabeza del talud, 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 generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.
- Altura del nivel freático: es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua, es decir, donde la presión en el agua es igual a la presión atmosférica.
- Pendiente: es la medida de la inclinación de la superficie 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. Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos tienden a formar laderas de baja pendiente.

Figura 4. Partes que componen un talud.



Fuente: Corrales et al., 2013.

Según indica García (2020): “un talud es estable cuando la relación entre las fuerzas resistentes, ΣF_R , y deslizantes, ΣF_D , o momentos resistentes, ΣM_R , y deslizantes, ΣM_D , es mayor a la unidad”, de manera que se obtenga un factor de seguridad mayor que uno considerando todas las posibles combinaciones de fuerza que afectan a un talud durante su vida útil. Por lo tanto, la estabilidad de un talud consiste en el análisis geotécnico que permite la obtención de un factor de seguridad mínimo, con el cual es posible evitar accidentes que puedan resultar en pérdidas tanto materiales como humanas, de ahí su importancia.

Algunas de las aplicaciones de la estabilidad de taludes en la ingeniería civil consisten en la construcción de infraestructura vial y ferroviaria, así como viviendas y edificaciones, ya que se debe velar por la seguridad de las personas, así como la integridad de las estructuras mismas y el medioambiente. Además, toma relevancia también en el área de la agricultura, preservando zonas de cultivos al evitar el deslizamiento o desprendimiento del suelo por las laderas.

Figura 5. Implementación de malla para la estabilidad de talud sobre vía ferroviaria en Canadá.



Fuente: Proyectos Lica, s.f.

Muchos países se componen de estructuras montañosas, por lo que es común ver que se construyan carreteras y líneas ferroviarias atravesando estas elevaciones de tierra, tal como se aprecia en la Figura 5; donde, además, se evidencia la importancia de la estabilidad de taludes, ya que, si no se contuviera el material de manera correcta, podría desprenderse el material de la ladera y ocasionar una catástrofe.

1.2.1. Factores influyentes en la estabilidad de taludes

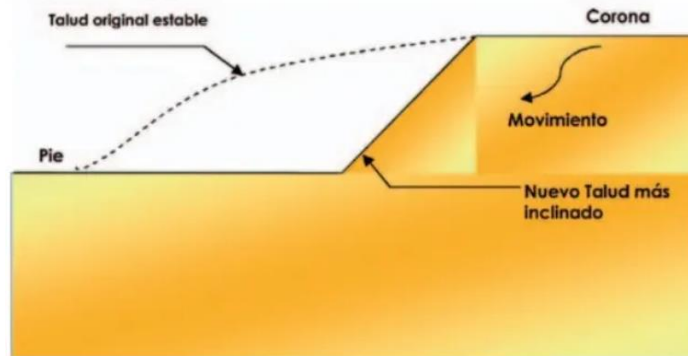
Generalmente, la falla de un talud se debe a la acción de fuerzas naturales, como las gravitacionales o sísmicas, y la actividad humana; además de las características geomecánicas y físicas propias del suelo. Por tanto, las probabilidades de que un talud se vuelva inestable aumentan cuando se tiene una pendiente alta, suelos sueltos y no consolidados, presencia de agua superficial o subterránea, cargas superficiales y actividad sísmica en la zona.

Según Muni Budhu (2010), los principales factores que inciden en la estabilidad de los taludes tanto naturales como artificiales son la erosión, lluvia, fuerzas sísmicas, aspectos geológicos, cargas externas, excavaciones o rellenos, así como la condición de presión de poro y vaciado rápido, los cuales se describen con mayor detalle, a continuación.

1.2.1.1. Erosión

El viento erosiona continuamente los taludes naturales y artificiales, cambiando la geometría de la pendiente como se aprecia en la Figura 6, lo cual tiene como posible resultado final el colapso de la pendiente en forma de deslizamiento de tierra.

Figura 6. Desgaste de pendiente ocasionado por la acción del viento.



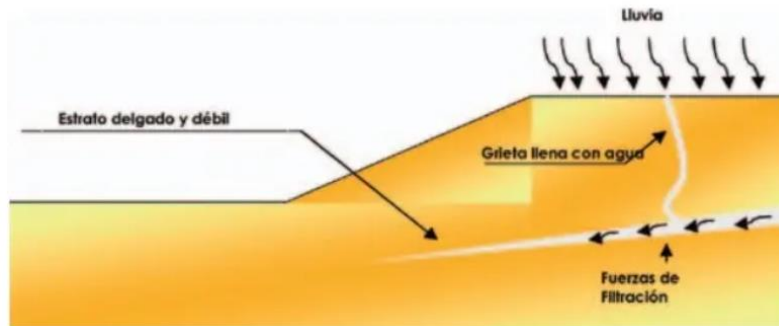
Fuente: Seguridad Minera, 2018.

Similar es el caso cuando se tiene una masa de agua como ríos y corrientes, las cuales erosionan constantemente sus orillas, socavando sus pendientes.

1.2.1.2. Lluvia

Los largos períodos de lluvia saturan, ablandan y erosionan los suelos, ya que el agua ingresa al interior del suelo por medio de las grietas existentes, debilitando las capas subyacentes del suelo y provocando fallas como deslizamientos de lodo (Figura 7).

Figura 7. Efecto de la lluvia al ingresar en las grietas presentes en el suelo.

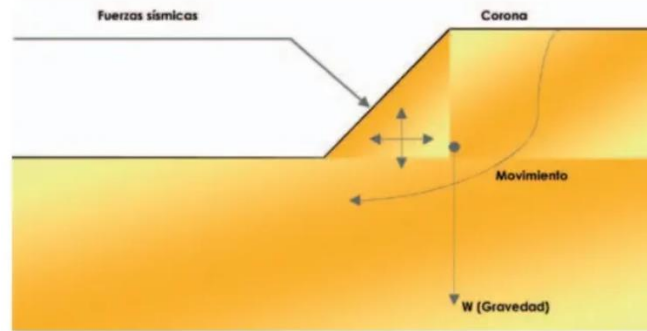


Fuente: Seguridad Minera, 2018.

1.2.1.3. Actividad sísmica

Los sismos y terremotos inducen fuerzas dinámicas (Figura 8), específicamente fuerzas de corte dinámicas que reducen la resistencia al corte y la rigidez del suelo, provocando, además, que las presiones de agua de los poros en suelos saturados de grano grueso aumenten hasta un valor igual a la tensión media total y provoquen que estos suelos se comporten como fluidos viscosos, fenómeno mejor conocido como licuefacción dinámica.

Figura 8. Efecto de las fuerzas dinámicas ejercidas durante un evento sísmico en un talud.



Fuente: Seguridad Minera, 2018.

La rapidez con la que se inducen las fuerzas dinámicas impide incluso que los suelos de grano grueso sean capaces de drenar el exceso de presión de agua de los poros, por lo tanto, la falla generada durante un evento sísmico suele ocurrir sin drenaje del suelo.

1.2.1.4. Aspectos geológicos

Muchas fallas en taludes son producto de las características geológicas no identificadas durante la exploración del suelo. Por ejemplo, una delgada capa de limos bajo un grueso depósito de arcilla rígida puede ser pasada por alto fácilmente durante el proceso de perforación del suelo, capa que podría significar una catástrofe, ya que los limos representan el tipo de suelo más inestable.

Figura 9. Capa de suelo débil en la estratificación de un talud.



Fuente: Seguridad Minera, 2018.

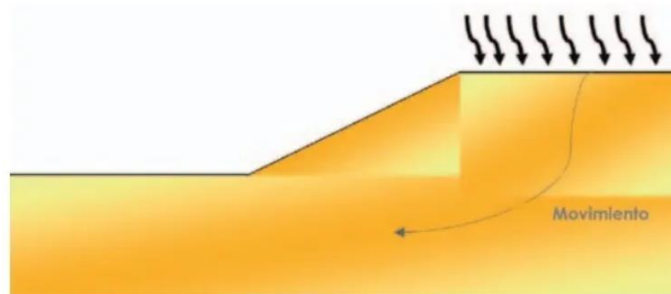
Los suelos inclinados y estratificados son propensos al deslizamiento traslacional a lo largo de las capas débiles (Figura 9), por lo tanto, hay que considerar las características geológicas al momento de evaluar la estabilidad de un talud.

1.2.1.5. Cargas externas

Las cargas situadas en la parte superior de un talud se suman a la carga gravitacional y pueden provocar el fallo del talud como se muestra en la Figura 10. Por el contrario, una carga que se coloca en la base del talud,

también llamada berma, aumentará la estabilidad de la ladera; a menudo, estas cargas se utilizan como medida para remediar taludes problemáticos.

Figura 10. Efecto de las cargas situadas en la parte superior de un talud sobre su estabilidad.

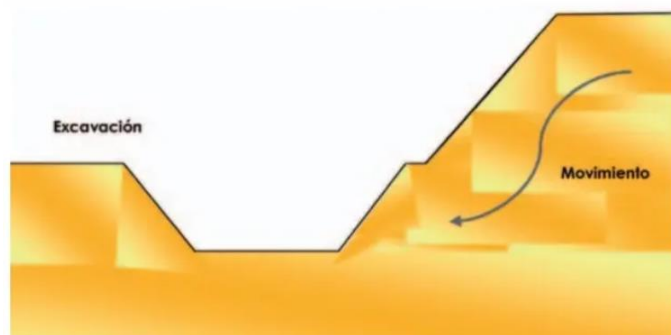


Fuente: Seguridad Minera, 2018.

1.2.1.6. Excavaciones o rellenos

Las actividades de construcción desarrolladas cerca de la base de un talud existente podrían ocasionar una falla, ya que estas eliminan la resistencia lateral de la ladera. Dichas actividades se dividen en excavaciones y rellenos.

Figura 11. Efecto de las cargas situadas en la parte superior de un talud sobre su estabilidad.



Fuente: Seguridad Minera, 2018.

Cuando se realiza una excavación al pie de un talud, como se ejemplifica en la Figura 11, se están reduciendo las tensiones totales y generando presiones negativas de agua de poros en el suelo, las cuales se disipan con el paso del tiempo, provocando una disminución de las tensiones efectivas y, por consiguiente, la resistencia al corte del suelo. Si se produjera alguna falla en el talud, es más probable que este tenga lugar una vez finalizada la construcción.

Por otro lado, los taludes de relleno son comunes en la construcción de terraplenes, se coloca el suelo en el emplazamiento y se compacta según las especificaciones, normalmente por encima del 95% del peso unitario seco máximo Proctor. El suelo es invariablemente no saturado, desarrollándose presiones negativas de agua de poro, no obstante, el suelo sobre el cual se coloca el relleno puede estar saturado o no; de manera que, al estar saturado, se generan presiones de agua de poro positivas debido al peso del

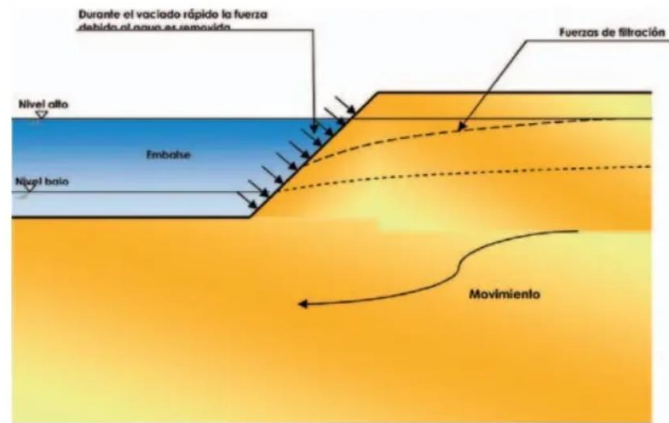
relleno y el proceso de compactación, disminuyendo las tensiones efectivas y, por consecuencia, la resistencia al corte.

Al contrario de las excavaciones, cuando se realiza un relleno es más probable que la falla del talud ocurra durante o inmediatamente después de la construcción; ya que, con el paso del tiempo, las presiones positivas del agua del poro se disipan, aumentando las tensiones efectivas y la resistencia al cizallamiento del suelo.

1.2.1.7. Condición de presión de poro y vaciado rápido

La condición de vaciado rápido aplica para los embalses, donde la fuerza lateral proporcionada por el agua es removida y el exceso de presión del agua del poro no tiene tiempo suficiente para disiparse (Figura 12). El efecto neto es que el talud puede fallar en condiciones no drenadas.

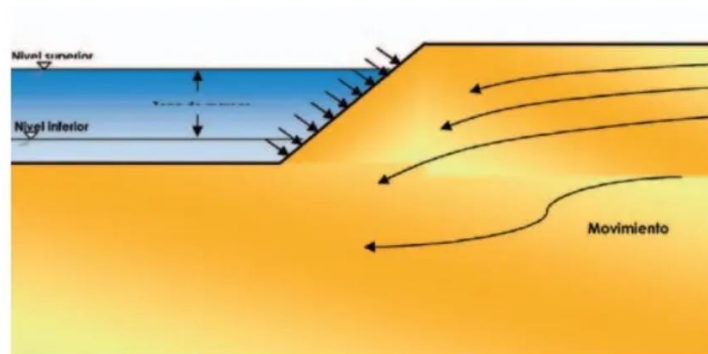
Figura 12. Efecto del vaciado rápido sobre las laderas de un embalse.



Fuente: Seguridad Minera, 2018.

Si el nivel del agua en el reservorio permanece en niveles bajos y la falla no ocurriera bajo condición no drenada, igualmente podría desencadenarse la falla como consecuencia de la filtración de aguas subterráneas (Figura 13).

Figura 13. Posible falla por filtración de aguas subterráneas en embalses con niveles bajos de agua.



Fuente: Seguridad Minera, 2018.

Cualquier intervención que se realice en un talud para mejorar su estabilidad debe considerar al menos uno de los factores mencionados; no obstante, es común que se vean involucrados como mínimo dos de estos factores en simultáneo al momento de ocurrir una falla (Cervera, 2023).

1.2.2. Tipos de falla y mecanismos de ruptura

Tanto los taludes naturales como los artificiales presentan una tendencia de falla gracias a las fuerzas gravitacionales, sin embargo, si la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es capaz de contrarrestarlas, se puede decir que el talud es estable; en caso contrario, se da la falla en forma de deslizamiento.

Dado que existen diversos factores para desencadenar una falla, también existe una clasificación de ellas acorde con la forma en que se produce el movimiento de la masa de suelo: falla por deslizamiento superficial, falla por rotación, falla por traslación, falla por flujo y falla por licuación. A continuación, se describen las cinco fallas, haciendo énfasis en la primera mencionada según el alcance del proyecto.

1.2.2.1. Falla por deslizamiento superficial

Según García (2020), la falla por deslizamiento superficial: "se refiere al deslizamiento lento pero continuo del suelo debido a diferentes factores, entre ellos el incremento de la presión de poro y/o la modificación de la filtración del agua en la masa del suelo"; es decir, no se presenta una superficie de falla definida, debido a que el movimiento superficial se produce de manera suave y no presenta una transición marcada entre la parte superficial móvil y la masa inmóvil más profunda.

Este tipo de falla comúnmente afecta grandes áreas del terreno. Algunos indicadores que permiten identificarla corresponden a un eventual escalonamiento o agrietamiento en la superficie del talud, la dirección de crecimiento de los árboles, la acumulación de suelos en las depresiones y valles, así como los faltantes en zonas altas de la ladera (Figura 14).

Figura 14. Falla superficial ocurrida en las rutas inter colinas de Santa Mónica, Venezuela.



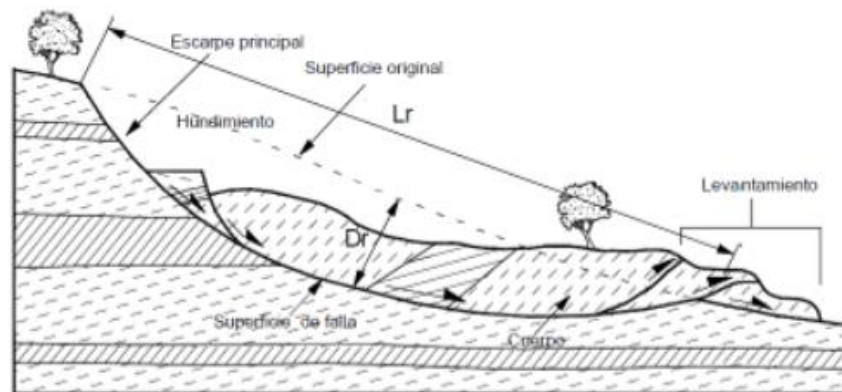
Fuente: Tagliaferro y Singer, 2011.

El ingeniero Karl van Terzaghi (1948) expone que existen dos tipos de deslizamientos superficiales: estacional y masivo. El primero afecta únicamente la corteza superficial del talud, es decir, los suelos que sufren las consecuencias de los cambios climáticos expresados en expansiones y contracciones por el humedecimiento secado del material; mientras que el masivo afecta capas de suelo más profundas y se atribuye exclusivamente a los factores internos que actúan sobre el suelo, ya que estas capas profundas no se ven afectadas por los agentes climáticos exteriores.

1.2.2.2. Falla por rotación

Se tiene una falla por rotación cuando: “la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento” (Corrales et al., 2013). Visto en planta, este tipo de falla presenta una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en dirección del movimiento del material; provocando un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, y abarcando una masa considerable de suelo que afecta a profundidad la geometría del talud. Como producto de este movimiento, se tienen flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento como se observa en la Figura 15.

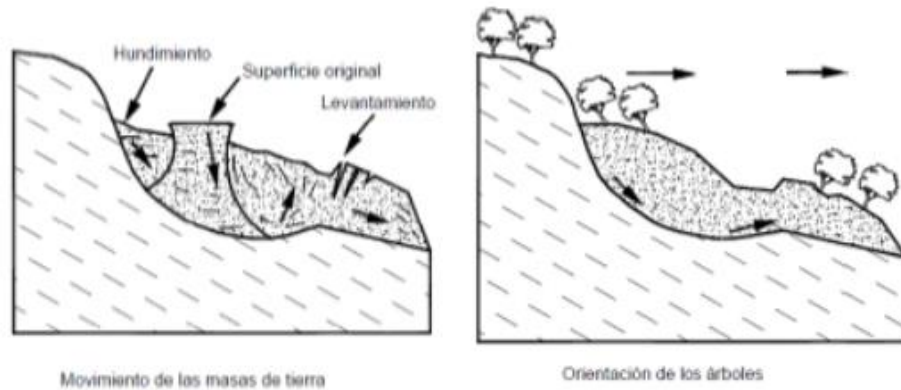
Figura 15. Esquema de un deslizamiento por falla rotacional.



Fuente: Corrales, et al., 2013.

Además, en la Figura 16 se observa una de las características para identificar este tipo de falla: la cabeza del movimiento bascula hacia atrás y la inclinación de los árboles difiere según su posición, es decir, se inclinan de una manera en la cabeza y de otra en el pie del talud.

Figura 16. Características para identificar una falla de tipo rotacional.



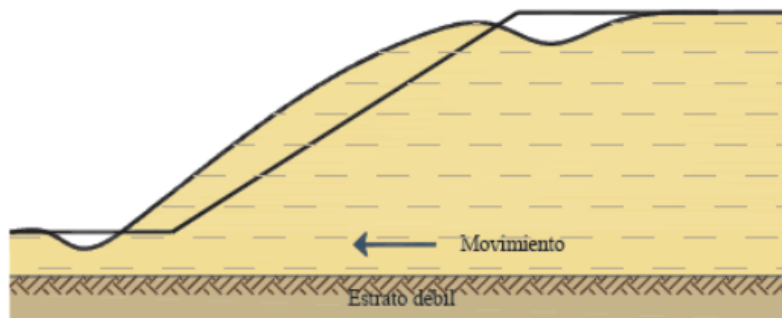
Fuente: Corrales, et al., 2013.

1.2.2.3. Falla por traslación

Por su parte, la falla traslacional se describe: “como una masa de suelo que se desliza a lo largo de un plano de falla paralelo a la superficie del suelo” (Schmalbach, 2019), es decir, suele ocurrir sobre una superficie relativamente plana asociada a estratos de poca resistencia ubicados cerca de la parte baja del talud.

Usualmente, estos estratos débiles se traducen a arcillas blandas, arenas finas o limos no plásticos que se encuentran contenidos en medio de suelos de mayor resistencia; activándose el mecanismo de falla por el aumento en las condiciones de presión de poro de estos estratos débiles y produciendo un movimiento horizontal como se muestra en la Figura 17 (Estrada y Soberanis, 2014).

Figura 17. Movimiento del suelo provocado por una falla por traslación.



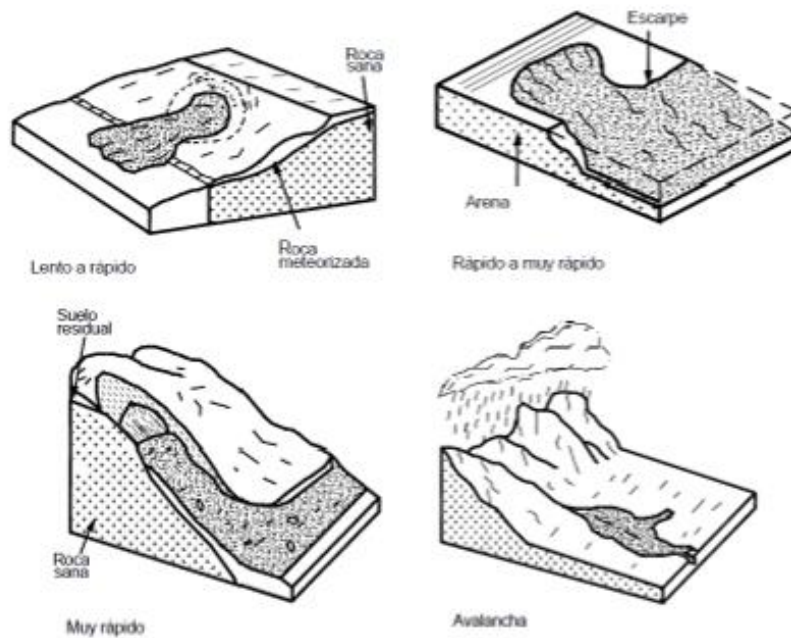
Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

1.2.2.4. Falla por flujo

Este tipo de falla se relaciona con movimientos relativamente rápidos en una sección del talud, simulando el comportamiento de un líquido viscoso que se derrama a lo largo de la ladera; con lo cual, no es posible identificar una superficie de deslizamiento, ya que el movimiento se produce por períodos cortos de tiempo.

Según indican Estrada y Soberanis (2014), este tipo de falla: “se presenta con mayor frecuencia en taludes naturales formados por materiales no “consolidados” y se desarrolla el mecanismo cuando hay un aumento apreciable en el contenido de agua”. En la Figura 18, se muestran cuatro tipos de deslizamientos que pueden ocurrir como consecuencia de una falla por flujo.

Figura 18. Posibles fallas por flujo en materiales húmedos y no consolidados según su velocidad.



Fuente: Corrales et al. 2013.

1.2.2.5. Falla por licuación

Este tipo de falla se atribuye al fenómeno de licuación o licuefacción, el cual provoca una reducción rápida de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Dicha pérdida puede desencadenar el colapso del suelo y, en consecuencia, las edificaciones que se encuentran cimentadas sobre este (Estrada y Soberanis, 2014). Según la Universidad de Costa Rica (UCR) (2019):

La licuefacción de suelos es un fenómeno en el cual los terrenos, a causa de saturación de agua y particularmente en sedimentos recientes como arena o grava, pierden su firmeza y fluyen como resultado de los esfuerzos provocados en ellos debido a los temblores. La licuefacción es una causa mayor de destrucción relacionada con terremotos (más aún que por la acción directa de las ondas sobre los edificios).

Dicho de otra manera, este evento tiene la capacidad de modificar las condiciones de las estructuras presentes sobre el suelo afectado, desplazándolas, hundiéndolas o incluso volcándolas, simulando el comportamiento de arenas movedizas. Usualmente, los materiales más susceptibles a sufrir el efecto de la licuación son las arenas finas en regiones costeras, por lo que cualquier obra construida en estas zonas debe

contar con estudios geotécnicos previos donde se caracterice el tipo de suelo y se puedan tomar las medidas correspondientes. Un ejemplo de este tipo de falla se dio en el año 2011 con el terremoto ocurrido en Japón, gran parte de los daños se atribuyen a la licuefacción de los suelos (Figura 19).

Figura 19. Efecto de la licuación de suelos en playa Garza.



Fuente: UCR, 2019.

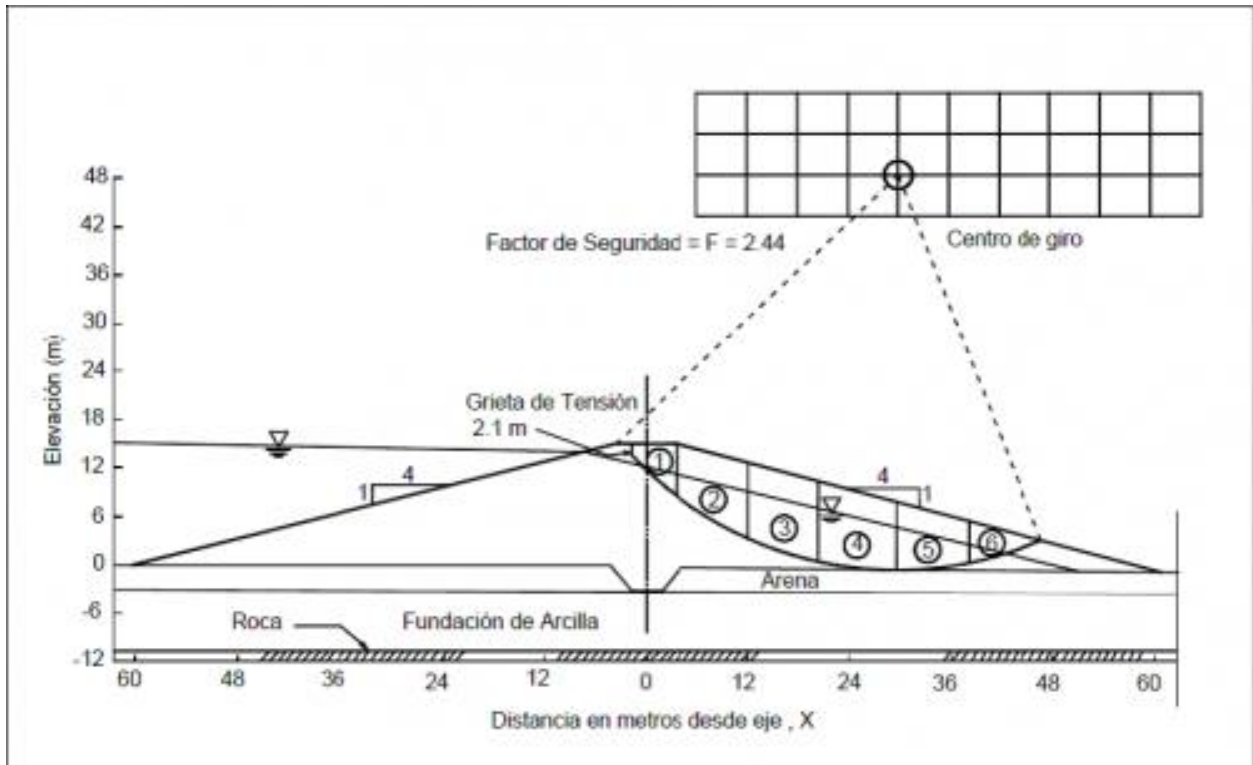
1.2.3. Análisis de estabilidad de taludes

El análisis de la estabilidad de los taludes nace como una necesidad en el área de la ingeniería civil para disminuir las posibles fallas que ocurren en los taludes, considerando lo expuesto por Corrales et al. (2013): “la modelación matemática de los taludes es parte de la práctica de la ingeniería geotécnica, con el objeto de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales”; en la Figura 20 se muestra un ejemplo de análisis de un talud según la U.S. Corps of Engineers.

Además, este mismo autor menciona los principales objetivos del análisis matemático de los taludes, los cuales se listan, a continuación:

- Determinar las condiciones de estabilidad del talud (si es estable o inestable y el margen de estabilidad).
- Investigar los mecanismos potenciales de falla (analizar cómo ocurre la falla).
- Determinar la susceptibilidad de los taludes a diferentes mecanismos o factores detonantes (efecto de las lluvias, sismos, etc.).
- Comparar la efectividad de las diferentes opciones de estabilización y su efecto sobre el talud.
- Diseñar los taludes óptimos en términos de seguridad, confiabilidad y economía.

Figura 20. Ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes.



Fuente: Corrales et al., 2013.

Para obtener un análisis adecuado de un talud, se cuenta con herramientas de modelación y diseño como lo son las tablas de datos, gráficos, hojas de cálculo y el uso de *softwares*. Así, se deben considerar diversos parámetros al momento de analizar el comportamiento de un talud, los cuales se describen, a continuación.

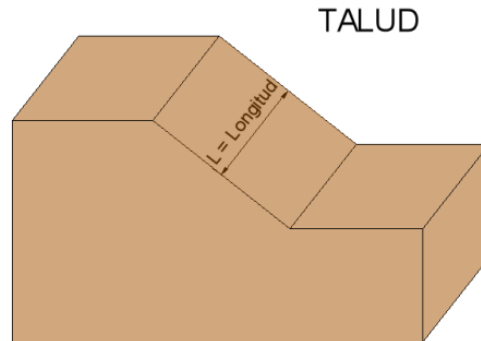
1.2.3.1. Hipótesis utilizadas

Todos los métodos para el análisis de la estabilidad de taludes son basados en hipótesis propias, no obstante, es posible identificar que comparten algunas de estas suposiciones, las cuales se describen, a continuación, considerando lo expuesto por Estrada y Soberanis (2014).

- Análisis bidimensional

Al realizar el análisis, se idealiza el problema de forma plana en dos dimensiones, debido a que la longitud L mostrada en la Figura 21 suele ser mucho mayor que las medidas de la sección transversal; por lo tanto, se considera que no existe influencia de factores que sumen deformación a los resultados obtenidos desde el punto de vista de la sección transversal. En otras palabras, se asume que las características presentadas en un plano transversal serán las mismas a lo largo de la longitud L del talud.

Figura 21. Corte transversal del talud.

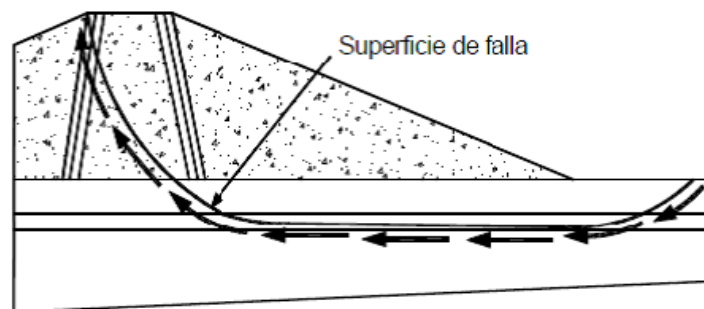


Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

- Superficie de falla

En cuanto a la superficie de falla, esta corresponde al plano sobre el cual se desplaza la masa de suelo durante un deslizamiento o rotura del talud. En los modelos de análisis de estabilidad, es común que se represente esta condición como una forma geométrica que se asemeje lo más posible a la condición presentada en el talud analizado como se muestra en la Figura 22. Usualmente su forma puede ser plana, circular, logarítmica, parabólica o una combinación de estas, aunque en la actualidad ya se pueden encontrar modelos de superficies de falla con formas no geométricas.

Figura 22. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante.



Fuente: Corrales et al., 2013.

Si la falla ocurre, los esfuerzos cortantes se consideran iguales en todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; aun así, generalmente se asume un gran número de superficies de falla para encontrar aquella con el valor mínimo de factor de seguridad, ya que con esto se identifica la superficie crítica de falla, la cual presenta mayores probabilidades de producir el deslizamiento.

- Movimiento de la masa de suelo como cuerpo rígido

Igualmente, para simplificar los cálculos al máximo, se considera que la masa desplazada de suelo se mueve como un cuerpo rígido, es decir, como un todo; de esta manera, se supone que el material no sufre de deformaciones ni cambios de volumen al momento de darse la falla.

- Homogeneidad en las propiedades del suelo

Siguiendo la misma línea de la primera hipótesis, se considera que las propiedades del suelo no varían con respecto a la geometría o profundidad del talud.

- Condición de falla generalizada a lo largo de la superficie de falla

Como se mencionó anteriormente, se supone que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se presenta a lo largo de toda la superficie de falla. Cuando se tienen taludes estratificados, se toma la resistencia al esfuerzo cortante como la suma de las resistencias de cada suelo a lo largo del tramo de superficie que corta cada estrato.

1.2.3.2. Factor de seguridad

El factor de seguridad se puede definir como la relación que existe entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos cortantes críticos que tratan de producir el deslizamiento a lo largo de la superficie de falla. Este valor es utilizado por 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.

Cuando el factor de seguridad es igual a 1, el talud se encuentra en un estado de falla incipiente. Generalmente, un valor de 1.5 es aceptable para el diseño de un talud estable. Matemáticamente, el factor de seguridad se define como:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

FS = factor de seguridad con respecto a la resistencia.

τ_f = resistencia cortante promedio del suelo (fuerza resistente).

τ_d = esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla (fuerza motora).

Por su parte, la resistencia cortante de un suelo consta de dos componentes: la cohesión y la fricción, expresándose matemáticamente como:

$$\tau_f = C + \sigma' \tan \phi$$

Donde

C = cohesión.

ϕ = ángulo de fricción drenada.

σ' = esfuerzo normal efectivo sobre la superficie.

E igualmente, el esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla se expresa como:

$$\tau_d = Cd + \sigma' \tan \phi d$$

Donde Cd y ϕd corresponden a la cohesión efectiva y el ángulo de fricción generado a lo largo de la superficie de falla respectivamente.

1.2.3.3. Resistencia al esfuerzo cortante

Cuando un material falla al corte, adopta un comportamiento acorde con las teorías tradicionales de fricción y cohesión según la ecuación generalizada de Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi'$$

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte.

c' = Cohesión efectiva.

σ = Esfuerzo normal total.

μ = Presión de agua intersticial o de poros.

ϕ' = Ángulo de fricción interna del material.

Cabe destacar que, cuando hay agua presente en el suelo, se reduce el valor de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones de poros de acuerdo con la ecuación de Coulomb. Esto se visualiza matemáticamente cuando se resta μ al valor de la presión normal, σ , de manera que su resultante se conoce como presión efectiva y se simboliza como σ' . Por lo tanto, previo al análisis se deben definir los parámetros del ángulo de fricción y cohesión, los cuales son considerados como propiedades intrínsecas del suelo según indican Estrada y Soberanis (2014).

- Ángulo de fricción

Por su parte: “el ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física” (Estrada y Soberanis, 2014); que, además, depende de varios factores como el tamaño y forma de los granos del suelo, la distribución de los tamaños y la densidad. Se obtiene a partir de pruebas de laboratorio, específicamente de ensayos triaxiales o de corte directo.

- Cohesión

La cohesión corresponde a una medida de adherencia entre las partículas del suelo y es utilizada en la mecánica de suelos para representar la resistencia al cortante producida por la cementación. De esta manera, se puede decir que, en suelos de tipo granular, el valor de la cohesión es igual a cero, ya que no existe ningún tipo de material capaz de producir adherencia.

Caso contrario es el de los limos y arcillas, materiales que son conocidos como suelos plásticos o cohesivos, ya que cuentan con un valor diferente de cero para este parámetro en el análisis de la estabilidad. En otras palabras, cuanto más grande sea el valor de la cohesión, mayor probabilidad hay de que un talud se mantenga estable.

Igualmente, existe un fenómeno llamado cohesión aparente, la cual se presenta en suelos no saturados donde el agua contenida en los poros genera una adherencia por presión negativa o fuerzas capilares; no obstante, esta cohesión desaparece una vez que se sature el suelo.

- Esfuerzo efectivo

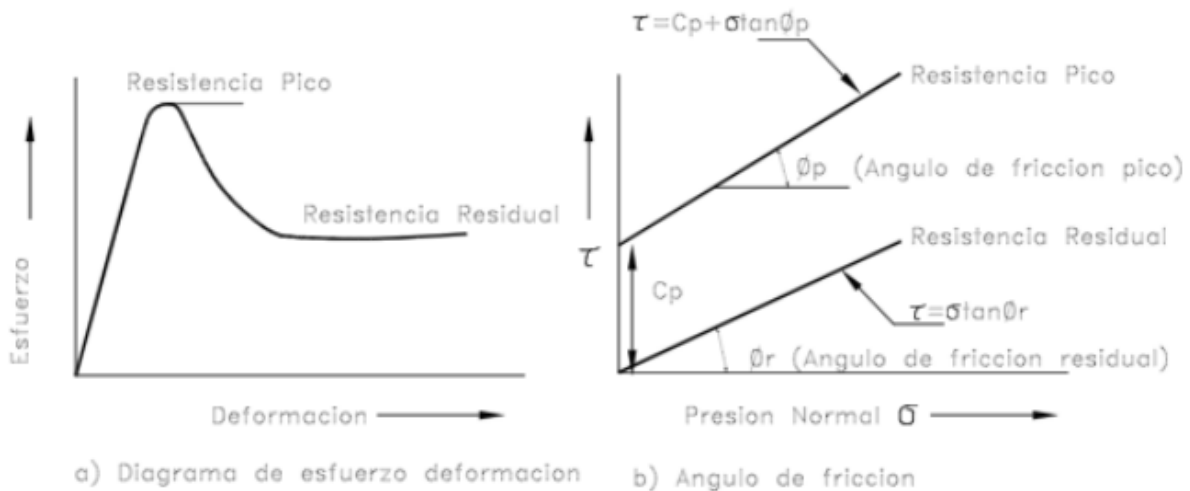
Primeramente, se debe comprender que una masa de suelo saturada se compone de dos fases: el esqueleto de partículas y los poros llenos de agua. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo será soportado tanto por

el esqueleto como por la presión de agua; no obstante, aquellos que son ejercidos por el esqueleto se conocen como esfuerzos efectivos y son los encargados de controlar el comportamiento del suelo ante la acción de las fuerzas.

Se pueden identificar dos tipos de resistencia desde el punto de vista de la relación esfuerzo–deformación: máxima o pico y residual (Figura 23). Por un lado, la resistencia máxima corresponde al punto más alto en la curva de esfuerzo versus deformación, pero este no representa un valor confiable en el análisis de la estabilidad de un talud, debido a que asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla, mas no siempre es así; produciéndose errores en el análisis.

Por otro lado, la resistencia residual es aquella resultante posterior al evento de la falla. Skempton (1964) recomienda utilizar este valor para calcular los factores de seguridad, aun cuando estos no difieren significativamente de la resistencia máxima.

Figura 23. Tipos de resistencia desde el punto de vista de la relación esfuerzo–deformación (máxima y residual).



Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

- Parámetros de presión de poros

Ahora bien, el análisis de esfuerzos efectivos requiere del conocimiento de las presiones de poro en el campo, las cuales pueden ser estimadas por medio de los esfuerzos presentes dentro del suelo. Para ello se utilizan los parámetros de presión de poros A y B propuestos por Skempton (1954) y así, calcular las presiones de poro en exceso (Estrada y Soberanis, 2014).

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

Donde:

Δu = Exceso de presión de poros.

A = Parámetro de presión de poros A.

B = Parámetro de presión de poros B.

$\Delta\sigma_1$ = Cambio en el esfuerzo principal mayor.

$\Delta\sigma_3$ = Cambio en el esfuerzo principal menor.

Según indican Estrada y Soberanis (2014):

Los parámetros A y B deben ser determinados de ensayos de laboratorio o seleccionados de la experiencia. Para suelos saturados B se acerca a 1.0 pero su valor disminuye drásticamente con la disminución en el grado de saturación. Los valores del parámetro A dependen de las deformaciones y generalmente, alcanzan valores máximos en el momento de la falla.

A continuación, en el Cuadro 1 se presentan los valores típicos de A según Skempton en el momento de falla para distintos tipos de arcillas:

Cuadro 1. Valores típicos del valor A según Skempton	
Tipo de arcilla	Valor del parámetro A
Altamente sensitiva	0.75 a 1.5
Normalmente consolidada	0.5 a 1.0
Arenosa compactada	0.25 a 0.75
Ligeramente sobreconsolidadas	0.0 a 0.5
Gravosas compactadas	-0.25 a 0.25
Muy sobreconsolidadas	-0.5 a 0.0

Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

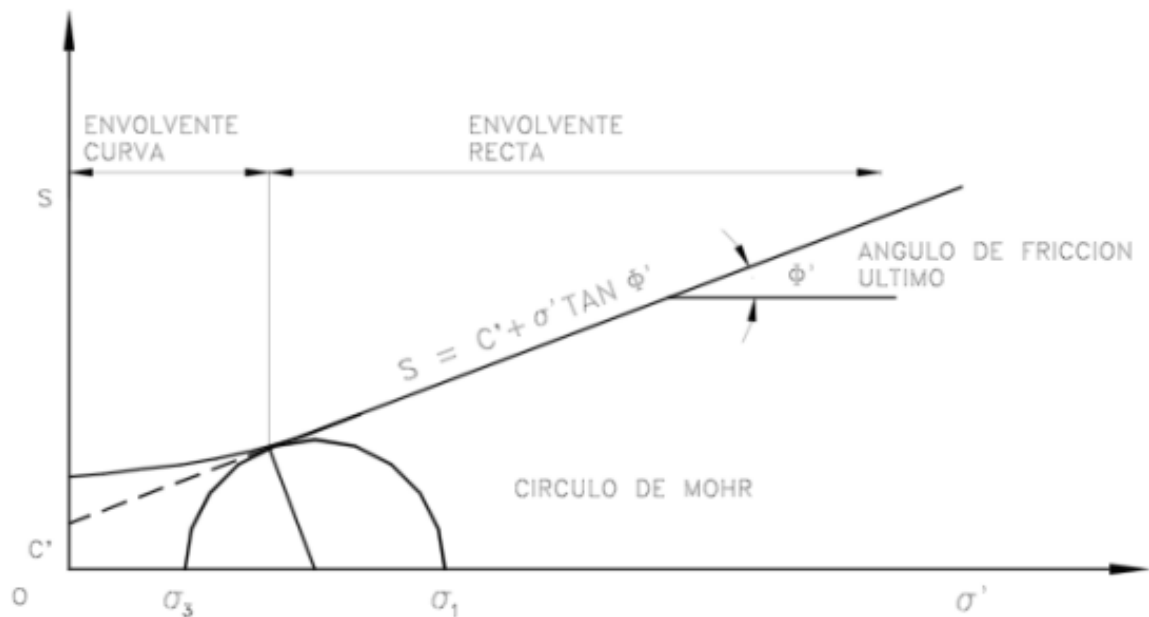
1.2.3.4. Círculo de Mohr

El círculo de Mohr es una representación gráfica bidimensional utilizada en la mecánica de suelos e ingeniería geotécnica para visualizar el estado de los esfuerzos en un punto determinado del material sometido a fuerzas externas. Se realiza en un plano cartesiano, donde los ejes representan los esfuerzos normales, σ , y tangenciales, τ , tal como se muestra en la Figura 24.

En este círculo se definen los valores de esfuerzo máximo (σ_1) y el esfuerzo mínimo (σ_3), conocidos como esfuerzos principales. Según Estrada y Soberanis (2014):

Para interpretar correctamente el fenómeno de falla al cortante en un talud debe tenerse en cuenta cuál es la dirección de los esfuerzos principales en cada sitio de la superficie de falla. El esfuerzo σ_1 es vertical en la parte superior de la falla y horizontal en la parte inferior

Figura 24. Envolvente de falla y círculo de Mohr.



Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

- Envolvente de falla

La envolvente de falla Mohr – Coulomb equivale a la combinación crítica de esfuerzos que soporta un material antes de fallar, es decir, no pueden existir esfuerzos por encima de la envolvente. Generalmente, se representa como una relación lineal entre la resistencia al cortante y el esfuerzo normal efectivo:

$$s = A(\sigma')B$$

Donde:

s = Resistencia al cortante.

σ' = Esfuerzo normal efectivo.

A, B = constantes.

Aunque, en la práctica profesional, se define la envolvente de falla como una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos, donde:

$$s = C' + \sigma' \tan \phi'$$

Donde:

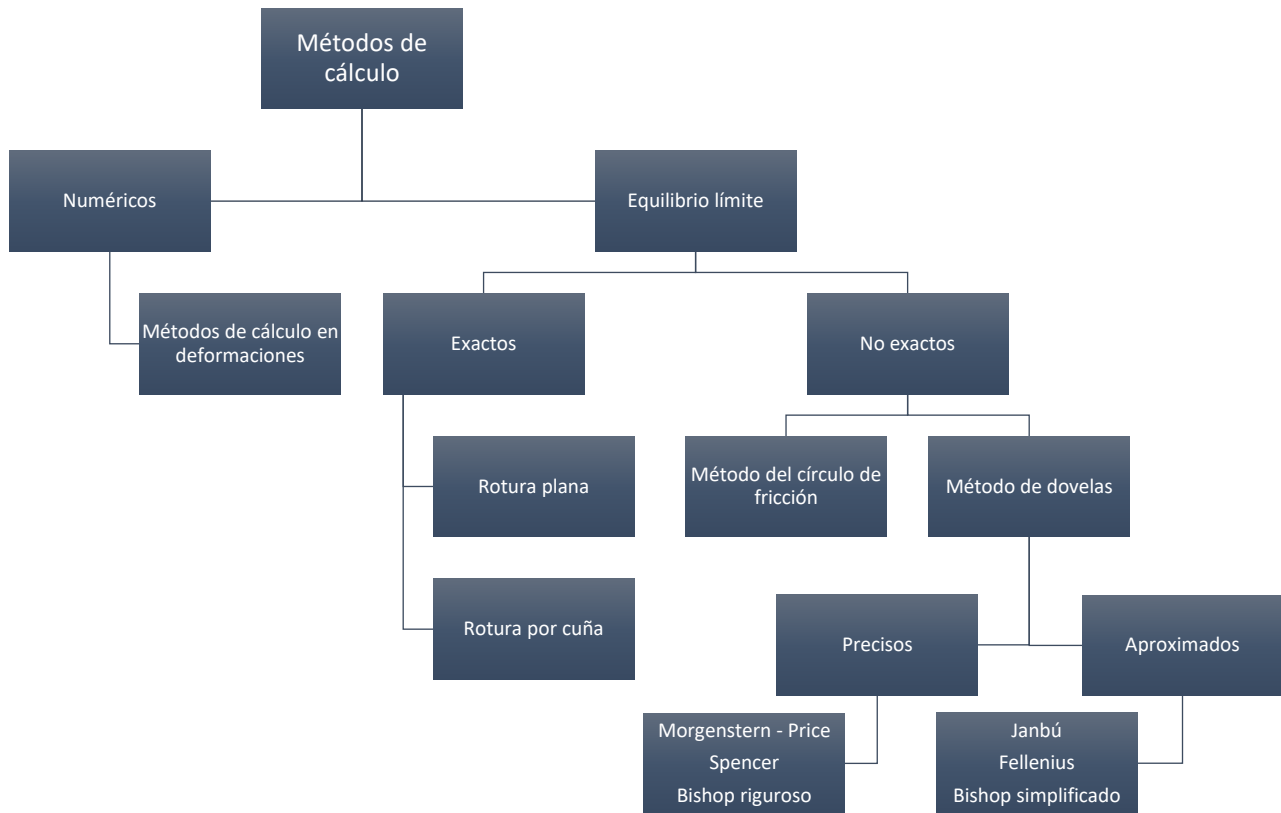
C' = Intercepto del eje de resistencia (cohesión).

ϕ' = Pendiente de la envolvente (ángulo de fricción).

1.2.4. Métodos de cálculo

Los métodos de cálculo pueden clasificarse como numéricos o de equilibrio límite, los cuales, a su vez, se dividen tal como se muestra en el siguiente diagrama (Figura 25).

Figura 25. Clasificación de los métodos de análisis para la estabilidad de taludes.



Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

Por su parte, los métodos numéricos consideran el cálculo de las deformaciones del terreno, además de las leyes de la estática. Según Estrada y Soberanis (2014): “su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos”.

Por el contrario, los métodos de equilibrio límite se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de un talud potencialmente inestable; esto porque consideran que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. Estos, a su vez, se dividen en exactos e inexactos; los primeros corresponden al método más simple de análisis, ya que es aplicable únicamente en taludes de geometría sencilla, es decir, suponiendo que no hay deformaciones y que el factor de seguridad es constante a lo largo de la superficie de falla. Mientras que los métodos inexactos significan un problema hiperestático que requiere de una simplificación o hipótesis previa que permita su solución. A continuación, en el Cuadro 2 se presenta un listado de algunos métodos existentes para el análisis de un talud con su respectiva superficie de falla, equilibrio y características.

Cuadro 2. Métodos de análisis para la estabilidad de taludes			
Método	Superficie de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas y momentos implícitos	Se analiza un bloque superficial con un determinado espesor y una altura de nivel freático, y se supone una falla paralela a la superficie del terreno.
Bloque deslizante y cuñas	Tramos rectos formando una cuña	Fuerzas	Se analiza la falla de cuñas simples, dobles o triples analizando las fuerzas que actúan sobre cada uno de los sectores de la cuña. Resulta de mucha utilidad cuando se tienen suelos estratificados o mantos de roca.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas	Se asume una superficie de falla en espiral logarítmica, en la cual el radio de la espiral varía con el ángulo de rotación sobre el centro de la espiral. Es muy útil para analizar la estabilidad de taludes reforzados con geomallas. Se considera uno de los mejores métodos para el análisis de taludes homogéneos.
Arco circular (Peterson, 1916 y Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos y fuerzas	Se supone un círculo de falla, el cual se analiza como un solo bloque. Para aplicarlo se requiere que el suelo sea cohesivo, es decir, que el ángulo de fricción sea igual a cero.
Ordinario o de Fellenius (Fellenius, 1927)	Circulares	Fuerzas	Este método no considera las fuerzas entre las dovelas y no satisface el equilibrio de fuerzas, tanto para la masa de suelo deslizada como para dovelas individuales. No obstante, este método es muy utilizado debido a su simple procedimiento. Es impreciso para analizar taludes planos con alta presión de poros y brinda factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop, 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, reduciendo así 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)	Indiferente	Fuerzas	Al igual que el 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, aun así, los factores de seguridad son bajos
Sueco modificado (U.S. Army Corps)	Indiferente	Fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad generalmente son valores altos.

of Engineers, 1970)			
Lowe y Karafiath (1959)	Indiferente	Fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinadas 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)	Indiferente	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales es igual para cada dovela. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre dovelas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Indiferente	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al de Spencer con la diferencia de que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo con una función arbitraria
Sarma (1973)	Indiferente	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 coeficiente sísmico igual a cero. Satisface todas las condiciones de equilibrio, sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.

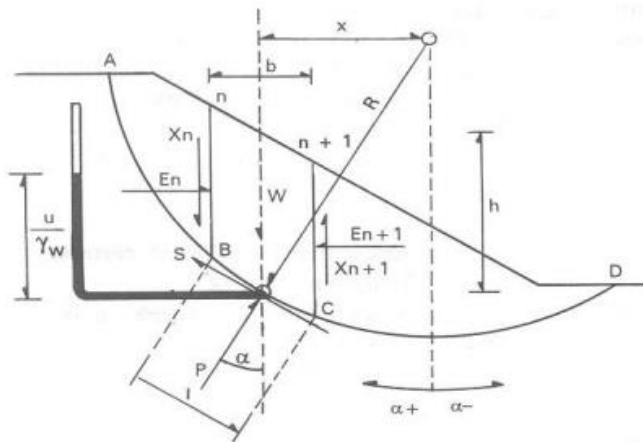
Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

A pesar de haber gran cantidad de métodos, considerando el alcance del proyecto, se describen a profundidad los métodos de Bishop simplificado, Janbú simplificado y Morgenstern y Price, ya que estos serán empleados en el *software* Slide 2.0 para obtener los FS de los taludes en estudio.

1.2.4.1. Método de Bishop simplificado

El método Bishop utiliza dovelas para analizar la estabilidad de taludes en suelos de comportamiento cohesivo-friccionantes, no obstante, tiene la importante restricción de que solamente considera superficies circulares. Por lo tanto, se supone una sección de un talud limitada por una superficie de falla de radio R y centro en O, tal como se muestra en la Figura 26.

Figura 26. Talud con superficie de falla circular.



- En, En+1** Resultantes de las fuerzas horizontales en las secciones n y n+1
- Xn, Xn+1** Resultantes de las fuerzas verticales cortantes
- W** Peso de la dovela
- P** Fuerza total normal que actúa en la base de la dovela
- T** Fuerza cortante que actúa en la base de la dovela
- h** Altura de la dovela
- b** Ancho de la dovela
- l** Longitud BC
- α** Ángulo entre BC y la horizontal
- x** Distancia horizontal del centro de la dovela al centro de rotación

Fig. 6.1 Talud con superficie circular de falla

Fuente: Estrada y Soberanis, 2014.

La siguiente ecuación es conocida como la del Método de Bishop simplificado, la cual se utiliza frecuentemente en la práctica para el análisis de los taludes con superficies de falla circular:

$$F.S. = \frac{\sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi'] \left[\frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F.S.}} \right] \right\}}{\sum W \sin \alpha}$$

Ahora bien, para solucionar dicha ecuación, se requiere de un proceso de aproximaciones sucesivas, por lo que su forma más conocida es:

$$F.S. = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \frac{(c'b + (W - ub) \tan \phi') \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F.S.}}$$

Donde:

b = base de la dovela.

W = Peso de cada dovela.

C, ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

D = Ángulo del radio y la vertical en cada dovela.

Según Estrada y Soberanis (2014):

Lo anterior se efectúa haciendo una estimación de un posible factor de seguridad inicial, el cual se sustituye en el término de la derecha de la ecuación y se evalúa la expresión, resultando un factor de seguridad correspondiente; este valor se compara con el inicial estimado y si no son iguales se repite el proceso con un nuevo valor del factor de seguridad.

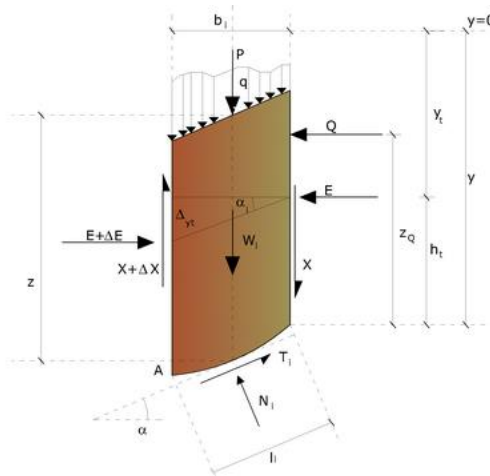
De esta manera, se debe repetir el proceso hasta que se obtenga una diferencia despreciable entre el factor de seguridad propuesto y el obtenido. Este se registra y se procede con el análisis de otros círculos de falla

variando el radio o la posición del centro para, finalmente, definir el factor de seguridad como el mínimo valor obtenido de todos los círculos analizados. Los errores obtenidos con respecto al método completo son de aproximadamente el 1%.

1.2.4.2. Método de Janbú Simplificado

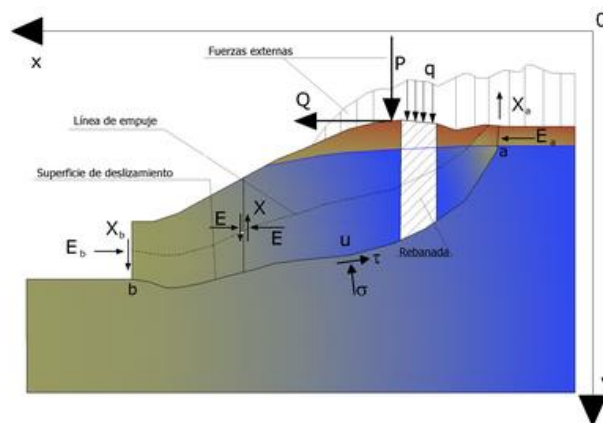
Consiste en una extensión del método anterior para la aplicación en superficies de deslizamiento de cualquier forma. Acorde con Catanzariti (2016): “cuando se tratan superficies de deslizamiento de cualquier forma el brazo de las fuerzas cambia”. Por tanto, resulta de mayor utilidad valorar la ecuación del momento respecto al ángulo de cada bloque. Este método toma en consideración las fuerzas que actúan entre las rebanadas a lo largo de una línea de empuje prefijada (Figuras 27 y 28).

Figura 27. Acciones en la *i*-ésima rebanada según las hipótesis de Janbú.



Fuente: Catanzariti, 2016.

Figura 28. Representación en conjunto de las hipótesis del método de Janbú.



Fuente: Catanzariti, 2016.

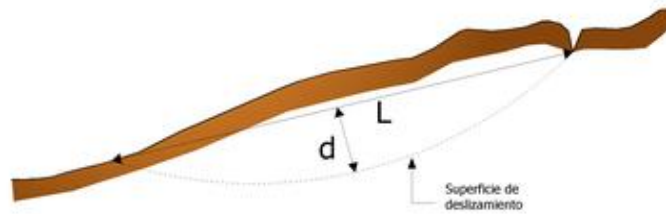
Al igual que el método de Bishop, la solución se obtiene gracias a iteraciones sucesivas a partir de la siguiente ecuación.

$$F.S. = \frac{\sum \left\{ [c_i b_i + (W_i - u_i b_i + \Delta X_i) \tan \phi_i] \left[\frac{F.S.}{\cos \alpha_i^2 (1 + \tan \phi_i \tan \alpha_i)} \right] \right\}}{\sum W_i \tan \alpha_i}$$

Además, Janbú propuso un método corregido por un factor de corrección empírico (f_0) que depende de la superficie de deslizamiento y de los parámetros geotécnicos del suelo, y se puede obtener de la gráfica mostrada en la Figura 30. Esta corrección resulta muy confiable para taludes poco inclinados.

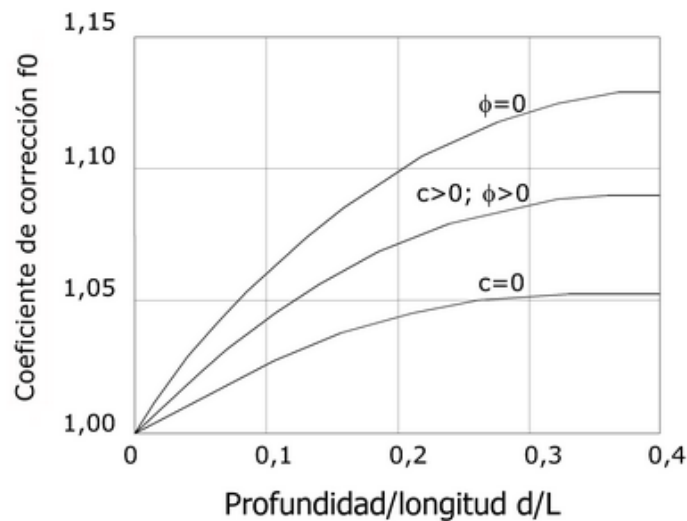
$$F.S._{corregido} = f_0 \cdot F$$

Figura 29. Parámetros para calcular el factor de corrección empírico.



Fuente: Catanzariti, 2016.

Figura 30. Valores del coeficiente de corrección en función de d/L .

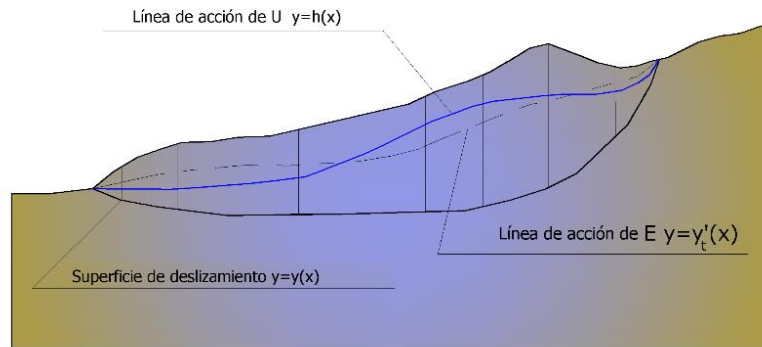


Fuente: Catanzariti, 2016.

1.2.4.3. Método de Morgenstern-Price

Según indica Aguilar y Zúñiga (2015), en este método se: “asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas”; la cual puede considerarse constante o como otro tipo de función. Gracias a esto, el método de cálculo satisface todas las ecuaciones de equilibrio y se puede aplicar a superficies de cualquier forma.

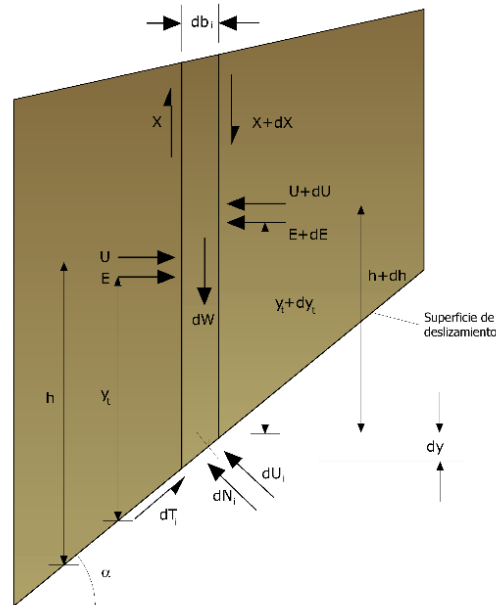
Figura 31. Superficie de falla para el método de Morgenstern y Price.



Fuente: Catanzariti, 2016.

Su particularidad radica en que la masa se subdivide en franjas infinitesimales, a las cuales se aplican las ecuaciones de equilibrio en la traslación horizontal y vertical y de rotura en la base de las franjas, para obtener las ecuaciones de fuerza y momentos según el siguiente diagrama de fuerzas.

Figura 32. Diagrama de fuerzas para las franjas infinitesimales del método de Morgenstern y Price.



Fuente: Catanzariti, 2016.

1.3. Ensayos de laboratorio

Todos los ensayos de laboratorio realizados se basaron en la normativa estandarizada por parte de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). A continuación, se enumeraron las pruebas correspondientes al proyecto con una breve descripción de su finalidad, así como el equipo necesario y su procedimiento.

1.3.1. ASTM D2216

Esta norma se emplea para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y roca por masa. Se tiene como muestra un espécimen húmedo que se seca en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante, de manera que la pérdida de masa debida al secado se considera agua. El contenido de agua se calcula a partir de la relación que existe entre la masa de agua y la masa de la muestra seca, expresada en porcentaje.

Para realizar esta prueba, se requieren tres aparatos: horno de secado capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, balanza y contenedores de muestras. Además, es importante que se realice este ensayo tan pronto como sea posible después de obtener las muestras para que el suelo en estudio no pierda o gane humedad significativamente.

El procedimiento consiste en seleccionar una muestra representativa, la cual es colocada en un contenedor previamente pesado en la balanza y determinar la masa del contenedor con la muestra. Seguidamente, se coloca el contenedor en el horno de secado y se deja entre 12 y 16 horas, aunque el tiempo de secado depende del tipo de suelo en estudio y la cantidad de muestra utilizada.

Finalmente, se debe medir la masa de la muestra después del proceso de secado hasta obtener una masa constante. Todos los valores de masa deben registrarse adecuadamente en un cuadro de información y se debe calcular el contenido de agua de la muestra con la siguiente ecuación:

$$w = [(M_{cms} - M_{cds}) / (M_{cds} - M_C)] \times 100 \quad (1)$$

Donde:

w: porcentaje de contenido de agua.

M_{cms} : masa del contenedor y la muestra húmeda.

M_{cds} : masa del contenedor y la muestra seca al horno.

M_C : masa del contenedor.

1.3.2. ASTM D1140

La ASTM D1140 describe el procedimiento para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz 75- μm (nro. 200) en suelos por lavado. En resumen, se lava una muestra de suelo sobre un tamiz de 75- μm y la arcilla, limo y demás partículas dispersadas por el agua de lavado se eliminan del suelo durante el ensayo;

siendo esta pérdida de masa la que se calcula como porcentaje en masa del espécimen original y se notifica como el porcentaje de material más fino que un tamiz nro. 200 por lavado.

Para ejecutar este ensayo, se requiere: una balanza para obtener la masa de la muestra; un tamiz nro. 200 para el lavado de la muestra; una secuencia de tamices que van desde el nro. 40 hasta el nro. 200 configurados como se muestra en la Figura 33; un horno de secado capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, área de lavado y accesorios de cuarteo.

Figura 33 Batería de tamices utilizados en el ensayo ASTM D1140.



Fuente. INCACAP, s.f.

Primeramente, se debe obtener una muestra representativa de tamaño suficiente y transferirla a un recipiente previamente pesado en el cual se seca la muestra hasta obtener una masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Seguidamente, se debe identificar si se trata de un suelo cohesivo o no, de manera que si se tiene un suelo no cohesivo, se debe inundar la muestra y dejarla en remojo por al menos 10 minutos; si la muestra es suelo cohesivo, se debe preparar una solución dispersante de agua con hexametáfosfato sódico e inundar completamente el espécimen durante mínimo dos horas. En ambos casos, la muestra debe agitarse manualmente con el fin de separar las partículas.

Pasado el tiempo de remojo, se debe transferir la muestra en el tamiz nro. 200 y proceder con el lavado de la muestra hasta obtener que el agua resultante esté libre de cualquier suciedad. Así, el material que quede retenido después del lavado debe pasarse a través de la batería de tamices para identificar los porcentajes de masa de cada tamaño presentes en el suelo, de acuerdo con el Cuadro 3.

Cuadro 3. Requerimientos mínimos de la masa de la muestra para la granulometría			
Tamaño máximo de partícula (100% pasando) mm	Tamaño de tamiz alternativo	Masa seca mínima del espécimen para obtener resultados con una aproximación del 1%	Masa seca mínima del espécimen para obtener resultados con una aproximación del 0.1%
0.425	No. 40	-	75 g
2.00	No. 10	-	100 g
4.75	No. 4	-	200 g
9.5	3/8 in	165 g	-
19.0	¾ in	1.3 kg	-
25.4	1 in	3 kg	-
38.1	1 ½ in	10 kg	-
50.8	2 in	25 kg	-
76.2	3 in	70 kg	-

Fuente. ASTM, 2017.

Finalmente, se calcula la cantidad de material pasando el tamiz nro. 200 por lavado utilizando la siguiente ecuación:

$$A = [(B - C)/B] \times 100$$

Donde:

A: porcentaje de material más fino que el tamiz nro. 200.

B: masa seca original de la muestra.

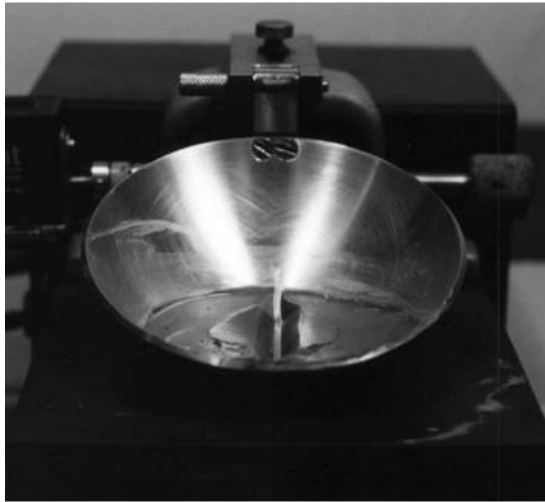
C: masa seca de la muestra retenida en el tamiz nro. 200.

1.3.3. ASTM D4318

La norma ASTM D4318 tiene como objetivo determinar las propiedades índices que definen el comportamiento de plasticidad de los suelos, es decir, el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad; parámetros esenciales para clasificar los suelos y comprender su comportamiento durante diferentes procesos de manipulación y construcción.

Para poder ejecutar este ensayo, se requiere una taza de Casagrande para la determinación del límite líquido, la cual se muestra en la Figura 34; una herramienta de corte utilizada para preparar la muestra y determinar el límite plástico; una balanza para medir las masas de muestra y agua; horno de secado; molde de determinación del índice de plasticidad; y una lámina de vidrio o mármol para trabajar la muestra y determinar el límite plástico.

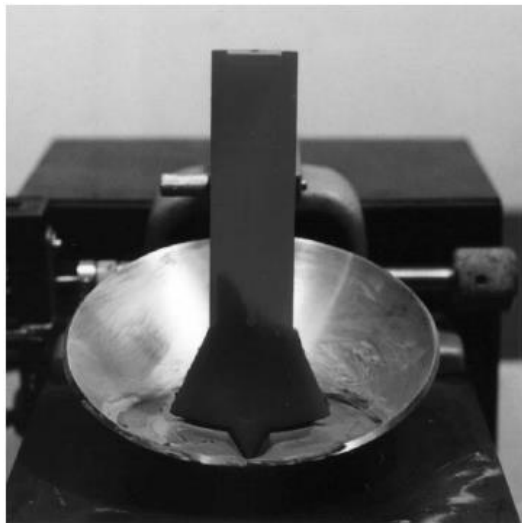
Figura 34. Copa de Casagrande para ensayo de Límites de Atterberg.



Fuente: DAVI, s.f.

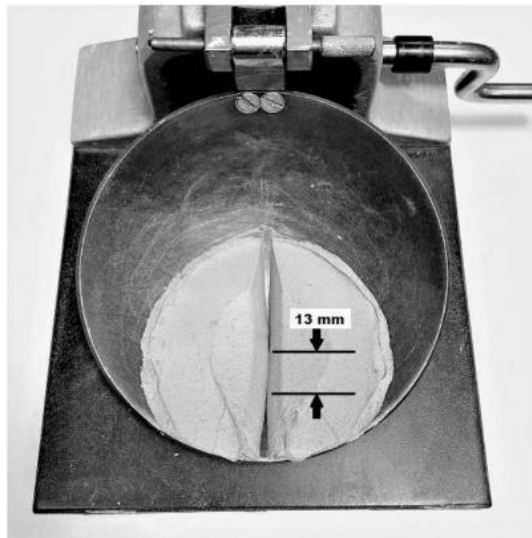
Por un lado, para determinar el límite líquido, se debe tomar una muestra del suelo, mezclarlo con agua y colocarla en la taza de Casagrande, para realizarle una pequeña abertura en medio de aproximadamente 0.5 cm, tal como se muestra en las Figuras 35 y 36. Posteriormente, la taza se eleva y se deja caer, permitiendo que la muestra fluya hasta que se cierre la abertura realizada en la muestra. Se deben contar el número de golpes requeridos y calcular el contenido de agua correspondiente a esta condición, el cual se expresa como el límite líquido.

Figura 35. Determinación del límite líquido.



Fuente: DAVI, s.f.

Figura 36. Ranura requerida para determinar el límite líquido de la muestra.

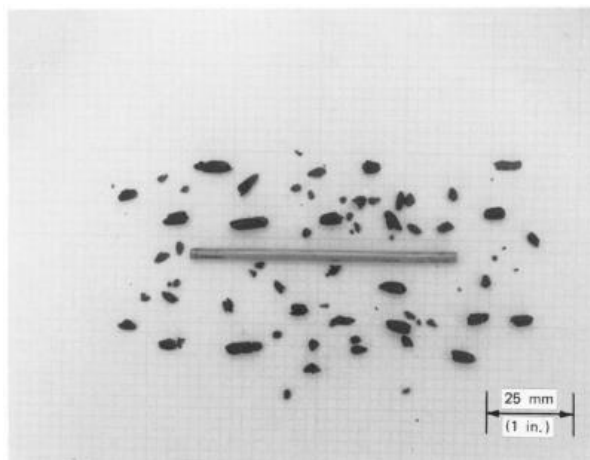


Fuente: DAVI, s.f.

Por otra parte, para determinar el límite plástico, se toma una porción de la muestra utilizada para el límite líquido y se amasa hasta obtener una consistencia adecuada; se debe formar un cilindro delgado con la muestra y se enrolla sobre una superficie plana hasta que tenga un diámetro de 3 mm. Cuando se tiene esta forma, se divide en dos partes y se enrolla cada parte en forma de una bola pequeña.

Se coloca una de dichas bolas en el molde de determinación del límite plástico y se presiona ligeramente con la palma de la mano y se repite el procedimiento para la segunda muestra. Además, se determina el contenido de humedad correspondiente al límite entre el estado plástico y semisólido, expresado como el límite plástico.

Figura 37. Ensayo para determinar el límite plástico de una muestra.



Fuente: DAVI, s.f.

Finalmente, se calcula el índice de plasticidad utilizando la siguiente fórmula:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: índice plástico.

LL: límite líquido.

LP: límite plástico.

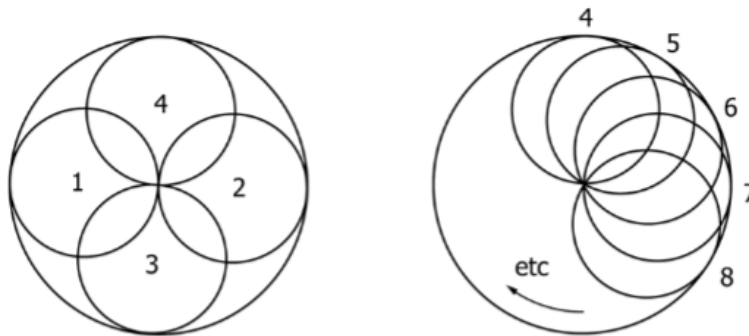
1.3.4. ASTM D1557

La norma ASTM D1557 cubre el método de ensayo para la compactación de suelos utilizando el esfuerzo modificado, el cual tiene la finalidad de determinar la cantidad óptima de agua de un suelo que permite la mejor compactación para una energía dada. Además, se basa en que la compacidad del suelo es proporcional a la densidad del suelo seco.

Cabe destacar que este ensayo está limitado a suelos que pasen totalmente por el tamiz No. 4 o que tengan un porcentaje retenido no mayor al 10% y pase el 100% del material por el tamiz de 3/8". De lo contrario, se debe aplicar el ensayo de Proctor estándar (norma ASTM D698).

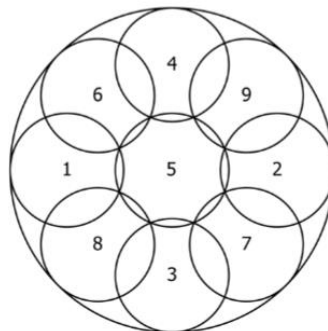
A modo general, su procedimiento consiste en colocar cinco capas de la muestra de suelo ligeramente húmeda en moldes cilíndricos de 4 in o 6 in de diámetro, las cuales serán compactadas según el patrón mostrado en la Figura 38 y Figura 39 con una fuerza de 10 lbf producida por la caída repetida (56 veces) de un martillo desde una altura de 18 in, produciendo un esfuerzo de compactación de 56000 ft-lbf/ft³.

Figura 38. Patrón de compactación para los moldes de 4 in de diámetro.



Fuente: ASTM, 2021.

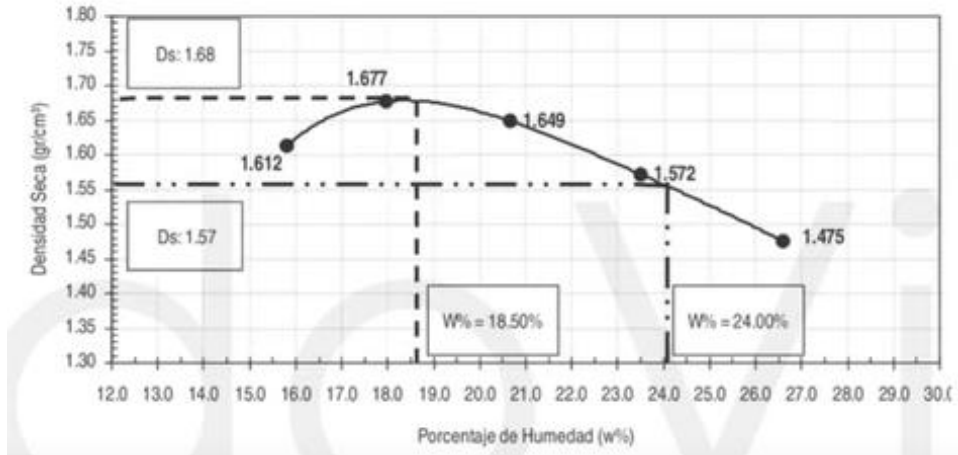
Figura 39. Patrón de compactación para los moldes de 6 in de diámetro.



Fuente: ASTM, 2021.

Posterior a la compactación, se toman muestras representativas del material, se pesan y se secan en el horno por mínimo 12 horas. El procedimiento se repite con diferentes contenidos de agua en la muestra hasta que disminuya o no existan cambios en la masa unitaria húmeda o se hayan obtenido dos puntos para realizar la gráfica de compactación (Figura 40).

Figura 40. Ejemplo de la gráfica de compactación obtenida al finalizar el ensayo Proctor modificado.



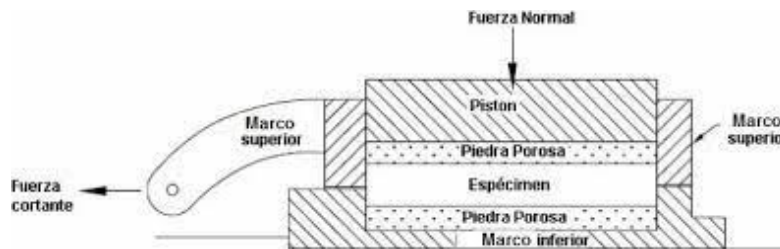
Fuente: Todo Vial, 2020.

1.3.5. ASTM D3080

Por su parte, la norma ASTM D3080 contiene el procedimiento para realizar el ensayo de corte directo en suelos consolidados en condición drenada para obtener el ángulo de fricción efectivo y la resistencia a los esfuerzos cortantes del material en estudio.

Su procedimiento consiste en preparar la muestra de suelo conteniéndola en el molde cuadrado de lado dos pulgadas o circular del mismo diámetro. Se ensambla la caja de corte según la Figura 41 para posicionarla en el equipo de corte directo, colocando el brazo de carga sobre la tapa superior y ajustando los sensores de carga y desplazamiento horizontal.

Figura 41. Ensamble de la caja de corte para el ensayo de corte directo.



Fuente. ASTM, 2023.

Una vez finalizado el ensayo, es posible obtener la gráfica de los estados de esfuerzo a partir de las mediciones obtenidas del esfuerzo cortante y el esfuerzo normal. Cabe destacar que el ensayo se debe repetir para diferentes cortes que permitan generar una pendiente, la cual corresponde al ángulo de fricción efectivo.

1.3.6. ASTM D2166

Este método de ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos bajo condiciones de carga controlada, para lo cual se selecciona una muestra representativa del suelo y se prepara de manera que tenga una forma cilíndrica con relación de altura a diámetro de aproximadamente 2:1.

Dicha muestra se deja inconfinada de manera lateral, mientras se carga axialmente a una velocidad de deformación axial entre 0.5 y 2%/min. Se miden el tiempo transcurrido, la deformación y la carga axial.

Para ejecutar este ensayo, se requiere de una máquina de ensayo de compresión a fin de aplicar carga axial de manera controlada a la muestra de suelo hasta que ocurra la falla; un molde cilíndrico para la preparación de la muestra; un instrumento para medir la deformación durante la aplicación de carga; una balanza y un horno de secado.

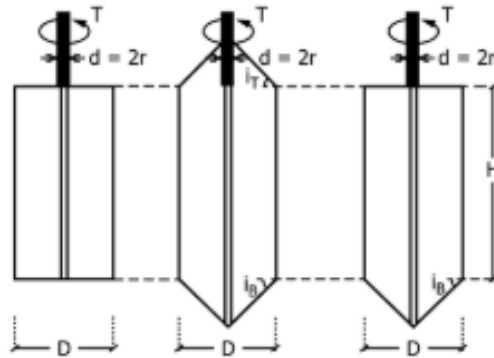
Cuando se tiene la muestra lista, se coloca en la máquina de ensayo de compresión, asegurándose de que esté centrada y alineada correctamente con el eje de carga. Después, se aplica la carga axial gradualmente y de manera continua a la muestra hasta que ocurra la falla o rotura, mientras tanto se van registrando las cargas aplicadas y las deformaciones axiales correspondientes que permitan dibujar una gráfica de carga versus deformación de la muestra. Finalmente, se calcula la resistencia a la compresión no confinada dividiendo la carga máxima aplicada por la superficie transversal de la muestra, empleando las ecuaciones de la norma ASTM 3080.

1.3.7. ASTM D2573

La norma ASTM D2573 corresponde al método estandarizado para el cizallamiento con veleta en suelos saturados de grano fino, el cual consiste en colocar una veleta de cuatro palas en el suelo intacto y hacerla girar desde la superficie a fin de determinar el par necesario para cizallar una superficie cilíndrica con la paleta. Este torque o momento se convierte en una resistencia unitaria al cizallamiento de la superficie de rotura mediante un análisis de equilibrio límite.

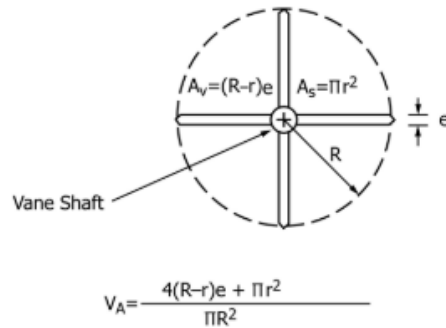
El equipo requerido para la ejecución de este ensayo es: una veleta de cuatro paletas como se muestra en las Figuras 42 y 43; dispositivo para medición de torque, varillas de torque, acoplamiento de fricción, centralizadores y equipo avanzado para empujar la aleta por debajo de la base del agujero en el suelo.

Figura 42. Geometría de las paletas de la veleta.



Fuente: ASTM, 2018.

Figura 43. Dimensiones de la veleta.



Fuente: ASTM, 2018.

Nota: donde V_A es el área de la veleta, R es el radio de falla cilíndrica [mm/in], r es el radio del eje de la veleta [mm/in]; y e es el espesor de la paleta de la veleta [mm/in].

Para realizar este ensayo, primero se debe preparar el sitio en estudio excavando un agujero a la profundidad deseada, el cual debe permitir la colocación de la veleta dentro de él. Luego, se monta la veleta en el dispositivo de fijación sobre el agujero para girarla de forma constante y continua a una velocidad específica, midiendo la fuerza o torque necesario para que la veleta penetre el suelo. Es necesario registrar la profundidad de penetración y el torque requerido durante el ensayo y calcular la resistencia al corte drenado en kPa utilizando la siguiente fórmula:

$$(S_u)_{fv} = \frac{6 T}{7 \pi D^3} \times K$$

Donde:

T: valor máximo de torque en N.m.

D: diámetro de la veleta en mm.

K: constante 1×10^6 en unidades del Sistema Internacional.

Capítulo 2: Metodología

En esta sección, se detalla el tipo de investigación asignada para el proyecto, así como las diferentes variables y fuentes de información que contribuyeron al cumplimiento de los objetivos planteados. Adicionalmente, se describe el procedimiento para la construcción de un modelo físico de taludes, desde la preparación del suelo hasta su confección propiamente; además, se listaron los ensayos de laboratorio y en sitio para la caracterización del material y la obtención de propiedades físicas como densidad, permeabilidad, plasticidad, entre otros. Finalmente, se explican los pasos realizados en el programa Slide 2.0 para la creación de modelos computacionales de los taludes en estudio.

2.1. Tipo de investigación

El presente proyecto constituye una investigación en la cual se determinó la viabilidad del uso del equipo SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific para ser utilizado como parte de la instrumentación en el análisis de taludes de suelos plásticos por medio de pruebas en modelos físicos y ensayos de laboratorio, por lo tanto, se plantea que la metodología es de tipo cuantitativa experimental.

Este tipo de metodología permite la recolección de datos numéricos por medio de experimentos o pruebas en un contexto de investigación para probar hipótesis previamente definidas, de manera que se pueda probar si el supuesto planteado es correcto o no. Para el caso del proyecto, se establece la hipótesis de que, cuanto mayor cantidad de agua haya en el suelo, mayor será la probabilidad de que ocurra un deslizamiento superficial.

Otra razón por la cual se definió este tipo de metodología radica en la facilidad para manipular intencionalmente las variables independientes para obtener distintos comportamientos de las variables dependientes, llevando un control sobre el proceso.

2.2. Variables

El sensor SoilVUE™10 es capaz de medir cuatro parámetros del suelo: conductividad eléctrica, permisividad dieléctrica, contenido de humedad y temperatura. No obstante, según la bibliografía consultada en el marco teórico del trabajo, el parámetro que más se ajusta a los objetivos planteados es la humedad del suelo, de manera que el estudio se enfoca principalmente en esta variable por parte del sensor.

Además, fue necesario mantener un control sobre los posibles desplazamientos del suelo, para lo cual se realizó un registro fotográfico tomando imágenes cada 10 segundos, además del control visual durante toda la toma de mediciones; de manera que se pueda generar una relación entre la humedad y los

desplazamientos de suelo, y así probar la hipótesis establecida inicialmente. Esto porque la ubicación y dimensiones del modelo físico no permitieron realizar un control topográfico en los taludes.

Otras variables que se tomaron en cuenta al momento de obtener las mediciones correspondientes de humedad en el suelo fueron las propiedades físicas del suelo (tamaño, densidad, plasticidad, permeabilidad...), la topografía, geología y geometría del talud; esto por la influencia que tienen para desencadenar un deslizamiento. Cabe destacar que la vegetación y las sobrecargas en el terreno también son parámetros que afectan la estabilidad del talud, no obstante, se dejaron por fuera del alcance del presente proyecto.

2.3. Fuentes de información

Para el proyecto se emplearon tanto fuentes primarias como secundarias, ya que, acorde con los objetivos planteados, se requirió una caracterización del equipo en estudio, la cual se realizó por medio del análisis de la documentación aportada por la empresa Campbell Scientific, además de la revisión de artículos desarrollados en torno al uso del sensor.

Además, al ser un trabajo de tipo experimental, se requirió la obtención de materiales para la construcción de un modelo físico de taludes a partir del cual se tomaron datos empleando el perfilador. Adicionalmente, se realizaron ensayos de laboratorio para poder relacionar las humedades obtenidas a partir del sensor con los diferentes parámetros y características del suelo utilizado para el estudio de la estabilidad de los taludes.

Dicha información fue contrastada con la teoría existente referente a la estabilidad de taludes y la obtenida por medio de la creación de modelos computacionales con el *software* Slide 2.0, con la finalidad de verificar el cumplimiento del principal objetivo del proyecto.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

A continuación, se describen las diferentes técnicas, procedimientos e instrumentos utilizados para la recolección de datos correspondientes al proyecto.

2.4.1. Sensor SoilVUE™10

Para empezar, fue necesario conocer las características, especificaciones y modo de empleo del equipo en estudio: el sensor SoilVUE™10. Para ello, se recopiló la documentación existente acerca del sensor indagando en la página oficial de la empresa Campbell Scientific, donde se encontró la ficha técnica del equipo, adjunta en el Anexo 1; videos explicativos en los cuales se indica cómo instalar el sensor en campo y un manual referente a la conexión requerida con diferentes registradores de datos. Además, se contó con el apoyo directo de uno de los ingenieros de la compañía, quien realizó una demostración y explicación

presencial detallada sobre la instalación del sensor, la conexión con el registrador de datos CR310 y el uso del *software* PC400 para el almacenamiento de los datos registrados por el SoilVUE™10, esto con el fin de clarificar dudas sobre el modo de empleo del sensor.

A partir de dicha información, se confeccionó una guía sobre el equipo en la cual se detallan las principales características técnicas y especificaciones del sensor SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific; además de explicar su modo de empleo y la manera en que se obtienen los datos recopilados por el equipo a través del registrador de datos CR310, igualmente suministrado por la compañía.

2.4.2. Muestreo y preparación del material

Considerando las características del sensor, se planteó la opción de trabajar con suelo de tipo fino, por lo que, con ayuda del profesor Alonso Poveda, se contactó a la ingeniera encargada del proyecto vial de La Galera, Curridabat, para solicitar aproximadamente 3 m³ de material. Los cuales fueron trasladados en camión hasta el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) (Figura 44), donde fueron descargados para su preparación.

Figura 44. Material transportado desde el proyecto de La Galera y descargado en el TEC.



Primeramente, se extendió el material a lo largo de una capa de plástico de aproximadamente seis metros de largo por cuatro metros de ancho para su almacenamiento y secado. Esto se realizó tanto fuera como dentro de las instalaciones del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción (Figuras 45 y 46), con el fin de evitar las infiltraciones por lluvia para obtener un secado efectivo donde la humedad se aproximara al valor cero y así facilitar el proceso de pulverización y movilización del material.

Figura 45. Almacenamiento y secado del material fuera de las instalaciones del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción.



Figura 46. Almacenamiento y secado del material dentro de las instalaciones del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción.



Una vez seco el material, se separó una parte para realizar ensayos en laboratorio de caracterización que permitieran verificar que se trabajó con el tipo de suelo apropiado para la toma de datos con el perfilador; además de ensayos para determinar algunas de sus propiedades físicas y mecánicas para la obtención de parámetros como resistencia a la compresión y corte, densidad, permeabilidad, entre otros.

El suelo restante fue utilizado para la construcción de dos taludes con pendientes de aproximadamente 60° y 90° dentro del modelo físico; por lo tanto, fue sometido a un proceso controlado de humedecimiento en aras de disminuir el polvo en el aire y facilitar el proceso de llenado y compactación. Se generó una relación por prueba y error donde, por cada cubeta de material, se adicionaron 200 ml de agua para obtener la consistencia mostrada en la Figura 47.

Figura 47. Consistencia del material para el proceso de llenado y compactación.



2.4.3. Ensayos «in situ» y laboratorio

Como se indicó anteriormente, el material fue sometido a una serie de ensayos de laboratorio que permitieron caracterizar el tipo de suelo utilizado en el modelo físico y obtener algunas de sus propiedades físicas y mecánicas. Además, una vez finalizada la construcción del modelo, se obtuvieron valores de resistencia al cortante por medio de la prueba de la veleta. Para los ensayos ejecutados, se tomó como base la normativa ASTM y los procedimientos se describen brevemente, a continuación.

2.4.3.1. Granulometría

Esta prueba se basa en la norma ASTM D1140 y consiste en lavar un espécimen de suelo de más de 0.075 mm (tamiz nro. 200). Se inicia con el tamizado de una muestra de suelo obtenida por el método de cuarteo, para ello se colocan varios tamices en serie y se pasa el material a través de estos, a fin de obtener la masa contenida en cada uno y así, determinar el porcentaje retenido y el porcentaje pasando.

Las arcillas, limos y otras partículas que son dispersadas por el agua de lavado, así como los materiales solubles en agua, se eliminan del suelo durante la prueba. La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como el porcentaje de masa de la muestra original y se informa como el porcentaje de material más fino que un tamiz nro. 200 por lavado.

Ahora bien, el material más fino que el tamiz nro. 200 puede separarse de partículas más grandes o las agregaciones del suelo pueden descomponerse de manera mucho más eficiente y completa mediante tamizado en húmedo que con tamizado en seco. Por lo tanto, cuando se desean determinaciones precisas de material más fino que un tamiz nro. 200, estos métodos de ensayo se utilizan en el espécimen de ensayo antes del tamizado en seco o como una determinación del porcentaje de material que es más fino que un tamiz nro. 200. Por lo general, la cantidad adicional de material más fino que un tamiz nro. 200 obtenido en el proceso de tamizado en seco es una cantidad pequeña. Si es grande, se debe comprobar la eficiencia de

la operación de lavado, ya que podría ser una indicación de la degradación del suelo. Al finalizar la prueba, se obtiene la curva granulométrica del material, la cual constituye un complemento de la carta de plasticidad para la caracterización del suelo en estudio.

2.4.3.2. Límites de Atterberg

Por su parte, este ensayo sigue la norma ASTM 4318 y se inicia procesando la muestra para eliminar cualquier material retenido en un tamiz nro. 40.

El límite de líquido se determina mediante la realización de ensayos en los que una parte de la muestra se extiende en una taza de latón (Copa de Casagrande), dividida en dos por una herramienta de ranurado, y luego se permite que fluyan juntos a partir de los choques causados por la caída repetida de la taza en un dispositivo mecánico estándar, siguiendo el método de límite de líquido A (método multipunto) o el método de límite de líquido B (método de un punto).

El límite de plástico se determina presionando alternativamente y rodando en un hilo de 3,2 mm de diámetro una pequeña porción de suelo de plástico hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el que el hilo se desmorona y ya no se puede presionar y volver a enrollar. El contenido de agua del suelo en este punto se reporta como el límite de plástico.

El índice de plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite de líquido y el límite de plástico. Y gracias a estos valores es posible situar el suelo en la carta de plasticidad y con ello identificar la presencia de limos o arcillas, así como la plasticidad del material.

2.4.3.3. Proctor modificado

La prueba de Proctor modificado se basa en la norma ASTM D1557 y consiste en colocar un suelo con un contenido de agua en cinco capas dentro de un molde de determinadas dimensiones, las cuales son compactadas por 25 o 56 golpes con una pesa de 10,00 lbf (44,48-N) caída desde una distancia de 18,00 pulgadas. (457,2 mm), sometiendo el suelo a un esfuerzo compacto total de aproximadamente 56 000 pies-lbf/pie (2700 kN-m/m³).

Se determina el peso de la unidad seca resultante y el procedimiento se repite para que un número suficiente de contenido de agua de moldeo establezca una relación entre el peso de la unidad seca y el contenido de agua de moldeo para el suelo. Estos datos, cuando se trazan, representan una relación curvilínea conocida como la curva de compactación. Los valores del contenido óptimo de agua y el peso unitario seco máximo modificado se determinan a partir de dicha curva.

2.4.3.4. Compresión inconfina

Acorde con lo que indica la norma ASTM D2166, en este método de ensayo, una muestra de aceite cilíndrico se desconfina de manera lateral, mientras se carga axialmente a una tasa de deformación axial entre 0,5 y 2%/min. Las mediciones se realizan con tiempo transcurrido, deformación y carga axiales. La carga no confinada, q , se calcula como el estrés de compresión en la falla. La resistencia al corte, s , es la mitad de la resistencia a la compresión no confinada.

El propósito principal de la prueba de compresión no confinada es obtener rápidamente una medida de resistencia a la compresión para aquellos suelos que poseen suficiente cohesión para permitir la prueba en el estado no confinado.

2.4.3.5. Resistencia al corte en laboratorio

Para determinar los parámetros de resistencia al corte como cohesión y ángulo de fricción, se empleó la norma ASTM D3080, la cual establece un método estandarizado para muestras de suelo en condiciones consolidadas y drenadas en laboratorio.

El procedimiento implica la preparación de muestras de suelo cilíndricas o rectangulares que luego se consolidan bajo una carga vertical específica. Al estar consolidada la muestra, se aplica una fuerza de corte horizontal controlada, generalmente mediante un dispositivo de corte directo. Suele realizarse la prueba para tres muestras diferentes con tres fuerzas distintas, para así generar una envolvente de falla que permita la obtención de la cohesión y el ángulo de fricción.

Al finalizar la prueba se cuenta con la información de los esfuerzos cortantes y esfuerzos normales para cada una de las muestras y con ello se genera la curva de estados de esfuerzos, a partir de la cual se obtiene la ecuación lineal que relaciona los parámetros de cohesión con sus respectivos ángulos de fricción.

2.4.3.6. Permeabilidad variable

Finalmente, la norma ASTM D5084 incluye los métodos para determinar la conductividad hidráulica de los suelos de drenaje libre (por ejemplo, arenas y gravas con bajo contenido de finos) mediante la penetración de muestras con agua en condiciones de cabeza constantes. Se presentan múltiples métodos que incluyen diferentes permeámetros (pared rígida, pared rígida de doble anillo y pared flexible). Diferentes opciones para sistemas de cabezal constante incluyen depósitos, botella de Mariotte y una bomba de flujo.

Estos métodos de ensayo se utilizan para medir el flujo vertical de agua unidimensional a través de suelos de grano grueso saturados inicialmente, permeables (es decir, de drenaje libre), bajo un gradiente hidráulico aplicado. Estos métodos de ensayo son adecuados para determinar la conductividad hidráulica de suelos con $k > 10^{-7}$ m/s.

2.4.3.7. Resistencia al corte «in situ»

El ensayo de corte directo en sitio, basado en la norma ASTM D2573, consiste en colocar una paleta de cuatro palas en el suelo intacto y rotarla desde la superficie para determinar el par necesario para esquilarse una superficie cilíndrica con la paleta. Este par, o momento, se convierte en una resistencia de cizallamiento unitaria de la superficie de fallo mediante el análisis de equilibrio de límite. La fricción de la barra de paletas y el instrumento se minimiza durante las lecturas mediante carcasas o carcasas especiales, o bien se contabiliza y resta del par total para determinar el par aplicado a la paleta.

Este método de ensayo proporciona una indicación de la resistencia al corte desgarrado en forma *in situ* de suelos de grano fino saturados (arcillas y limos) u otros materiales de grano fino saturados, como los relaves de las minas y el lodo orgánico. El ensayo es aplicable a suelos con resistencias no drenadas

inferiores a 200 kPa. Además, los suelos muy sensibles se pueden remodelar durante la inserción de la paleta.

2.4.4. Modelo físico de taludes

Con respecto a las mediciones, se realizaron en un espacio controlado dentro del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción, lo cual permitió analizar el comportamiento del suelo deseado, en este caso, suelos finos como arenas, limos y arcillas, en presencia de agua y con dos pendientes predeterminadas.

Por lo tanto, se construyó un modelo físico con dimensiones de 1.20 m de altura, 1.50 m de largo y 1.00 m de ancho dentro del cual se moldearon dos taludes artificiales con pendientes aproximadas de 60° y 90°, y se instaló el SoilVUE™10 dejando un espacio de 20 cm entre el extremo inferior del perfilador y el fondo del modelo. Los materiales utilizados para la construcción del modelo fueron:

- Ocho tarimas de madera de tipo americano: cuentan con dimensiones de 1.20 m x 1.00 m, un peso aproximado de 25 kg y soportan hasta 6000 kg de carga estática (AR Racking, s.f.).
- Cuatro láminas de Plywood de 5 mm de espesor.
- Dos reglas de laurel de 3 x 1 pulgadas y 3.20 m de largo.
- Tornillos para techo galvanizados punta corriente de 2.5 pulgadas de largo.
- Plástico transparente.
- Una lámina de acrílico de 1.75 m x 0.80 m y 8 mm de espesor.

La estructura principal se construyó a partir de las tarimas, utilizando dos con sus medidas originales (caras laterales) y modificando tres para adecuar las dimensiones requeridas por el modelo para la parte inferior, trasera y frontal. De manera que las medidas finales de cada tarima se presentan en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Medidas finales de tarimas utilizadas para la construcción del modelo	
Posición	Dimensiones
Frontal	1.80 x 0.40 m
Trasera	1.80 x 1.35 m
Lateral derecha	1.00 x 1.20 m
Lateral izquierda	1.00 x 1.20 m
Inferior	1.80 x 1.00 m

Figura 48. Estructura principal del modelo.



Seguidamente, para evitar el derrame de material por los espacios libres de las tarimas, se utilizaron láminas de Plywood de 5 mm de espesor para forrar cada una de las caras internas del modelo, tal como se muestra, a continuación, en la Figura 49.

Figura 49. Estructura principal forrada con láminas de Plywood.



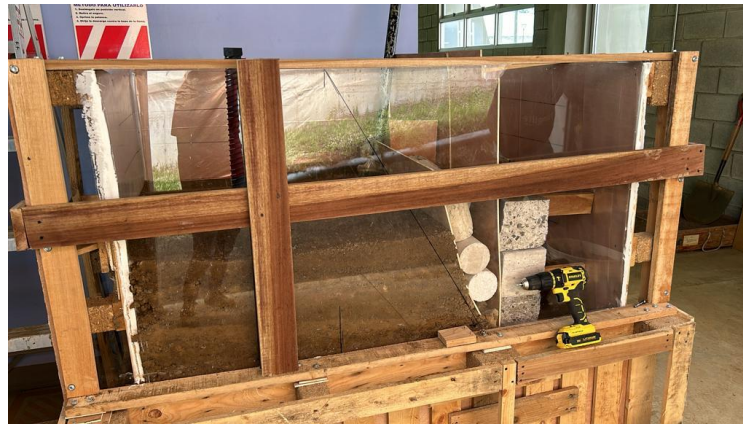
La unión de las tarimas se realizó utilizando juntas de madera atornilladas en cada una de las caras del modelo (Figura 50). En aras de lograr una mejor sujeción y rigidez entre las juntas y las tarimas, se utilizaron tornillos de techo galvanizados de punta corriente de 2.5 pulgadas de largo.

Figura 50. Juntas de madera del modelo.



Adicionalmente, se colocó una lámina de acrílico transparente de 8 mm en el frente del modelo con la finalidad de visualizar las diferentes condiciones de saturación a las que fue sometido el material durante la toma de datos. Esta fue soportada por dos piezas de madera en forma de cruz para evitar el pandeo excesivo durante la compactación del material, tal como se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Soportes de madera para evitar el pandeo excesivo del acrílico.



2.4.4.1. Llenado y compactación

Una vez construido el modelo, se realizó el llenado y moldeo de taludes por capas de 15 cm previamente demarcadas en las paredes del arquetipo. Se requirieron aproximadamente 15 cubetas con 35-40 kg de material por cada capa colocada, las cuales fueron compactadas de manera individual utilizando un apisonador manual.

Adicionalmente, durante el proceso de compactación se incluyó un sistema de contención dentro del modelo para evitar el desplazamiento no deseado del material, además de funcionar como molde para la construcción de los taludes según las pendientes requeridas. Este se aprecia en la Figura 52, en conjunto con la demarcación de las capas y el apisonador manual utilizado.

Figura 52. Capas de 15 cm y sistema de contención para el proceso de llenado y compactación.



Cabe destacar que ambos taludes fueron estudiados en simultáneo, es decir, dentro del mismo modelo se generaron ambas pendientes; de manera que una mitad correspondió al talud de pendiente 90° y la otra de 60° (Figura 53). Esto con la finalidad de que ambos taludes estuvieran sometidos a las mismas condiciones de humedad.

Figura 53. Pendientes en simultáneo dentro del modelo.



Ahora bien, para medir la compactación de cada una de las capas, se requirió la ayuda de los técnicos para emplear el densímetro nuclear del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), mostrado en la Figura 54.

Figura 54. Densímetro nuclear 3450 RoadReader™ Plus.



Este aparato permitió obtener mediciones de densidad y humedad sin necesidad de realizar cálculos laboriosos, como densidad en húmedo, densidad en seco, humedad, porcentaje de humedad, porcentaje de compactación, porcentaje de huecos y porcentaje de huecos de aire. Únicamente se configuraron las condiciones del suelo y se instaló sobre el material para obtener las densidades requeridas y verificar que fueran cercanas a la densidad obtenida de la prueba de Proctor modificado.

2.4.4.2. Instalación del SoilVUE™10

La empresa Campbell Scientific pone a disposición un manual de instrucciones sobre el SoilVUE™10 para los usuarios, además de un video en el cual se explica y ejemplifican los pasos a seguir para la instalación del sensor en un terreno determinado. Adicionalmente, en el Apéndice 1 se encuentra un manual escrito propiamente para este proyecto en idioma español, en el cual se encuentra, una vez más, el método de instalación del SoilVUE™10.

Ahora bien, para la instalación del sensor en el modelo anteriormente descrito, no se utilizó el método de instalación preestablecido por la empresa, ya que se corría el riesgo de generar desplazamientos no deseados en el terreno al momento de insertar el sensor en el material. A raíz de esto, se optó por enterrar el sensor conforme se iban colocando las capas de material como se observa en la Figura 55; además, de esta manera se tuvo mejor control al momento de apisonar el material y procurar que todas las ondas sensoriales estuvieran en contacto con el suelo.

Figura 55. Método utilizado para la instalación del sensor en el modelo.



Asimismo, al tener únicamente un sensor, la posición en que este se ubicó fue pensada a fin de que los resultados obtenidos fueran significativos para ambos taludes. Por ello, se colocó en la parte horizontal del terreno, en medio de los dos taludes, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 56. Posición del sensor en el modelo.



2.4.4.3. Sistema de agua

Para garantizar el humedecimiento uniforme del material, se utilizó una manguera a la cual se le obstruyó el extremo libre y se realizaron pequeños cortes a lo largo de ella para simular un aspersor alargado. Además, se calcularon tres caudales con la finalidad de simular diferentes intensidades de lluvia sobre los taludes. Para ello, se conectó la manguera descrita a la toma de agua dentro del laboratorio, se abrió la llave

aproximadamente a 45°, 90° y 135° como se muestra en la Figura 57 y se recolectó el agua en un recipiente por un minuto. Este procedimiento se repitió cinco veces para cada una de las aperturas del grifo.

Figura 57. Apertura de la llave del tubo a 45°, 90° y 135°.



Nota: la línea roja indica la posición inicial, la verde representa los 45°, la azul 90° y la amarilla 135° de apertura. No se dieron vueltas completas del grifo.

Posteriormente, el líquido recolectado se vertió en una probeta de 100 mL para obtener el volumen por minuto que se obtenía según la apertura de la llave y, por consiguiente, un promedio para cada escenario.

Para la instalación del sistema en el modelo, se colocó una estructura de metal sobre este con una altura aproximada de 20 cm, a fin de cumplir la función de soporte y así, mover manualmente la manguera sobre el material para simular la caída de lluvia sobre los taludes. Cabe destacar que, durante el proceso de toma de mediciones, los caudales obtenidos se alternaron aleatoriamente cada 30 minutos. Dicho sistema se ilustra en la Figura 58.

Figura 58. Sistema de agua empleado.



2.4.5. Modelado en software Slide 2.0

Se realizaron modelos computacionales a través del programa Slide 2.0 para verificar el comportamiento de los taludes según su geometría, las propiedades del material y las condiciones de saturación del modelo; además de calcular su factor de seguridad por medio de diferentes métodos de cálculo. Para ello, se utilizaron tutoriales proporcionados por el programa (en el Anexo 2 se visualiza el paso a paso realizado para la obtención de los diferentes modelos generados).

Primeramente, se tabularon las coordenadas de ambos modelos en Excel asumiendo el origen en la esquina inferior izquierda de los modelos, para facilitar el dibujo de la geometría en el programa. Dichas coordenadas se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Coordenadas utilizadas para generar los modelos computacionales		
Pendiente del talud	Coordenadas	
	X	Y
60°	0	0
	0	1.2
	0.65	1.2
	1	0.3
	1	0
	0	0
90°	0	0
	0	1.2
	0.95	1.2
	1	0.3
	1	0
	0	0

Al iniciar el programa, se definieron las condiciones del análisis que van desde las unidades por utilizar, las condiciones de agua y los métodos de cálculo para el FS; para ambas geometrías se estableció una falla de izquierda a derecha y se seleccionaron los métodos de Bishop simplificado, Morgenstern-Price y Janbú simplificado.

Dichos métodos fueron seleccionados por su disponibilidad en el programa Slide 2.0, además de que proporcionan confiabilidad y precisión en sus resultados para una evaluación adaptativa de la estabilidad de los taludes, permitiendo una mejor validación y toma de decisiones en el proyecto.

Por su parte, el método Bishop simplificado asume que las fuerzas interlaminares son horizontales, simplificando los cálculos y proporcionando resultados precisos para suelos homogéneos y cohesivos. Es de gran utilidad cuando se evalúa la estabilidad de taludes en casos donde existe buena aproximación de las condiciones del suelo y el agua.

El método de Janbú simplificado considera fuerzas interlaminares horizontales y verticales, convirtiéndolo en un método más robusto en situaciones donde la presión del agua y las características del

suelo varían a lo largo de la profundidad. Finalmente, el método de Morgenstern-Price es más general y no realiza suposiciones simplificadoras sobre las fuerzas interlaminares, proporcionando una solución más precisa y confiable al resolver el equilibrio de fuerzas y momentos.

Figura 59. Configuración general de los modelos.

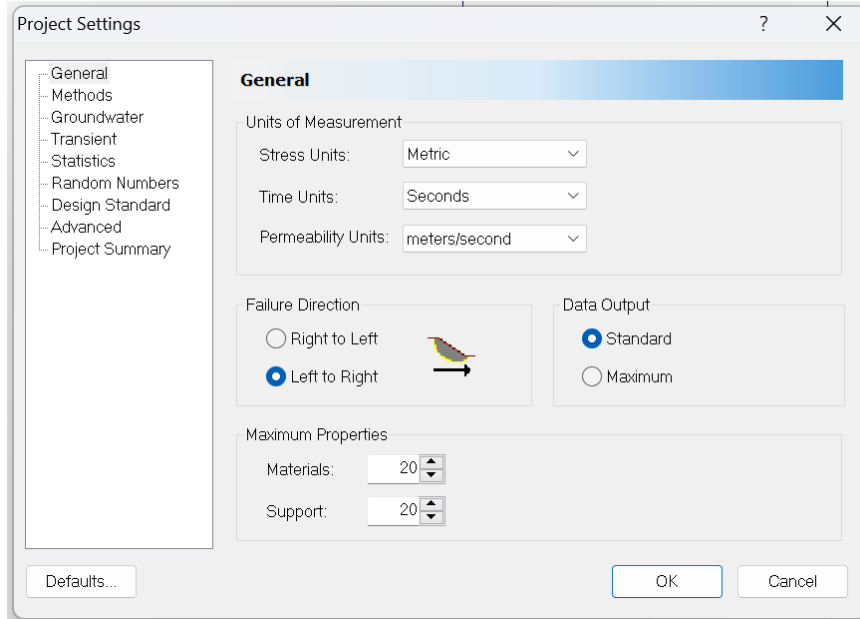
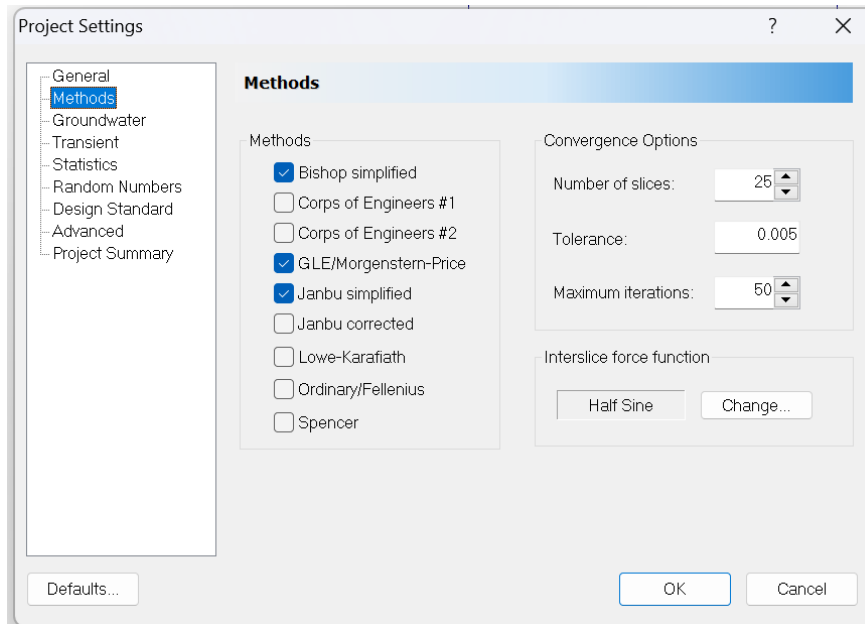
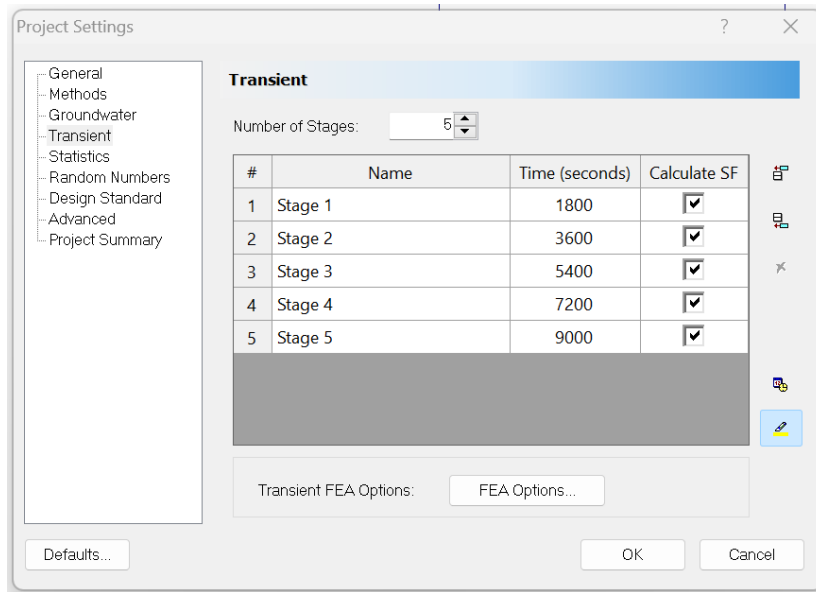


Figura 60. Métodos de cálculo seleccionados para el cálculo del FS.



Adicionalmente, se indicó al programa que las condiciones de agua en el suelo serían transitorias y se definieron cinco escenarios considerando los momentos en los que falló el modelo físico y el tiempo de toma de datos de humedad con el sensor SoilVUE™10.

Figura 61. Escenarios según el tiempo para las condiciones del agua en el suelo del modelo.



Con respecto a las propiedades del material, el programa solicita el peso unitario y dependiendo de la condición que se desee analizar (en este caso la drenada y no drenada), los parámetros necesarios.

Figura 62. Propiedades del suelo para la condición no drenada.

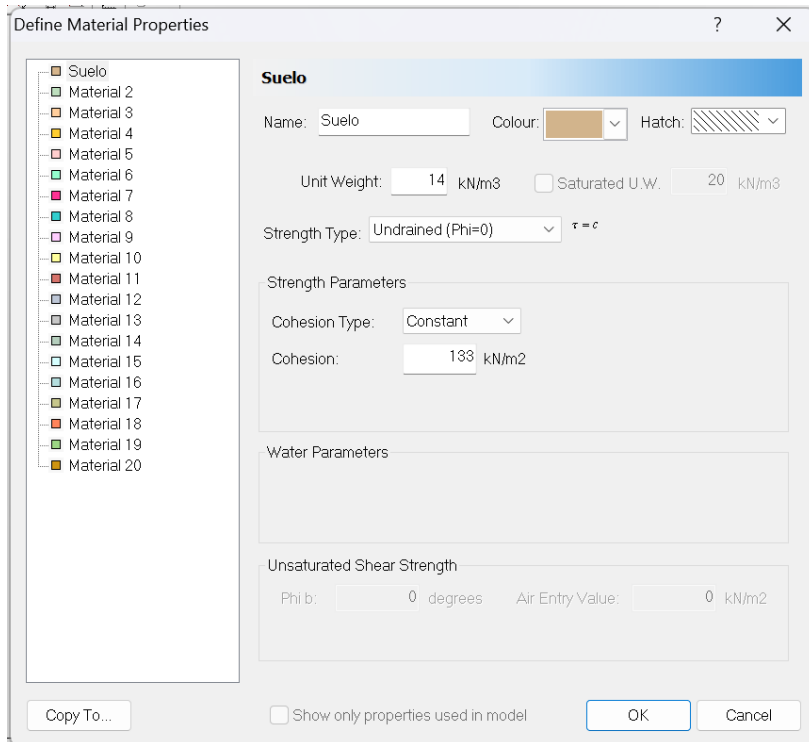
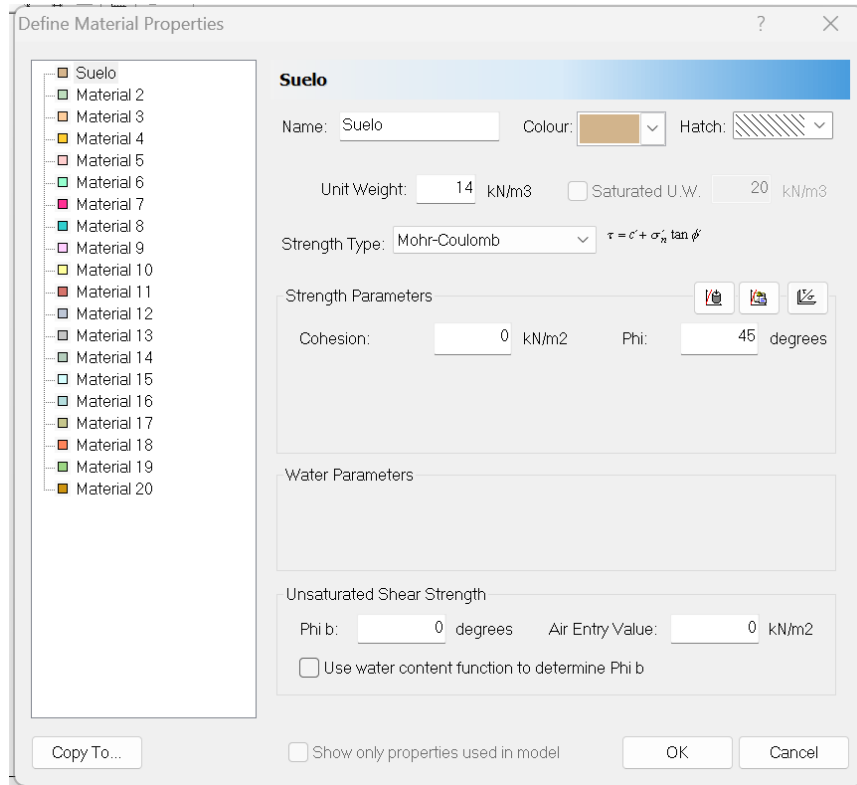
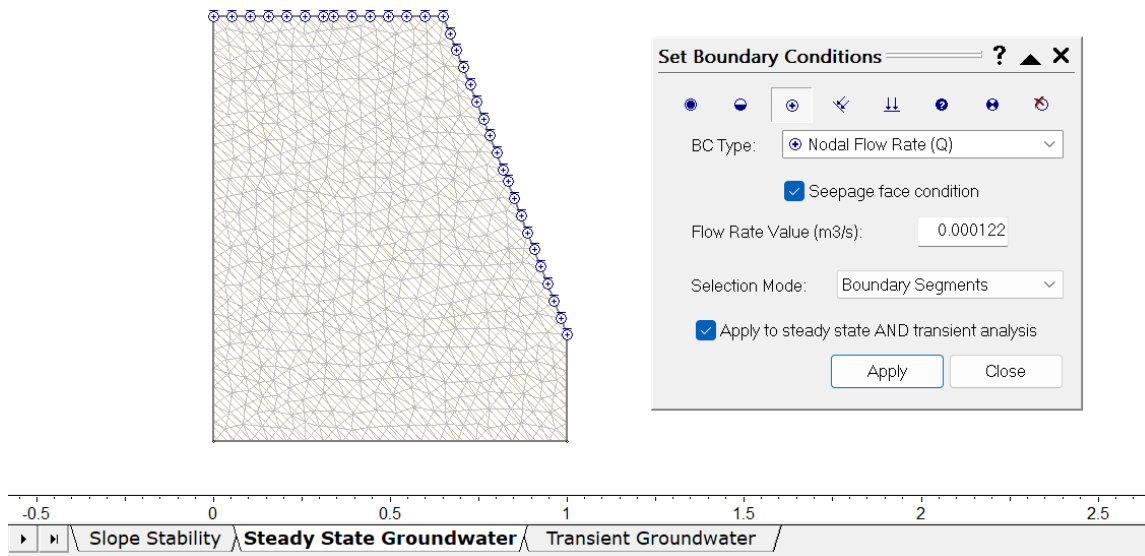


Figura 63. Propiedades del suelo para la condición drenada.



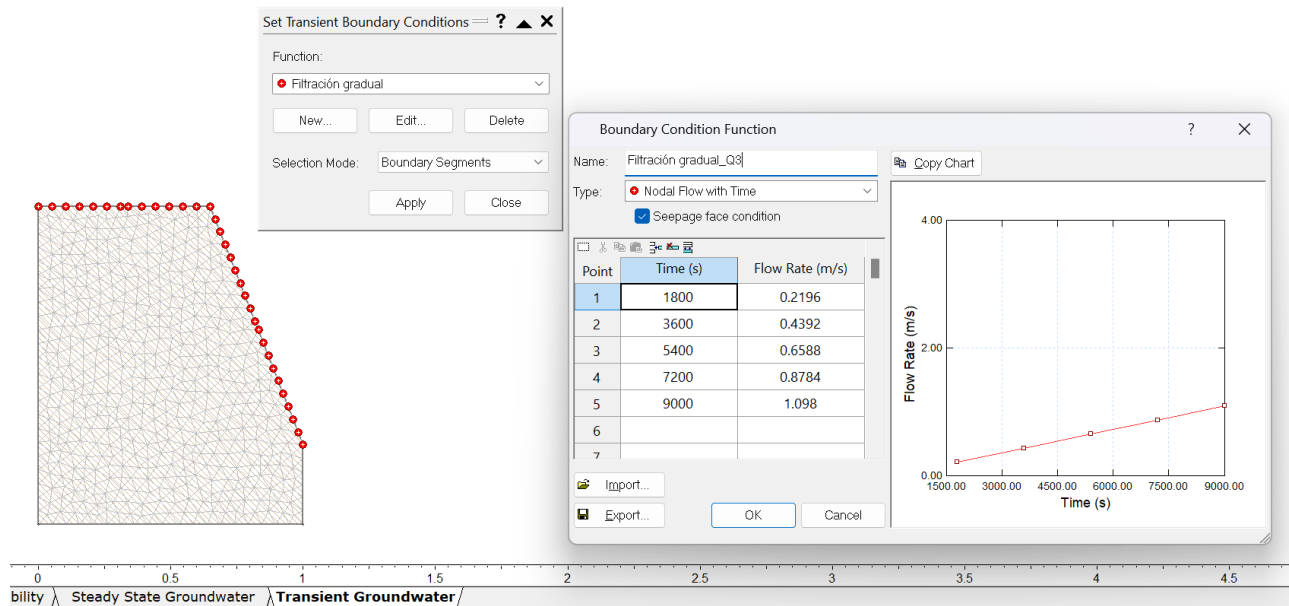
El siguiente pasó consistió en la implementación de los flujos de agua en el modelo, para ello, el programa presenta una pestaña llamada “*Steady State Groundwater*”, donde se indica el tipo y, en este caso, el flujo deseado. Además, se debe indicar las superficies por donde ingresará el agua al suelo.

Figura 64. Implementación del agua en los modelos.



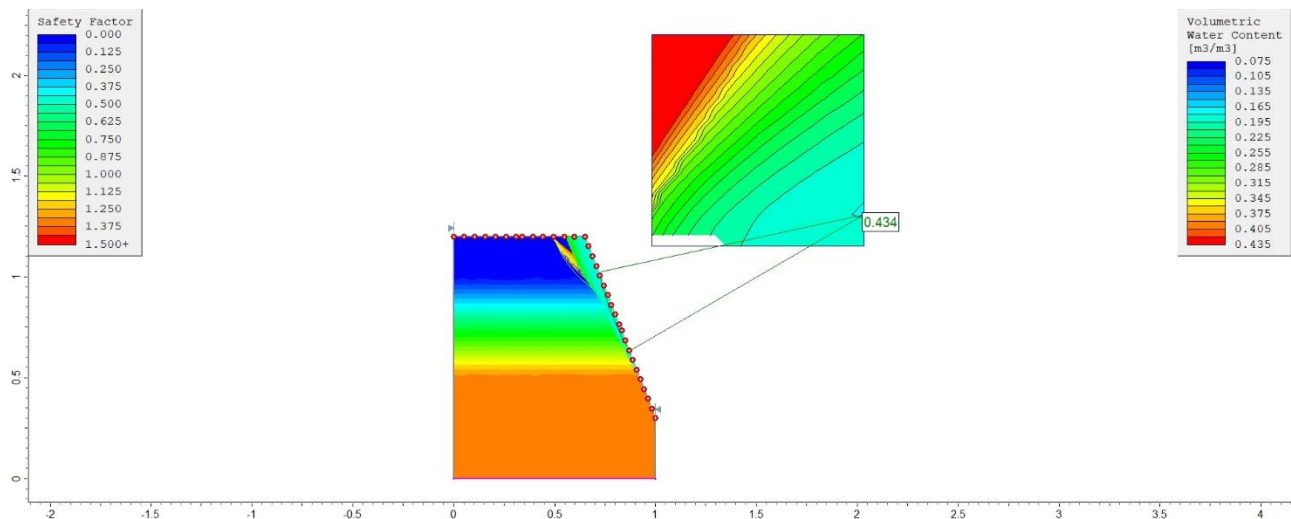
También, acorde con el tipo de agua subterránea seleccionada, el programa solicita una función que indique la condición de la capa de agua, la cual depende del tipo de flujo y el valor como tal.

Figura 65. Función del caudal aplicado en el modelo.



Una vez introducidos los parámetros necesarios, se dejó que el programa realizara los cálculos correspondientes según los métodos seleccionados y cuando finalizó el proceso, se visualizaron los diferentes factores de seguridad obtenidos, así como la superficie de falla de los taludes. Además, el modelo presenta el contenido de humedad a lo largo del talud según la escala de colores y valores de preferencia. En la Figura 66, se presenta un ejemplo de modelo obtenido; los resultados completos se muestran tanto en la sección de Resultados como en el Apéndice 5 y 6.

Figura 66. Modelo obtenido para el talud de pendiente 60° para la condición drenada mediante el programa Slide 2.0.



2.5. Análisis y procesamiento de la información

Considerando la naturaleza de los datos obtenidos de las pruebas en el modelo y en laboratorio, la información se presentó en cuadros debidamente identificados según la prueba o ensayo realizado para, posteriormente, generar curvas donde se relacionaron los parámetros medidos a partir del sensor en función del tiempo y con ello, se identificaron los desplazamientos ocurridos en los taludes.

Al tener los datos tabulados y graficados, utilizando la información desarrollada en el marco teórico y la técnica de análisis cuantitativo, se procedió con la evaluación de la posible relación que existe entre los parámetros medidos, implementando el uso de un modelo computacional en el *software* Slide 2.0 y así verificar si es posible utilizar las medidas que brinda el sensor SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific para realizar el análisis de estabilidad de taludes de suelos plásticos.

Capítulo 3: Resultados y análisis

A continuación, se muestran los resultados tabulados o graficados que se obtuvieron a partir del perfilador, los ensayos de laboratorio y en sitio, así como los modelos computacionales. Cabe destacar que algunos de ellos se colocaron en el capítulo de Apéndice debido a su extensión.

3.1. Resultados

Como primer objetivo específico, se identificaron las características, especificaciones y usos del sensor SoilVUE™10 que pueden ser utilizadas para la determinación de propiedades del suelo asociadas a los deslizamientos. Esto se realiza empleando el sensor y analizando la documentación existente sobre el equipo. Por ello, en el Cuadro 6 se resumen las especificaciones del sensor SoilVUE™10.

Cuadro 6. Especificaciones del sensor SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific	
Parámetros de medición	Contenido volumétrico de agua Permitividad eléctrica Conductividad eléctrica Temperatura
Rango de temperatura de funcionamiento	-40 °C a 60 °C
Torque máximo de instalación	54 N m
Rango de voltaje de operación	9 a 36 VDC
Diámetro	5.8 cm incluyendo las roscas 5.2 cm excluyendo las roscas
Longitud máxima del cable	304.8 m
Longitud del sensor utilizado	105 cm
Peso del sensor	3.6 kg
Profundidades de mediciones (cm)	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, y 100

Fuente: Campbell Scientific, 2020.

Adicionalmente, con ayuda de la ficha técnica del sensor, se identificaron los rangos de medición y la precisión con la que cuenta el sensor según cada uno de los parámetros que mide, la información se detalla en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Precisión de las mediciones del sensor SoilVUE™10 por cada parámetro		
Parámetro	Rango de medición	Precisión
Conductividad eléctrica	0 a 10 dS/m	±2% (0 a 2.5 dS/m) ±5% (rango completo)
Permisividad dieléctrica	1 a 80	±1 unidad de permitividad (entre 4 y 42 de permitividad)
Contenido volumétrico de agua	0 a 100%	±1.5% en la mayoría de los suelos
Temperatura	No indica	±0.15 °C (entre -30 °C y +40 °C)

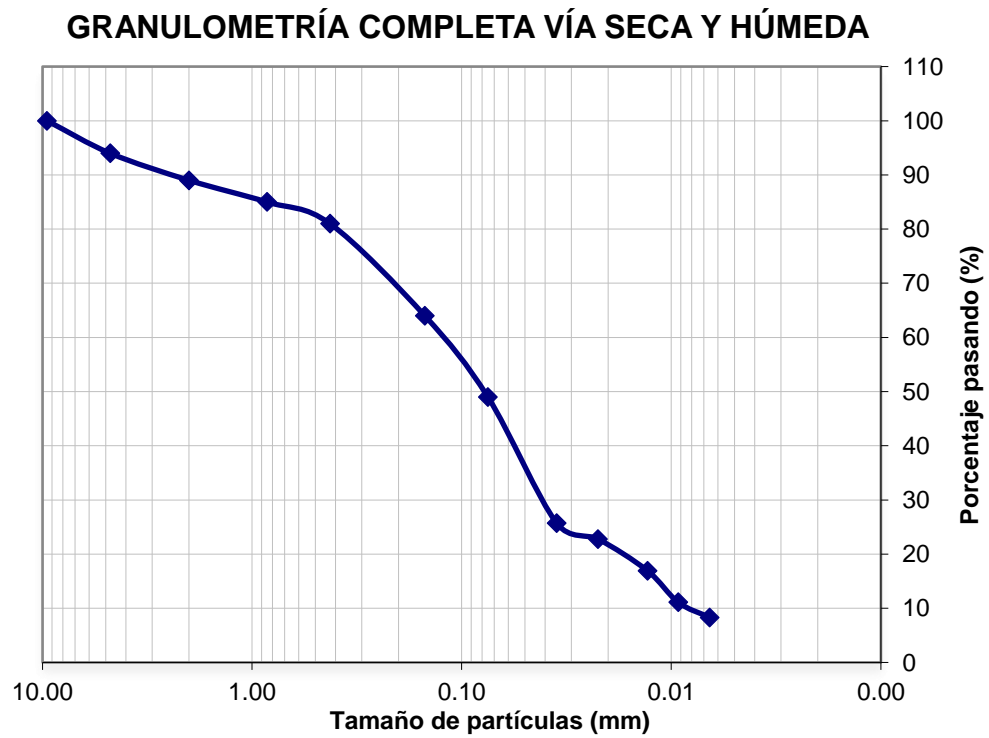
Fuente: Campbell Scientific, 2020.

Actualmente, no se registran datos que evidencien su uso en el ámbito de la Ingeniería Civil o en Construcción; únicamente se tienen estudios de comparación con otros sensores de perfil como el Drill&Drop y el SMT500 en el área de la agricultura para verificar la necesidad de sistemas de riego en los cultivos.

Con respecto a la caracterización del suelo, se tomaron muestras del material para realizar pruebas de granulometría y límites de plasticidad en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción con ayuda de los técnicos. Los resultados obtenidos para dichas pruebas se muestran en los Cuadros 8 y 9 y en las Figuras 67 y 68.

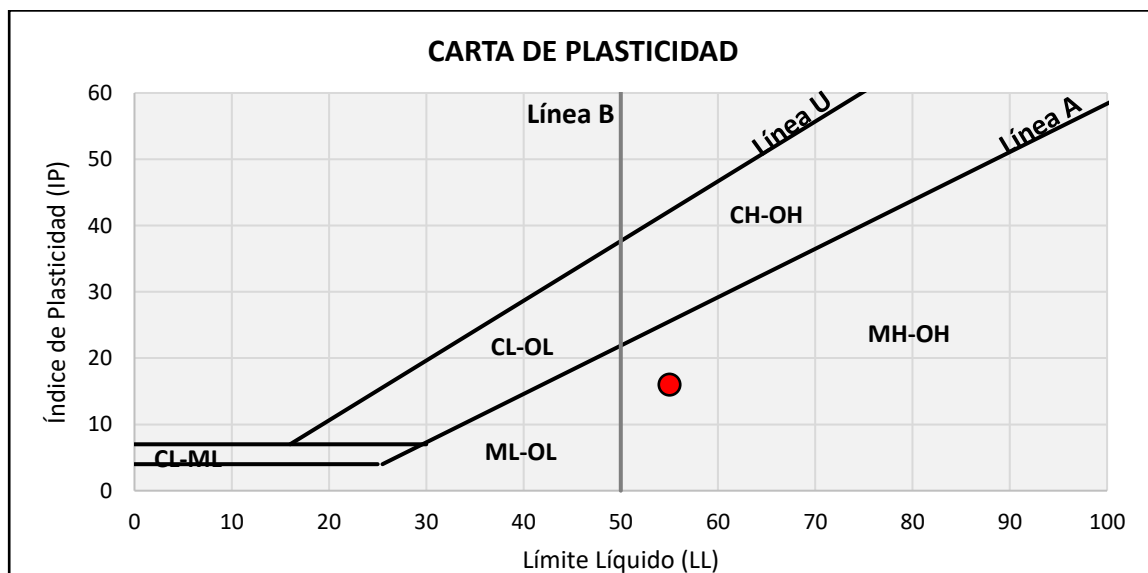
Cuadro 8. Resultados de granulometría por vía seca e hidrómetro	
Tamaño de partículas (mm)	Porcentaje pasando (%)
9.53	100
4.76	94
2.00	89
0.85	85
0.43	81
0.15	64
0.08	49
0.0352	25.7
0.0224	22.8
0.0130	16.9
0.0093	11.1
0.0066	8.3

Figura 67. Curva de granulometría del material.



Cuadro 9. Límites de plasticidad	
Límite líquido (LL)	55%
Límite plástico (LP)	39%
Índice de plasticidad (IP)	16%

Figura 68. Curva de granulometría del material.



Adicionalmente, se muestra la tabla del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) a partir de la cual se determinó que el tipo de suelo corresponde a una arena limosa de alta plasticidad (SM).

Cuadro 10. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)				
Divisiones mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos El 50% o más queda retenido en el tamiz nro. 200	Grava Menor al 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz nro. 4 (4.75 mm)	Grava limpia Menos del 5% pasa el tamiz nro. 200	GW	Grava bien graduada
			GP	Grava pobremente graduada
		Grava con más del 12% de finos pasantes del tamiz nro. 200	GM	Grava limosa
			GC	Grava arcillosa
	Arena Mayor o igual al 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz nro. 4	Arena limpia menos del 5% pasa el tamiz nro. 200	SW	Arena fina a gruesa
			SP	Arena pobremente graduada
		Arena con más del 12% de finos pasantes del tamiz nro. 200	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino Más del 50% de la muestra pasa el tamiz nro. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor a 50	Inorgánico	ML	Limo
			CL	Arcilla
		Orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla orgánica
	Limos y arcillas Límite líquido mayor o igual a 50	Inorgánico	MH	Limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	OH	Arcilla orgánica
Suelos altamente orgánicos			Pt	Turba

Fuente: Minaya, 2016.

Ahora bien, considerando que el segundo objetivo específico del proyecto se centra en la obtención de datos a partir del modelo, primeramente, en el Cuadro 11 se muestran las densidades obtenidas durante el proceso de compactación por medio del densímetro nuclear.

Cuadro 11. Densidades obtenidas en el proceso de compactación del suelo			
Capa	Espesor (cm)	Densidad (kg/m³)	% PR
1	15	1407	99.8
2	15	1385	98.2
3	15	1249	88.6
4	15	1242	88.1
5	15	1202	85.3
6	15	1056	74.9

Nota: donde %PR significa el porcentaje de la prueba Proctor.

Adicionalmente, se determinaron tres promedios del caudal que estarían cayendo sobre el material durante la toma de mediciones. Los resultados se observan en los Cuadros 12, 13 y 14.

Cuadro 12. Caudal bajo			
Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	Promedio (L/s)
0.980	60	0.016	0.016
0.940	60	0.016	
0.950	60	0.016	
0.980	60	0.016	
0.910	60	0.015	

Cuadro 13. Caudal intermedio			
Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	Promedio (L/s)
4.580	60	0.076	0.078
5.070	60	0.085	
4.100	60	0.068	
3.870	60	0.065	
5.870	60	0.098	

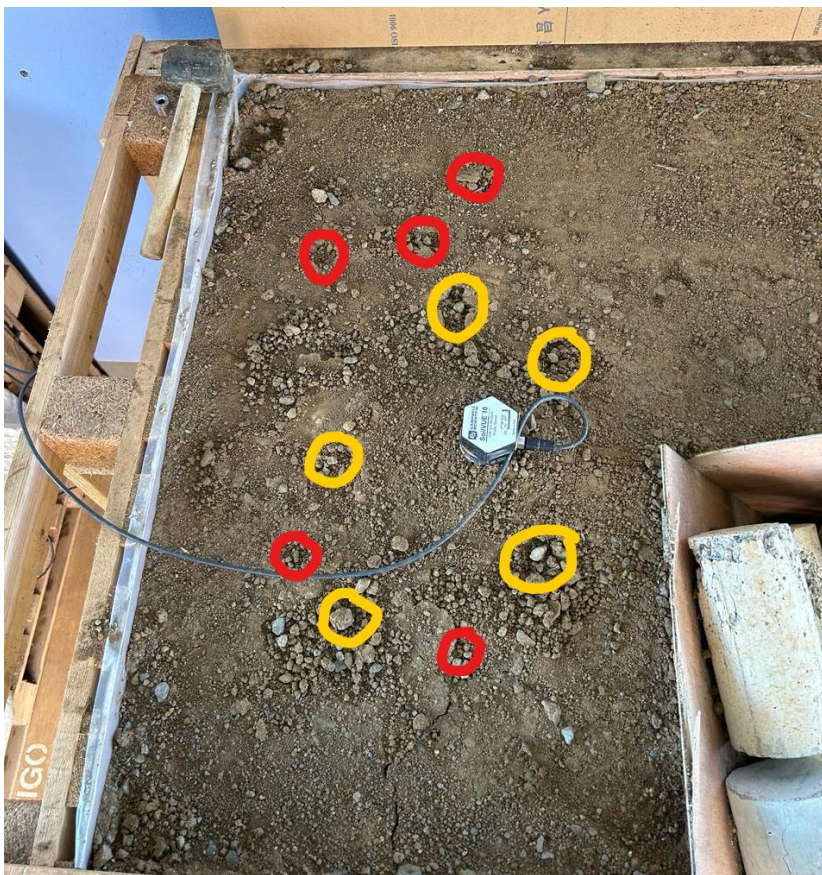
Cuadro 14. Caudal alto			
Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)	Promedio (L/s)
7.830	60	0.131	0.122
6.500	60	0.108	
7.670	60	0.128	
7.140	60	0.119	
7.310	60	0.122	

Otro parámetro relevante para el análisis de la estabilidad de los taludes corresponde a la resistencia al corte, la cual fue medida en el modelo utilizando la veleta de 19 mm, a dos profundidades distintas. En el

Cuadro 15, se muestran los resultados obtenidos, mientras que en la Figura 69 se ilustran los puntos donde se tomaron las mediciones según la profundidad: 4 cm demarcados con rojo y 10 cm con amarillo.

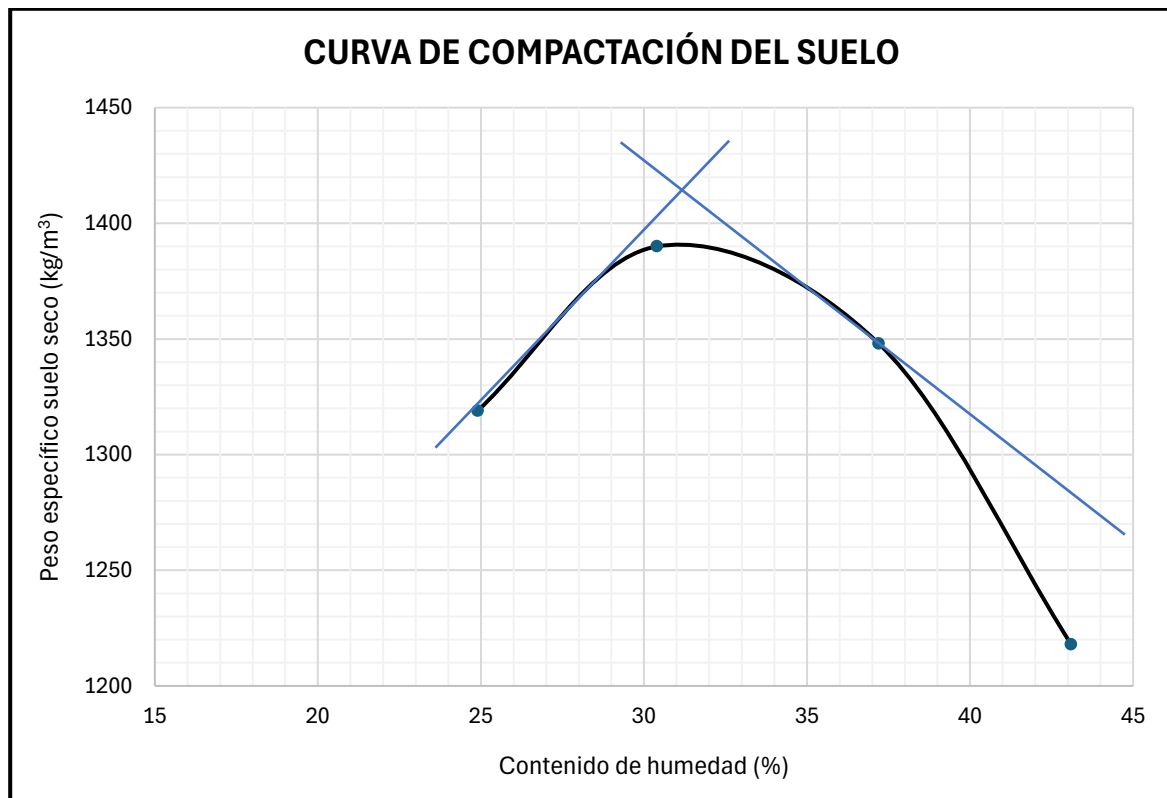
Cuadro 15. Resistencia no drenada al corte del suelo por medio de la prueba de veleta			
Medición	Paleta (mm)	Profundidad (cm)	S_u (kPa)
1	19	4	44
2			94
3			62
4			59
5			58
6		10	83
7			86
8			116
9			68
10			72

Figura 69. Puntos de muestreo para la prueba de la veleta a 4 cm y 10 cm de profundidad.



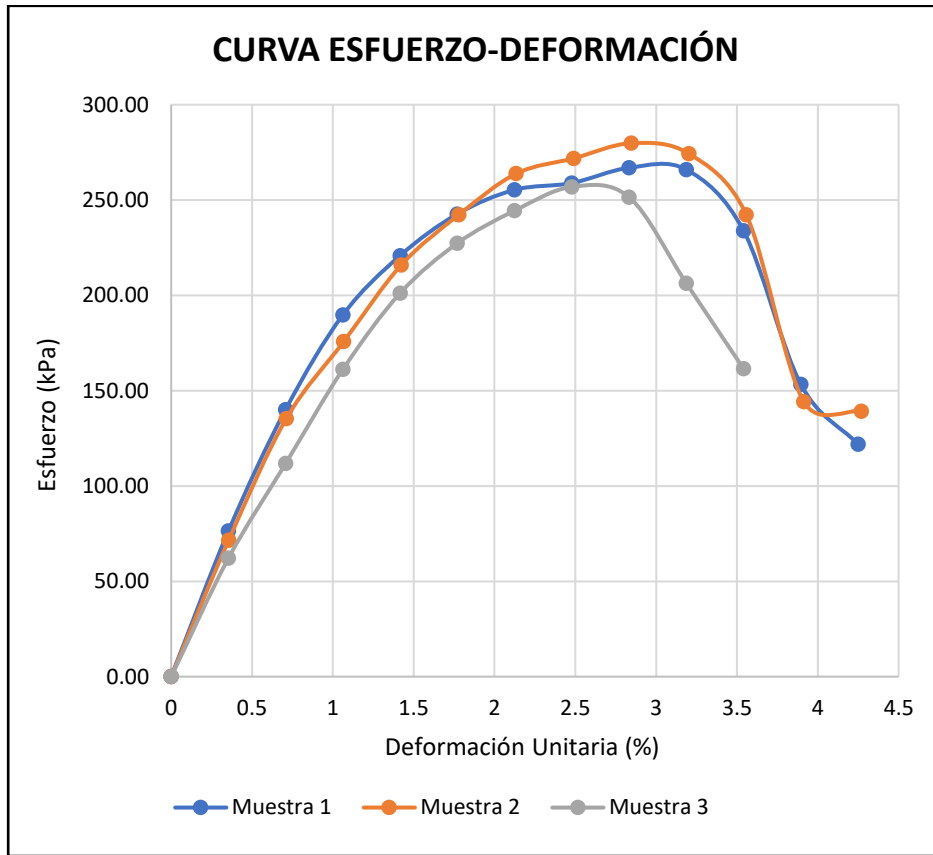
Adicionalmente, se realizaron una serie de pruebas en laboratorio para la obtención de parámetros geotécnicos del suelo en estudio. Primero, se ejecutó la prueba de Proctor modificado por medio del método A que indica la norma ASTM D1557, obteniéndose la curva de compactación mostrada en la Figura 70. A partir de la cual, se estimó que la densidad seca máxima del material corresponde a 1410 kg/m^3 con un contenido óptimo de humedad de 31.6% aproximadamente.

Figura 70. Curva de compactación obtenida para el suelo por medio de la prueba Proctor modificado.



Seguidamente, se utilizaron tres muestras de material para determinar la curva de esfuerzo-deformación (Figura 71) por medio de la prueba de compresión inconfiada, y con ello promediar el esfuerzo máximo y la cohesión del suelo, con resultados de 266.08 kPa y 133.04 kPa respectivamente. En el Apéndice 4, se muestran los resultados tabulados y parámetros empleados para la ejecución del ensayo.

Figura 71. Curva de esfuerzo-deformación obtenida para tres muestras de suelo mediante la prueba de compresión inconfiada.



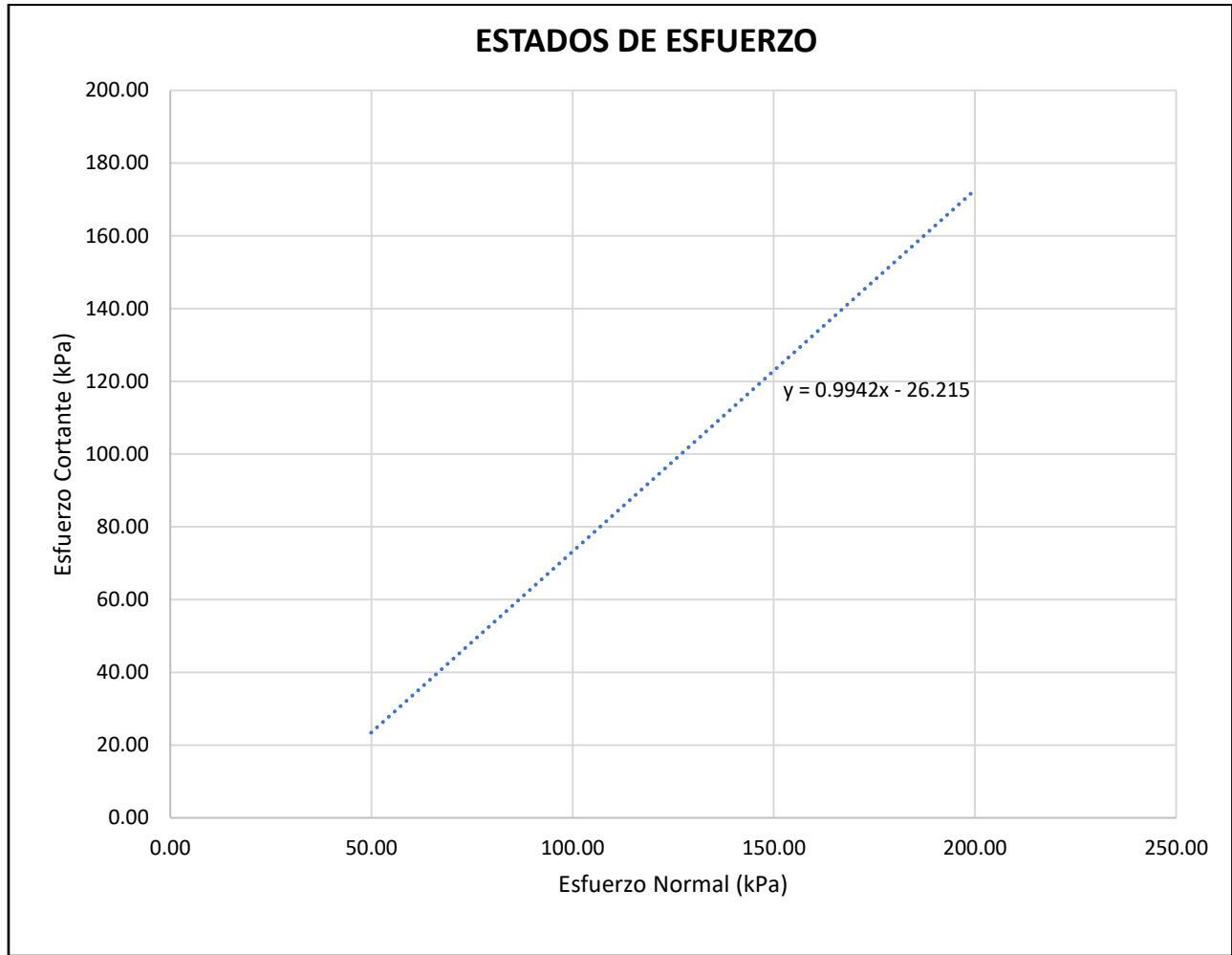
También se llevó a cabo la prueba de permeabilidad por medio del método de carga variable (Cuadro 16), a partir de la cual se promedió un valor final de 1.895×10^{-07} cm/s.

Cuadro 16. Resultados de la prueba de permeabilidad con carga variable									
L (cm)	D (cm)	A (cm ²)	d (cm) ²	a (cm) ²	h1 (cm)	h2 (cm)	Δh (cm)	Tiempo (s)	k (cm/s)
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	100	100	0	0	0
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	82	75	7	55560	6.568E-08
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	74	67	7	73440	5.534E-08
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	65	60	5	55380	5.911E-08
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	59.7	52	7.7	56520	9.991E-08
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	22.3	19.7	2.6	126600	4.004E-08
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	19.7	15.7	4	47400	1.958E-07
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	15.7	8.1	7.6	84240	3.213E-07
11.68	10.14	80.754	0.6	0.283	8.1	2	6.1	84240	6.790E-07

Nota: Donde k corresponde al coeficiente de permeabilidad.

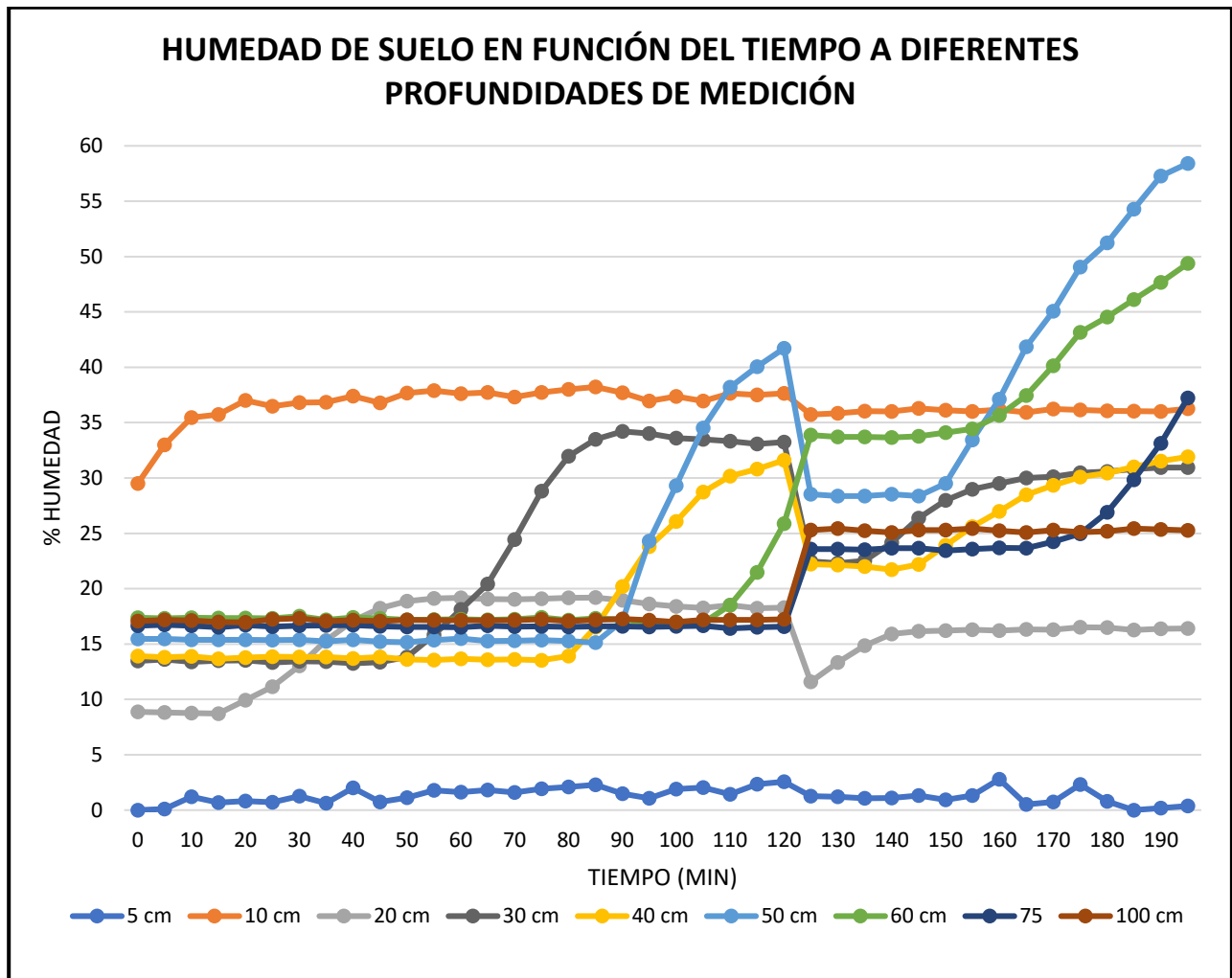
Con el fin de analizar la estabilidad de los taludes en condición drenada, se realizó el ensayo de corte directo basado en la norma ASTM D3080, considerando tres niveles de esfuerzo para obtener el valor del ángulo de fricción efectivo, asumiendo una cohesión efectiva de 0 kPa. El resultado obtenido fue de 44.83° según la gráfica de los estados de esfuerzo mostrada en la Figura 72.

Figura 72. Gráfica de estados de esfuerzo obtenida de la prueba de corte directo.



Seguidamente, se obtuvo la información de humedad, permitividad dieléctrica, conductividad eléctrica y temperatura del suelo por medio del sensor SoilVUE™10 a las diferentes profundidades. Las mediciones se tomaron durante dos horas consecutivas en dos días diferentes. Dichos resultados se pueden visualizar a modo de tabla en el Apéndice 3 adjunto al final del presente documento, además de las gráficas individuales para cada una de las profundidades consideradas en las mediciones de humedad. Para esta sección, se presenta una gráfica resumen (Figura 73) donde se muestran todas las curvas de humedad en función del tiempo para todas las profundidades de medición del perfilador.

Figura 73. Humedad en función del tiempo según las diferentes profundidades de medición del sensor SoilVUE™10.



Finalmente, a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio y los caudales calculados e implementados al modelo físico, se generaron modelos computacionales de ambos taludes donde se insertaron los tres caudales y se determinó el FS utilizando tres métodos de cálculo: Bishop, Janbú y Morgenstern-Price. Dichas figuras se encuentran en los Apéndices 5 y 6, a continuación, se muestra una tabla resumen con los factores de seguridad obtenidos para cada talud según la condición de estudio, el caudal y el método de cálculo empleado.

Cuadro 17. FS obtenidos mediante el software Slide 2.0 para los taludes en estudio				
Talud	Condición	Flujo de agua (m ³ /s)	Método	FS
Pendiente 60°	Drenada	1.6E-05	Bishop	0.4
			Janbú	0.4
			Morgenstern	0.5
		7.8E-05	Bishop	0.4
			Janbú	0.4
			Morgenstern	0.5
	1.2E-04	Bishop	0.4	
		Janbú	0.4	
		Morgenstern	0.5	
	No drenada	1.6E-05	Bishop	41.7
			Janbú	45.8
			Morgenstern	47.5
7.8E-05		Bishop	41.7	
		Janbú	45.8	
		Morgenstern	47.5	
1.2E-04	Bishop	41.7		
	Janbú	45.8		
	Morgenstern	47.5		
Pendiente 90°	Drenada	1.6E-05	Bishop	0.3
			Janbú	0.3
			Morgenstern	0.4
		7.8E-05	Bishop	0.3
			Janbú	0.3
			Morgenstern	0.4
	1.2E-04	Bishop	0.3	
		Janbú	0.3	
		Morgenstern	0.4	
	No drenada	1.6E-05	Bishop	25.5
			Janbú	31.0
			Morgenstern	31.0
7.8E-05		Bishop	25.5	
		Janbú	31.0	
		Morgenstern	31.0	
1.2E-04	Bishop	25.5		
	Janbú	31.0		
	Morgenstern	31.0		

3.2. Análisis

Seguidamente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos por medio de secciones según los objetivos del proyecto para un mejor entendimiento del lector. Se inicia con el perfilador, seguido de los ensayos de laboratorio, el modelo físico y, finalmente, los modelos computacionales.

3.2.1. SoilVUE™10

Considerando los cuatro parámetros del suelo que mide el perfilador SoilVUE™10, se identificó que el más influyente al momento de analizar la estabilidad de un talud corresponde a la humedad. Por tanto, se planteó la hipótesis inicial de que, cuanto mayor sea la cantidad de agua en el suelo, mayor será la probabilidad de generarse un deslizamiento superficial en el material y, por ende, una falla.

Además, comparando los resultados obtenidos con el sensor (Apéndice 3) y lo que indica la ficha técnica (Anexo 1), se evidencia que el SoilVUE™10 genera mediciones a lo largo de su estructura en las profundidades indicadas. Esto sucede gracias a las ondas sensoriales ubicadas a 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 75 y 100 cm a lo largo del sensor; las cuales se identifican por ser plateadas, en contraste con el resto del material del perfilador.

Adicionalmente, fue posible obtener mediciones del contenido volumétrico de agua en el rango establecido por el fabricante de 0 a 100%. Por lo tanto, se garantiza que el perfilador consiste en una herramienta confiable para identificar la humedad presente en el suelo utilizado.

3.2.2. Ensayos de laboratorio

Ahora bien, se procuró utilizar un suelo de grano fino y alta plasticidad, siguiendo la instrucción brindada por el ingeniero Osvaldo Cubero referente a la efectividad en la toma de mediciones por parte del sensor, es decir, cuanto más finas sean las partículas del suelo, más precisos serán los datos obtenidos con el SoilVUE™10 gracias al contacto directo y continuo de las partículas con las ondas sensoriales del perfilador. Para verificarlo, se realizó un análisis granulométrico por vía seca y húmeda del suelo sustraído del proyecto vial *Diseño y construcción del paso a desnivel en el cruce "La Galera", Rutas Nacionales Nos. 2 y 251*, del cual se obtuvo que aproximadamente el 6% representaba la presencia de gravas, 45% del material correspondía a suelos granulares o arenas y el restante 49% representaba la presencia de suelos finos como limos y arcillas (partículas de 0.074 mm o menos) (Cuadro 8).

Adicionalmente, se realizaron pruebas de laboratorio para identificar el grado de plasticidad del suelo; por un lado, el límite líquido representa el contenido de humedad en el cual el suelo cambia de un estado plástico a un estado líquido. Para el suelo en estudio, se obtuvo un límite líquido de 55%, valor clasificado como alto e indicando que el suelo es altamente plástico con gran capacidad de retener agua, por ende, el suelo es susceptible a sufrir cambios de volumen significativos por la variación de su humedad.

Por otro lado, el límite plástico corresponde al contenido de humedad en el cual el suelo comienza a comportarse plásticamente y puede mantener una forma determinada. Un límite plástico alto implica que el suelo es más plástico y, por ende, más moldeable. Tal es el caso del suelo utilizado para el proyecto, ya que se obtuvo un valor de 39%.

Siguiendo esta línea, se calculó el índice de plasticidad, que corresponde a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y proporciona una medida de la variabilidad de la humedad en la que el suelo exhibirá comportamiento plástico. Cuanto mayor sea el IP, mayor será la variabilidad en la humedad en la que el suelo será plástico. En este caso, el IP alcanzó un valor de 16%, clasificándolo en el rango de alta plasticidad para el suelo utilizado.

Dichas pruebas se resumen gráficamente en la carta de plasticidad presentada en la Figura 68. La carta de plasticidad o diagrama de plasticidad corresponde a una herramienta gráfica utilizada en la ingeniería geotécnica para representar las propiedades plásticas de los suelos. Para este caso, el suelo se clasifica como MH, es decir, el suelo contiene características de limos de alta plasticidad. "M" significa que el suelo es limoso y la "H" indica que el suelo tiene una alta plasticidad.

Además, se presenta la tabla de clasificación SUCS a partir de la cual se tiene que el material utilizado corresponde a una arena limosa altamente plástica. La explicación se basa en que solo el 49% del material pasó el tamiz nro. 200, a su vez, más del 50% del material pasó el tamiz nro. 4 y más del 12% pasó el tamiz nro. 200. A partir de esta información, se utiliza la carta de plasticidad para identificar la presencia de limos altamente plásticos en el material arenoso.

Dicho esto, se intuye que los resultados obtenidos con el SoilVUE™10 no se vieron altamente afectados por el tipo de suelo utilizado, aun así, cabe la posibilidad de que parte del material correspondiente al 6% de partículas gruesas haya generado espacios vacíos entre las ondas sensoriales del perfilador y el material, resultando en valores aproximados a 0 para las diferentes mediciones de los parámetros.

Adicionalmente, se realizaron pruebas para la obtención de parámetros geotécnicos que serían de utilidad al momento de confeccionar los modelos físicos y computacionales. Por un lado, la prueba de Proctor modificado se llevó a cabo con la finalidad de construir un modelo físico que alcanzara la mayor densidad posible; así, al ocurrir la falla, se podía asumir que fue únicamente por la acción del agua. No obstante, cabe destacar que, en el talud de corte vertical, intervino otro factor que propició su falla y fue la falta de confinamiento lateral en el sector central del modelo físico donde se conectaban ambas pendientes.

Se determinó la cantidad óptima de agua en el suelo para obtener la mejor compactación y con ello la densidad máxima del material seco; se optó por el método A del Proctor modificado debido a que la totalidad del material pasó el tamiz de 9.54 mm y menos del 10% quedó retenido en el nro. 4. Dicho contenido de humedad fue de aproximadamente 31.6%, lo cual implica que, con esta cantidad de agua en el suelo, se obtiene la mayor densidad con un valor de 1410 kg/m³ al momento de la compactación.

También se llevó a cabo el ensayo de compresión inconfina en tres muestras de material con el fin de obtener las curvas esfuerzo-deformación mostradas en la Figura 72, obteniendo un valor promedio de

esfuerzo máximo de 266.08 kPa, a partir del cual es posible estimar el valor de la cohesión o resistencia no drenada al corte como la mitad del esfuerzo máximo, es decir, 133.04 kPa.

Además, al observar el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación, se identificó que el material posee un comportamiento plástico en un rango limitado y, al calcular las pendientes o módulos de elasticidad, se obtuvo un valor aproximado de 181.80 Pa, el cual implica que el material es capaz de soportar grandes esfuerzos sin sufrir deformaciones significativas.

Con respecto al coeficiente de permeabilidad, cabe resaltar que los suelos granulares poseen coeficientes mayores que los suelos arcillosos o limosos. En este caso, se tenía una mezcla de arena y limos con un k de 1.895×10^{-7} cm/s obtenido por medio del método de carga variable, implicando una permeabilidad lenta acorde con la Figura 74.

Figura 74. Coeficientes de permeabilidad según el tipo de suelo.



Fuente: Torrijo, 2013.

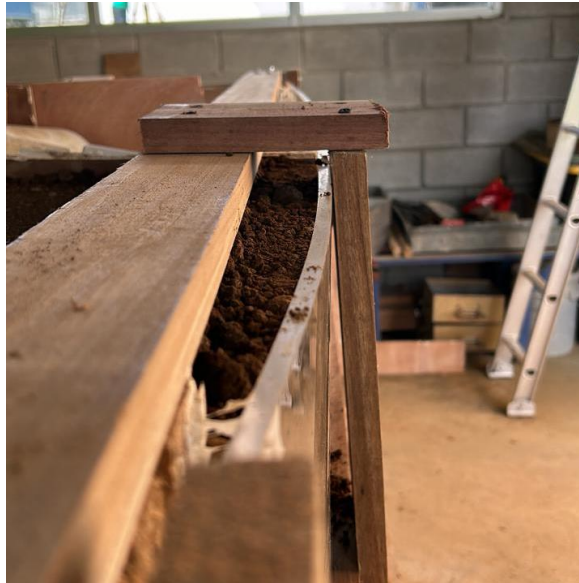
Por lo general, en el ensayo de corte directo se utilizan tres cargas normales distintas sobre tres muestras distintas del mismo material para producir tres fuerzas tangenciales que lleven a la falla. De esta manera, es posible dibujar una envolvente de falla con una ecuación de la forma $\tau = c + \sigma \tan \phi$, como se muestra en la Figura 70, con la cual se determina la cohesión efectiva (C') intersecando la recta con el eje de ordenadas y el ángulo de fricción efectivo (ϕ') por medio de la pendiente, se obtiene un valor aproximado de 0 kPa para C' y un ϕ' de 44.83° .

3.2.3. Modelo físico

En lo que respecta al modelo físico, se construyó un escenario estratégico para identificar el efecto del agua en el suelo al momento de producirse un deslizamiento evitando la intervención de otros parámetros externos como las cargas sobre el terreno y la vegetación. Además, donde las condiciones del suelo simularan dos taludes estables a partir de la máxima reducción de los espacios vacíos dentro del material, ya que estos producen afectaciones en las mediciones del perfilador y permiten el tránsito del agua con mayor facilidad generando planos de falla indeseados para el proyecto. Por lo tanto, para reducir dichos vacíos y aumentar la densidad del terreno, se compactó el material previamente humedecido por capas de 15 cm para facilitar el proceso y asegurarse de que el suelo presente alrededor del SoilVUE™10 quedara adherido a las diferentes ondas sensoriales que permitirían la toma de datos de los parámetros correspondientes.

Al visualizar los resultados obtenidos con el densímetro nuclear tabulados en el Cuadro 11, es notable que se obtuvieron valores de densidad cercanos a la densidad máxima seca obtenida en la prueba de Proctor modificado con un valor de 1410 kg/m^3 . Cabe destacar que, conforme se fue subiendo en la geometría de los taludes, la densidad fue disminuyendo en las capas, debido a que el modelo presentó algunas deficiencias que podían implicar la destrucción de la estructura. Un claro ejemplo de ello fue el pandeo del acrílico en la parte frontal del modelo, ya que, al compactar el material, este buscaba expandirse lateralmente y al verse limitado por la lámina, esta se fue deformando conforme se aumentaba la cantidad de material (Figura 75). Por esta razón, la capa superior alcanzó apenas el 74.9% de la compactación obtenida en el Proctor modificado, mientras que la primera se aproximó al 100% con un valor de 1407 kg/cm^3 .

Figura 75. Deformación de la lámina de acrílico como consecuencia del proceso de compactación del material en el modelo.



Adicionalmente, se aplicó la prueba de resistencia al corte utilizando la veleta una vez que los taludes estuvieron formados, con la finalidad de complementar los ensayos en laboratorio para la caracterización del suelo. Para ello, se empleó la veleta de 19 mm y se tomaron 10 mediciones en los alrededores del sensor:

cinco a 4 cm de profundidad y las restantes a 10 cm de profundidad. Los resultados obtenidos fueron, en su mayoría, de más de 50 kPa, indicando que el suelo es cohesivo y tiene una resistencia inherente al corte.

Aun así, los esfuerzos obtenidos en dicha prueba difirieron considerablemente con respecto a los resultados de las pruebas de compresión inconfiada, provocando que se descartaran del análisis para efectos del proyecto. Dicha diferencia se justifica por las condiciones en que se realizó cada una de las pruebas. Por su parte, la prueba de compresión inconfiada se llevó a cabo dentro del laboratorio, es decir, en un ambiente controlado con muestras remoldeadas y compactadas al 100%; por ende, se podría decir que contaban con mayor densidad y, a su vez, mayor resistencia en comparación con el suelo contenido dentro del modelo donde se aplicó la prueba de la veleta. Además, cabe destacar que las profundidades de la veleta no pasaron de la capa superior, la cual tenía apenas un 74.9% de la densidad obtenida mediante la prueba de Proctor modificado. Adicionalmente, en la Figura 69 se puede observar la presencia de partículas gruesas en los alrededores de las zonas donde se insertó la veleta, provocando posibles alteraciones en las mediciones de este equipo.

Aunado a esto, las condiciones de humedad del suelo fueron diferentes para ambas pruebas; ya que las humedades de las muestras en laboratorio rondaron el 35%, mientras que, para el suelo, en el modelo fue inferior al 30% según los datos obtenidos con el perfilador al minuto cero.

El ensayo de corte por veleta es más adecuado para mediciones rápidas y en suelos blandos en sitio, mientras que el ensayo de compresión inconfiada proporciona datos precisos de laboratorio que pueden ser necesarios para el análisis detallado de suelos cohesivos. Por lo tanto, se decidió utilizar la información obtenida en laboratorio para la simulación de los modelos computacionales, ya que se consideró que con ella era posible asumir que los resultados obtenidos serían dependientes únicamente del factor agua en términos de parámetros mecánicos del suelo.

Para el sistema de riego implementado en el modelo, se simularon distintas intensidades de lluvia que caerían sobre el terreno, de manera que se estimaron tres caudales diferentes: uno bajo de 0.016 L/s, uno intermedio de 0.078 L/s y uno alto de 0.122 L/s. Cabe destacar que la intensidad con la que cayó el agua constituyó un factor determinante al momento de apreciar si se daban deslizamientos/flujo o desprendimientos del material; ya que los primeros ocurrieron con el caudal medio en el talud de pendiente 60°, mientras que los segundos fueron más comunes con el caudal mayor en el talud de pendiente 90°.

Por un lado, la UCR (2019) define los deslizamientos como movimientos que se producen cuando el material, unido, se mueve a lo largo de una superficie de falla. Mientras que los flujos son producidos cuando el material se desplaza pendiente abajo en forma de fluido viscoso. Para este último caso, por lo general, el suelo se encuentra saturado con agua y de ahí su diferencia con los deslizamientos. A continuación, se ejemplifica un movimiento tipo flujo observado en el talud de pendiente 60°.

Figura 76. *Movimiento tipo flujo observado en el talud con pendiente de 60°.*



Se resalta que este tipo de movimiento no se percibió de forma considerable hasta el segundo día de toma de mediciones, es decir, cuando el suelo se encontraba saturado casi en su totalidad; esto se puede apreciar en la Figura 76 gracias al color oscuro del material en el talud de pendiente 60°. Además, los flujos apreciables a simple vista se dieron, principalmente, en la zona intermedia entre ambos taludes donde ya existía una fisura consecuencia del sistema de contención del modelo.

Por otro lado, se entiende por desprendimiento: “la caída libre de fragmentos sueltos de cualquier tamaño y es común en pendientes muy empinadas donde el material del suelo no puede mantenerse adherido a la superficie” (UCR, 2019). En las Figuras 77 y 78, se aprecia el primer y mayor desprendimiento observado en el talud de pendiente 90° respectivamente, donde también influyó la falta de confinamiento lateral mencionada antes en el presente análisis.

Figura 77. *Primer desprendimiento de material observado en el talud de pendiente 90°.*



Figura 78. Mayor desprendimiento observado en el talud de pendiente 90°.



Al comparar las Figuras 77 y 78, se aprecia que, en la primera, donde se presentó un desprendimiento menor, la saturación del suelo apenas iniciaba en la capa superior del suelo, esto se identifica por el color del material superior en contraste con el inferior en el talud con 90° de pendiente. En cambio, al mirar la Figura 78, el desprendimiento fue masivo y la saturación de las capas se notaba a simple vista gracias al color marrón oscuro del suelo.

A partir de los movimientos descritos en ambos taludes, se confirmó que la hipótesis planteada inicialmente es verdadera, ya que, a mayor cantidad de humedad en el suelo, mayor fue la probabilidad de la ocurrencia de una falla debido a la disminución de esfuerzos efectivos. Indistintamente de la geometría del terreno estudiada, se cumplió que, al aplicar únicamente el factor externo del agua, se observaron distintos movimientos en el suelo que implicaron la disminución de la pendiente o el colapso de grandes masas de material.

Ahora bien, para las mediciones de humedad en el terreno, se empleó únicamente el perfilador SoilVUE™10, por lo que se registraron datos en nueve profundidades distintas. No obstante, se descartaron las mediciones a los 5 cm de profundidad, debido a que, al no utilizar el método de instalación propuesto por la empresa y optar por el entierro del sensor, las ondas sensoriales a dicha profundidad quedaron expuestas, generando mediciones incorrectas y, por ende, estas difieren significativamente con respecto a los valores obtenidos para las demás profundidades. A continuación, en la Figura 79 se muestra el error cometido al momento de instalar el SoilVUE™10.

Figura 79. Ondas sensoriales expuestas para las mediciones a los 5 cm de profundidad.



A modo general, se esperaba que el comportamiento de la humedad en el modelo fuera de tipo descendente según las capas, es decir, conforme se aumentara la profundidad de medición, se tendrían humedades más bajas. Esto debido a que el agua ingresaría en el suelo únicamente por la parte superior, siendo la capa más inferior, la última en humedecerse gracias al efecto de la gravedad.

Dicha hipótesis puede apreciarse claramente en la Figura 73, donde se tienen graficadas las curvas de porcentaje de humedad en función del tiempo para cada una de las profundidades de medición del SoilVUE™10. Se aprecia como la curva de los 10 cm (curva naranja) oscila en un rango de humedad que va desde 29% hasta 35% aproximadamente; mientras que la curva de los 100 cm (curva marrón) inicia con 17% de humedad y alcanza un máximo de 25%.

Aun así, se observó que la curva con mayor crecimiento resultó ser la de profundidad intermedia (50 cm), ilustrada en celeste, la cual inició con un 15% y terminó con casi 60% de humedad. El mismo comportamiento exponencial se identificó para las mediciones de la profundidad de 60 cm, en la cual se tiene una humedad máxima de aproximadamente 50%.

En contraparte, los datos obtenidos para las demás profundidades mantuvieron un comportamiento ascendente, mas no exponencial, si no constante a través del tiempo. Tal es el caso de las curvas de 75 y 100 cm, las cuales se mantuvieron aproximadamente con el valor de la medición inicial hasta el minuto 120, donde tuvieron un aumento considerable. Dicho aumento repentino, a diferencia de las demás curvas que por el contrario disminuyeron, se debe a que el modelo no contaba con una salida inferior para el agua, de manera que esta quedó retenida y su escape culminó en la absorción por parte de las capas inferiores.

Cabe destacar que todas las curvas generadas tuvieron un punto de inflexión entre los minutos 120 y 125, unas más marcados que otras, debido a que las mediciones se tomaron en días diferentes, es decir, no fueron continuas al no poder dejar el agua corriendo sin supervisión dentro de las instalaciones universitarias. El segundo día se intentó reanudar las mediciones en el mismo punto que quedaron el día anterior, no obstante, queda evidenciado en la Figura 73 que no fue así; razón por la cual las mediciones

presentan una caída repentina en el porcentaje de humedad entre los minutos 120 y 125. A pesar de ello, es evidente que, de forma independiente, todos los datos de las diferentes profundidades mantuvieron un comportamiento creciente a lo largo del periodo de tiempo en que se tomaron las mediciones.

3.2.4. Modelos computacionales

En aras de confirmar lo sucedido en el modelo físico, realizar el análisis de estabilidad de los taludes en estudio y obtener los factores de seguridad (FS) correspondientes, se generaron distintos modelos computacionales a partir de los resultados obtenidos por medio de los ensayos de laboratorio. Para ello se empleó el *software* Slide 2.0, ya que permite considerar desde el tipo de suelo utilizado hasta el flujo de agua que se introdujo al material durante la toma de mediciones.

Se crearon 12 modelos en total, seis para cada geometría de talud considerando la condición de flujo (drenada o no drenada) y los diferentes caudales mostrados en los Cuadros 12, 13 y 14. A modo general, se puede observar que los factores de seguridad obtenidos no difieren entre sí según sea el caudal que se analiza; mientras que es evidente que ambos taludes son mucho más propensos a fallar en condición drenada que la no drenada según los factores de seguridad calculados por el programa (Cuadro 17).

Ahora bien, dados los resultados obtenidos por los modelos computacionales y el comportamiento observado de los taludes en el modelo físico, se planteó la hipótesis de que los taludes asemejaban más la condición drenada que la no drenada. Esto se puede justificar gracias a que las fallas observadas en el modelo físico coincidieron con las mostradas en el modelo computacional. Aunado a esto, los factores de seguridad obtenidos para ambos taludes, independientemente del caudal y método de cálculo utilizado, los valores menores a uno o propensos a fallar fueron los obtenidos para la condición drenada; mientras que los resultados para la condición no drenada alcanzan valores superiores a 25.5 y 41.7 en el talud de pendiente de 90° y de 60°, respectivamente. Por esta razón, cuando se diseñan excavaciones se suelen modelar en condición drenada, ya que esta representa la condición más crítica.

Para el caso del talud de pendiente 60°, se obtuvieron FS aproximados a 0.4 para los métodos de Bishop simplificado y Janbú simplificado y un valor de 0.5 con el método de Morgenstern-Price, en condición drenada, implicando una falla inminente en la parte superior-intermedia del talud considerando únicamente la acción del agua. Por el contrario, para la condición no drenada, presentó los FS más altos y la superficie de falla más extensa; por tanto, se podría decir que, dadas estas condiciones, el talud no fallará durante el tiempo en que se realizaron las mediciones, el cual fue muy limitado.

Al comparar lo ocurrido en el modelo físico con lo dictado por los modelos de Slide 2.0, se confirma que la falla ocurrida en dicho talud fue notoria en la parte intermedia cuando se aplicó el caudal más fuerte, como se muestra en la Figura 76. Igualmente, se debe considerar que los deslizamientos en este talud fueron más frecuentes en la zona media donde se generó el cambio de las pendientes. Estas fallas fueron el resultado de la alteración sobre el material, al retirar las láminas que mantuvieron ambas geometrías durante el proceso de compactación y preparación del modelo, además de la acción del agua.

En el caso del talud de pendiente 90°, el escenario más crítico fue en la condición drenada con un factor de seguridad de aproximadamente 0.3. Gracias a esto, las fallas fueron más notorias que en el talud de pendiente de 60°, pues al momento de implementar el caudal fuerte, aunado a la falta de confinamiento lateral en la zona, primeramente, se observaron grietas en la parte superior del talud evidenciando que se sobrepasó la resistencia en tracción del material e implicando el desprendimiento de bloques de suelo. Esta falla se observa en la Figura 78, donde gran parte del material se desprendió del suelo consolidado a modo de bloque y en cuestión de segundos.

Finalmente, con los modelos computacionales generados, también fue posible estimar el contenido volumétrico de agua en el suelo para realizar una comparación con los resultados obtenidos con el SoilVUE™10. Como se indicó anteriormente, el comportamiento general de las mediciones tomadas fue ascendente en cada una de las profundidades, sin embargo, al juntarlas todas se obtiene que las humedades mayores estuvieron en la zona intermedia de los taludes con valores de hasta 0.584 m³/m³ o 58.4%; mientras que, según los modelos de Slide 2.0, el contenido de humedad fue mayor en las capas inferiores, alcanzando valores máximos de 0.405 m³/m³ o 40.5% aproximadamente.

Esta diferencia en el comportamiento de la humedad a lo largo de la profundidad de los taludes pudo deberse al hecho de que, en el modelo físico, las humedades iniciales son diferentes para cada una de las profundidades debido a la preparación del material para el proceso de compactación. Caso contrario ocurre en el modelo computacional, donde no se consideran humedades iniciales diferentes de cero, de manera que, al ingresar el agua únicamente por la parte superior, esta se filtra gradualmente de arriba hacia abajo por efecto de la gravedad. Aunado a esto, para la modelación computacional no se contempló la totalidad de mediciones para efectos del flujo de agua por cuestiones de tiempo.

Conclusiones y recomendaciones

Finalmente, se listan las conclusiones a las cuales se llegó tomando como referencia los objetivos planteados para el proyecto y el análisis de los resultados mostrado en el Capítulo 3; además de algunas recomendaciones para ampliar o mejorar la información obtenida para la temática abordada.

Conclusiones

- El perfilador SoilVUE™10 representa una herramienta de gran utilidad para la obtención de datos de contenido volumétrico de agua de forma sencilla *in situ* y precisa en suelos limosos o arenas limosas altamente plásticas.
- Actualmente, el SoilVUE™10 se encuentra en el mercado en dos presentaciones: 50 cm o 1 m de longitud; por lo que resulta complicado que este pueda ser implementado en el monitoreo del suelo en proyectos geotécnicos de grandes magnitudes.
- Según la información obtenida del proyecto, el uso en solitario del perfilador no resulta suficiente para la detección anticipada de un deslizamiento superficial en suelos limosos. Se requieren otros equipos que acompañen al SoilVUE™10 como inclinómetros, extensómetros, radares de penetración en el suelo (GPR) o sensores de movimiento para detectar los posibles desplazamientos de material.
- Se obtuvieron mediciones de humedad en el modelo físico que correspondían al comportamiento esperado, es decir, conforme se fue agregando agua al material, el sensor registró datos cada vez mayores según las condiciones temporales para las cuales se programó. Además, se identificó que dichas mediciones fueron mayores en las capas superiores e intermedias, debido a que el agua se suministró únicamente por la parte superior del modelo físico.
- Durante el proceso de compactación, se utilizó el densímetro nuclear para tomar mediciones de densidad en las diferentes capas y así controlar que su valor fuera igual o cercano a los 1410 kg/cm³ obtenidos en la prueba de Proctor modificado, con una humedad óptima del 31.6%.
- La curva granulométrica obtenida del ensayo de granulometría mostró que el suelo utilizado era en su mayoría de tipo granular-fino con un 96% de material que pasó por el tamiz nro. 4. Además de presentar un 49% de partículas de 0.074 mm o menos.

- Se utilizó la carta de plasticidad para graficar los límites líquido y plástico y así, determinar que el suelo correspondía a un limo plástico (MH) y una arena con limos altamente plásticos (SM) según la clasificación SUCS.
- A partir de la prueba de compresión inconfiada, se obtuvo que el máximo esfuerzo soportado por el suelo es de 266.08 kPa; dato que permitió el cálculo de la resistencia no drenada al corte como 133.04 kPa para su posterior uso en los modelos computacionales.
- La permeabilidad obtenida en laboratorio empleando el método de carga variable correspondió a 1.895×10^{-07} cm/s, lo cual implicó que los vacíos existentes en el material no permitieron la filtración excesiva de agua, disminuyendo la posibilidad de falla de los taludes.
- Durante la prueba de corte directo, se midieron valores residuales y pico, estos últimos permitieron la construcción de envolvente de falla para el cálculo de un ángulo de fricción efectivo de aproximadamente 45° , el cual se utilizó después en el programa Slide 2.0 para calcular el FS en condiciones drenadas para ambos taludes.
- Se crearon diferentes modelos computacionales utilizando el programa Slide 2.0 para ambas geometrías de talud construidas en el modelo físico a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, los caudales implementados en el suelo y su condición (drenada o no drenada).
- Se confirmaron las fallas ocurridas en el modelo físico por medio factores de seguridad obtenidos a partir de los modelos computacionales con valores menores a 1 para la condición drenada y valores que superaron la unidad con rangos que van desde 25 hasta 47.5 para la condición no drenada.
- Las humedades obtenidas a partir del modelo computacional no consideraron la condición inicial de humedades en el modelo físico, por lo tanto, el comportamiento general de este parámetro difiere con respecto a las mediciones obtenidas con el SoilVUETM10.
- No fue posible establecer correlaciones entre los datos obtenidos en laboratorio con los que brindó el perfilador. No obstante, al utilizar los parámetros de los ensayos y las condiciones de agua en la creación de los modelos computacionales, se logró comparar el comportamiento del agua esperado con las mediciones obtenidas a partir del perfilador en el modelo físico.

Recomendaciones

Se recomienda a los estudiantes de Ingeniería en Construcción:

- Realizar investigaciones o proyectos de graduación adicionales que permitan estudiar a profundidad cuál es el efecto de la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica y la temperatura sobre un suelo propenso a deslizamientos, ya que estos parámetros también pueden obtenerse con el SoilVUETM10.
- Desarrollar investigaciones o proyectos de graduación adicionales que permitan analizar el comportamiento de las mediciones en otros tipos de suelos, por ejemplo, menos plásticos o más granulares; otras condiciones de flujo; así como con diferentes dimensiones y pendientes en los taludes.

- En futuros proyectos de graduación donde se requieran modelos físicos de taludes, considerar una geometría por modelo con los confinamientos necesarios para limitar el estudio según los parámetros de estudio establecidos en los objetivos del trabajo.
- En futuros proyectos de graduación que requieran la elaboración de modelos físicos o transporte de suelos a la institución, considerar las condiciones climáticas para la preparación del material y así evitar atrasos no deseados.
- En futuros proyectos de graduación que requieran llevar algún control, se recomienda utilizar equipos destinados a tal fin. Por ejemplo, para el presente proyecto el control sobre el flujo de agua que se implementó en el modelo debió realizarse con un manómetro.

A su vez, se recomienda a los diferentes usuarios del perfilador SoilVUE™10:

- Utilizar el método establecido por la empresa Campbell Scientific para la instalación del perfilador SoilVUE™10, evitando así la obtención de mediciones falsas en alguna de las profundidades.
- Tomar mediciones continuas durante un tiempo prolongado para aumentar cantidad de información y asemejar el comportamiento del suelo real durante largos períodos de exposición al agua.
- Utilizar más de un perfilador SoilVUE™10 al momento de tomar las mediciones para generar un perfil amplio del material en estudio.

Finalmente, se recomienda a la empresa Campbell Scientific en Costa Rica:

- Generar información adicional acerca del perfilador SoilVUE™10 en idioma español para un mejor entendimiento por parte del usuario.
- Realizar estudios con el perfilador empleando equipos adicionales como inclinómetros, extensómetros, radares de penetración en el suelo (GPR) o sensores de movimiento que permitan detectar posibles desplazamientos de suelo para evaluar con mayor precisión la efectividad del SoilVUE™10 dentro del campo de la geotecnia.

Referencias

- Aguilar, O., & Zúñiga, C. (2015). *Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al cerro de la popa, casco urbano de cartagena*. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/2089/TRABAJO-DE-GRADO-FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- American Society for Testing Materials. (2011). *D3080/D3080M standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. 10.1520/D3080_D3080M-11 <http://www.astm.org/Standards/D3080/D3080M>
- American Society for Testing Materials. (2016). *D2166 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?gid=TRZJGFAAAAAAAAAA&input_doc_number=ASTM D2166/D2166M
- American Society for Testing Materials. (2017). *D1140 standard test methods for determining the amount of material finer than 75- μ m (no. 200) sieve in soils by washing*. 10.1520/D1140-17 <http://www.astm.org/Standards/D1140>
- American Society for Testing Materials. (2018a). *D2573/D2573M standard test method for field vane shear test in saturated fine-grained soils*. 10.1520/D2573_D2573M-18 <http://www.astm.org/Standards/D2573/D2573M>
- American Society for Testing Materials. (2018b). *D4318 standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. 10.1520/D4318-17E01 <http://www.astm.org/Standards/D4318>

- American Society for Testing Materials. (2019). *D2216 standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. 10.1520/D2216-19 <http://www.astm.org/Standards/D2216>
- American Society for Testing Materials. (2021). *D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))¹*. 10.1520/D1557-12R21. <http://www.astm.org/Standards/D1557>
- AR Racking. (s.f.). *Tipos de tarimas y sus características*. <https://www.ar-racking.com/mx/blog/tipos-de-tarimas-y-caracteristicas/>
- Arcila, A., Guerra, D., & Bergaño, C. (2019). *Diseño de taludes, muros y estructura de pavimentos urbanización municipio de Fredonia*. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/56192cc0-0f33-4b35-9c38-396f5f2a6f86/content>
- Budhu, M. (2010). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed.). Wiley.
- SoilVUE10. Campbell Scientific (Director). (2019). [Video/DVD] <https://www.campbellsci.es/videos/soilvue10-overview>
- Installing the SoilVUE™ 10*. Campbell Scientific (Director). (2020). [Video/DVD] <https://www.campbellsci.es/videos/soilvue10>
- Campbell Scientific. (2020). *SoilVUE10: TDR Soil Moisture Profile Sensor*. <https://www.campbellsci.es/soilvue10>
- Campbell Scientific. (2022). *SoilVUE10: Complete soil profiler*. <https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/soilvue10%20-%201298.pdf>
- Catanzariti, F. (2016). *Estabilidad de Taludes*. <https://www.geostru.eu/es/blog/2016/06/13/estabilidad-de-taludes/>
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. (2022). *Más de 125 áreas susceptibles a deslizamientos son monitoreadas por la CNE*. CNE. <https://www.cne.go.cr/noticias/2022/Mas%20de%20125%20areas%20susceptibles%20a%20deslizamientos%20son%20monitoreadas%20por%20la%20CNE.aspx>
- El ensayo de corte directo - Curso Virtual Geotecnia*. GeoJuanP (director). (2020). [Video/YouTube] <https://www.youtube.com/watch?v=DK0bpyNCvKM>

- García, C. (2020). *Análisis de estabilidad de taludes en suelos*. <https://www.uteycv.esiaz.ipn.mx/comunidad/geotecnia/apuntes/BARRO%209,%20EST.%20TAL%20UDES%20SUELOS,%2009.05.21.pdf>
- Nieberding, F., Huisman, J. A., Huebner, C., Schilling, B., Weuthen, A., & Bogena, H. R. (2023). Evaluation of Three Soil Moisture Profile Sensors Using Laboratory and Field Experiments. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(14), 6581. 10.3390/s23146581
- Organización de las Naciones Unidas, (. (s.f.a). *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Organización de las Naciones Unidas, (. (s.f.b). *Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- Schmalbach, R. (2019). *Solución ingenieril para la estabilidad de suelo*. <https://iecaiberoamerica.org/solucion-ingenieril-para-la-estabilidad-de-suelo/>
- Seguridad Minera. (2018). *Fallas que afectan la estabilidad de taludes*. <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/fallas-que-afectan-la-estabilidad-de-taludes/>
- Torrijo, J. (2013). *Permeabilidad de los suelos: concepto y determinación («in situ» y en laboratorio)*. <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia*. GOV.CO. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>
- Wilson, T. B., Kochendorfer, J., Diamond, H. J., Meyers, T. P., Hall, M., French, B., Myles, L., & Saylor, R. D. (2022). A field evaluation of the SoilVUE10 soil moisture sensor. *Vadose Zone Journal*, 22(2)10.1002/vzj2.20241
- Wilson, T. B., Kochendorfer, J., Diamond, H. J., Meyers, T. P., Hall, M., French, B., Myles, L., & Saylor, R. D. (2023). A field evaluation of the SoilVUE10 soil moisture sensor. *Vadose Zone Journal*, 22(2), n/a. 10.1002/vzj2.20241

Apéndices

1. Manual de uso del SoilVUE™10

SoilVUE™10 – Perfilador completo de suelos

Manual de uso



Sobre este manual...

Este manual fue escrito con fines académicos como parte del proyecto final de graduación “Viabilidad del sensor SoilVUE™10 de la empresa Campbell Scientific para el eventual desarrollo de sistemas de alerta temprana para deslizamientos superficiales en suelos plásticos” para optar por el título de Ingeniería en Construcción en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La información presentada puede utilizarse como referencia, sin embargo, para dudas específicas sobre el uso del sensor se recomienda consultar el manual oficial de la empresa Campbell Scientific.

Algunos factores de conversión relevantes son:

Área

$$1 \text{ in}^2 = 645 \text{ mm}^2$$

Longitud

$$1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ ft} = 304.8 \text{ mm}$$

$$1 \text{ yard} = 0.914 \text{ m}$$

$$1 \text{ mile} = 1.609 \text{ km}$$

Presión

$$1 \text{ psi} = 68.95 \text{ mb}$$

Masa

$$1 \text{ oz} = 28.35 \text{ g}$$

$$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ kg}$$

Volumen

$$1 \text{ galón} = 3.785 \text{ L}$$

Tabla de contenido

Introducción	4
Precauciones	5
Inspección inicial	5
Descripción general.....	6
Especificaciones	7
Instalación.....	8
Cableado	8
Programación de CRBasic	9
PC400	10
Instalación en campo.....	17
Operación.....	21
Mediciones SDI-12.....	21
Mediciones a velocidades de exploración rápidas	23
Teoría de medición.....	23
Mantenimiento y solución de problemas	25
Referencias.....	26

Introducción

El SoilVUE™10 consiste en una sonda de perfil de suelo basada en un reflectómetro de dominio temporal que mide el contenido volumétrico de agua, permitividad, conductividad eléctrica y temperatura a diferentes profundidades. Fue diseñado para investigadores y monitoreos ambientales; por lo que es ideal para operaciones de larga duración en la intemperie que requieren mediciones altamente precisas.

Se encuentra en dos tamaños: 50 cm o 100 cm. Utiliza guías de ondas o varillas de medición, las cuales están incrustadas en roscas y centradas en las diferentes profundidades de medición según las dimensiones del sensor seleccionado. Además, su diseño permite atornillar el sensor en un agujero de 5 cm de diámetro previamente creado; de manera que su simple instalación ayuda a reducir costos y se mantienen las propiedades del suelo para la toma de mediciones.

NOTA:

Considerando que para la escritura del presente manual se utilizó el documento oficial de la empresa Campbell Scientific además de la experiencia propia, la información proporcionada aplica únicamente para registradores de datos CRBasic. Para soporte adicional, se recomienda contactar a la empresa Campbell Scientific.

Precauciones

- Aunque el sensor es robusto, debe ser manipulado como un instrumento de precisión.
- La profundidad del hoyo donde se instalará el SoilVUE™10 debe tener su misma longitud, es decir, 50 cm o 100 cm según sea el caso. Se puede marcar la herramienta de instalación para garantizar la profundidad deseada. Es posible que las mediciones se vean afectadas por los espacios libres entre suelo y el sensor.
- Se debe utilizar agua para humedecer las paredes del hoyo y así reducir la fuerza necesaria para instalar el sensor.
- El sensor es robusto, pero puede romperse si se aplica una fuerza excesiva durante su instalación.
- Se recomienda verificar que los lados del hoyo son uniformes y no se estrechen con la remoción repetida de tierra.
- Para prevenir daños a los pines del conector, se recomienda dejar la tapa plástica en la conexión del cable durante la instalación.
- El SoilVUE™10 debe colocarse lejos de fuentes de radiofrecuencia significantes como líneas de poder AC y motores, ya que esto puede afectar su operación.

Inspección inicial

- Cuando reciba el SoilVUE™10, inspeccione el embalaje y el contenido para comprobar que no estén dañados.
- El número de modelo y la longitud del cable están impresos en una etiqueta en el extremo de conexión del cable. Compruebe esta información con los documentos correspondientes.

Descripción general

El SoilVUE™10 utiliza reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) para medir el contenido volumétrico de agua (VWC) y la conductividad eléctrica (CE) del suelo. Las guías de ondas están incrustadas en hilos y centradas en las profundidades de medición de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 cm para la opción de 0,5 m (Figura 1); se añaden profundidades de 60, 75 y 100 cm para la opción de 1,0 m. El diseño roscado maximiza el contacto con el suelo y minimiza el flujo preferencial, dos grandes inconvenientes de las sondas de perfil del suelo de lados lisos. Esta implementación patentada de TDR por Campbell Scientific produce una medición limpia y de alta resolución que proporciona una precisión y garantía que no se puede encontrar entre otros sensores disponibles comercialmente.



Figura 1. Guías de onda y profundidades del SoilVUE™10.
Fuente: Campbell Scientific, 2022.

Especificaciones

Rango de temperatura de funcionamiento: -40 a 60°C

Rango de contenido volumétrico de agua: 0 a 100%

Torque máximo de instalación: 54 N m (40 ft lb)

Diámetro sin rosca: 5.2 cm (2.05 pulgadas)

Diámetro con rosca: 5.8 cm (2.3 pulgadas)

Longitud: 0.55 m/1.05 m (21.5 pulgadas/41.2 pulgadas)

Peso: 1.9 kg/3.6 kg (4.2 lb/7.9 lb)

Salida: SDI-12 versión 1.4

Voltaje de operación: 9 a 36 VDC

Consumo de corriente a 12 VDC: ~1.5 mA (inactivo), ~64 mA (activo)

Profundidades de medición

0.5 m: 5, 10, 20, 30, 40 y 50 cm

1.0 m: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 y 100 cm

Rango de permitividad: 1 a 80

Rango de conductividad eléctrica: 0 a 10 dS/m

Precisión

Contenido volumétrico de agua: $\pm 1.5\%$ con la mayoría de los suelos; aquellos que tienen alto contenido orgánico (más de 12% carbono orgánico) o de arcillas (más de 45%) requieren una calibración específica del sensor.

Permitividad: ± 1 unidades de permitividad entre 4 y 42

Conductividad eléctrica: $\pm 2\%$ (0 a 2.5 dS/m) a $\pm 5\%$ (rango máximo)

Temperatura: ± 0.15 °C entre 30 y 40 °C

Tiempo de respuesta: Hasta 1 minuto para sonda de 0,5 m y hasta 1,5 minutos para sonda de 1,0 m sonda

Instalación

Cableado

En la siguiente tabla se muestran las conexiones requeridas para el sensor SoilVUE™10.

Tabla 1. Conexiones del registrador de datos con el SoilVUE™10.

Color del cable	Función del cable	Conexión del registrador de datos
Blanco	Señal SDI-12	Configuración C o U para el SDI-12 (se configura automáticamente por la instrucción SDI12Recorder ())
Transparente	Protección	G
Café	Voltaje	12 V
Negro	Tierra	G

Igualmente, se ilustran las conexiones en un registrador de datos CR300:

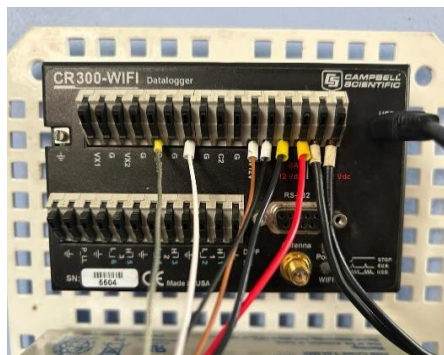


Figura 2. Conexión del cableado en el registrador de datos CR300.

Programación de CRBasic

El sensor SoilVUE™10 es compatible con los siguientes registradores de datos de la empresa Campbell Scientific:

Tabla 2. Compatibilidad de los registradores de datos con el SoilVUE™10.

Registrador de datos	Compatible
Aspen 10	Sí
CR1000 (retirado)	Sí
CR1000X	Sí
CR300	Sí
CR3000 (retirado)	Sí
CR310	Sí
CR350	Sí
CR6	Sí
CR800 (retirado)	Sí
CR850 (retirado)	Sí

Fuente: Campbell Scientific, 2022.

La instrucción que utiliza el programa para tomar las mediciones es el `SDI12Recorder()`. Esta envía una solicitud al sensor de realizar las mediciones y sustraer la información.

Para la mayoría de los registradores de datos, la instrucción `SDI12Recorder()` tiene la siguiente sintaxis:

`SDI12Recorder` (Destination, SDIPort, SDIAddress, "SDICommand", Multiplier, Offset, FillNAN, WaitonTimeout)

Para `SDIAddress`, los caracteres alfabéticos deben ir entre comillas (por ejemplo, "A"). Encierre también el `SDICommand` entre comillas como se muestra. El parámetro `Destination` debe ser una matriz. El número de valores necesarios en la matriz depende del comando (los cuales se presentan más adelante en este manual).

En el siguiente enlace se encuentra un programa base para el funcionamiento del sensor SoilVUE™10:

<https://www.campbellsci.com/downloads/soilvue10-example-program>

PC400

Corresponde al software gratuito de soporte para registradores de datos de Campbell Scientific. Este versátil software soporta una gran variedad de opciones de telecomunicación, recolecta manual de datos y la visualización de estos.

Este programa incluye un generador de programas llamado Short Cut, así como editores de programas completos como el CRBasic y Edlog.

Los pasos a seguir para configurar el programa y enlazarlo con el registrador de datos son los siguientes:

1. Descargar el programa PC400 en el siguiente enlace:
<https://www.campbellsci.com/pc400>
2. Al abrirlo, se tiene la interfaz mostrada en la Figura 3.

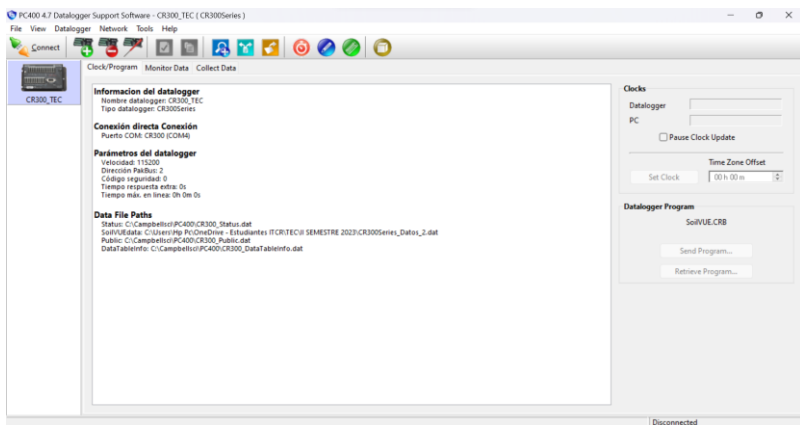


Figura 3. Interfaz del programa PC400.

Esta se compone de varios comandos:

- A. *Connect*
- B. *Add datalogger*
- C. *Delete datalogger*
- D. *Edit datalogger setup*
- E. *Station status*

- F. *File control*
- G. *View data files via View Pro*
- H. *Split*
- I. *Card covert*
- J. *Create program via Shor Cut*
- K. *Create program via CRBasic*
- L. *Create program via Edlog*
- M. *Configure Hardware Settings via DevConfig*

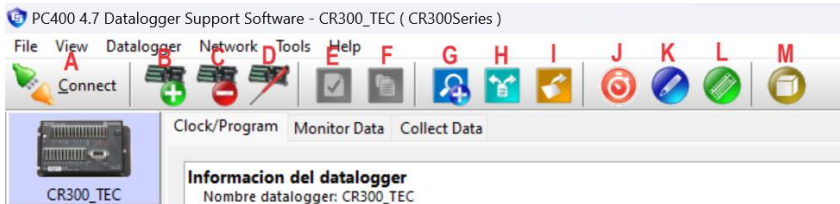


Figura 4. Comandos del programa PC400.

Adicionalmente, cuenta con tres pestañas distintas:

- A. *Clock/Program*: indica la información del registrador de datos, así como el programa en ejecución y el tiempo de conexión entre el programa y el registrador de datos.
 - B. *Monitor Data*: muestra los datos en tiempo real que recolecta el registrador de datos.
 - C. *Collect Data*: permite la obtención de tablas con las diferentes mediciones que se registran a partir del sensor.
3. Para agregar el registrador de datos, se selecciona el comando B (Figura 4), el cual lleva a una ventana llamada “EZSetup Wizard”, en la cual se presentan una serie de pasos a seguir para la correcta configuración del registrador de datos:

A. Introducción



Figura 5. Interfaz del EZSetup Wizard.

- B. Configuración de comunicaciones: se compone de tres pasos.
- i. Seleccionar el tipo de registrador de datos a utilizar y se nombra según corresponda.
 - ii. Se indica el tipo de conexión entre el programa PC400 y el registrador de datos.
 - iii. Seleccionar el puerto COM de la computadora a la que está conectado el registrador de datos. Para el método de conexión directa se requiere una instalación adicional del Controlador USB según el tipo de registrador de datos que se esté utilizando.

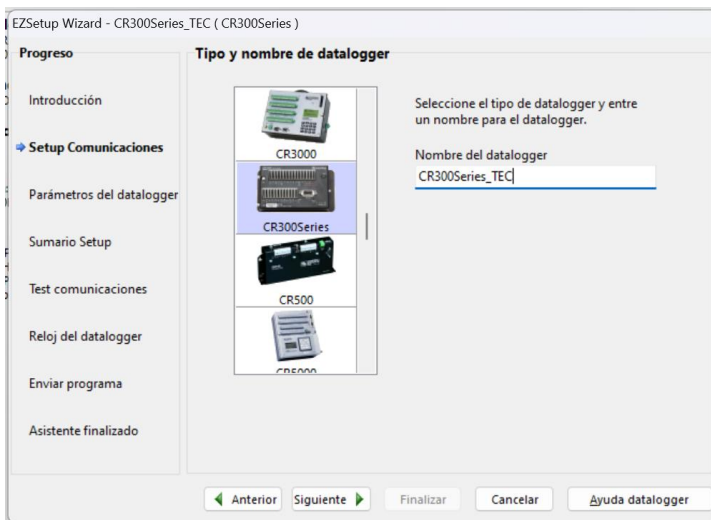


Figura 6. Selección del tipo de *datalogger*.

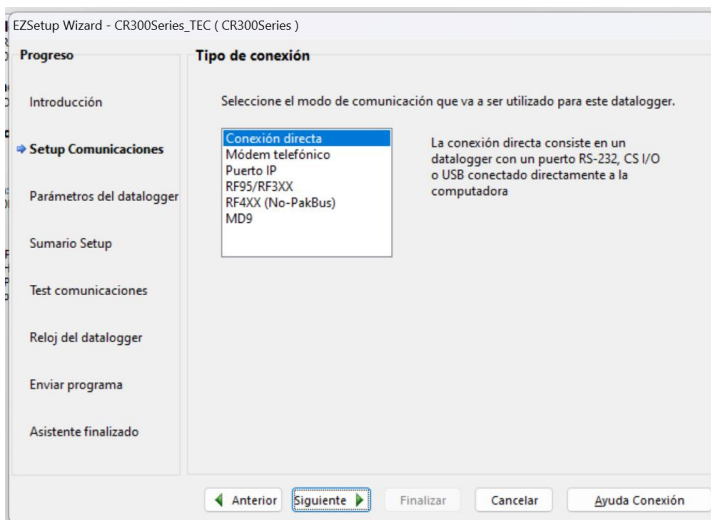


Figura 7. Selección del tipo de conexión entre el datalogger y el PC400.

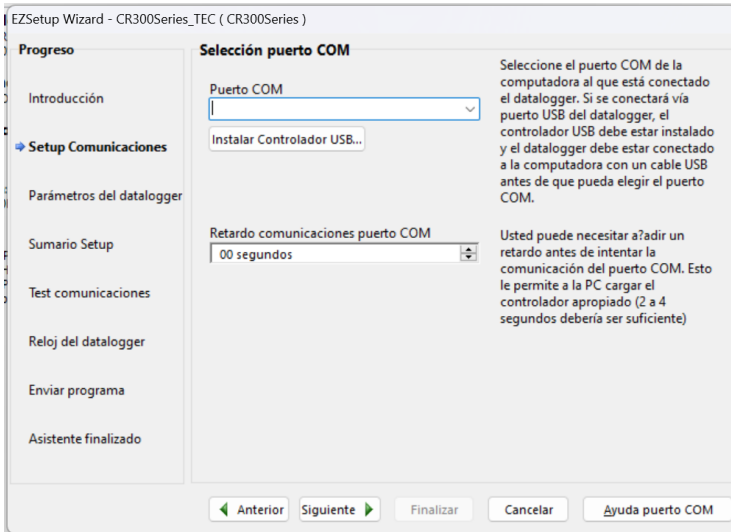


Figura 8. Selección del puerto COM.

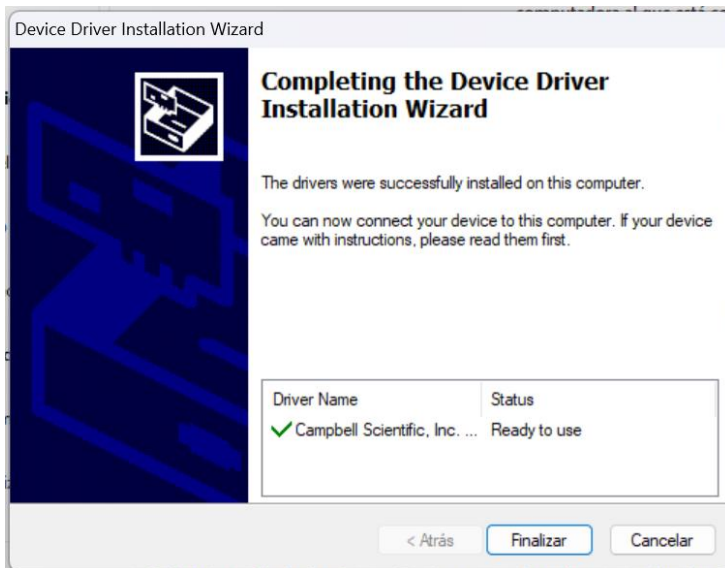


Figura 9. Instalación del controlador USB.

C. Parámetros del *datalogger*: usualmente se dejan los valores por defecto.

EZSetup Wizard - CR300Series_TEC (CR300Series)

Progreso

Introducción

Setup Comunicaciones

➔ **Parámetros del datalogger**

Sumario Setup

Test comunicaciones

Reloj del datalogger

Enviar programa

Asistente finalizado

Parámetros del datalogger

Velocidad
115200

Dirección PakBus
1

Tiempo respuesta extra
00 segundos

Tiempo máx. en línea
00 h 00 m 00 s

Neighbor PakBus Address
0

Seleccione la velocidad de transmisión a usar durante la comunicación con el datalogger. Nota: la velocidad máx. para el interface SC32A es de 19.200 bps. La máx. para el cable SC929 es 38.400 bps.

Para identificar un datalogger en una red PakBus, éste debe disponer de una dirección PakBus única. Entre la dirección PakBus que configuró en el datalogger. Rango válido de 1-4094. Rango sugerido de 1-3999.

Si el datalogger requiere un tiempo extra para responder, entre el tiempo de respuesta extra.

Dado que algunos enlaces son caros, podría desear que la sesión se cerrara automáticamente. Entre la duración máxima de la conexión en línea. 0 significa en línea hasta que el usuario desconecte.

The Pak-Bus address for a Pak-Bus neighbor used to communicate with the datalogger. For example the Konect router address. A value of 0 means connect directly with the datalogger.

Anterior Siguiente Finalizar Cancelar Ayuda parámetros

Figura 10. Parámetros del *datalogger*.

EZSetup Wizard - CR300Series_TEC (CR300Series)

Progreso

Introducción

Setup Comunicaciones

➔ **Parámetros del datalogger**

Sumario Setup

Test comunicaciones

Reloj del datalogger

Enviar programa

Asistente finalizado

Ajustes del Datalogger - Seguridad

Código seguridad
0

Llave de cifrado Pakbus

Si asignará un código de seguridad al datalogger, ingréselo aquí. 0 significa que no se usará código de seguridad.

Si asignará una llave de cifrado Pakbus al datalogger, ingréselo aquí. De lo contrario, deje este campo en blanco.

Anterior Siguiente Finalizar Cancelar Ayuda en este paso

Figura 11. Ajustes de seguridad del *datalogger*.

4. *Sumario setup*: se presenta un resumen de los parámetros del registrador de datos.

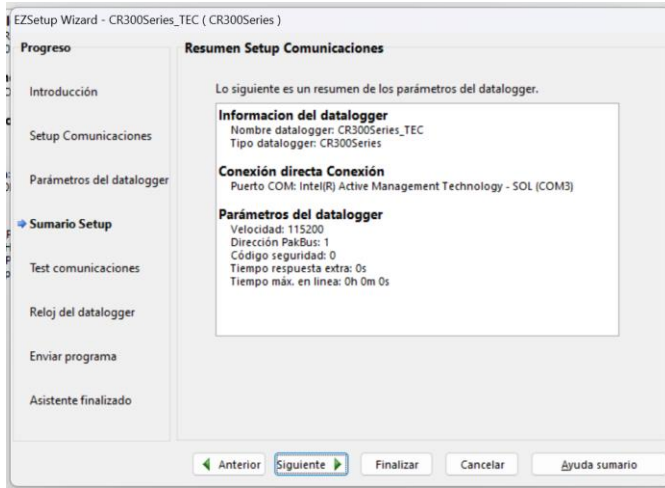


Figura 12. Resumen de la configuración del registrador de datos.

5. *Test comunicaciones*: finalmente se realiza la prueba de conexión entre el registrador de datos y el programa.

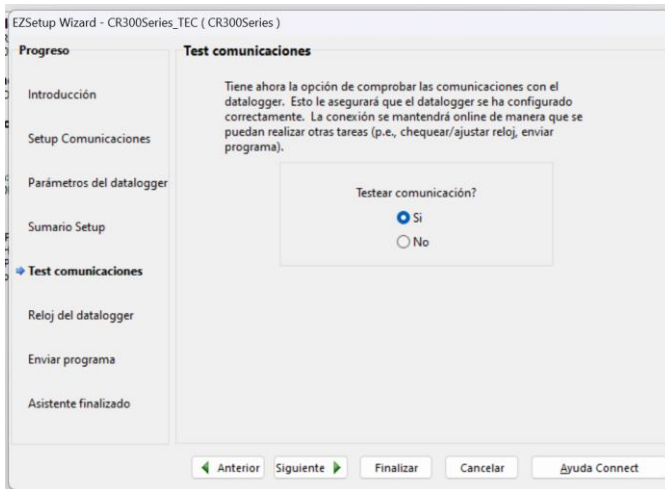


Figura 13. Prueba de comunicación entre el programa y el *datalogger*.

6. Si la conexión fue exitosa, se podrá visualizar el datalogger creado en la interfaz principal del programa.

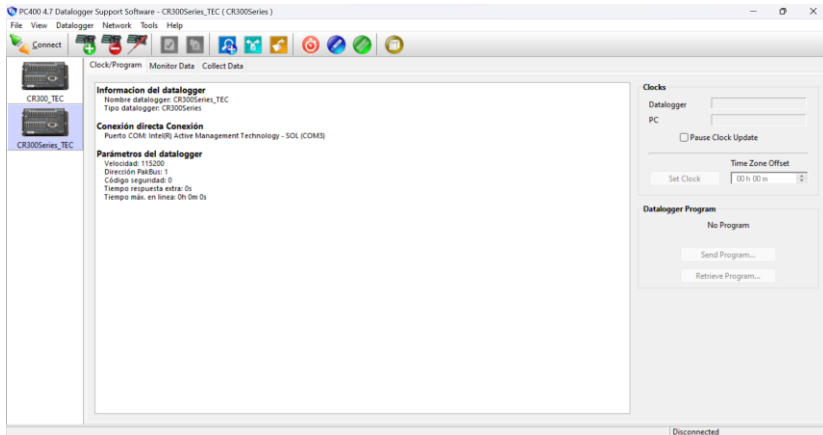


Figura 14. Configuración completa del *datalogger* en el PC400.

Instalación en campo

La empresa Campbell Scientific ofrece un kit de instalación que se compone de siete elementos listados a continuación:

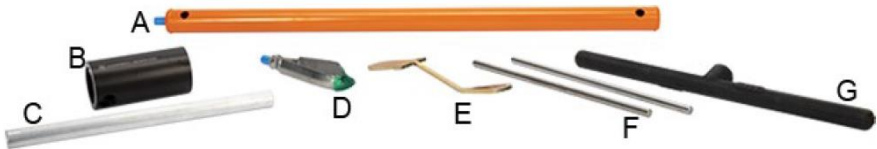


Figura 15. Kit de instalación del SoilVUE10.

- A. Eje de extensión del sinfín
- B. Toma hexagonal
- C. Mango hexagonal
- D. Sinfín Edelman
- E. Herramienta de limpieza del eje de extensión
- F. Varilla para desmontaje
- G. Mango en T para el eje de extensión

El kit facilita la instalación del sensor mas no es indispensable, ya que también es posible utilizar un sinfín estándar de 5 cm de diámetro (2 pulgadas) para realizar el agujero y el SoilVUE10 puede insertarse utilizando una toma estándar de seis lados de 2.25 pulgadas.

PRECAUCIÓN:

No utilice un sinfín eléctrico ya que este podría agrandar el diámetro del orificio más allá de la especificación deseada para una correcta instalación de la sonda. Además, las mediciones podrían verse afectadas por el desprendimiento de material en la parte superior del agujero.

A continuación, se describen los pasos para la instalación del sensor SoilVUE™10 y, adicionalmente, se pone a disposición el siguiente video de Campbell Scientific, en el cual se ilustra el procedimiento de instalación: <https://www.campbellsci.com/videos/soilvue10>.

1. Conecte el mango en T al extremo superior del eje de extensión del sinfín y el sinfín Edelman al extremo inferior.
2. Se recomienda marcar el largo del sensor en el eje de extensión para que el agujero tenga la profundidad correcta y con ello se evite la presencia de espacios libres en las paredes del orificio que afecten las mediciones.
3. Utilice el conjunto del sinfín para crear un agujero de 5 cm de diámetro que sea aproximadamente 5 cm más profundo que la longitud del SoilVUE™10. Esto porque la punta del sinfín es más estrecha que el sensor, de manera que, al profundizar el agujero, se asegura que este se instale en su totalidad.
 - a. Procure que los lados del agujero queden uniformes y paralelos, evitando que se estreche por la remoción repetida de material.

- b. Se humedece con agua las paredes del agujero para reducir la fuerza requerida para la instalación del sensor.

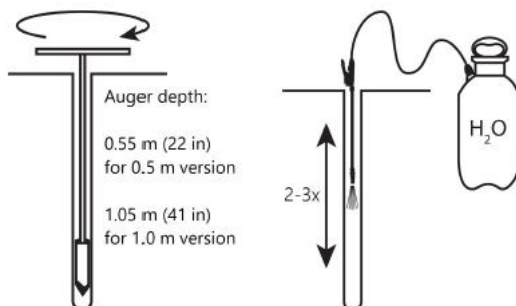


Figura 16. Preparación del agujero.

4. Inserte el mango hexagonal en los agujeros de la toma hexagonal como se muestra en la siguiente figura.



Figura 17. Conjunto de la toma hexagonal.

5. Coloque la toma hexagonal en la parte superior del SoilVUE™10 y atornillarlo en el agujero preparado previamente.
- a. Cuando se tenga el sensor instalado parcialmente, retire aproximadamente 5 cm de suelo alrededor de la parte superior del agujero para prevenir que el conector quede enterrado, además de liberar espacio para conectar el cable.

- b. Cuando el extremo superior del sensor está a ras del suelo, la primera guía de onda está a 5 cm de profundidad.

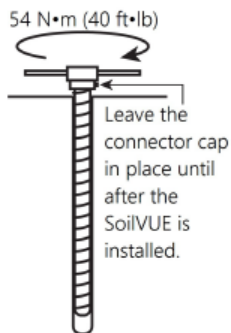


Figura 18. Inserción del SoilVUE10 en el suelo.

6. Conecte el cable al SoilVUE™10 y apriete a mano la tuerca del conector del cable para asegurar un sellado hermético. No apriete demasiado. La tuerca del cable debe girar fácilmente. Si no lo hace, compruebe para asegurarse de que está correctamente alineada. Intente también presionar suavemente el cable.
7. Después de conectar el cable, con cuidado vuelva a colocar la tierra alrededor de la parte superior de la sonda mientras se añade agua y se empaqueta bien.
8. Conecte el otro extremo del cable al registrador de datos.

ADVERTENCIA:

No apriete de más. No utilice nunca una llave inglesa en la tuerca del conector del cable ya que puede dañarlo.

Operación

Mediciones SDI-12

El SoilVUE™10 responde a los comandos SDI-12 mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Comandos SDI-12 del SoilVUE10.

Comando SDI-12	Valores devueltos	Unidades
aM!	Contenido volumétrico de agua, 5 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 10 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 20 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 30 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 40 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 50 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 60 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 75 cm	m ³ /m ³
	Contenido volumétrico de agua, 100 cm	m ³ /m ³
aM1! o aC1!	Contenido volumétrico de agua, 5 cm	m ³ /m ³
	Permitividad relativa, 5 cm	°C
	Temperatura, 5 cm	dS/m
aM2! o aC2!	Conductividad eléctrica, 5 cm	
	Contenido volumétrico de agua, 10 cm	m ³ /m ³
	Permitividad relativa, 10 cm	°C
aM3! o aC3!	Temperatura, 10 cm	dS/m
	Conductividad eléctrica, 10 cm	
	Contenido volumétrico de agua, 20 cm	m ³ /m ³
aM4! o aC4!	Permitividad relativa, 20 cm	°C
	Temperatura, 20 cm	dS/m
	Conductividad eléctrica, 20 cm	
aM5! o aC5!	Contenido volumétrico de agua, 30 cm	m ³ /m ³
	Permitividad relativa, 30 cm	°C
	Temperatura, 30 cm	dS/m
aM6! o aC6!	Conductividad eléctrica, 30 cm	
	Contenido volumétrico de agua, 40 cm	m ³ /m ³
	Permitividad relativa, 40 cm	°C
aM7! o aC7!	Temperatura, 40 cm	dS/m
	Conductividad eléctrica, 40 cm	
	Contenido volumétrico de agua, 50 cm	m ³ /m ³

	Permitividad relativa, 50 cm Temperatura, 50 cm Conductividad eléctrica, 50 cm	°C dS/m
aM7! o aC7!	Contenido volumétrico de agua, 60 cm Permitividad relativa, 60 cm Temperatura, 60 cm Conductividad eléctrica, 60 cm	m ³ /m ³ °C dS/m
aM8! o aC8!	Contenido volumétrico de agua, 75 cm Permitividad relativa, 75 cm Temperatura, 75 cm Conductividad eléctrica, 75 cm	m ³ /m ³ °C dS/m
aM9! o aC9!	Contenido volumétrico de agua, 100 cm Permitividad relativa, 100 cm Temperatura, 100 cm Conductividad eléctrica, 100 cm	m ³ /m ³ °C dS/m
aC!	Contenido volumétrico de agua, 5 cm Permitividad relativa, 5 cm Temperatura, 5 cm Conductividad eléctrica, 5 cm Contenido volumétrico de agua, 10 cm Permitividad relativa, 10 cm Temperatura, 10 cm Conductividad eléctrica, 10 cm Contenido volumétrico de agua, 20 cm Permitividad relativa, 20 cm Temperatura, 20 cm Conductividad eléctrica, 20 cm Contenido volumétrico de agua, 30 cm Permitividad relativa, 30 cm Temperatura, 30 cm Conductividad eléctrica, 30 cm Contenido volumétrico de agua, 40 cm Permitividad relativa, 40 cm Temperatura, 40 cm Conductividad eléctrica, 40 cm Contenido volumétrico de agua, 50 cm Permitividad relativa, 50 cm Temperatura, 50 cm Conductividad eléctrica, 50 cm Contenido volumétrico de agua, 60 cm	m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³

	Permitividad relativa, 60 cm Temperatura, 60 cm Conductividad eléctrica, 60 cm Contenido volumétrico de agua, 75 cm Permitividad relativa, 75 cm Temperatura, 75 cm Conductividad eléctrica, 75 cm Contenido volumétrico de agua, 100 cm Permitividad relativa, 100 cm Temperatura, 100 cm Conductividad eléctrica, 100 cm	°C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m m ³ /m ³ °C dS/m
?!	Devuelve la dirección del SDI-12	

Fuente. Campbell Scientific, 2022.

Debido a los M! requiere, Campbell Scientific recomienda escaneos de medida de al menos 10 segundos por sensor. Por ejemplo, la velocidad de exploración recomendada para una sonda de 0,5 m con seis SoilVUE™10 Perfilador de Suelo Completo 12 es de al menos 60 segundos. Un comando C! no requiere que el registrador de datos detenga su funcionamiento hasta que los valores estén listos.

Mediciones a velocidades de exploración rápidas

El uso de la función `SlowSequence` permite que la instrucción SDI-12 se ejecute como un proceso de fondo, causando una interferencia mínima a otras mediciones que utilizan el hardware analógico.

Medir con el SoilVUE10 en una sección `SlowSequence` del programa permite que programas más rápidos sean ejecutados como el escaneo principal. Sin embargo, si el registrador de datos está demasiado ocupado para completar todas sus tareas, algunos comandos de secuencia lenta pueden ser omitidos, resultando en NANs (no un número) en lugar de mediciones.

Teoría de medición

El SoilVUE™10 es una sonda multiparamétrica para perfiles de suelo que mide el contenido volumétrico de agua del suelo mediante el método TDR.

La sonda consta de circuitos TDR conectados a una serie de seis o nueve guías de ondas helicoidales que forman parte del diseño roscado general.

El tiempo de recorrido de una señal electromagnética pulsada a lo largo de una guía de ondas depende de la velocidad de la señal y de la guía de ondas. La velocidad depende de la constante dieléctrica constante dieléctrica del material que rodea la guía de onda. Esta relación puede expresarse mediante:

$$\Delta t = \frac{2L\sqrt{K_a}}{c}$$

Donde

K_a es la permitividad aparente

c es la velocidad de las señales electromagnéticas en el espacio libre

Δt es el tiempo de viaje

L es la longitud de la guía de onda.

La permitividad del agua en relación con otros componentes del suelo es alta. Por consiguiente, los cambios de este parámetro pueden relacionarse directamente con el cambio en la permitividad del material a granel del suelo.

De esta manera, el perfilador SoilVUE™10 puede describirse como un método de medición empírico que utiliza formas polinómicas y lineales.

Mantenimiento y solución de problemas

El sensor no requiere de mantenimientos periódicos. En cuanto a la solución de problemas, en la Tabla 4 se listan algunos síntomas con sus posibles causas y soluciones.

Tabla 4. Síntomas, posibles causas y soluciones.

Síntoma	Posible causa	Solución
Todos los valores brindados por el SoilVUE™10 son cero	No existe la instrucción SDI12Recorder() en el programa del registrador de datos La sentencia condicional que activa lecturas no se evalúa como verdadera	Incluir la instrucción SDI12Recorder() en el programa del registrador de datos Comprobar la lógica de la sentencia condicional que desencadena las lecturas
El primer valor se lee como NAN y los demás valores como cero o nunca cambian entre una medición y otra	La dirección de SoilVUE™10 SDI-12 no coincide con la especificada en el programa del registrador de datos El SoilVUE™10 no está conectado al terminal SDI-12 especificado en el programa del registrador de datos El SoilVUE™10 no está siendo alimentado	Cambiar la dirección del SoilVUE™10 SDI-12 o modificar el programa para que coincidan Conectar el cable al terminal correcto o modificar el programa para que coincida con el cableado Asegúrese de que el SoilVUE 10 está cableado correctamente y que coincide con el programa del registrador de datos
Lecturas irregulares, incluyendo NANs y 9999999s	Múltiples dispositivos con la misma dirección SDI-12 compartiendo el mismo terminal U o C	Connect each SDI-12 device to a different U or C terminal or give them unique SDI-12 addresses; ensure that the data logger program is revised to account for these changes

Fuente. Campbell Scientific, 2022.

Referencias

Campbell Scientific. (2022). *SoilVUE10: Complete soil profiler*. <https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/soilvue10%20-%201298.pdf>

SoilVUE10. Campbell Scientific (Director). (2019). [Video/DVD] <https://www.campbellsci.es/videos/soilvue10-overview>

2. Código de programación utilizado para la toma de mediciones

```
' Wiring
' SoilVUE CR300
' Brown 12V
' White C1
' Black G
' Clear analog ground

Public PTemp, batt_volt
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,

' SoilVUE variables
Public SoilVUE_05cm(4)
Alias SoilVUE_05cm(1) = VWC_5cm
Alias SoilVUE_05cm(2) = Perm_5cm
Alias SoilVUE_05cm(3) = TC_5cm
Alias SoilVUE_05cm(4) = EC_5cm
Public SoilVUE_10cm(4)
Alias SoilVUE_10cm(1) = VWC_10cm
Alias SoilVUE_10cm(2) = Perm_10cm
Alias SoilVUE_10cm(3) = TC_10cm
Alias SoilVUE_10cm(4) = EC_10cm
Public SoilVUE_20cm(4)
Alias SoilVUE_20cm(1) = VWC_20cm
Alias SoilVUE_20cm(2) = Perm_20cm
Alias SoilVUE_20cm(3) = TC_20cm
Alias SoilVUE_20cm(4) = EC_20cm
Public SoilVUE_30cm(4)
Alias SoilVUE_30cm(1) = VWC_30cm
Alias SoilVUE_30cm(2) = Perm_30cm
Alias SoilVUE_30cm(3) = TC_30cm
```

```

Alias SoilVUE_30cm(4) = EC_30cm
Public SoilVUE_40cm(4)
Alias SoilVUE_40cm(1) = VWC_40cm
Alias SoilVUE_40cm(2) = Perm_40cm
Alias SoilVUE_40cm(3) = TC_40cm
Alias SoilVUE_40cm(4) = EC_40cm
Public SoilVUE_50cm(4)
Alias SoilVUE_50cm(1) = VWC_50cm
Alias SoilVUE_50cm(2) = Perm_50cm
Alias SoilVUE_50cm(3) = TC_50cm
Alias SoilVUE_50cm(4) = EC_50cm
Public SoilVUE_60cm(4)
Alias SoilVUE_60cm(1) = VWC_60cm
Alias SoilVUE_60cm(2) = Perm_60cm
Alias SoilVUE_60cm(3) = TC_60cm
Alias SoilVUE_60cm(4) = EC_60cm
Public SoilVUE_75cm(4)
Alias SoilVUE_75cm(1) = VWC_75cm
Alias SoilVUE_75cm(2) = Perm_75cm
Alias SoilVUE_75cm(3) = TC_75cm
Alias SoilVUE_75cm(4) = EC_75cm
Public SoilVUE_100cm(4)
Alias SoilVUE_100cm(1) = VWC_100cm
Alias SoilVUE_100cm(2) = Perm_100cm
Alias SoilVUE_100cm(3) = TC_100cm
Alias SoilVUE_100cm(4) = EC_100cm
' Table for SoilVUE data
DataTable (SoilVUEdata, 1, -1)
    DataInterval (0, 5, Min, 10)
    Minimum (1, batt_volt, FP2, False, False)
    Sample (1, PTemp, FP2)
    Sample (4, SoilVUE_05cm(), IEEE4)

```

```

Sample (4, SoilVUE_10cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_20cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_30cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_40cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_50cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_60cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_75cm(), IEEE4)
Sample (4, SoilVUE_100cm(), IEEE4)
EndTable
' Main Program
BeginProg
  SW12(1)
  Scan (5, Sec, 0, 0)
    PanelTemp (PTemp, 60)
    Battery (batt_volt)
  NextScan
  SlowSequence
  Scan(5, Min, 0, 0)
    ' Queries to SoilVUE soil profiling probe
    SDI12Recorder (SoilVUE_05cm(), C1, 0, "M1!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_10cm(), C1, 0, "M2!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_20cm(), C1, 0, "M3!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_30cm(), C1, 0, "M4!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_40cm(), C1, 0, "M5!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_50cm(), C1, 0, "M6!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_60cm(), C1, 0, "M7!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_75cm(), C1, 0, "M8!", 1.0, 0, -1)
    SDI12Recorder (SoilVUE_100cm(), C1, 0, "M9!", 1.0, 0, -1)
  CallTable SoilVUEdata
  NextScan
EndProg

```

3. Resultados obtenidos con el SoilVUE™10

Cuadro 18. Parámetros medidos a los 5 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0	2.341666	0.0917441	16.12246
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.0008422	2.409375	0.1000706	16.29718
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.0120934	2.726079	0.1065348	16.27218
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.0068487	2.576015	0.0980232	16.54809
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.0081288	2.612252	0.1031552	16.42245
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.0069964	2.580184	0.0961246	16.27218
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.0125527	2.739424	0.1005913	16.24719
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.0061411	2.556096	0.1073831	16.24719
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.0200583	2.962099	0.1043901	16.37231
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.0073063	2.588939	0.0963197	16.69937
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.011085	2.696897	0.1000072	16.74993
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.0178	2.894183	0.1042324	16.87658
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.0161588	2.845321	0.1018257	16.67413
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.0180326	2.901141	0.1037181	16.92733
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.0158122	2.835057	0.0987626	16.85122
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.0192788	2.938566	0.1005673	16.1723
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.0209093	2.987893	0.0993943	15.94845
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.0229262	3.04948	0.1031427	16.85122
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.0148129	2.805563	0.101658	16.27218
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.010595	2.682774	0.0957016	15.94845
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.0189456	2.928539	0.1000215	15.82461
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.0204433	2.973753	0.0994581	15.65188
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.0142217	2.788187	0.100649	16.42245
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.0234253	3.064815	0.0997798	16.19726
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.0256736	3.134382	0.1018463	16.04779
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.0124816	2.737357	0.0941152	18.24429
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.0119578	2.722147	0.0954802	18.1394
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.0106676	2.684863	0.0939594	18.1394
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.0109189	2.692104	0.0920759	18.24429
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.013026	2.753208	0.09555675	18.27053
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.0092160	2.643225	0.0929341	18.27053
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.0131465	2.756724	0.098538	18.66671
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.0278778	3.203338	0.0999184	18.64016
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.0050175	2.524623	0.0930701	18.58715
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.0074510	2.593034	0.0958932	18.58715
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.0230312	3.052704	0.0965274	18.58715
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.0080065	2.608777	0.0935128	18.53421
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.0000000	2.322846	0.0941871	18.53421
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.0018825	2.437837	0.0923588	18.50775
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.0037322	2.488858	0.0944714	18.50775

Cuadro 17. Parámetros medidos a los 10 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.2948807	17.10677	0.1169943	17.23333
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.3300257	19.75683	0.1338568	17.23333
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.354582	21.72166	0.1501045	17.20773
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.3573111	21.94577	0.1457168	17.23333
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.369925	22.99657	0.1531022	17.33584
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.3646621	22.55516	0.1475432	17.3872
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.3680944	22.84254	0.1484222	17.4129
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.3684514	22.87255	0.1489004	17.4129
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.3740209	23.34307	0.1536764	17.43862
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.3678891	22.8253	0.1498973	17.46435
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.3766544	23.56721	0.15073	17.59326
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.3790255	23.76995	0.1491954	17.67083
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.376066	23.51704	0.1499849	17.69971
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.3773787	23.62905	0.1485239	17.72262
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.3732069	23.274	0.1458489	17.69671
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.3773321	23.62507	0.1493513	17.74853
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.3800063	23.85406	0.1431561	17.59326
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.3821994	24.04268	0.1443171	17.3872
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.3770517	23.60112	0.1412175	17.36151
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.3694284	22.95474	0.1408824	17.3872
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.3737082	23.31652	0.1381048	17.36151
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.3694964	22.96047	0.1378227	17.28454
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.3765335	23.5569	0.1333874	17.20773
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.3750064	23.42682	0.1338174	17.20773
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.3765434	23.55775	0.1353687	17.20773
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.3574488	21.95711	0.1200448	17.02908
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.3585488	22.0478	0.1186823	17.25891
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.3604253	22.20292	0.1208151	17.3872
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.3599503	22.1636	0.1176624	17.56747
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.3627748	22.39791	0.1211036	17.72262
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.3612569	22.27183	0.1174926	17.82641
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.3599860	22.16655	0.1151293	17.93048
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.3616684	22.30598	0.1161184	18.00869
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.3592454	22.10532	0.1137149	18.1694
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.3622421	22.35362	0.1176166	18.21804
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.3615498	22.29614	0.1137194	18.29687
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.3607409	22.22905	0.1140273	18.34945
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.3602627	22.18945	0.1178869	18.40219
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.3601727	22.182	0.1144722	18.42852
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.3626402	22.38672	0.1136155	18.45492

Cuadro 18. Parámetros medidos a los 20 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.0886267	5.39916	0	18.77304
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.0882569	5.384067	0	18.74642
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.0876206	5.358153	0	18.74642
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.0871976	5.340956	0	18.71984
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.0992271	5.840721	0.0001374	18.74642
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1113203	6.36566	0.01083	18.71984
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1302845	7.234327	0.0219802	18.66671
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.1532871	8.362518	0.0348396	18.66671
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.1708724	9.280132	0.0452581	18.61364
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1824464	9.910124	0.0464057	18.58715
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1885633	10.25143	0.0504255	18.53421
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.1911329	10.39654	0.051524	18.53421
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.1916924	10.42825	0.0539421	18.48135
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.1906648	10.37003	0.0553742	18.45492
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.1904339	10.35696	0.0541157	18.45492
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.1908272	10.37922	0.0538031	18.40219
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.1916732	10.42718	0.0522654	18.40219
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.1919466	10.4427	0.0575488	18.34945
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.1895259	10.30567	0.0545877	18.32318
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.1862379	10.121	0.0567277	18.29687
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.1840754	10.00045	0.0503711	18.29687
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.1826974	9.924015	0.0524308	18.29687
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.1851531	10.06044	0.0515823	18.27053
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.1823399	9.904232	0.0548276	18.24429
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.1828007	9.929739	0.0521533	18.21804
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.1159091	6.570755	0.0219865	16.97821
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.1331824	7.371961	0.0244495	16.95275
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.1484625	8.119119	0.0299496	16.97821
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.1590961	8.660352	0.0333224	16.95275
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.1615154	8.785933	0.0389438	16.95275
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.1620836	8.815556	0.0372438	16.97821
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.1629975	8.863309	0.0360393	16.97821
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.1621955	8.821394	30351326	16.97821
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.1631249	8.869975	0.0363989	16.97821
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.1630031	8.863602	0.0374227	17.000363
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.1652562	8.981885	0.0366504	17.02908
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.1649121	8.963769	0.0357514	17.05456
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.1625783	8.841391	0.373816	17.08007
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.1638683	8.908931	0.0358584	17.1311
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.1641416	8.92327	0.036493	17.18215

Cuadro 19. Parámetros medidos a los 30 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.1348006	7.449379	0	19.52575
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.1360835	7.511044	0	19.52575
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.1339349	7.407912	0	19.52575
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.1348852	7.453434	0	19.49859
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.1353065	7.473666	0	19.49859
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1332799	7.376613	0	19.52575
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1344878	7.434381	0	19.49859
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.134084	7.415046	0	19.47146
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.1326013	7.344255	0	19.49859
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1335829	7.391084	0	19.49859
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1382906	7.617724	0	19.49859
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.1582296	8.615597	0.0087772	19.47146
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.1811636	9.83928	0.0266836	19.44436
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.2042865	11.15527	0.0421425	19.44436
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.2442493	13.62435	0.0717883	19.41729
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.2881807	16.62322	0.0940202	19.41729
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.3196948	18.95805	0.1086438	19.36322
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.3349041	20.13975	0.1222662	19.33615
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.3420688	20.7088	0.1248816	19.30917
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.3401419	20.55498	0.1230569	19.30917
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.3359662	20.22361	0.1219418	19.25518
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.3348704	20.13709	0.1209345	19.22827
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.3331242	19.99961	0.1137609	19.20132
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.3308405	19.82052	0.114526	19.17443
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.3324868	19.94955	0.1144141	19.12066
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.2246343	12.38163	0.0595183	17.80044
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.2229252	12.27616	0.0578761	17.77447
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.2253034	12.42304	0.0583817	17.74853
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.241712	13.46025	0.0668076	17.77447
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.2638471	14.92533	0.0762593	17.74853
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.2796527	16.01777	0.0820755	17.74853
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.2897058	16.73268	0.087688	17.72262
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.2950986	17.12262	0.088309	17.72262
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.2999927	17.48038	0.0904355	17.69671
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.3012366	17.5719	0.0956182	17.67083
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.3047692	17.83312	0.0956624	17.67083
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.3058853	17.91605	0.0943279	17.61911
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.3080599	18.07818	0.0994243	17.56747
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.3094302	18.18071	0.0962156	17.56747
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.3094446	18.1818	0.1008054	17.54165

Cuadro 20. Parámetros medidos a los 40 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.1392096	7.662368	0	19.88037
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.1380649	7.606782	0	19.88037
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.1388211	7.643479	0	19.88037
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.1367241	7.541927	0	19.88037
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.1377389	7.590988	0	19.90777
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1386358	7.634477	0	19.88037
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1381967	7.613173	0	19.88037
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.1384325	7.624609	0	19.90777
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.1370201	7.556223	0	19.88037
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1383203	7.619167	0	19.90777
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1359984	7.506944	0	19.88037
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.1355664	7.486158	0	19.88037
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.1366649	7.539074	0	19.90777
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.1359397	7.504119	0	19.88037
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.1359681	7.505488	0	19.88037
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.1353893	7.477644	0	19.90777
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.1390715	7.655651	0	19.88037
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.1650472	8.970879	0.0066607	19.88037
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.2019035	11.01583	0.0227192	19.88037
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.2379028	13.21576	0.0402721	19.85296
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.2607181	14.71363	0.0511378	19.82559
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.2872681	16.55789	0.064156	19.85296
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.3016775	17.6044	0.0721128	19.82559
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.3080063	18.07417	0.075637	19.77087
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.3159206	18.67034	0.0818465	19.77087
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.2220707	12.2236	0.0415146	18.45492
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.2213805	12.18123	0.0378111	18.45492
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.2200517	12.09986	0.0377059	18.45492
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.2171967	11.92595	0.0392995	18.42852
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.2219635	12.21701	0.0386423	18.42852
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.2391604	13.29623	0.0450023	18.45492
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.2558584	14.38784	0.0520907	18.42852
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.2698871	15.33824	0.0583786	18.40219
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.2847611	16.3791	0.0673343	18.40219
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.2933632	16.99665	0.0728136	18.40219
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.3008697	17.54488	0.0752004	18.37579
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.3045658	17.81802	0.0783462	18.34945
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.3099844	18.22227	0.0833388	18.29687
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.3151679	18.61322	0.0846137	18.29687
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.3191099	18.91332	0.086924	18.24429

Cuadro 21. Parámetros medidos a los 50 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.1545051	8.424538	0.0118113	20.18307
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.1545734	8.428023	0.007707	20.21072
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.1538593	8.391627	0.0133405	20.21072
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.1538552	8.391415	0.0105802	20.2384
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.1538486	8.391081	0.0081226	20.2384
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1536526	8.381109	0.0107185	20.2384
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1537202	8.384545	0.0098109	20.2384
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.1525485	8.325025	0.0107608	20.26608
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.1536784	8.382417	0.0100269	20.26608
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1521304	8.303837	0.0112429	20.26608
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1514781	8.270837	0.0107077	20.26608
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.1535994	8.3784	0.0122363	20.26608
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.1547872	8.43893	0.0097866	20.26608
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.1528013	8.33785	0.0092875	20.26608
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.1529974	8.347803	0.007158	20.26608
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.1534092	8.368725	0.0046127	20.26608
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.1526187	8.328586	0.0016957	20.26608
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.1512515	8.259386	0.0011984	20.29376
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.1708547	9.279182	0.000998	20.29376
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.2429612	13.54092	0.0444882	20.2384
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.293025	16.97216	0.0942769	20.26608
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.3450875	20.95093	0.1314519	20.2384
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.3820669	24.03126	0.1681024	20.21072
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.4006358	25.65767	0.1900431	20.15548
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.4170046	27.13554	0.2035463	20.12786
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.2853931	16.42408	0.1208465	19.06695
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.2836851	16.30265	0.11975	19.06695
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.2837873	16.3099	0.118845	19.06695
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.2853046	16.41777	0.118367	19.06695
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.2837225	16.3053	0.1186026	19.06695
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.2950878	17.12183	0.1244529	19.06695
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.3343579	20.0967	0.1452051	19.09381
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.3712556	23.10885	0.1649984	19.06695
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.4185577	27.27792	0.1957124	19.01336
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.4504922	30.28791	0.210889	18.98657
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.4904400	34.27495	0.2396367	18.9331
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.5124872	36.58093	0.2562851	18.85299
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.5427616	38.84756	0.2666568	18.77304
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.5727997	41.12594	0.2755663	18.69326
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.5841348	42.00256	0.2747216	18.56066

Cuadro 22. Parámetros medidos a los 60 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.1737806	9.436485	0.0173871	20.2384
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.1732357	9.407088	0.0195705	20.26608
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.1737693	9.435872	0.0188162	20.2384
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.1734204	9.417045	0.0182783	20.26608
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.1733967	9.41577	0.0174398	20.26608
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1733048	9.410815	0.0141204	20.29376
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1751266	9.50929	0.0192815	20.26608
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.1718872	9.33454	0.020245	20.29376
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.173955	9.445898	0.0211877	20.29376
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1730867	9.399059	0.0167922	20.26608
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1718282	9.331369	0.018292	20.26608
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.172068	9.344248	0.0182481	20.29376
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.1723211	9.357852	0.0143132	20.29376
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.1716881	9.32385	0.0203974	20.29376
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.1722776	9.355511	0.0172999	20.29376
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.1739786	9.447173	0.0185033	20.29376
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.1715953	9.318871	0.0160984	20.29376
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.1733066	9.410911	0.0138596	20.29376
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.172175	9.350001	0.0125895	20.29376
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.1692614	9.194079	0.0098234	20.29376
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.1698124	9.223466	0.0050643	20.29376
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.1690333	9.181929	0.006268	20.3215
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.1851443	10.05995	0.0056716	20.29376
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.2146472	11.77172	0.0294508	20.29376
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.2588548	14.58829	0.0650352	20.29376
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.3388358	20.45104	0.1383422	19.33615
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.3369950	20.30499	0.1405525	19.33615
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.337037	20.30832	0.1402717	19.33615
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.336538	20.26883	0.1389167	19.36322
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.3375418	20.34832	0.1341091	19.36322
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.3408402	20.61066	0.1402419	19.36322
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.3442520	20.88377	0.1453134	19.33615
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.3565842	21.88597	0.1438586	19.33615
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.3744965	23.38347	0.1591991	19.36322
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.4014226	25.72777	0.1698665	19.33615
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.4314630	28.47535	0.1884322	19.33615
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.4454117	29.79852	0.2016618	19.28216
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.4610618	31.31885	0.2132203	19.30917
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.4766277	32.86852	0.2158807	19.25518
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.4937283	34.61412	0.227784	19.22827

Cuadro 23. Parámetros medidos a los 75 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.1666133	9.053507	0.0251486	20.2384
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.1673647	9.093285	0.0215928	20.21072
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.1666163	9.053665	0.0207143	20.2384
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.1651495	8.97626	0.0235556	20.21072
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.1669756	9.072674	0.0233566	20.2384
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1656149	9.000785	0.0239081	20.21072
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1666288	9.054325	0.0208269	20.2384
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.1667545	9.060974	0.0232421	20.21072
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.1672336	9.086339	0.0202485	20.2384
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1659056	9.016118	0.0235575	20.21072
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1653802	8.988417	0.0204283	20.26608
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.1654471	8.991943	0.023075	20.21072
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.165066	8.971868	0.0219904	20.2384
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.1666317	9.054475	0.0229637	20.21072
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.1656442	9.00233	0.0234273	20.2384
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.1660599	9.024262	0.0229247	20.21072
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.1653854	8.988691	0.0240316	20.2384
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.1660048	9.021357	0.0215027	20.2384
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.1658782	9.014673	0.0251461	20.2384
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.1654384	8.99148	0.0249451	20.21072
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.1660422	9.023329	0.0216895	20.2384
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.1664222	9.043399	0.0215057	20.2384
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.1641212	8.9222	0.0227709	20.21072
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.1651734	8.977521	0.0203813	20.21072
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.1658191	9.011557	0.0206046	20.2384
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.235741	13.078	0.0704601	19.55288
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.2357282	13.07719	0.0745509	19.55288
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.2352258	13.04529	0.0737741	19.55288
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.2367312	13.14101	0.0725158	19.52575
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.2365305	13.12823	0.070015	19.52575
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.2344858	12.99835	0.0740943	19.52575
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.2357402	13.07795	0.0712969	19.52575
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.2367361	13.14133	0.0730028	19.52575
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.2365991	13.1326	0.07325	19.52575
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.2425287	13.51297	0.0750093	19.49859
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.2495558	13.97076	0.0787962	19.49859
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.2689736	15.27543	0.0928546	19.49859
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.2982647	17.35364	0.1099073	19.49859
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.3311774	19.8469	0.1286941	19.49859
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.3723002	23.19719	0.1503073	19.49859

Cuadro 24. Parámetros medidos a los 100 cm de profundidad.

Fecha	Hora	Medición	T. Ambiental (°C)	Humedad	P. Dieléctrica	C. Eléctrica (dS/m)	T. Suelo (°C)
07/02/2024	09:15	1	21.45	0.1706458	9.268	0.0324522	20.26608
07/02/2024	09:20	2	21.70	0.1719367	9.337196	0.0327879	20.26608
07/02/2024	09:25	3	21.88	0.1713023	9.303158	0.0371127	20.26608
07/02/2024	09:30	4	22.05	0.1698532	9.225642	0.0330777	20.2384
07/02/2024	09:35	5	22.04	0.1695983	9.212039	0.0339403	20.26608
07/02/2024	09:40	6	22.03	0.1723976	9.361965	0.0296917	20.26608
07/02/2024	09:45	7	22.11	0.1732451	9.407592	0.0341009	20.2384
07/02/2024	09:50	8	22.17	0.170756	9.273895	0.0335546	20.2384
07/02/2024	09:55	9	22.21	0.1714974	9.31362	0.0348975	20.21072
07/02/2024	10:00	10	22.28	0.1707866	9.275533	0.0377152	20.2384
07/02/2024	10:05	11	22.39	0.1717593	9.327675	0.036949	20.26608
07/02/2024	10:10	12	22.45	0.1716022	9.31924	0.0340627	20.26608
07/02/2024	10:15	13	22.50	0.1714001	9.308402	0.0335159	20.2384
07/02/2024	10:20	14	22.60	0.1712819	9.302065	0.034112	20.2384
07/02/2024	10:25	15	22.62	0.1714344	9.310242	0.0312747	20.2384
07/02/2024	10:30	16	22.22	0.1724077	9.362506	0.0315846	20.2384
07/02/2024	10:35	17	21.99	0.1707315	9.272587	0.0341523	20.2384
07/02/2024	10:40	18	22.03	0.1716687	9.322814	0.0351338	20.2384
07/02/2024	10:45	19	22.10	0.1725171	9.36839	0.0336341	20.2384
07/02/2024	10:50	20	21.99	0.1715894	9.318555	0.0344549	20.2384
07/02/2024	10:55	21	22.04	0.1698571	9.225853	0.0324686	20.21072
07/02/2024	11:00	22	22.22	0.1718659	9.333396	0.0359139	20.26608
07/02/2024	11:05	23	22.35	0.1717314	9.326176	0.0325757	20.21072
07/02/2024	11:10	24	22.40	0.1719039	9.335434	0.034032	20.2384
07/02/2024	11:15	25	22.38	0.1724161	9.36296	0.0350257	20.2384
08/02/2024	10:20	26	25.45	0.252825	14.18634	0.1022336	19.49859
08/02/2024	10:25	27	25.94	0.2541768	14.27596	0.1041888	19.49859
08/02/2024	10:30	28	26.21	0.2522948	14.15127	0.1032689	19.49859
08/02/2024	10:35	29	26.36	0.2507611	14.05005	0.1022422	19.49859
08/02/2024	10:40	30	26.58	0.252848	14.18786	0.1032754	19.49859
08/02/2024	10:45	31	26.70	0.2509510	14.06256	0.1005953	19.47146
08/02/2024	10:50	32	26.80	0.2518658	14.12292	0.1012461	19.49859
08/02/2024	10:55	33	26.89	0.2542992	14.28409	0.1008416	19.44436
08/02/2024	11:00	34	26.76	0.2535927	14.2372	0.1009165	19.47146
08/02/2024	11:05	35	26.56	0.2526306	14.17347	0.1032753	19.47146
08/02/2024	11:10	36	26.30	0.2541646	14.27515	0.1039965	19.47146
08/02/2024	11:15	37	26.54	0.2554416	14.36008	0.1022089	19.47146
08/02/2024	11:20	38	26.65	0.2555291	14.3659	0.1078487	19.44436
08/02/2024	11:25	39	26.76	0.2637102	14.91603	0.1064052	19.41729
08/02/2024	11:30	40	26.84	0.5205809	37.20685	0.2560944	19.41729

Figura 75. Humedad en función del tiempo a 5 cm de profundidad.

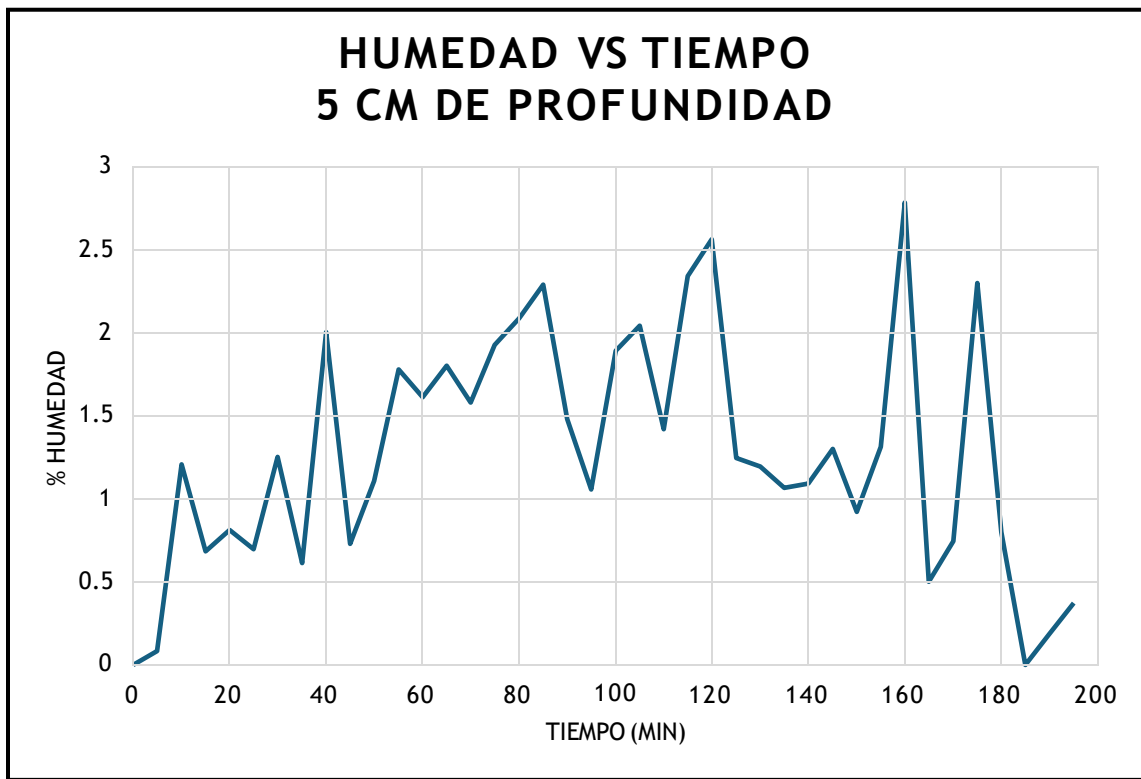


Figura 76. Humedad en función del tiempo a 10 cm de profundidad.

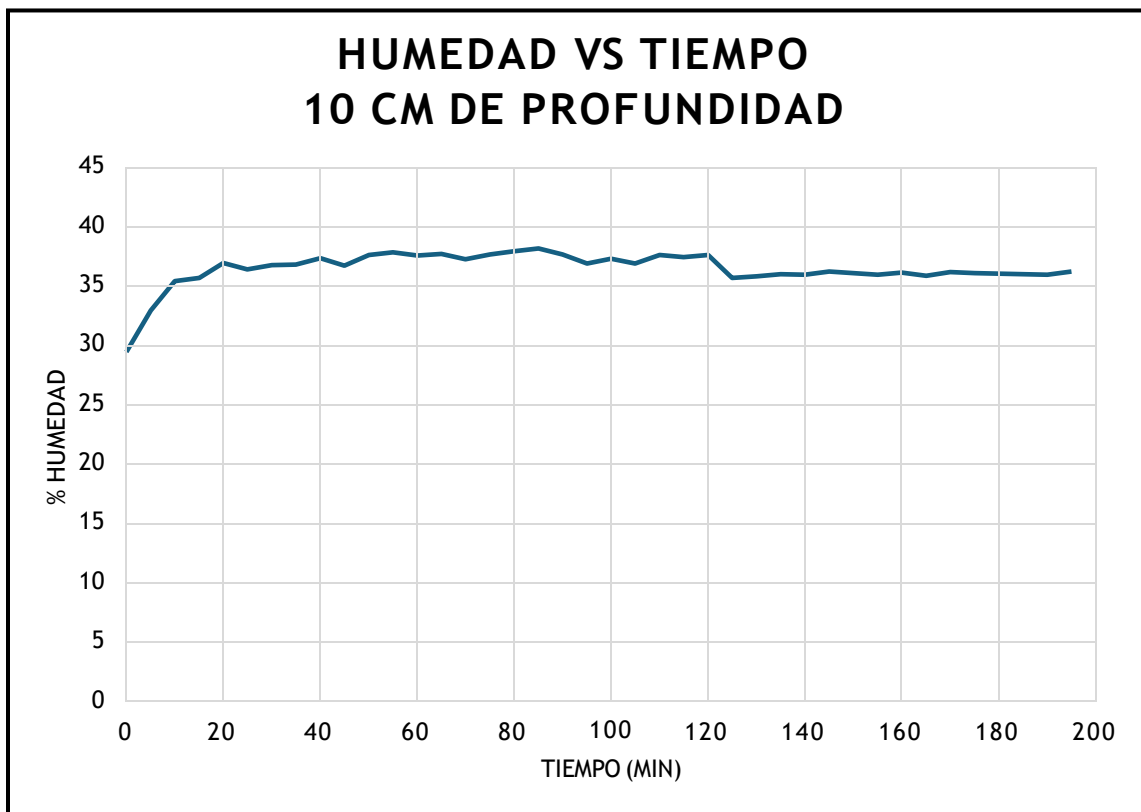


Figura 77. Humedad en función del tiempo a 20 cm de profundidad.

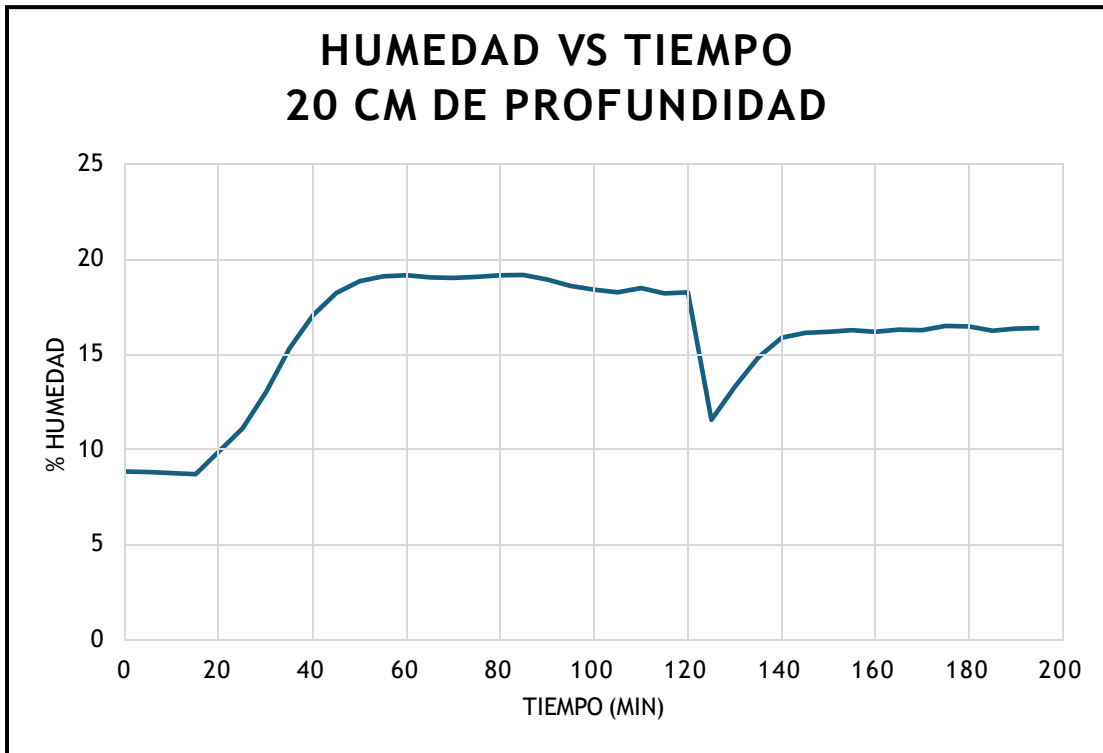


Figura 78. Humedad en función del tiempo a 30 cm de profundidad.

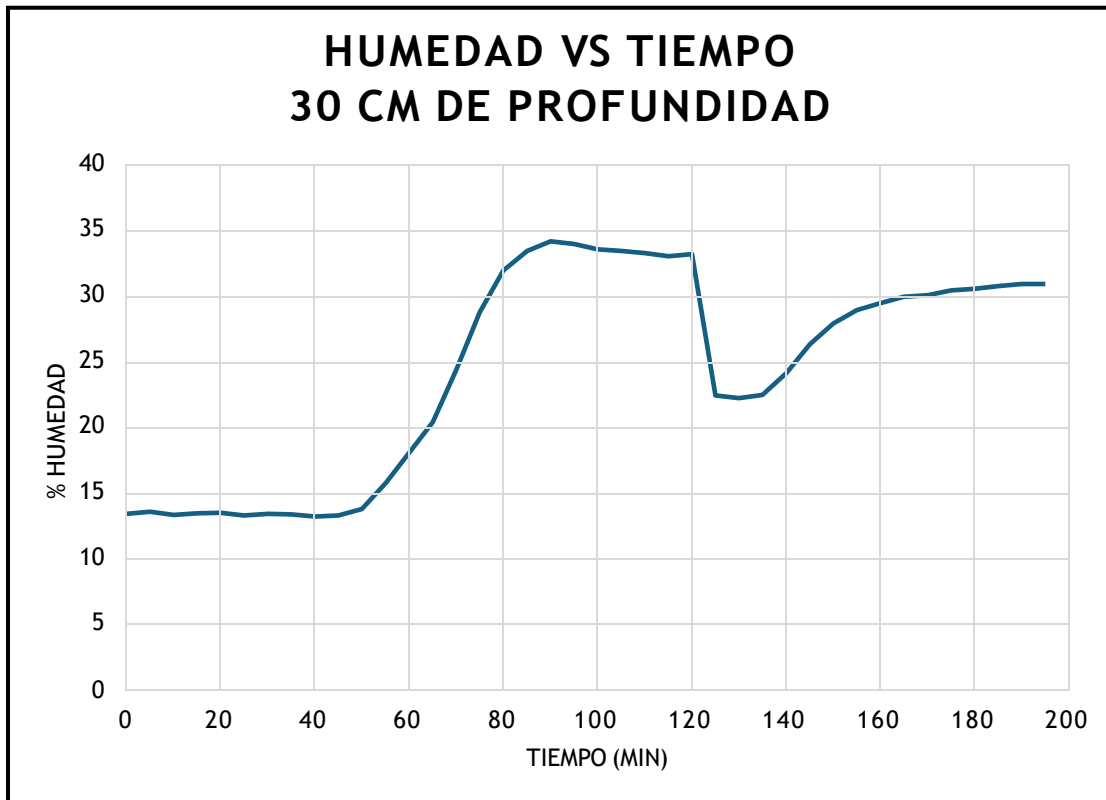


Figura 79. Humedad en función del tiempo a 40 cm de profundidad.

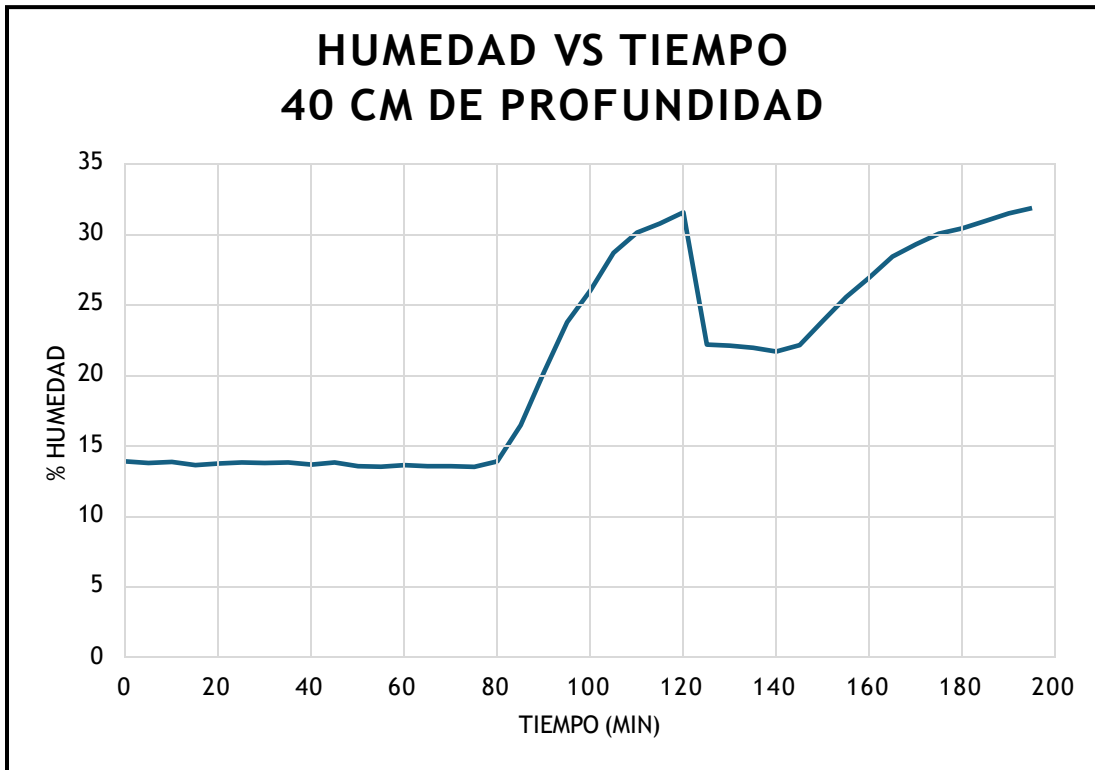


Figura 80. Humedad en función del tiempo a 50 cm de profundidad.

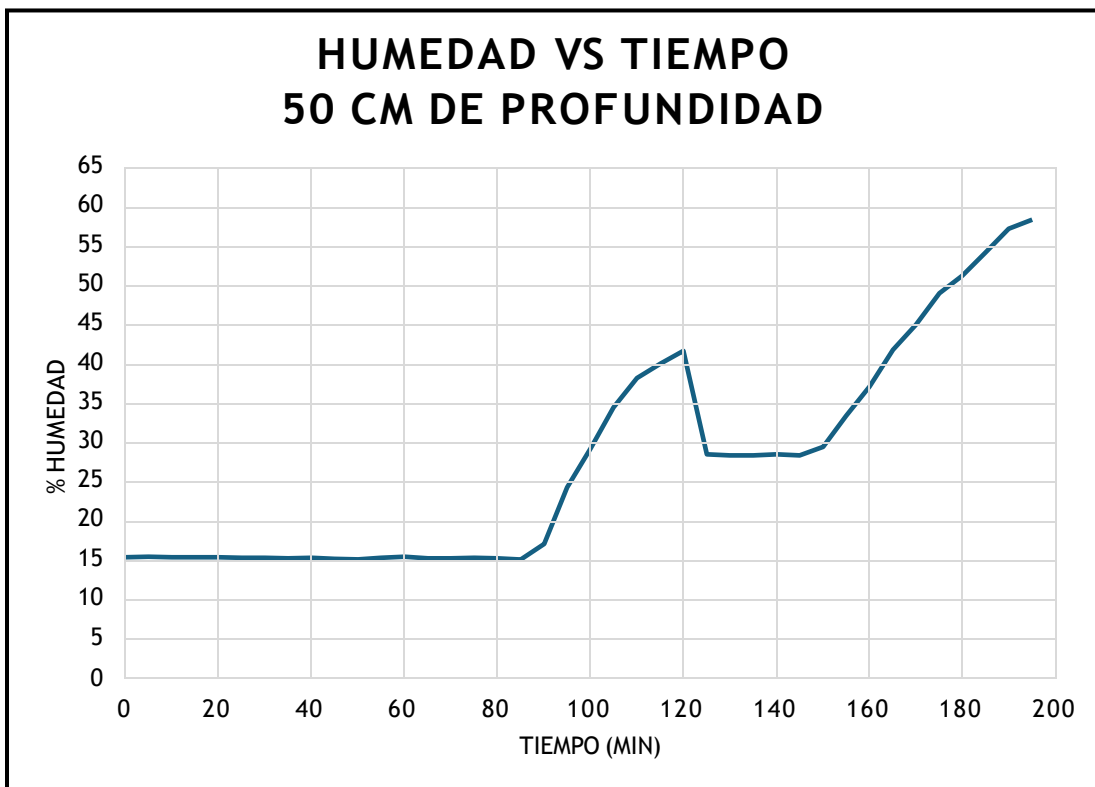


Figura 81. Humedad en función del tiempo a 60 cm de profundidad.

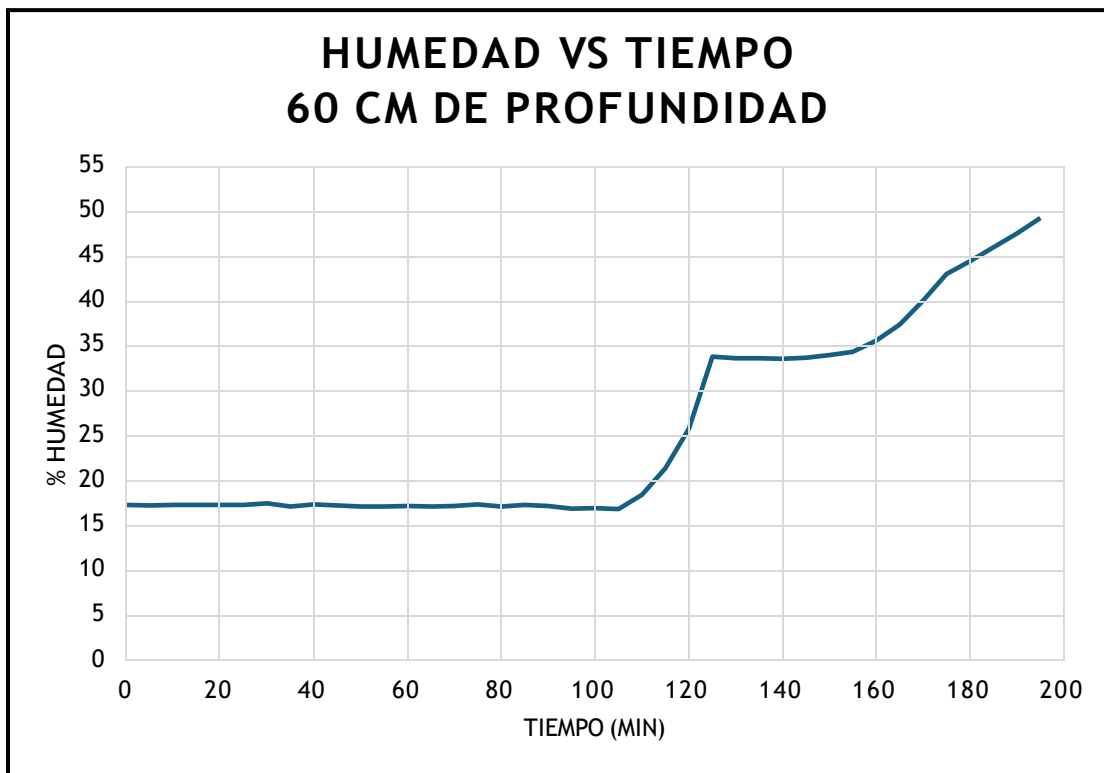


Figura 82. Humedad en función del tiempo a 75 cm de profundidad.

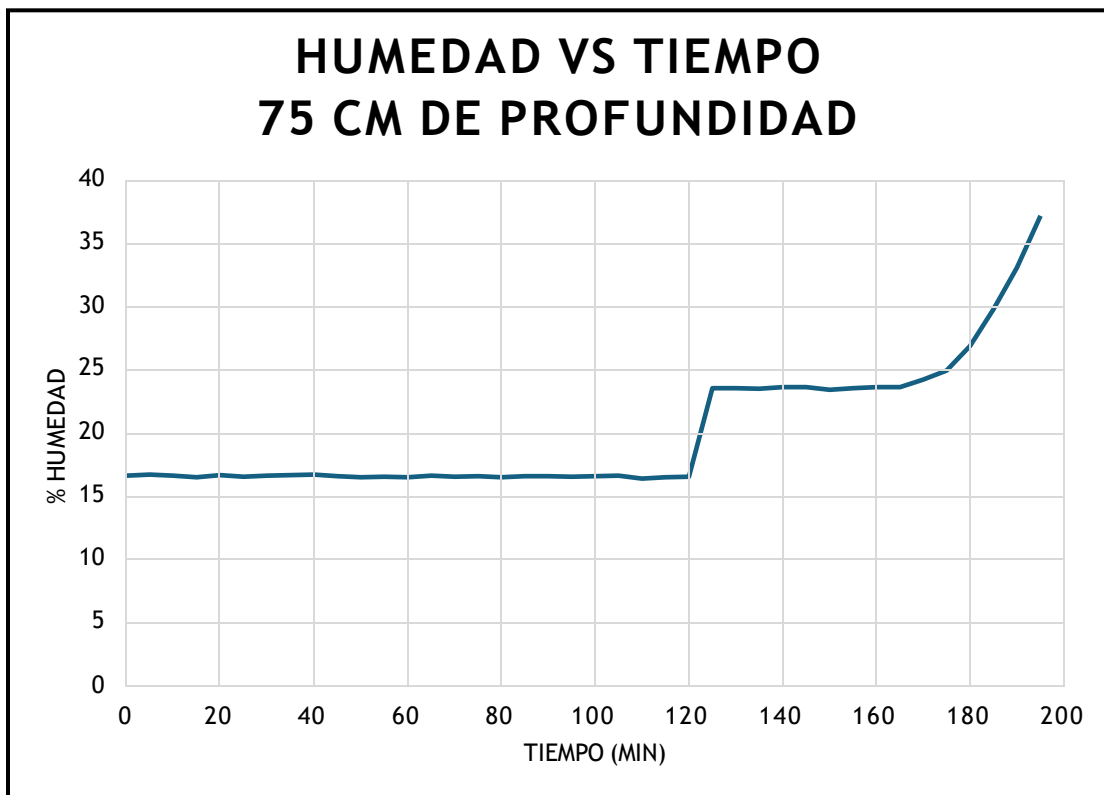
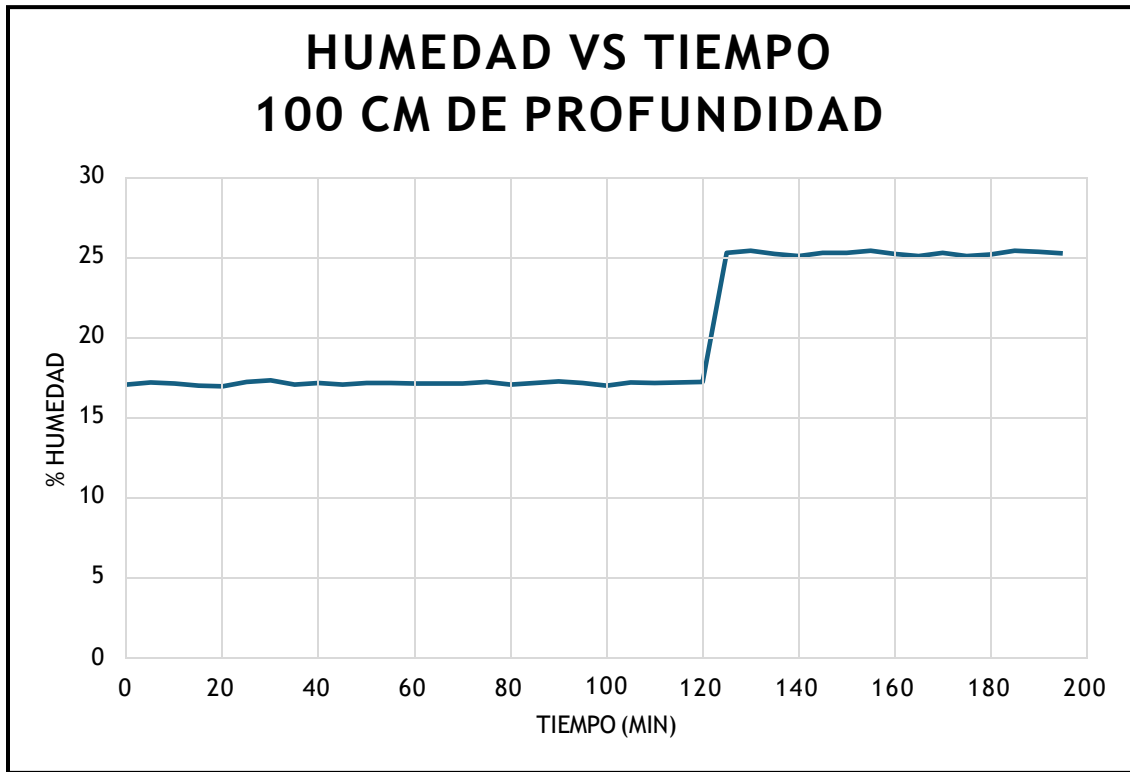


Figura 83. Humedad en función del tiempo a 100 cm de profundidad.



4. Resultados del ensayo de compresión inconfiada

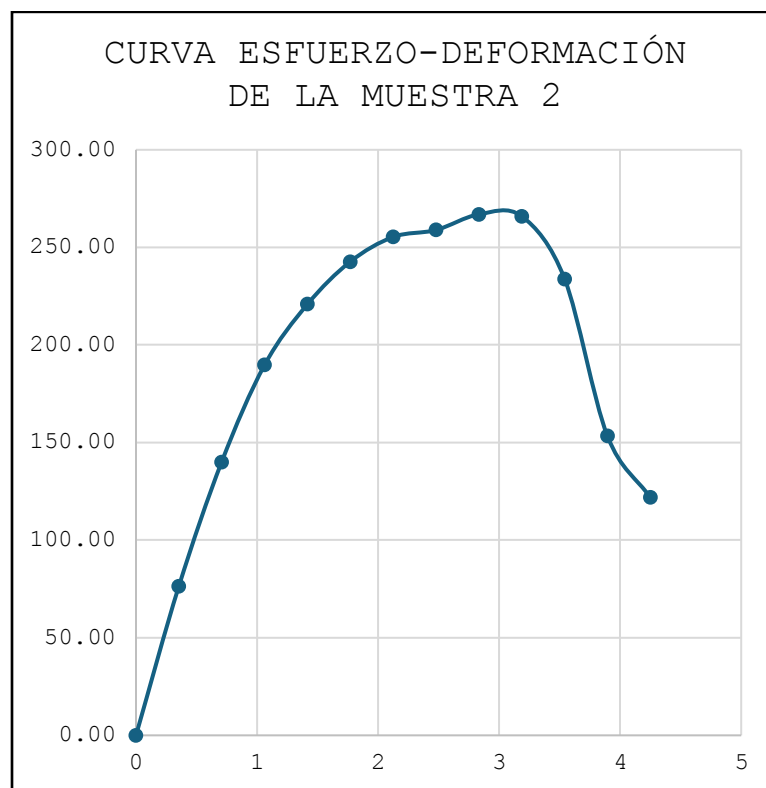
MUESTRA 1

Cuadro 27. Esfuerzos y deformaciones resultantes.						
Deformación Vertical	Deformación Vertical	Deformación Unitaria	Deformación Anillo	Carga	Área Corregida	Esfuerzo
ΔL (0.001")	ΔL (mm)	ϵ (%)	P (0.0001")	P (N)	Ac (mm ²)	qv (KPa)
0	0	0	0.0	0.0000	873.54	0.00
10	0.25	0.35	14.0	66.9489	876.64	76.37
20	0.51	0.71	28.0	123.2779	879.77	140.13
30	0.76	1.06	39.0	167.5364	882.92	189.75
40	1.02	1.42	46.0	195.7009	886.09	220.86
50	1.27	1.77	51.0	215.8184	889.28	242.69
60	1.52	2.12	54.0	227.8889	892.50	255.34
70	1.78	2.48	55.0	231.9124	895.74	258.91
80	2.03	2.83	57.0	239.9594	899.00	266.92
90	2.29	3.19	57.0	239.9594	902.29	265.94
100	2.54	3.54	50.0	211.7949	905.61	233.87
110	2.79	3.90	32.0	139.3719	908.94	153.33
120	3.05	4.25	25.0	111.2074	912.30	121.90

Cuadro 28. Humedad	
Cápsula N°	3
W cap.	114.2
Wt + cap	226.5
Ws + cap	197.2
Ww	112.3
Ws	83.1
w (%)	35.2

Cuadro 29. Relación Vacíos – Saturación	
Wt	112.3
wn	35.2
Ws	83.1
Vo	62.7
ys	1.3
Gs	2.6
e	3.5
Sat	74%

Figura 89. Curva de esfuerzo-deformación para la muestra 1.



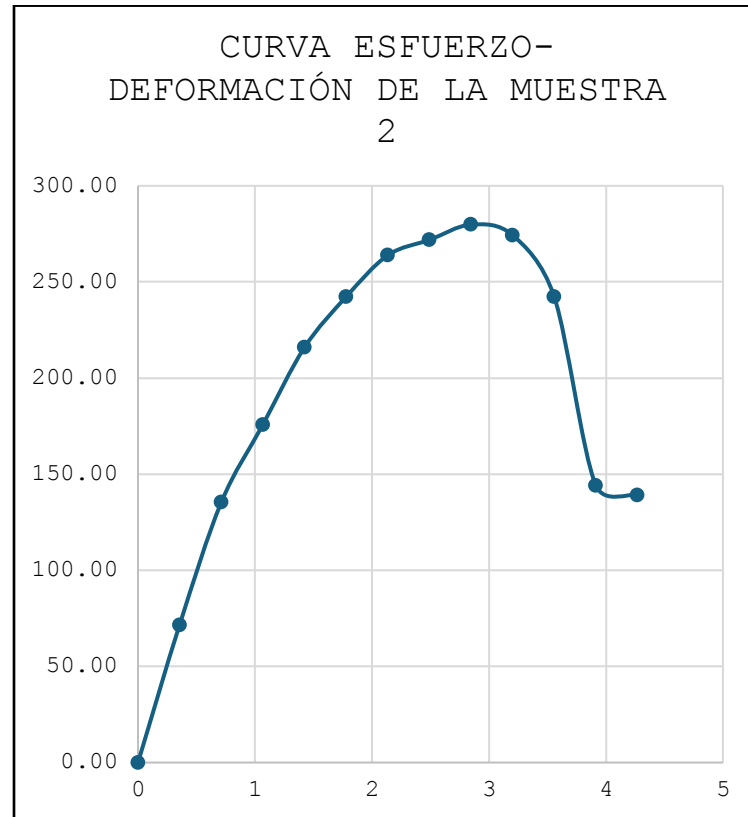
MUESTRA 2

Cuadro 30. Esfuerzos y deformaciones resultantes.						
Deformación Vertical	Deformación Vertical	Deformación Unitaria	Deformación Anillo	Carga	Área Corregida	Esfuerzo
ΔL (0.001")	ΔL (mm)	ϵ (%)	P (0.0001")	P (N)	Ac (mm ²)	qv (KPa)
0	0	0	0.0	0.0000	875.11	0.00
10	0.25	0.36	13.0	62.9254	878.23	71.65
20	0.51	0.71	27.0	119.2544	881.38	135.30
30	0.76	1.07	36.0	155.4659	884.55	175.76
40	1.02	1.42	45.0	191.6774	887.74	215.92
50	1.27	1.78	51.0	215.8184	890.96	242.23
60	1.52	2.13	56.0	235.9359	894.20	263.85
70	1.78	2.49	58.0	243.9829	897.46	271.86
80	2.03	2.85	60.0	252.0299	900.75	279.80
90	2.29	3.20	59.0	248.0064	904.06	274.33
100	2.54	3.56	52.0	219.8419	907.39	242.28
110	2.79	3.91	30.0	131.3249	910.75	144.19
120	3.05	4.27	29.0	127.3014	914.14	139.26

Cuadro 31. Humedad	
Cápsula N°	11
W cap.	105.6
Wt + cap	216.5
Ws + cap	187.2
Ww	110.9
Ws	81.6
w (%)	35.9

Cuadro 32. Relación Vacíos - Saturación	
Wt	110.9
wn	35.9
Ws	81.6
Vo	62.5
ys	1.3
Gs	2.6
e	3.5
Sat	74%

Figura 90. Curva de esfuerzo-deformación para la muestra 2.



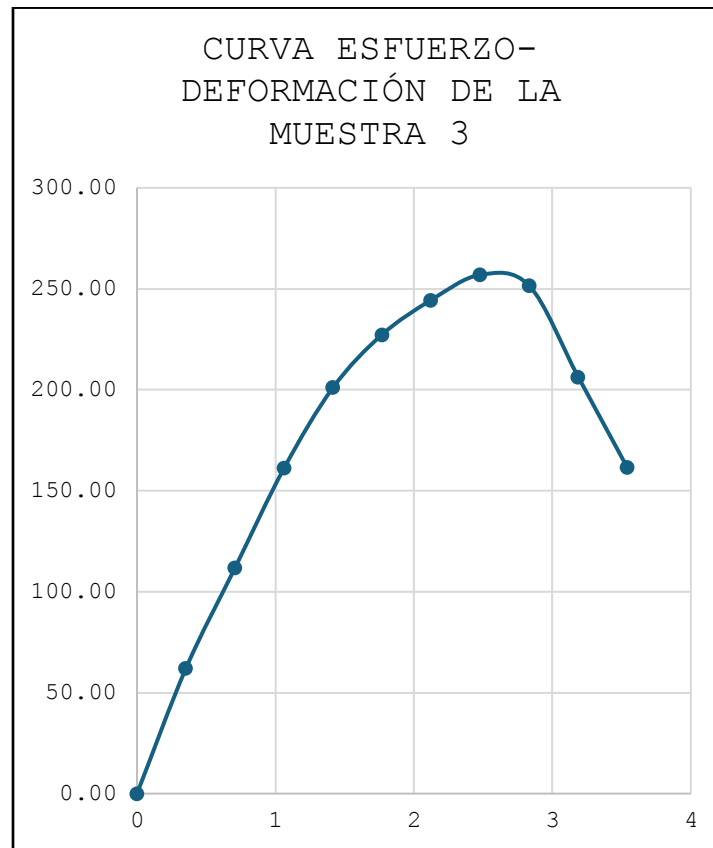
MUESTRA 3

Cuadro 33. Esfuerzos y deformaciones resultantes.						
Deformación Vertical	Deformación Vertical	Deformación Unitaria	Deformación Anillo	Carga	Área Corregida	Esfuerzo
ΔL (0.001")	ΔL (mm)	ϵ (%)	P (0.0001")	P (N)	Ac (mm ²)	qv (KPa)
0	0	0	0.0	0.0000	880.36	0.00
10	0.25	0.35	11.0	54.8784	883.49	62.12
20	0.51	0.71	22.0	99.1369	886.64	111.81
30	0.76	1.06	33.0	143.3954	889.81	161.15
40	1.02	1.42	42.0	179.6069	893.01	201.13
50	1.27	1.77	48.0	203.7479	896.23	227.34
60	1.52	2.12	52.0	219.8419	899.47	244.41
70	1.78	2.48	55.0	231.9124	902.73	256.90
80	2.03	2.83	54.0	227.8889	906.02	251.53
90	2.29	3.19	44.0	187.6539	909.34	206.36
100	2.54	3.54	34.0	147.4189	912.67	161.52

Cuadro 34. Humedad	
Cápsula N°	15
W cap.	103.5
Wt + cap	215.3
Ws + cap	186.0
Ww	111.8
Ws	82.5
w (%)	35.5

Cuadro 35. Relación Vacíos - Saturación	
Wt	111.8
wn	35.5
Ws	82.5
Vo	63.2
ys	1.3
Gs	2.6
e	3.5

Figura 91. Curva de esfuerzo-deformación para la muestra 3.



5. Modelos computacionales del talud con pendiente 60°

Figura 92. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal bajo y calculado por método Bishop Simplificado.

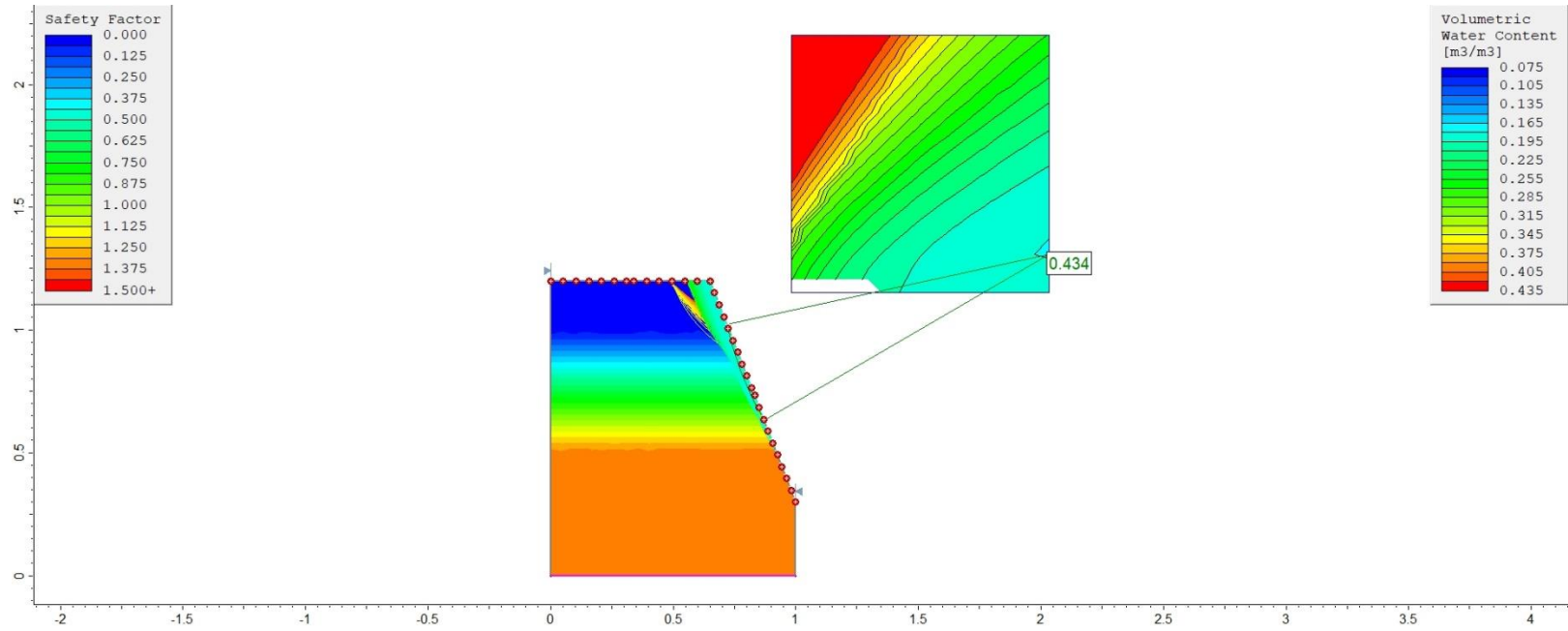


Figura 93. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal bajo y calculado por método Janbú Simplificado.

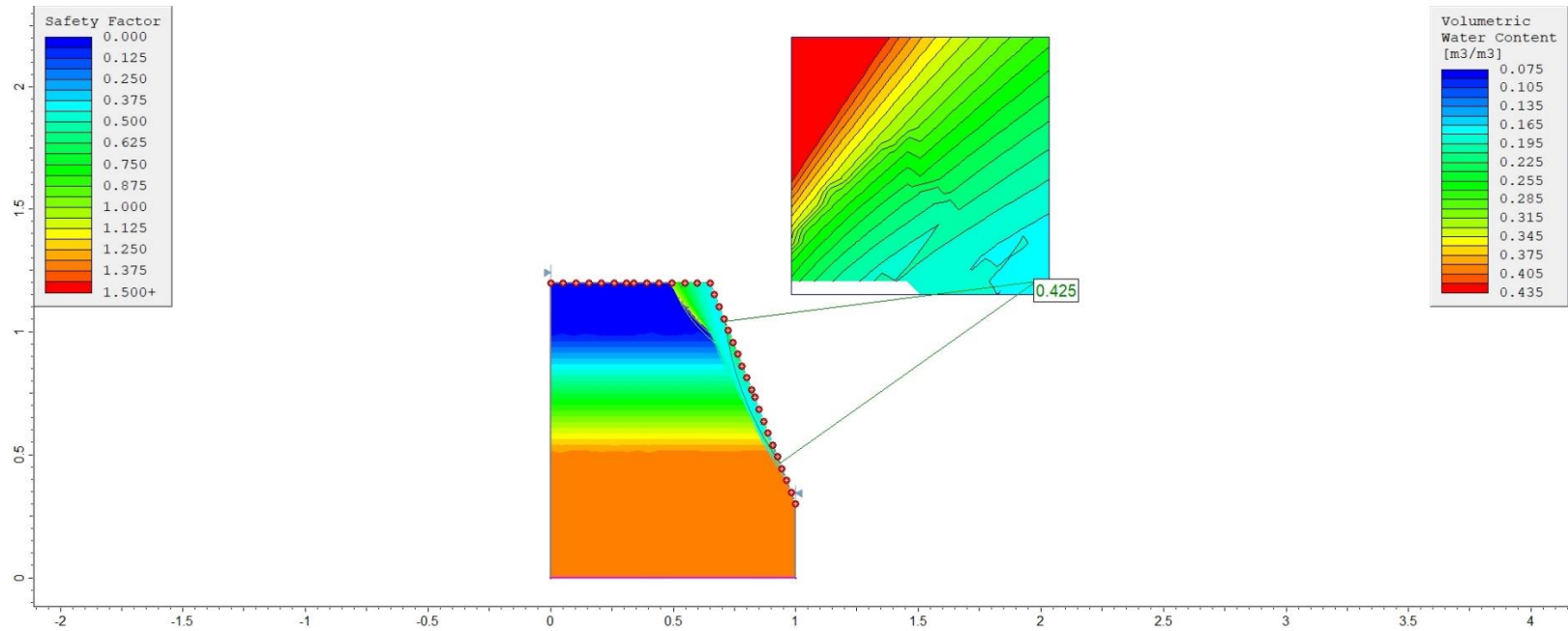


Figura 94. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal bajo y calculado por método de Morgenstern-Price.

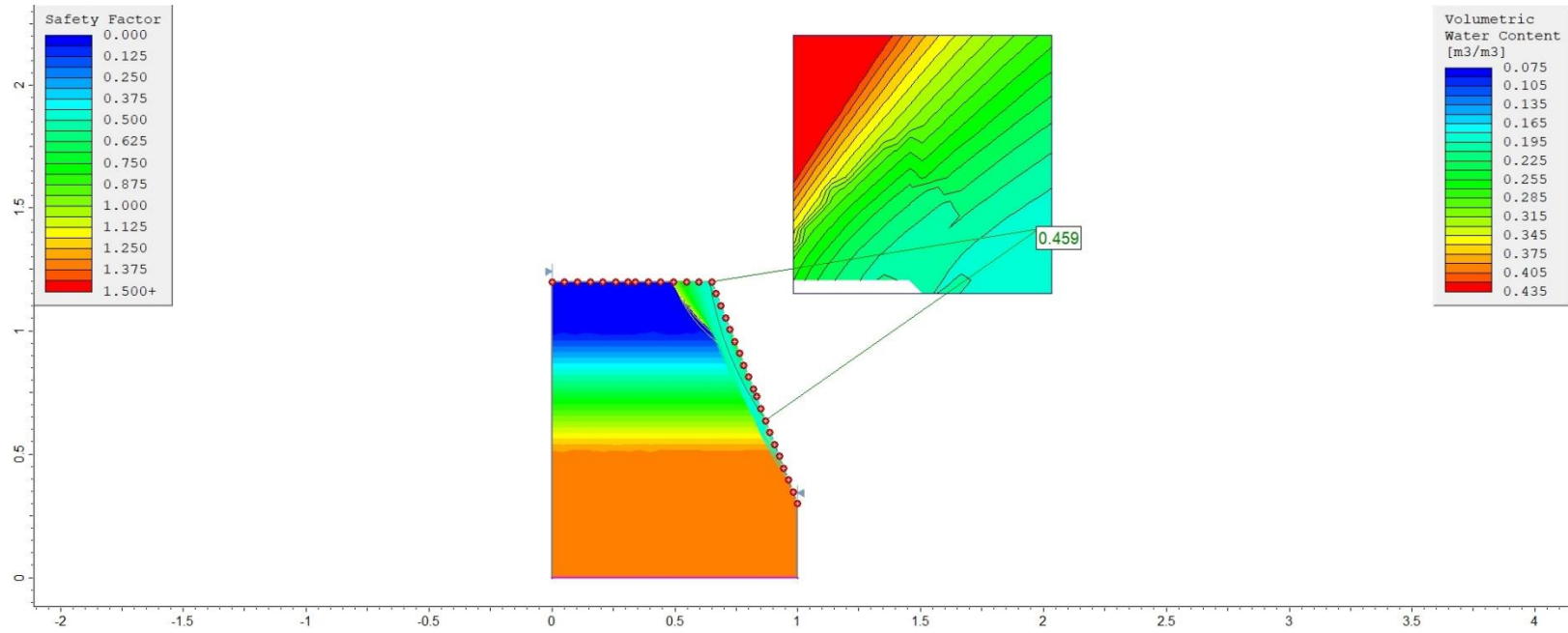


Figura 95. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal medio y calculado por método Bishop Simplificado.

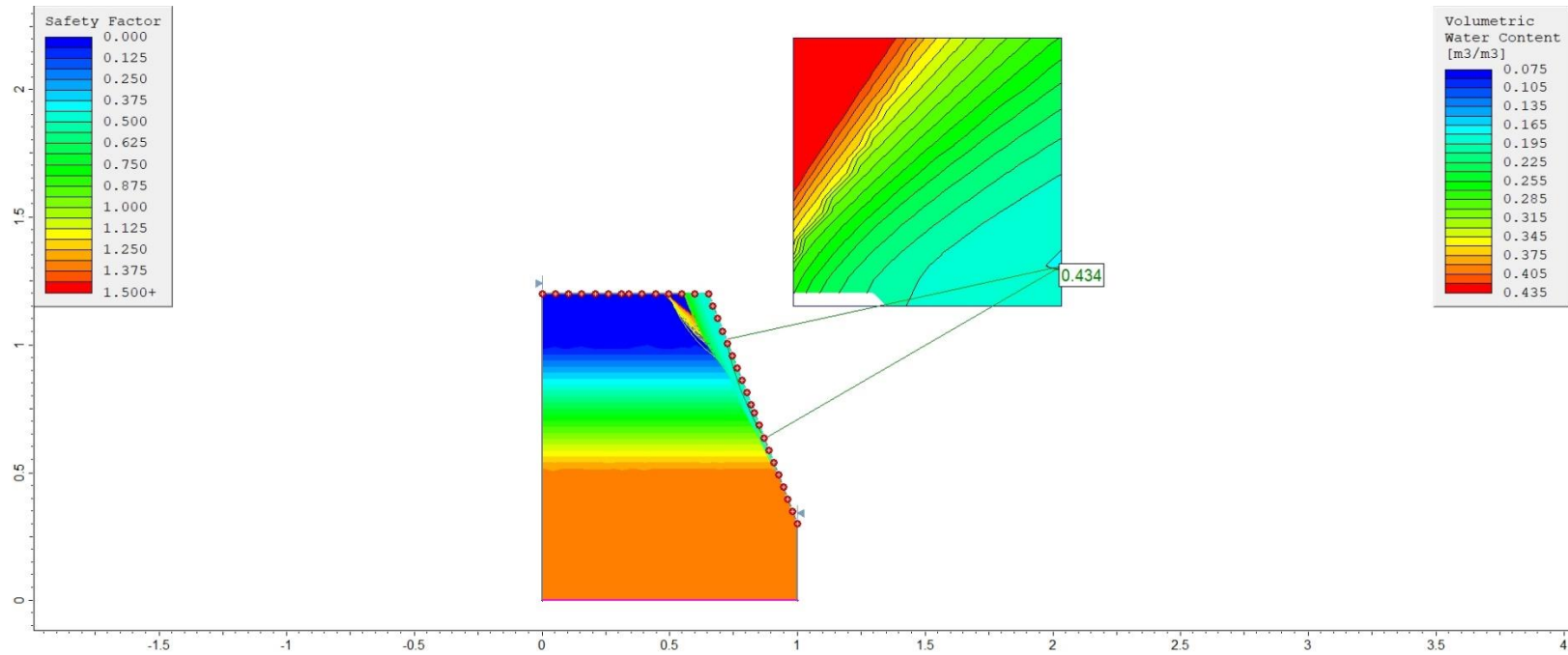


Figura 96. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal medio y calculado por método Janbú Simplificado.

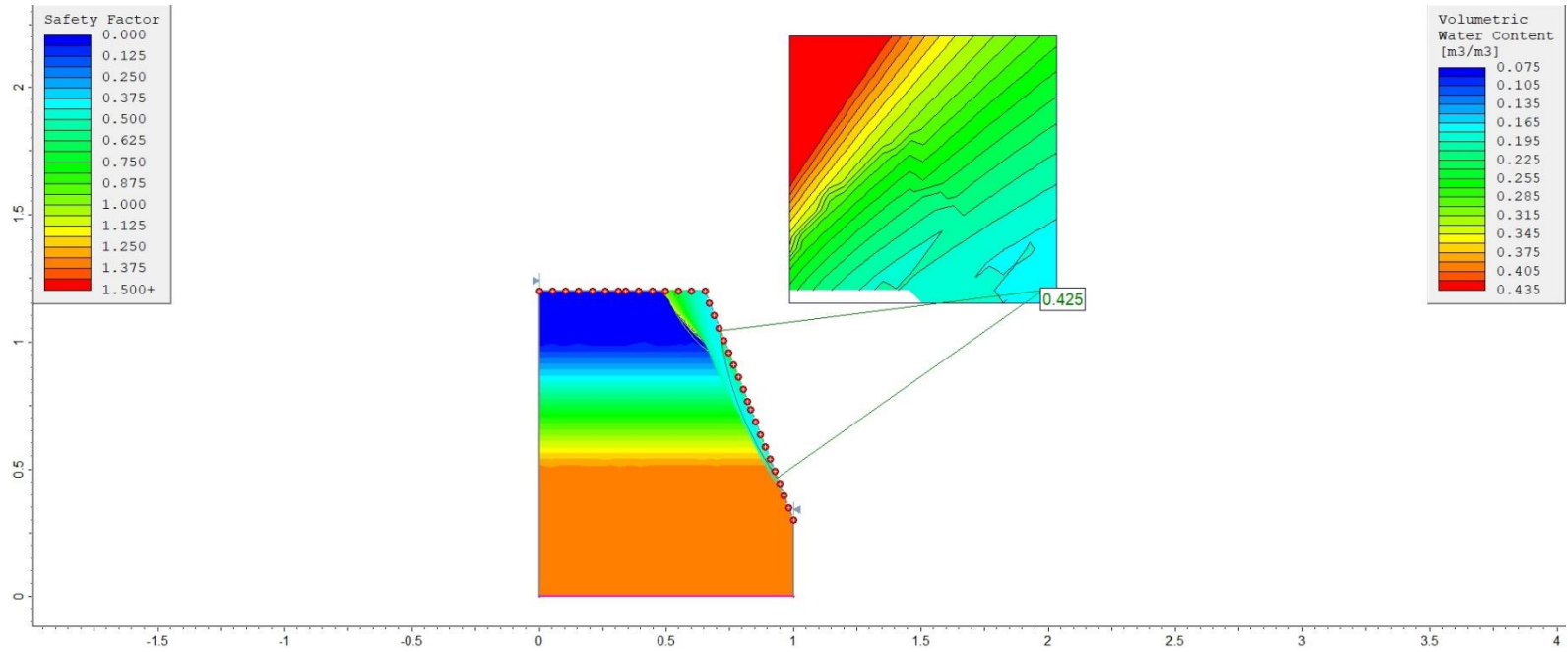


Figura 97. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal medio y calculado por método de Morgenstern-Price.

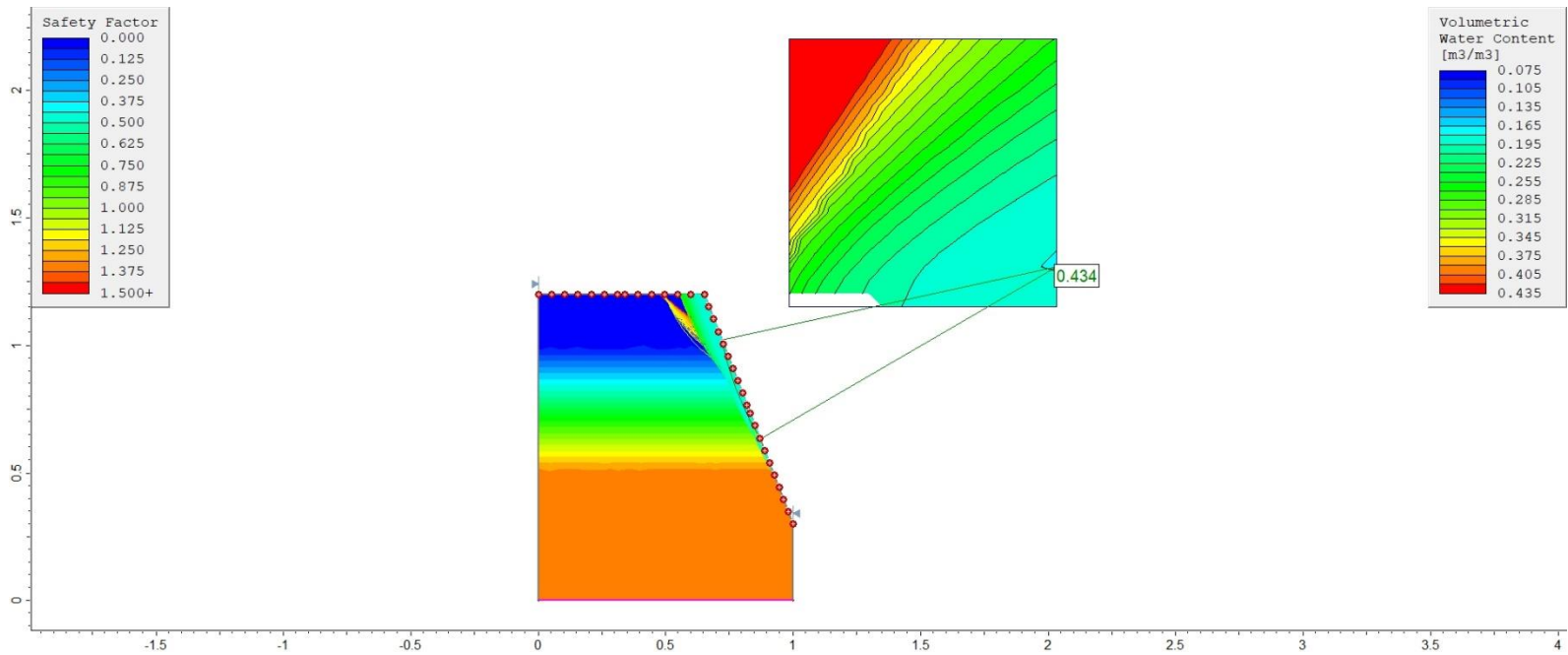


Figura 98. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal alto y calculado por método Bishop Simplificado.

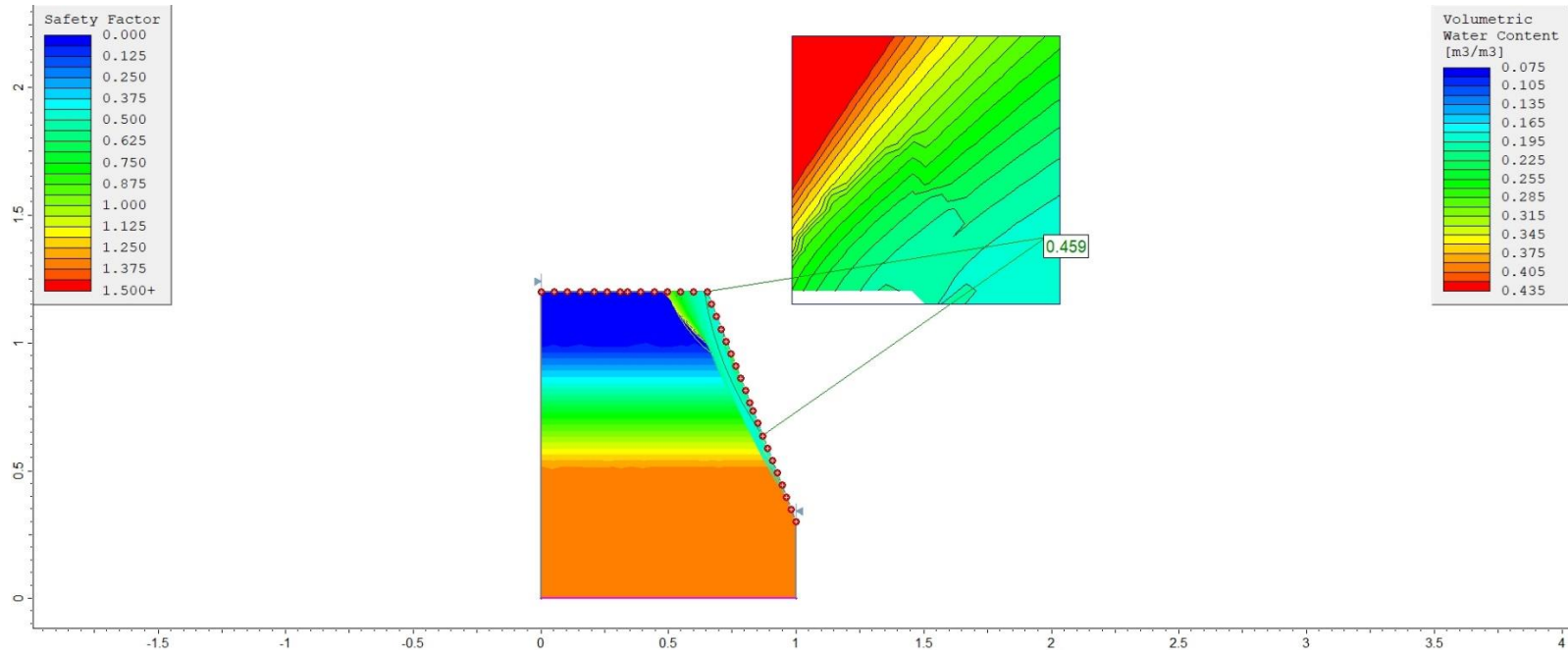


Figura 99. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal alto y calculado por método Janbú Simplificado.

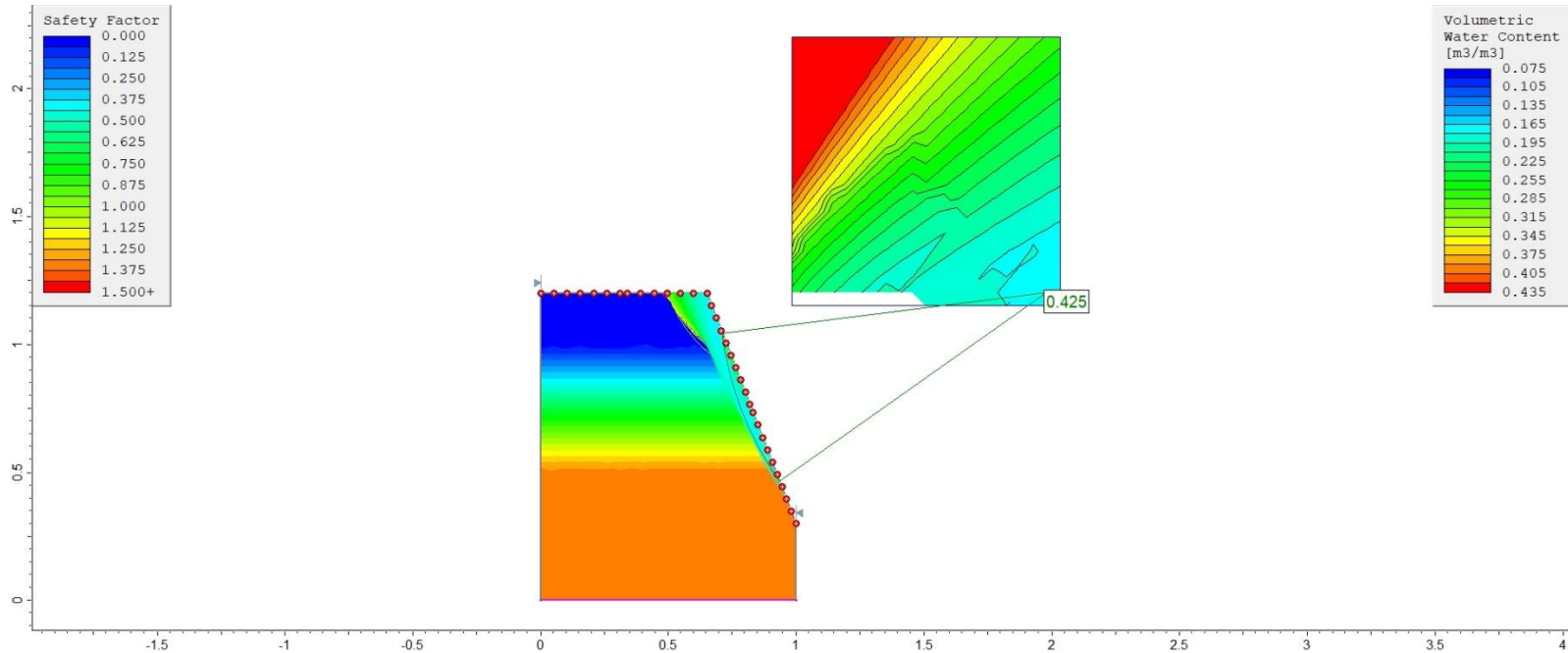


Figura 100. Modelo del talud de pendiente 60° en condición drenada, caudal alto y calculado por método de Morgenstern-Price.

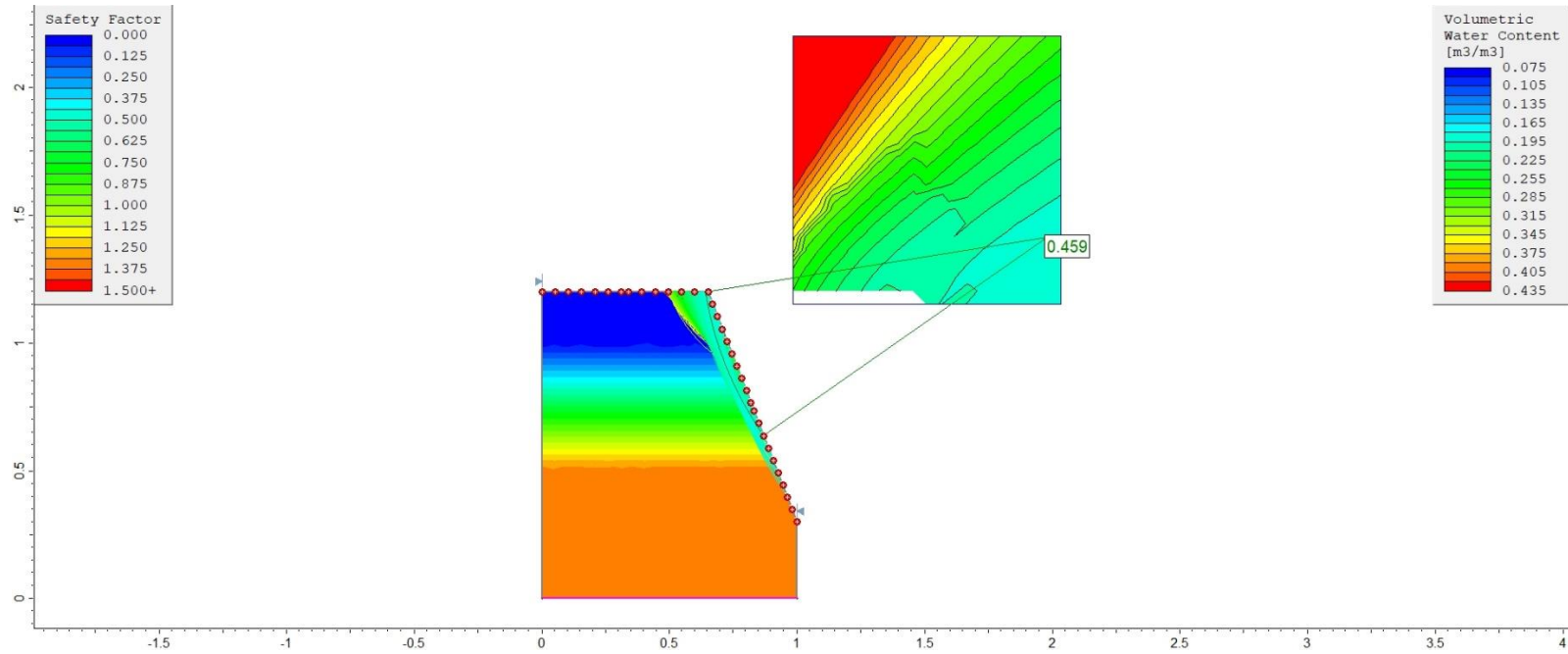


Figura 101. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal bajo y calculado por método Bishop Simplificado.

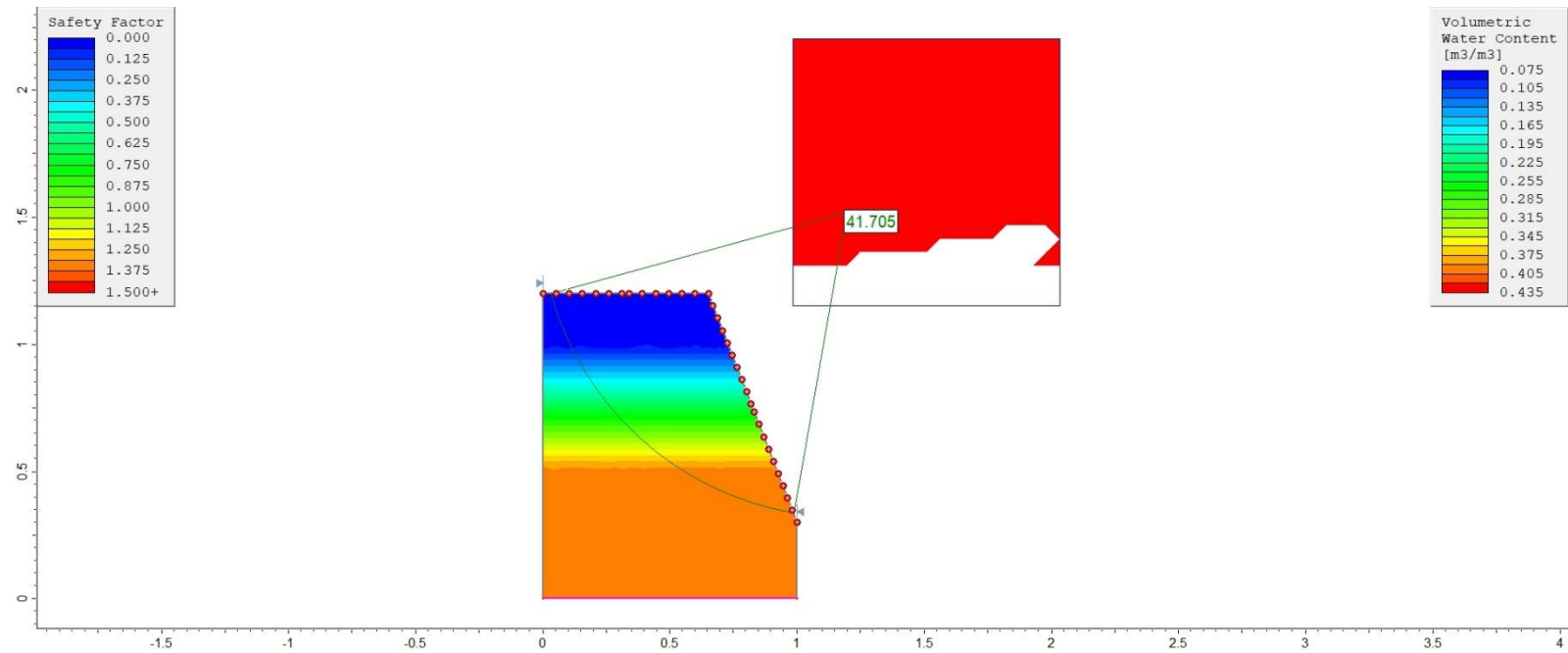


Figura 102. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal bajo y calculado por método Janbú Simplificado.

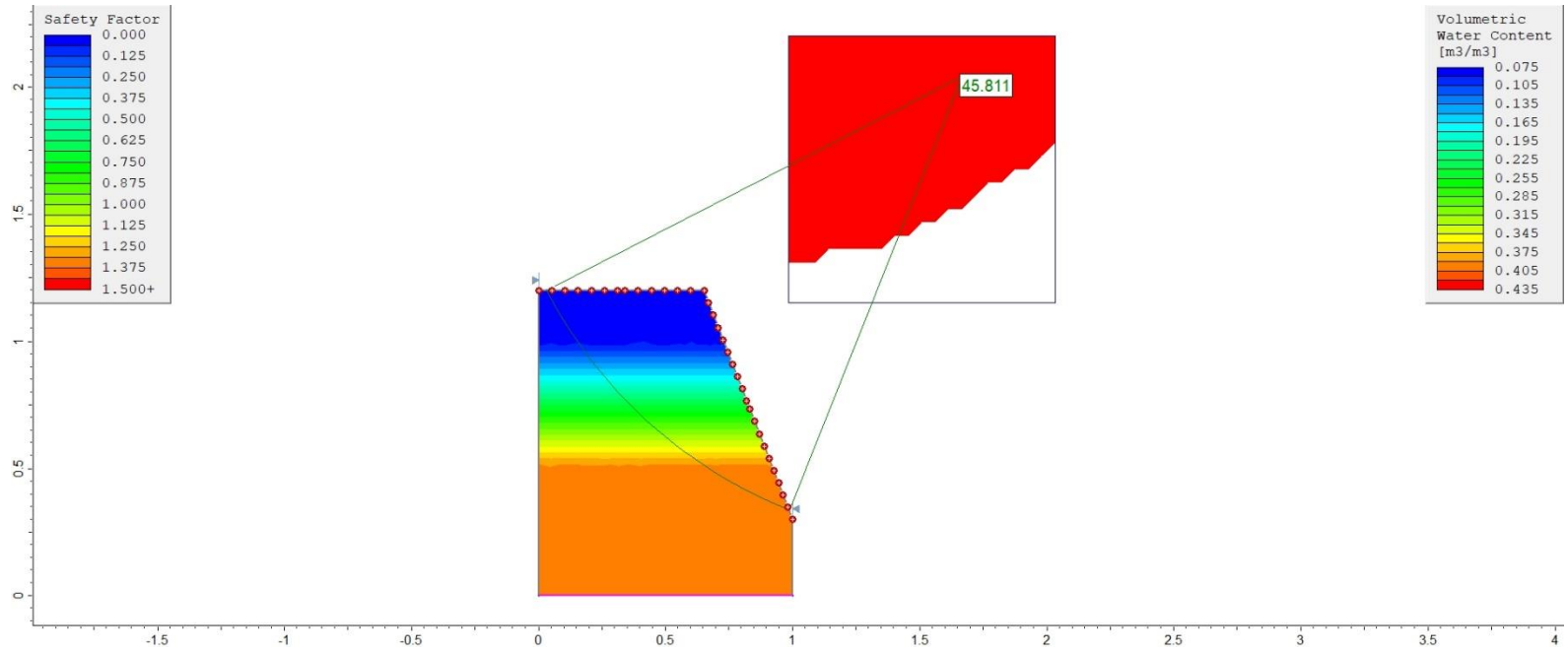


Figura 103. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal bajo y calculado por método Morgenstern-Price.

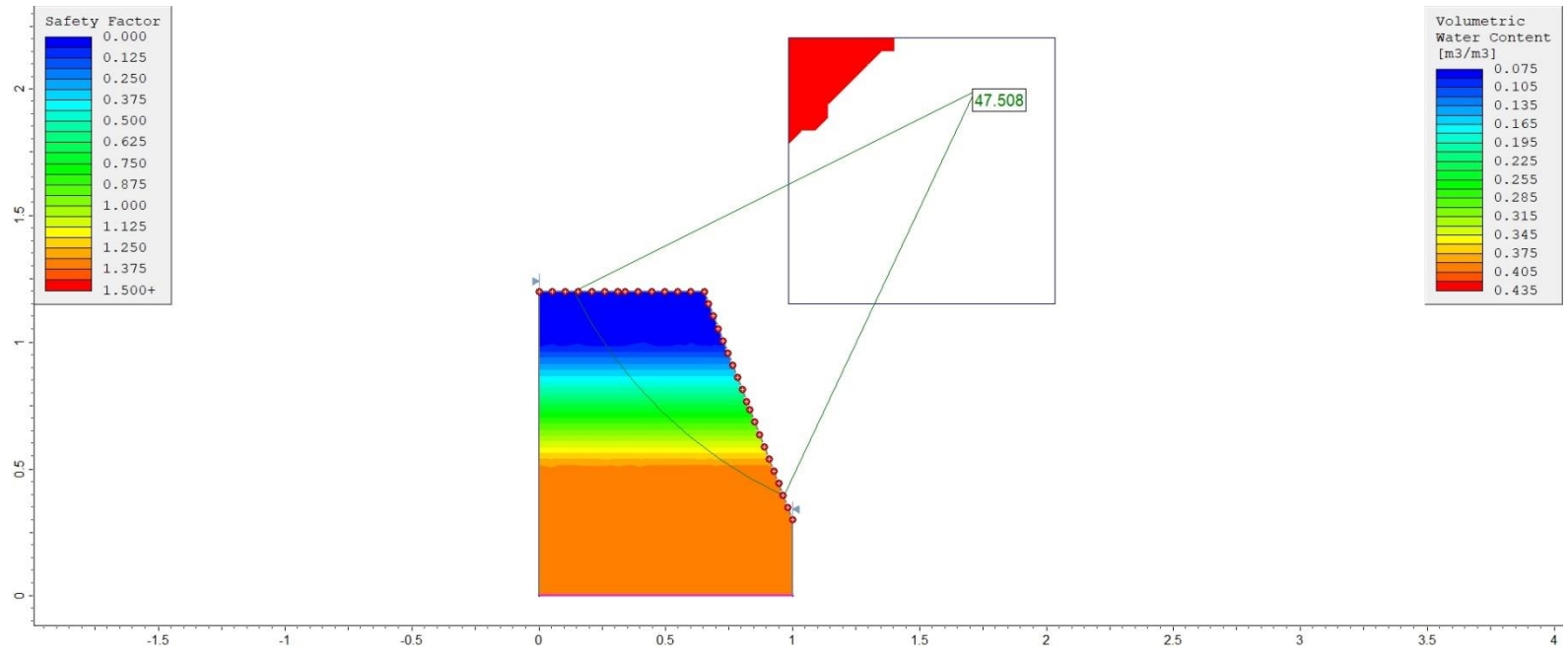


Figura 104. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal medio y calculado por método Bishop Simplificado.

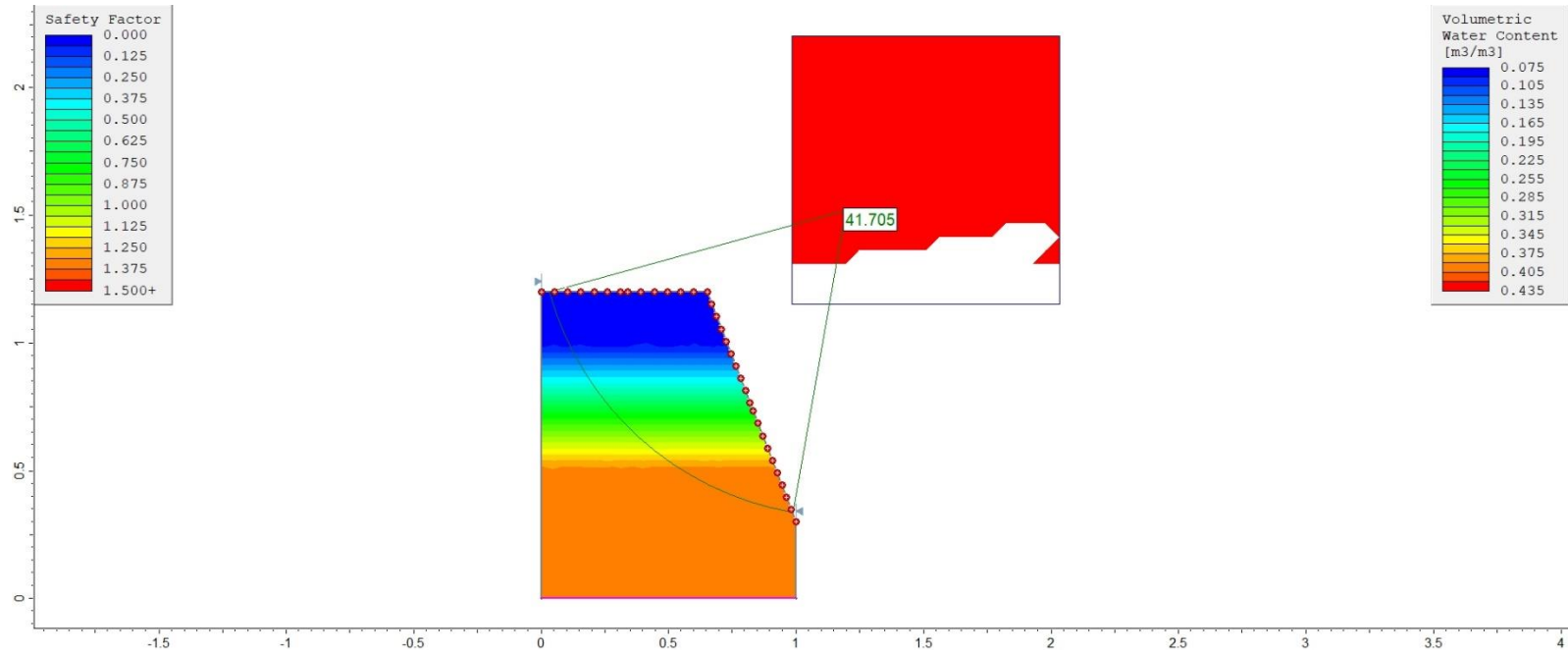


Figura 105. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal medio y calculado por método Janbú Simplificado.

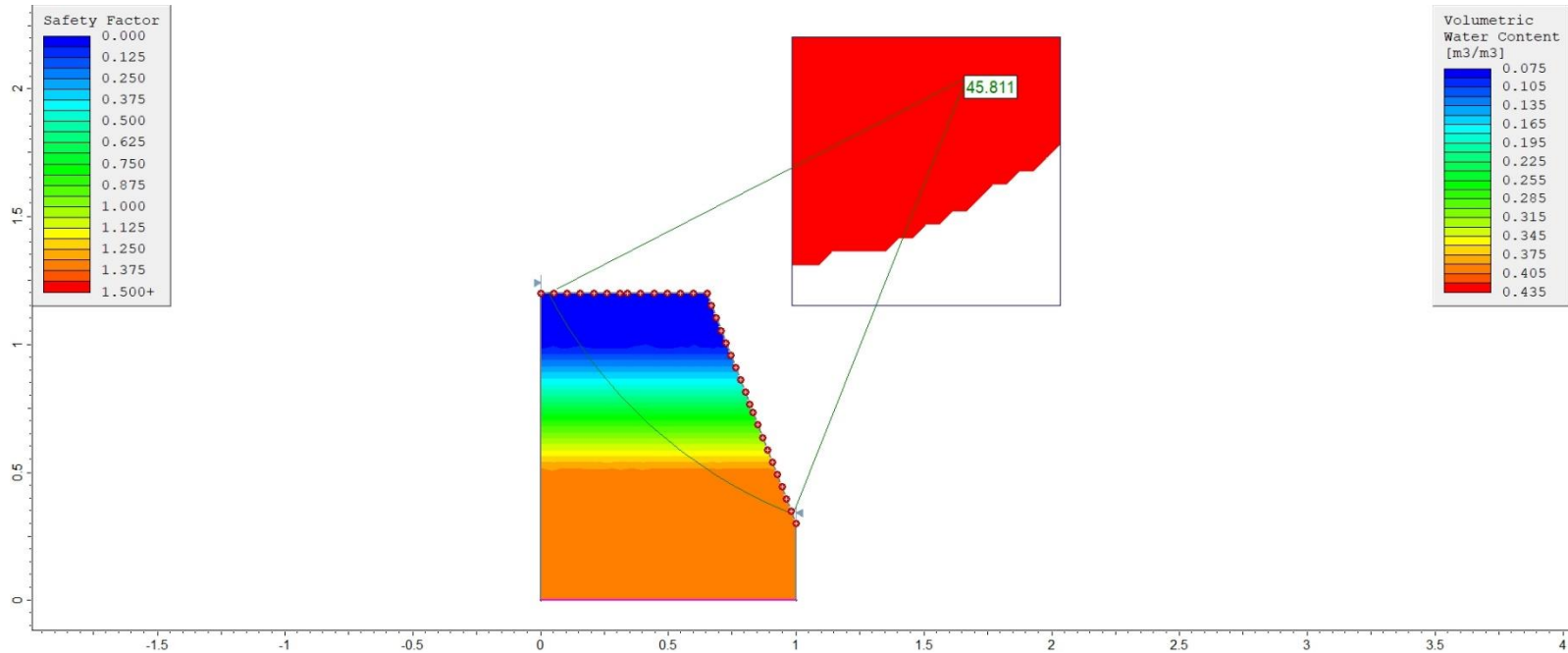


Figura 106. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal medio y calculado por método de Morgenstern-Price.

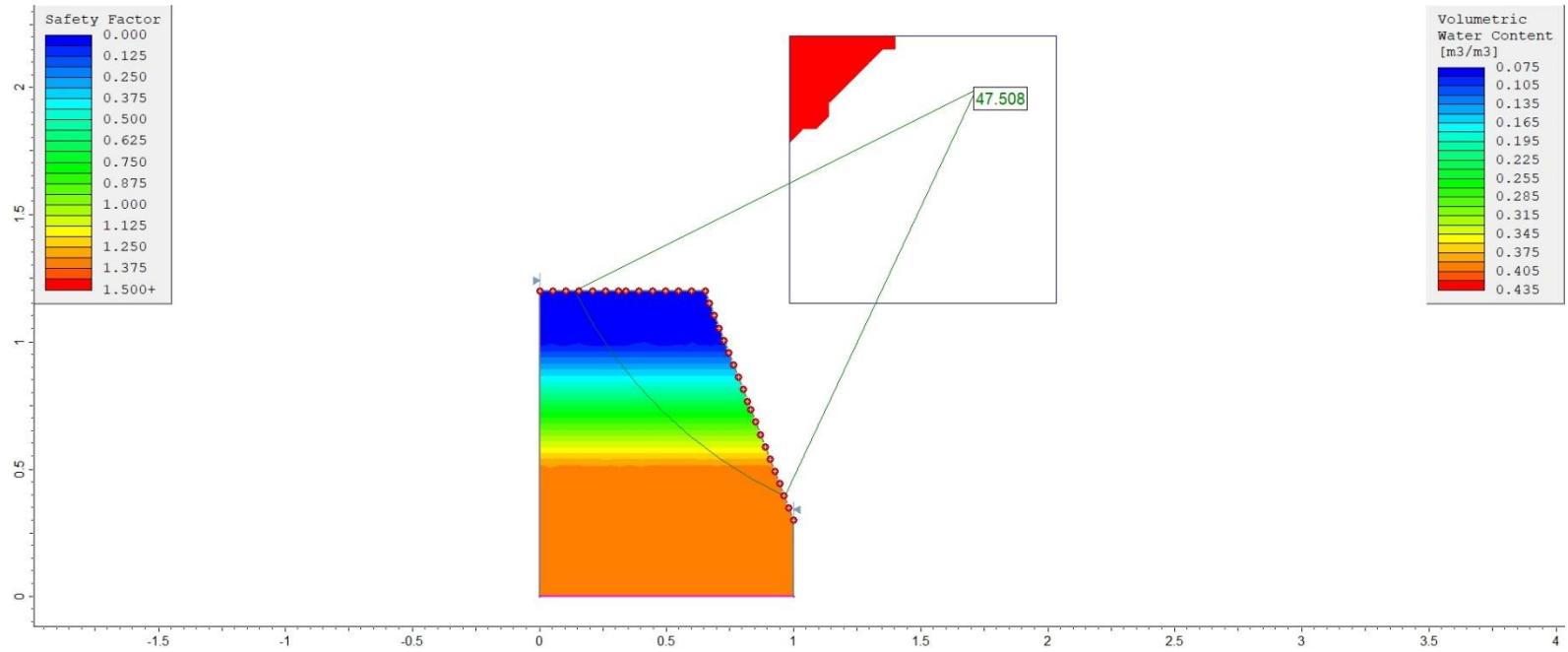


Figura 107. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal alto y calculado por método Bishop Simplificado.

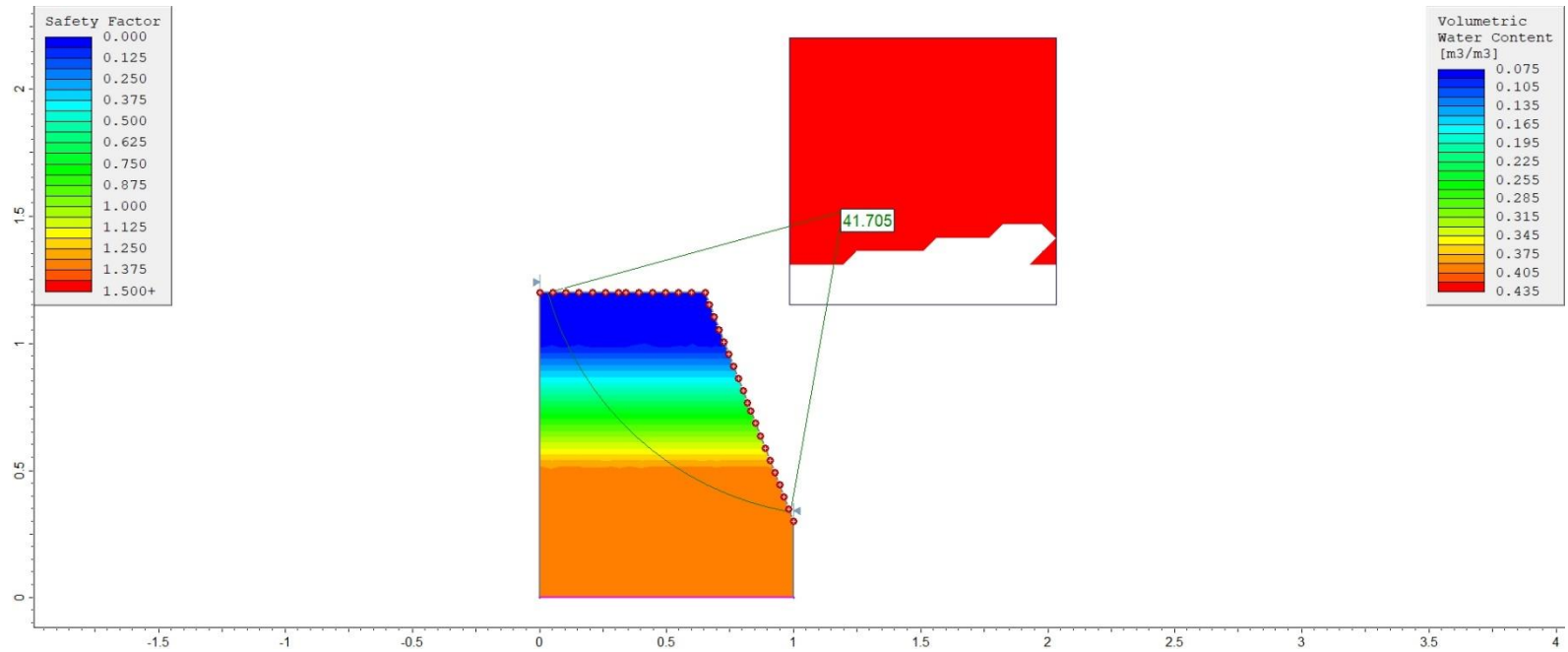


Figura 108. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal alto y calculado por método Janbú Simplificado.

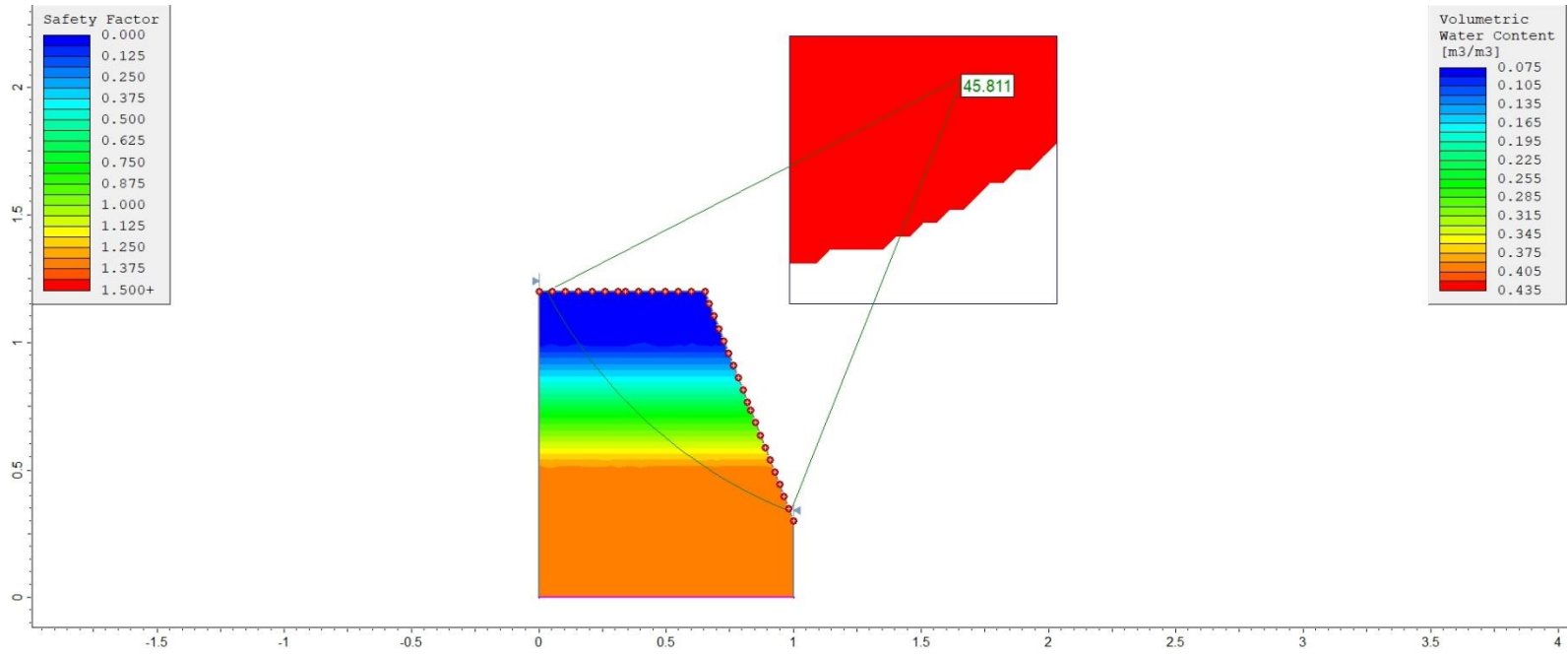
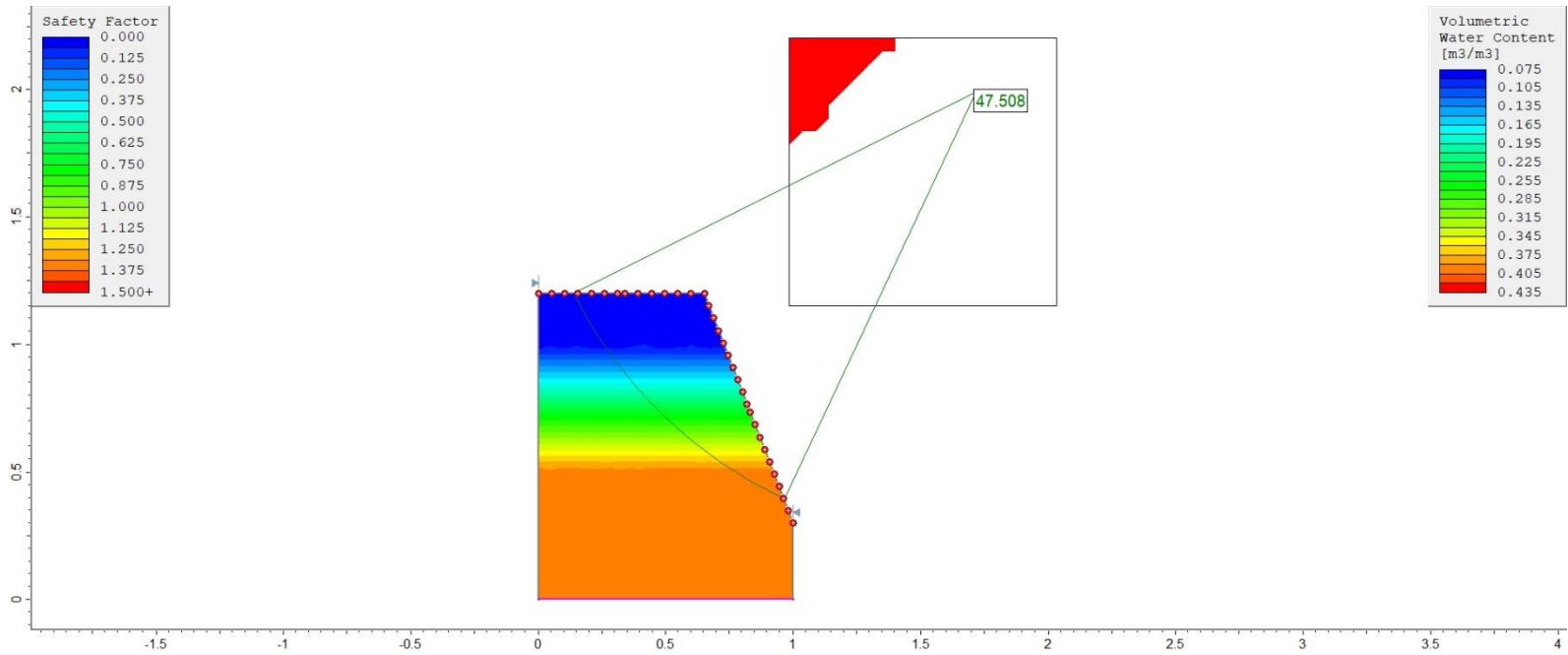


Figura 109. Modelo del talud de pendiente 60° en condición no drenada, caudal alto y calculado por método de Morgenstern-Price.



6. Modelos computacionales del talud con pendiente 90°

Figura 110. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal bajo y calculado por método Bishop Simplificado.

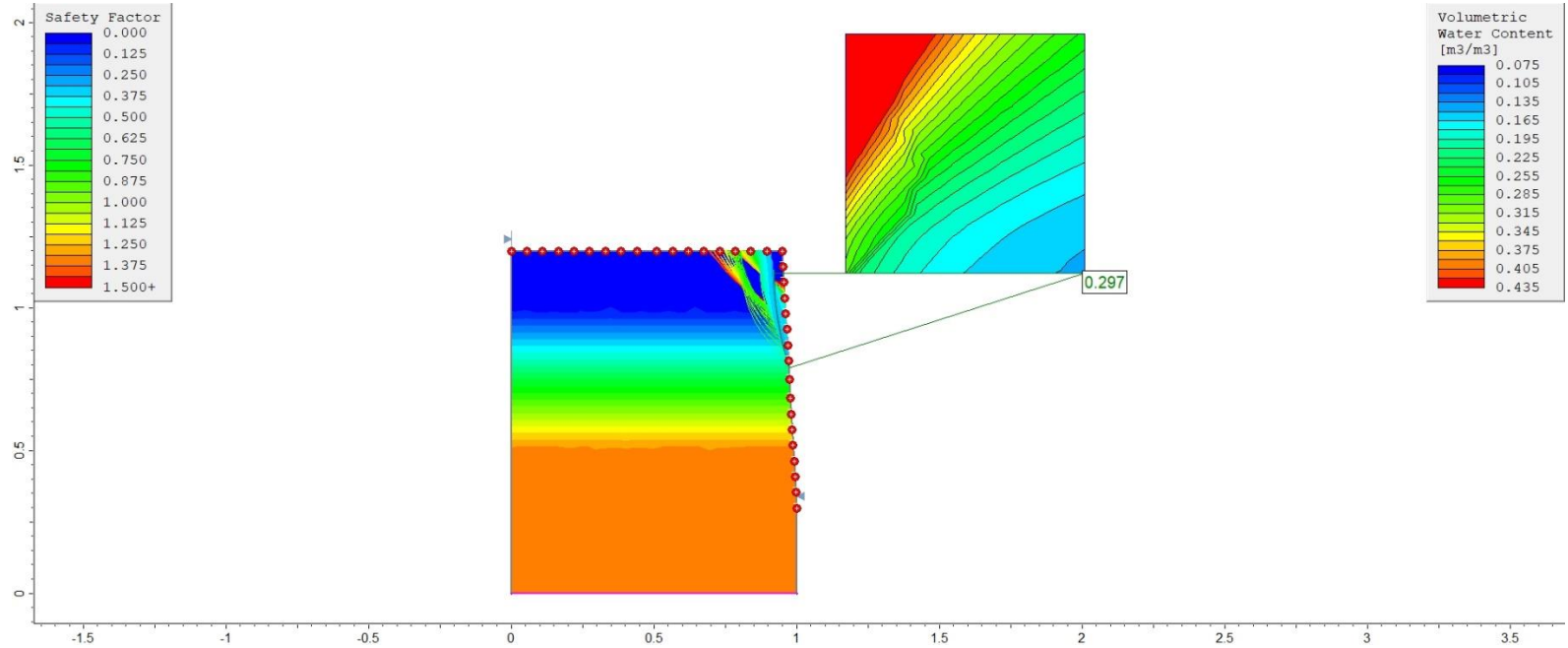


Figura 111. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal bajo y calculado por método Janbú Simplificado.

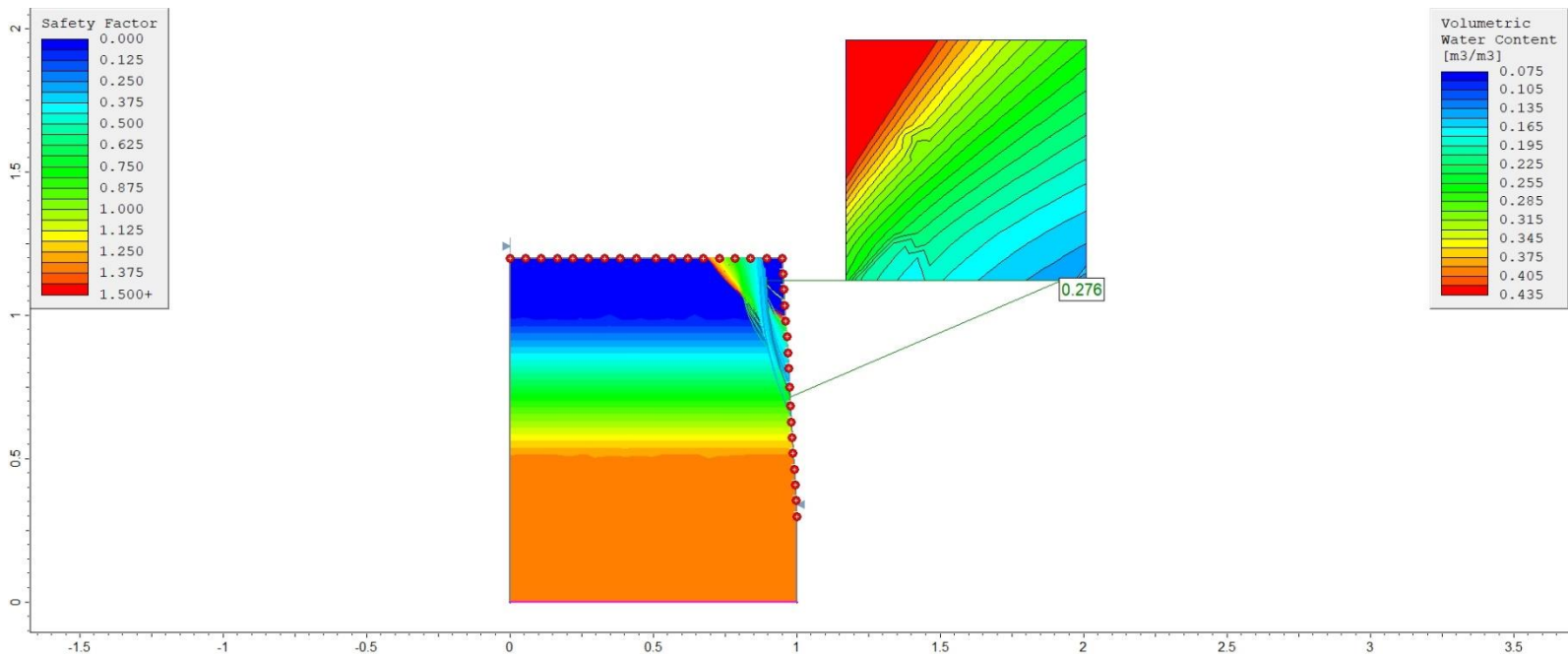


Figura 112. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal bajo y calculado por método de Morgenstern-Price.

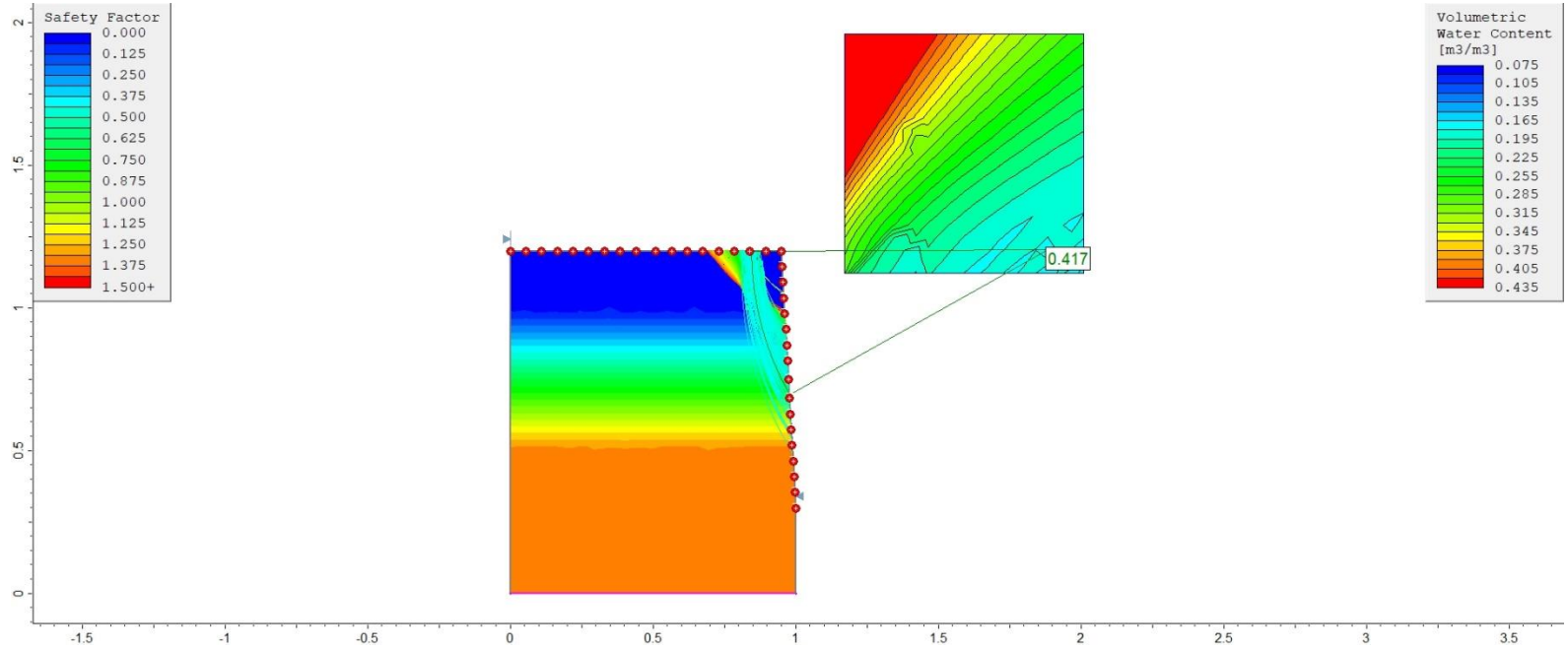


Figura 113. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal medio y calculado por método Bishop Simplificado.

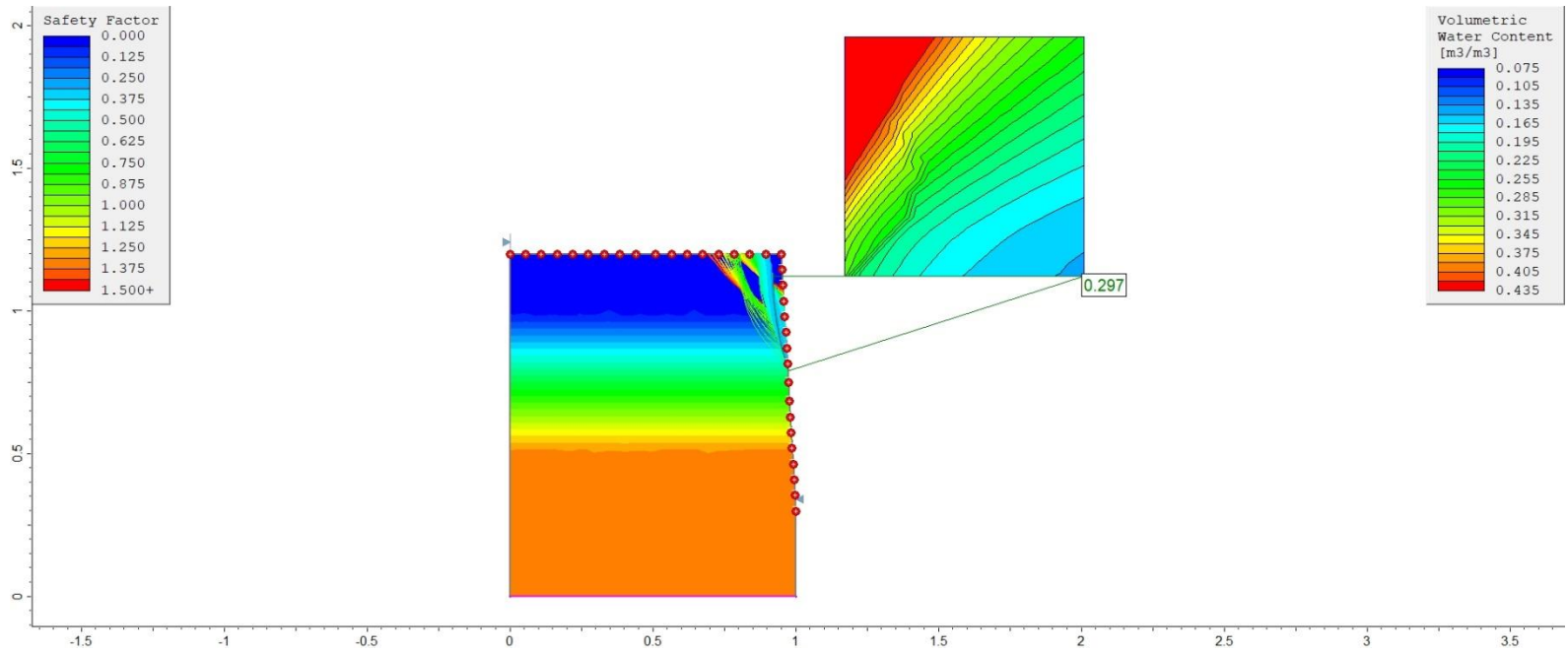


Figura 114. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal medio y calculado por método Janbú Simplificado.

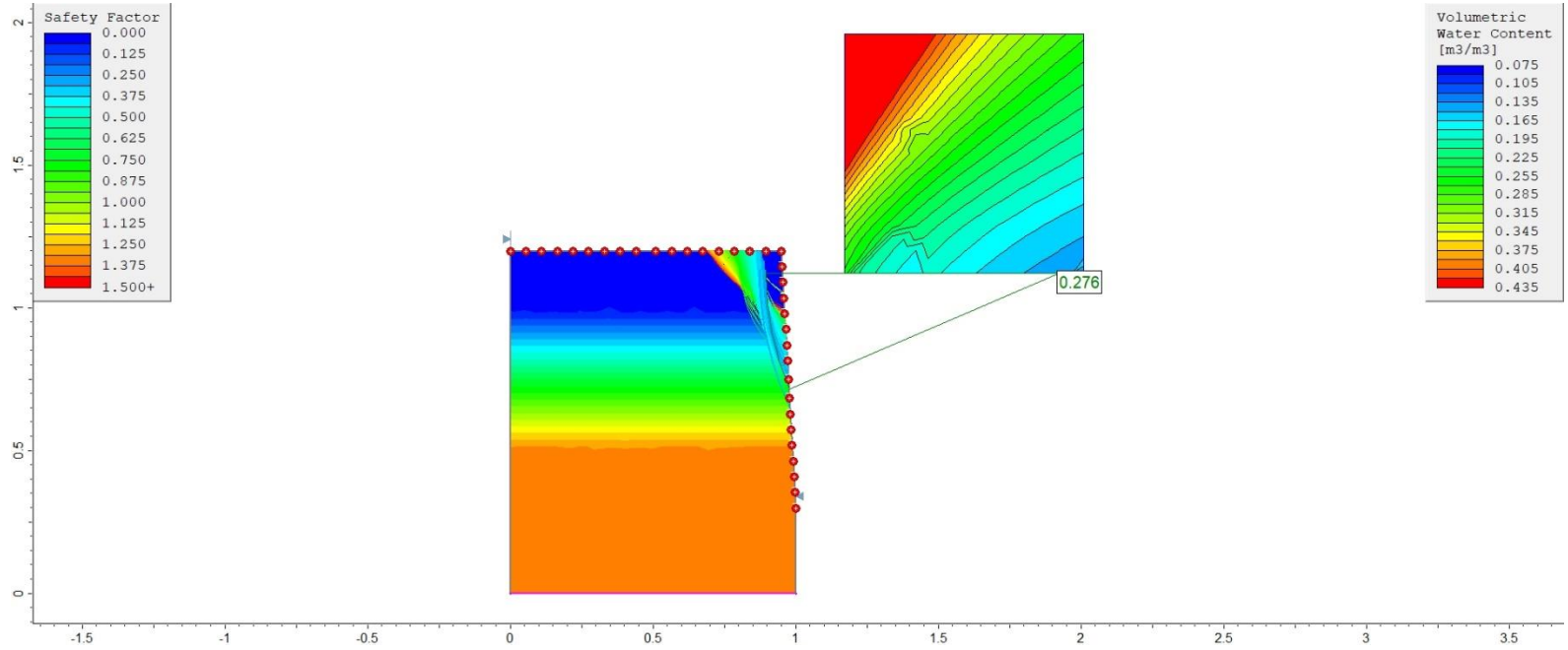


Figura 115. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal medio y calculado por método de Morgenstern-Price.

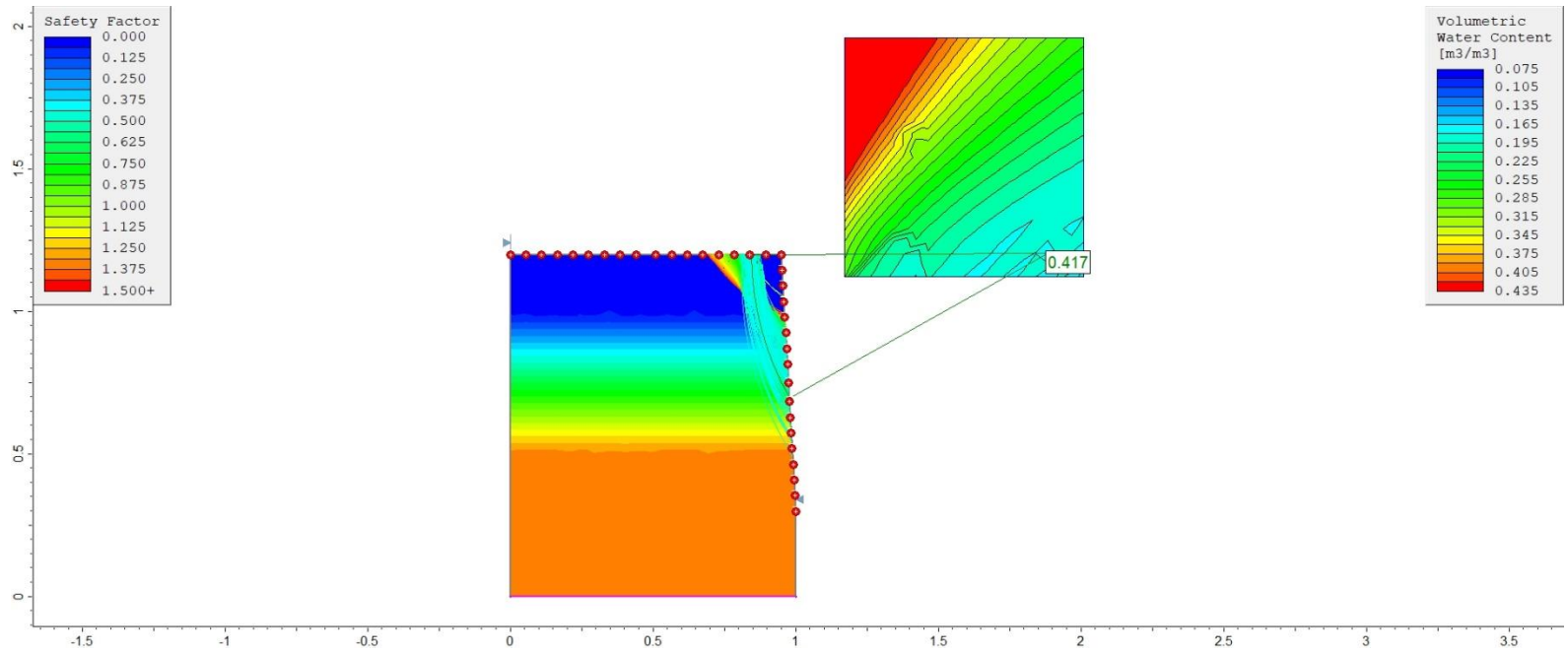


Figura 116. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal alto y calculado por método Bishop Simplificado.

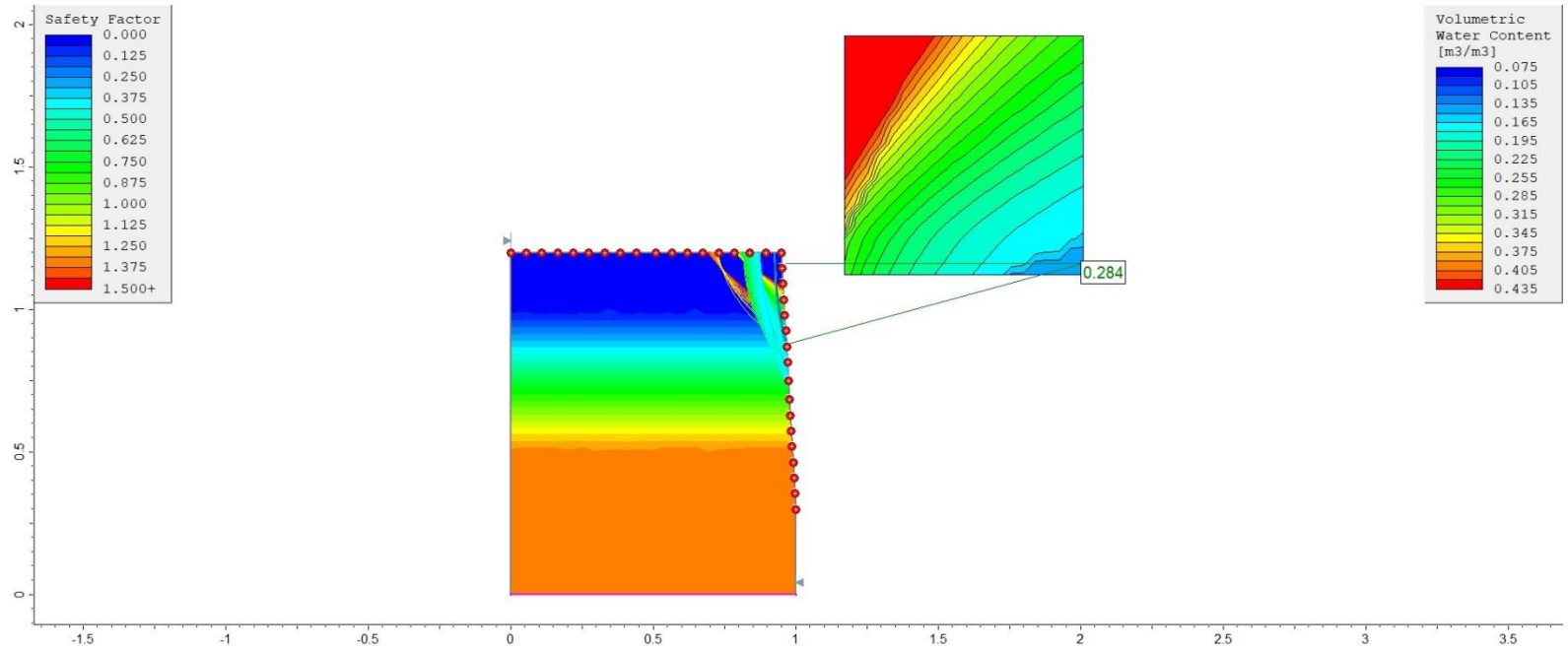


Figura 117. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal alto y calculado por método Janbú Simplificado.

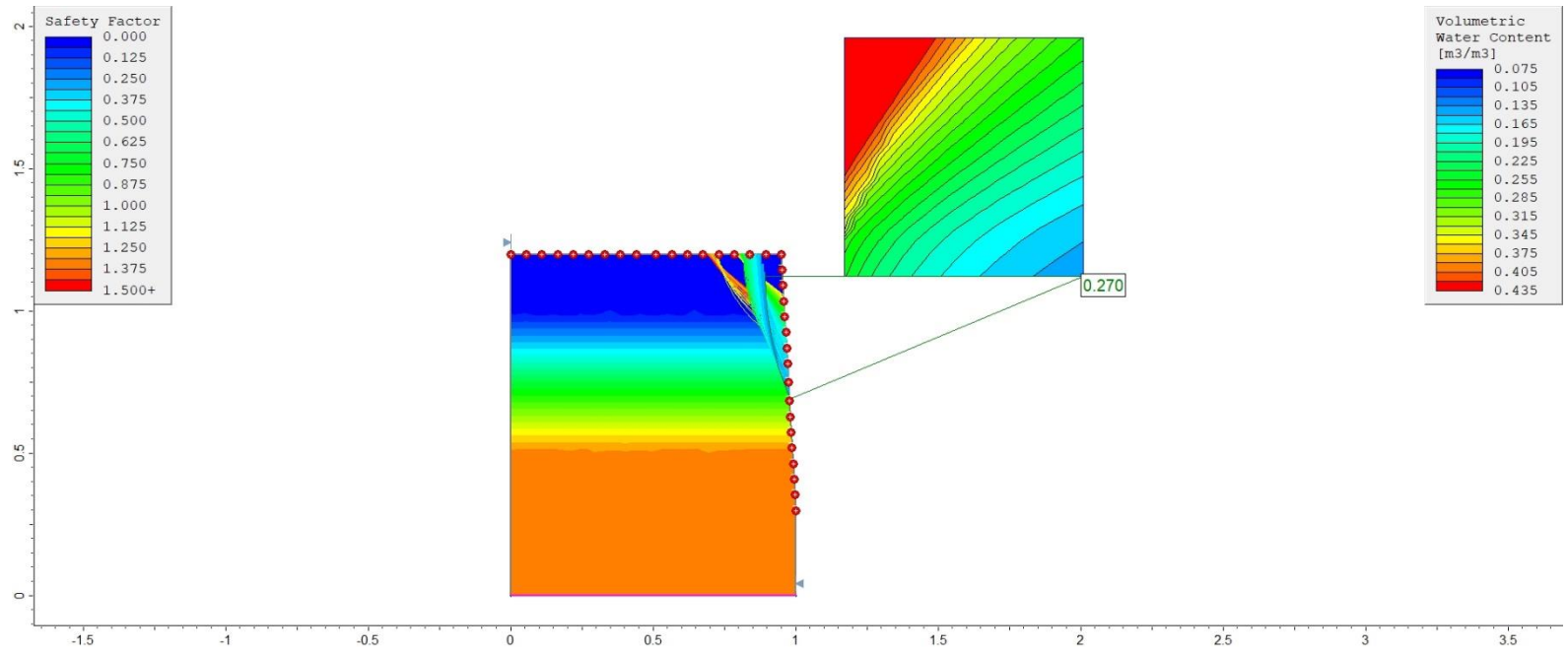


Figura 118. Modelo del talud de pendiente 90° en condición drenada, caudal alto y calculado por método de Morgenstern-Price.

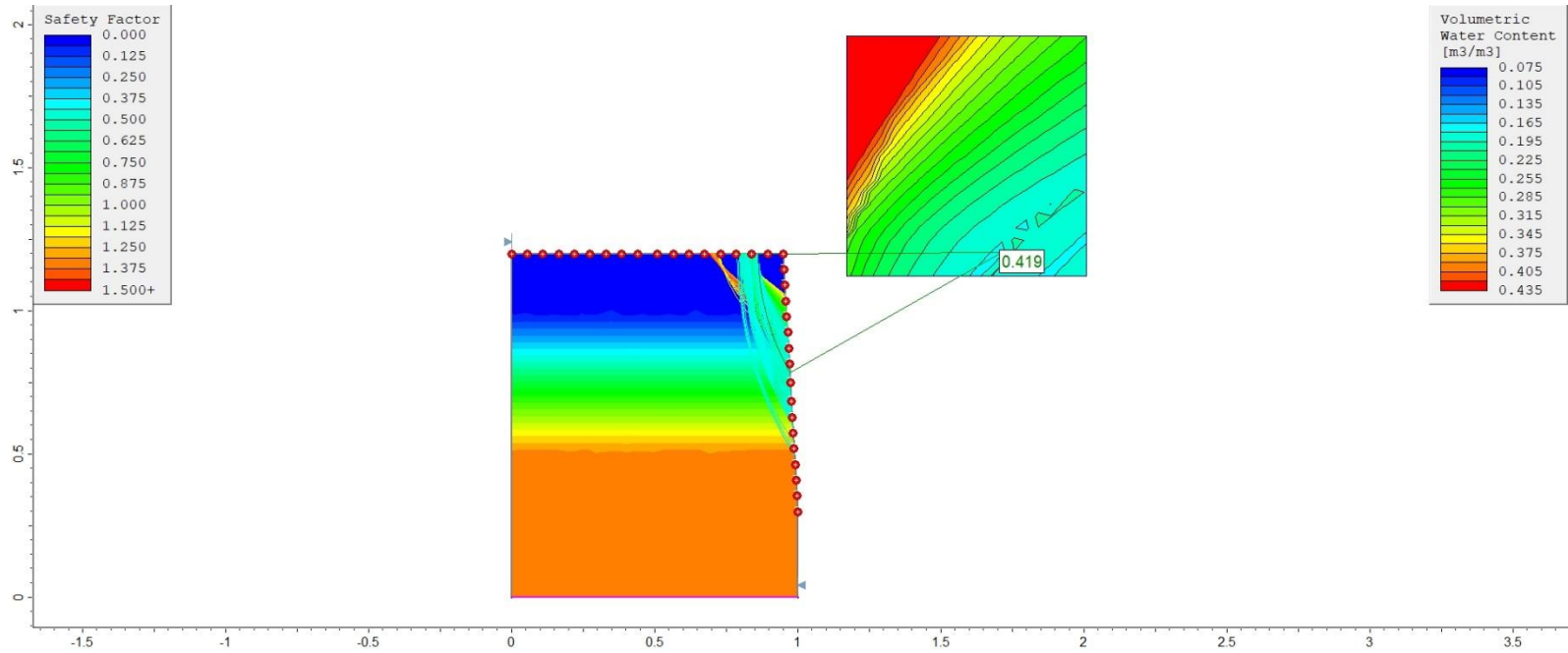


Figura 119. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal bajo y calculado por método Bishop Simplificado.

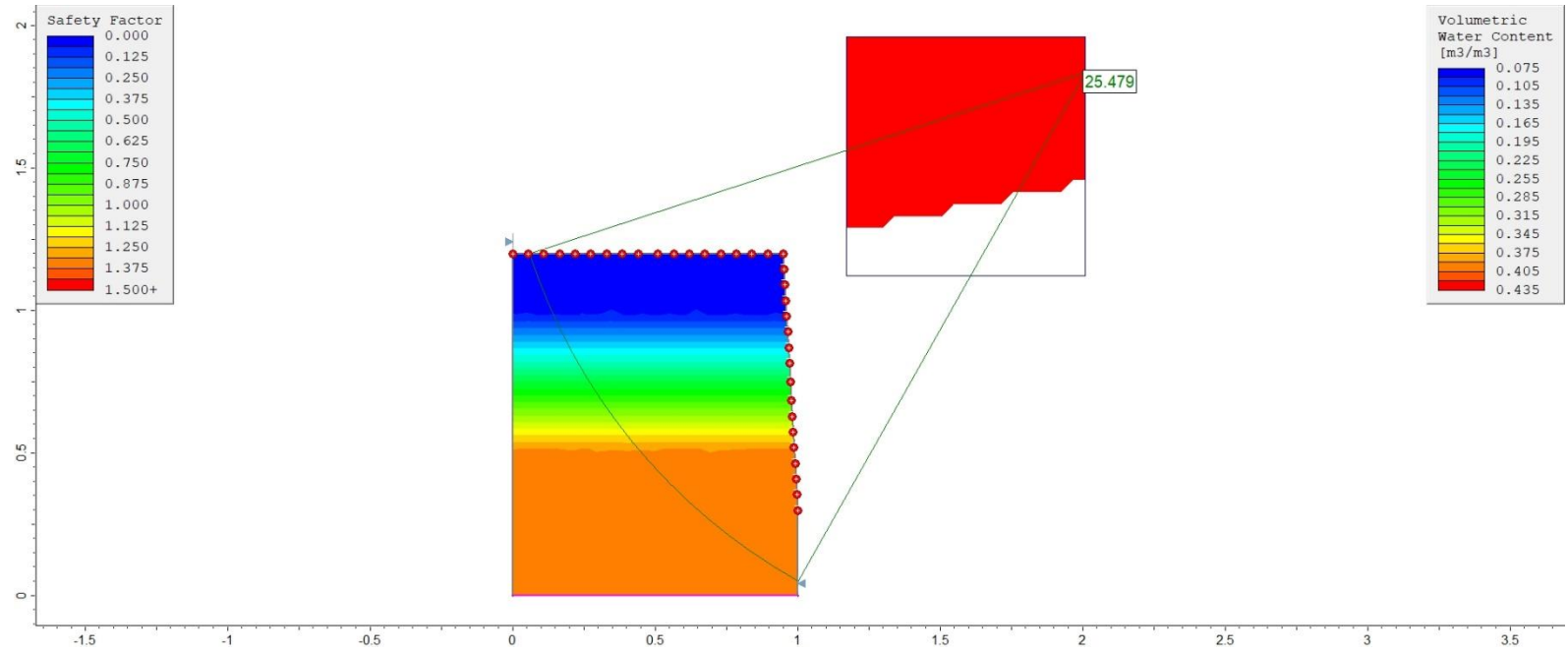


Figura 120. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal bajo y calculado por método Janbú Simplificado.

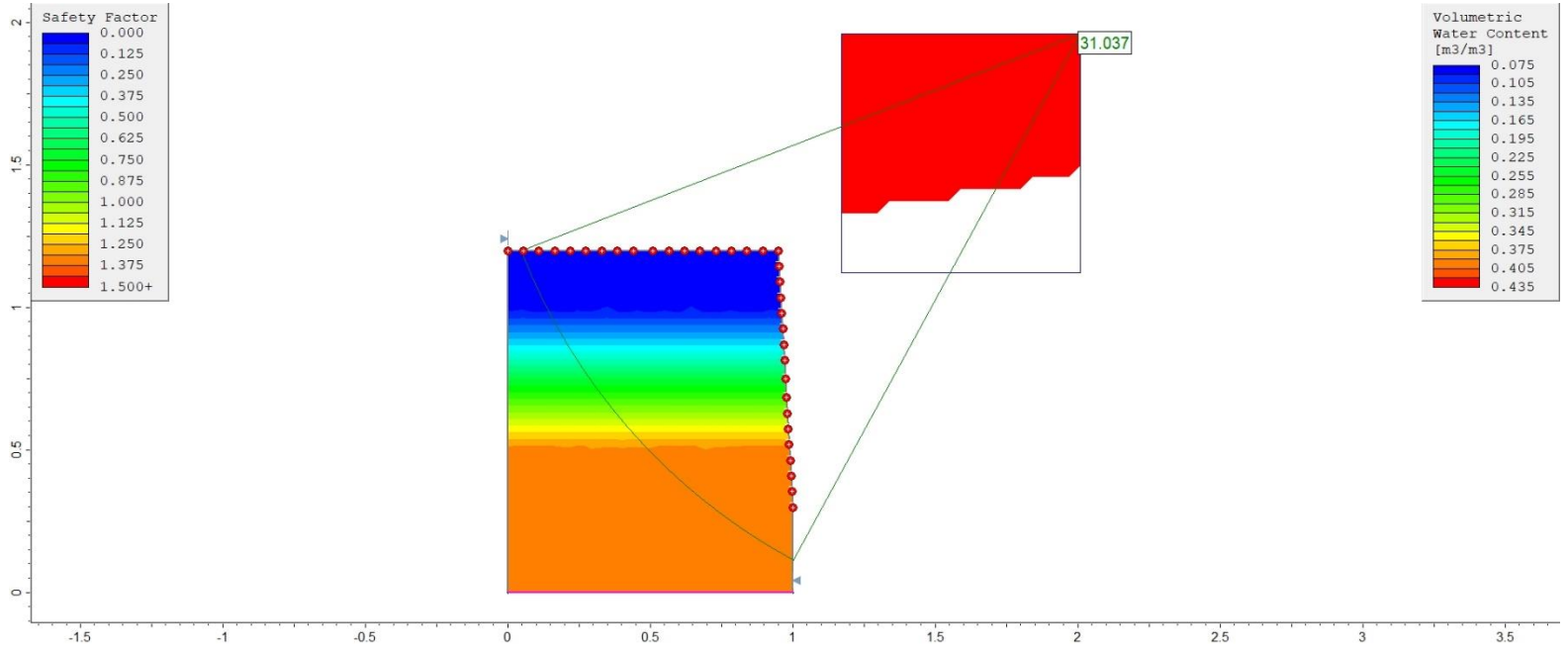


Figura 121. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal bajo y calculado por método Morgenstern-Price.

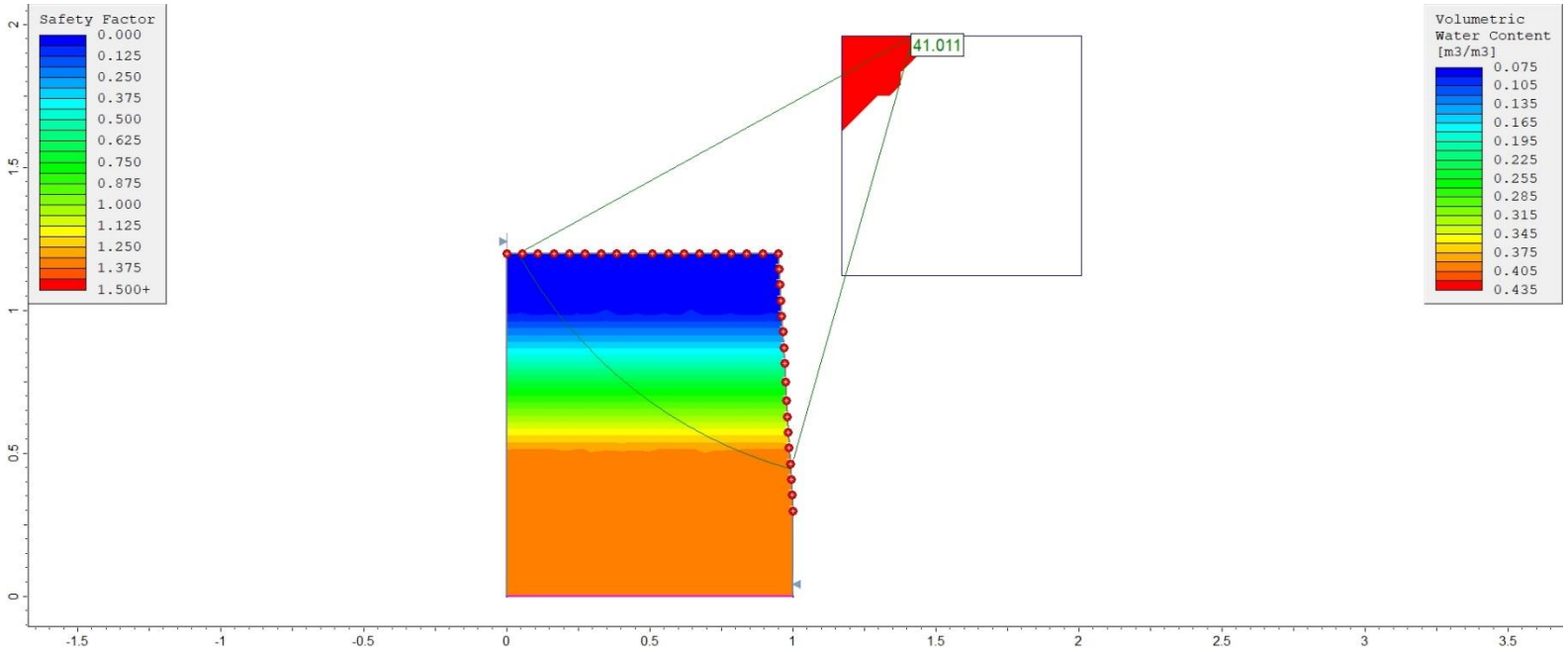


Figura 122. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal medio y calculado por método Bishop Simplificado.

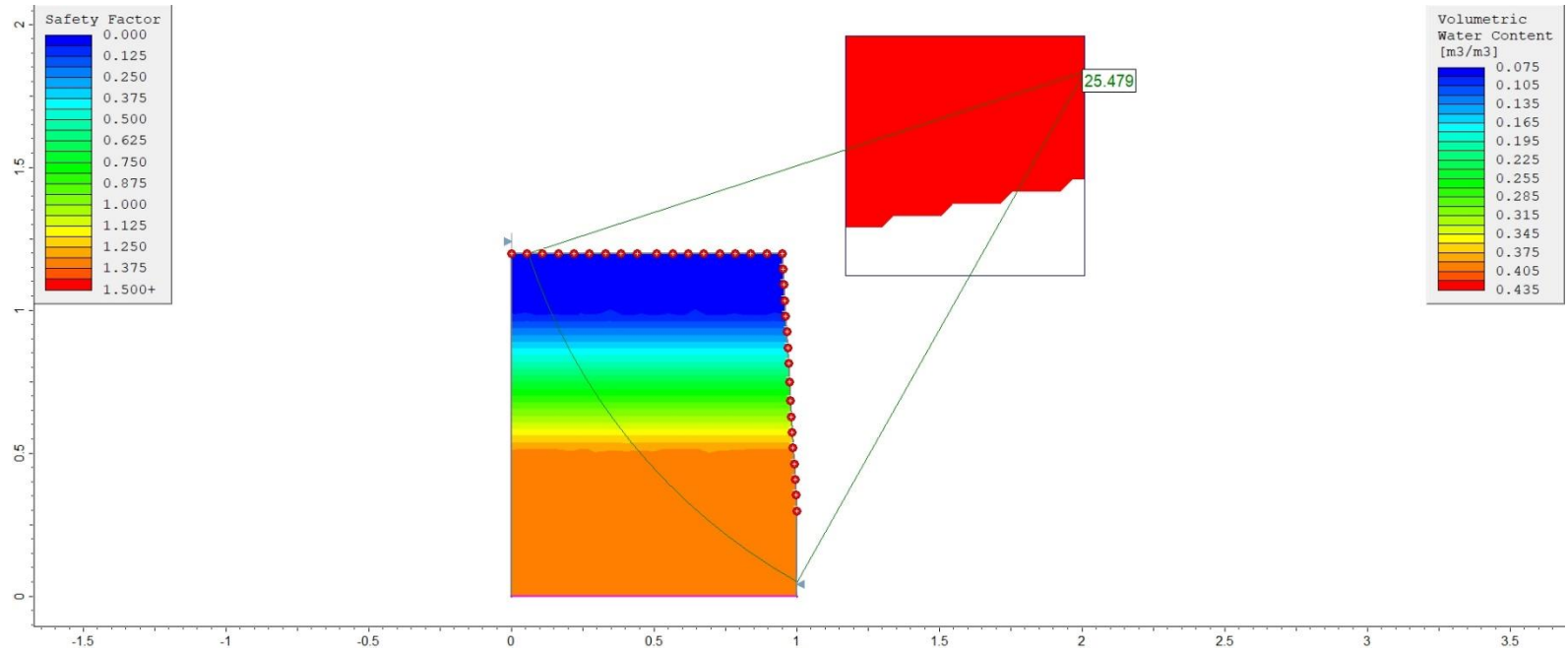


Figura 123. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal medio y calculado por método Janbú Simplificado.

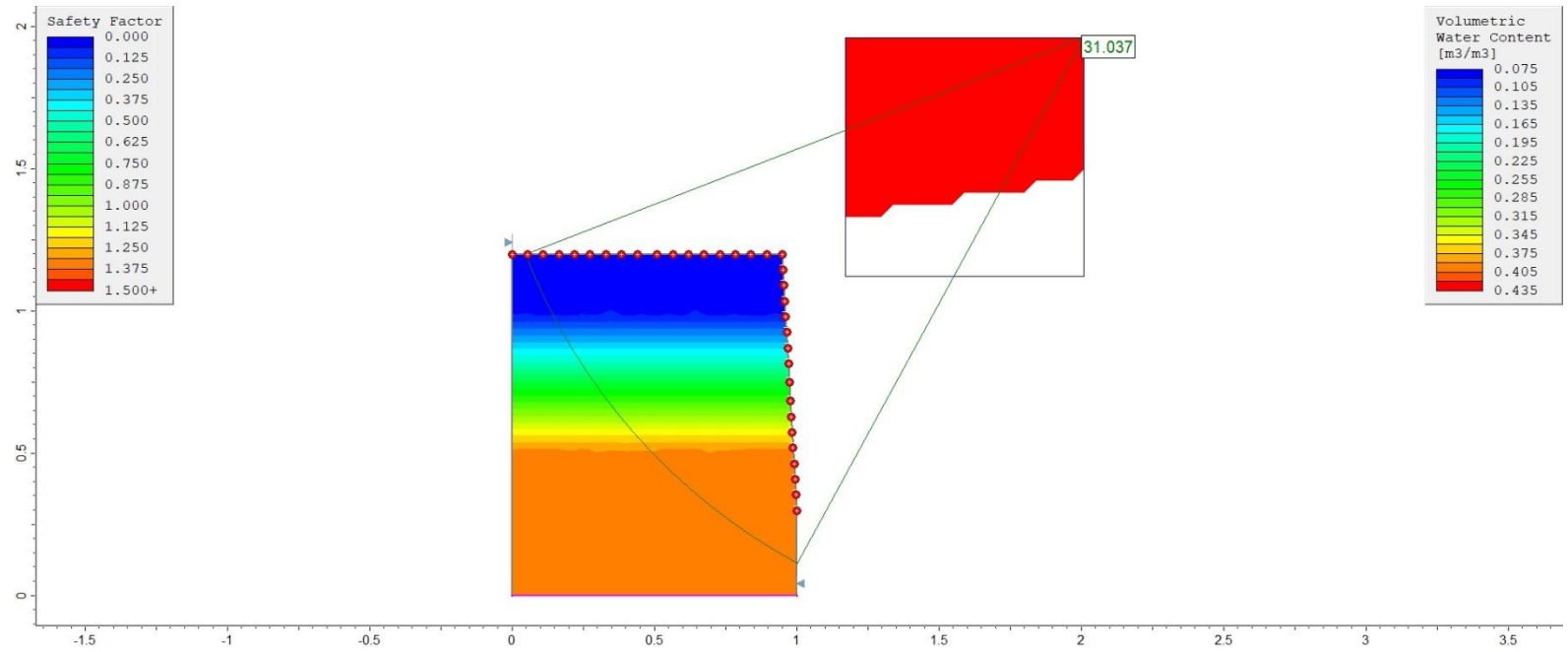


Figura 124. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal medio y calculado por método de Morgenstern-Price.

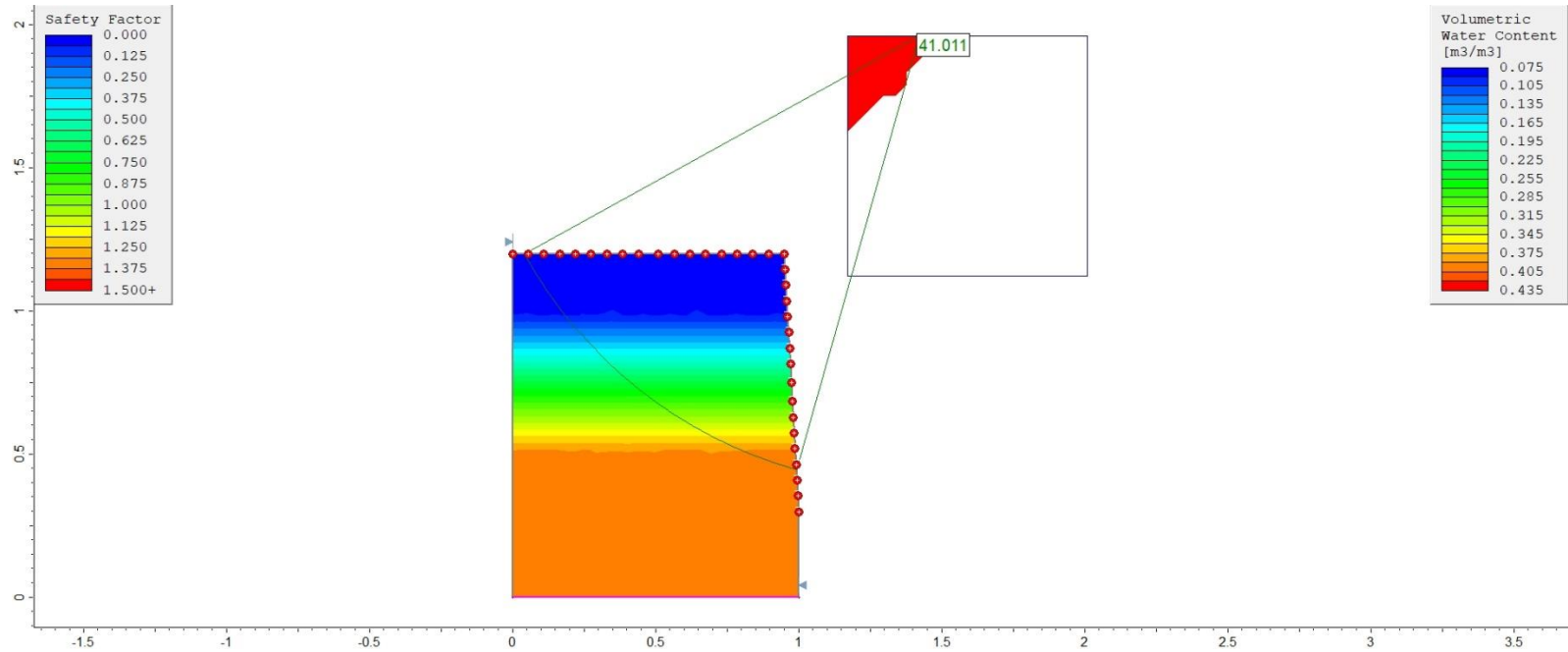


Figura 125. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal alto y calculado por método Bishop Simplificado.

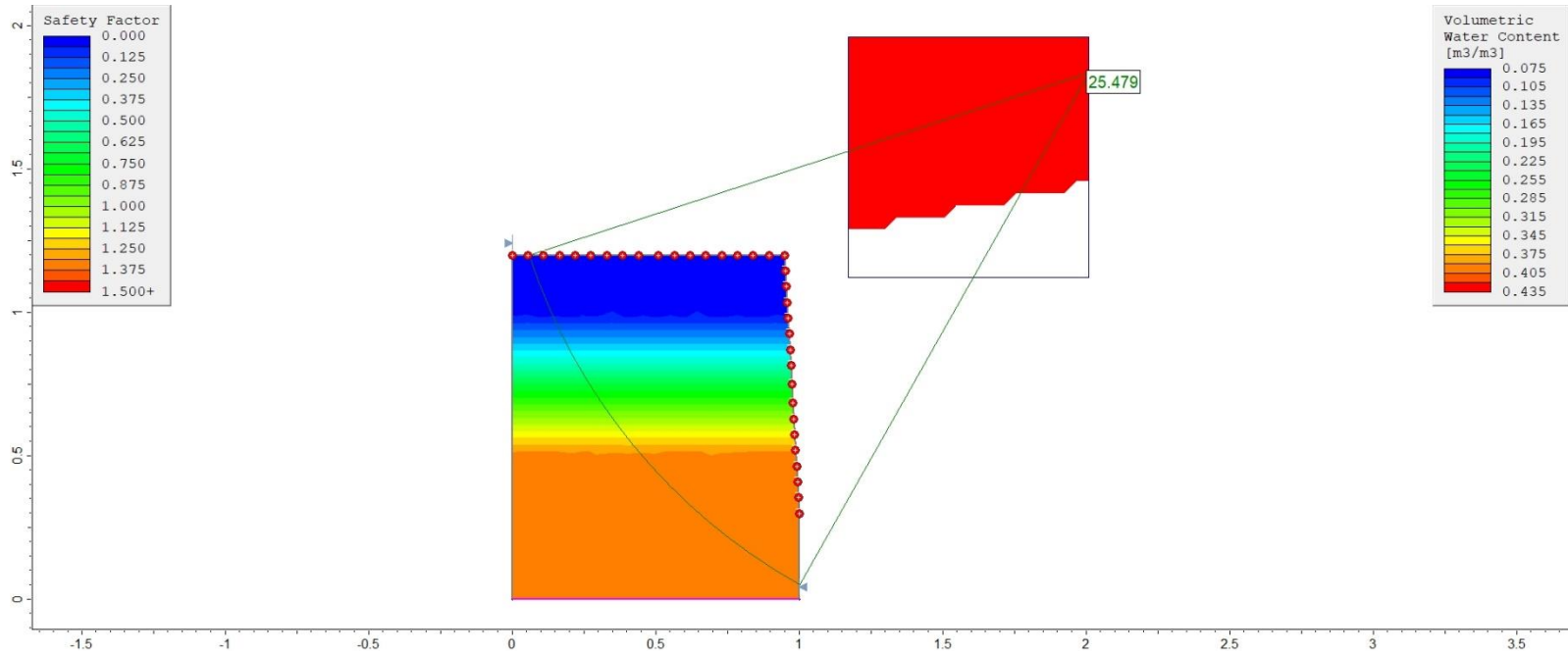


Figura 126. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal alto y calculado por método Janbú Simplificado.

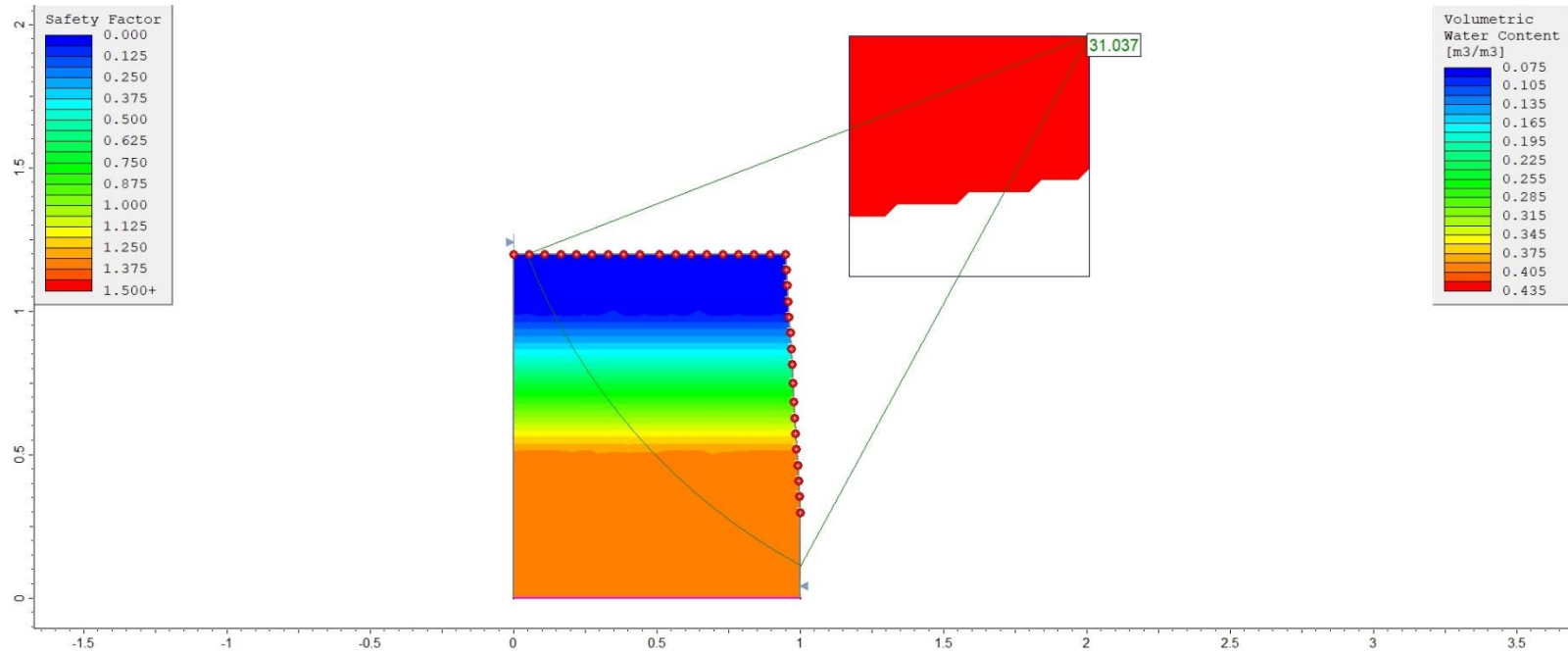
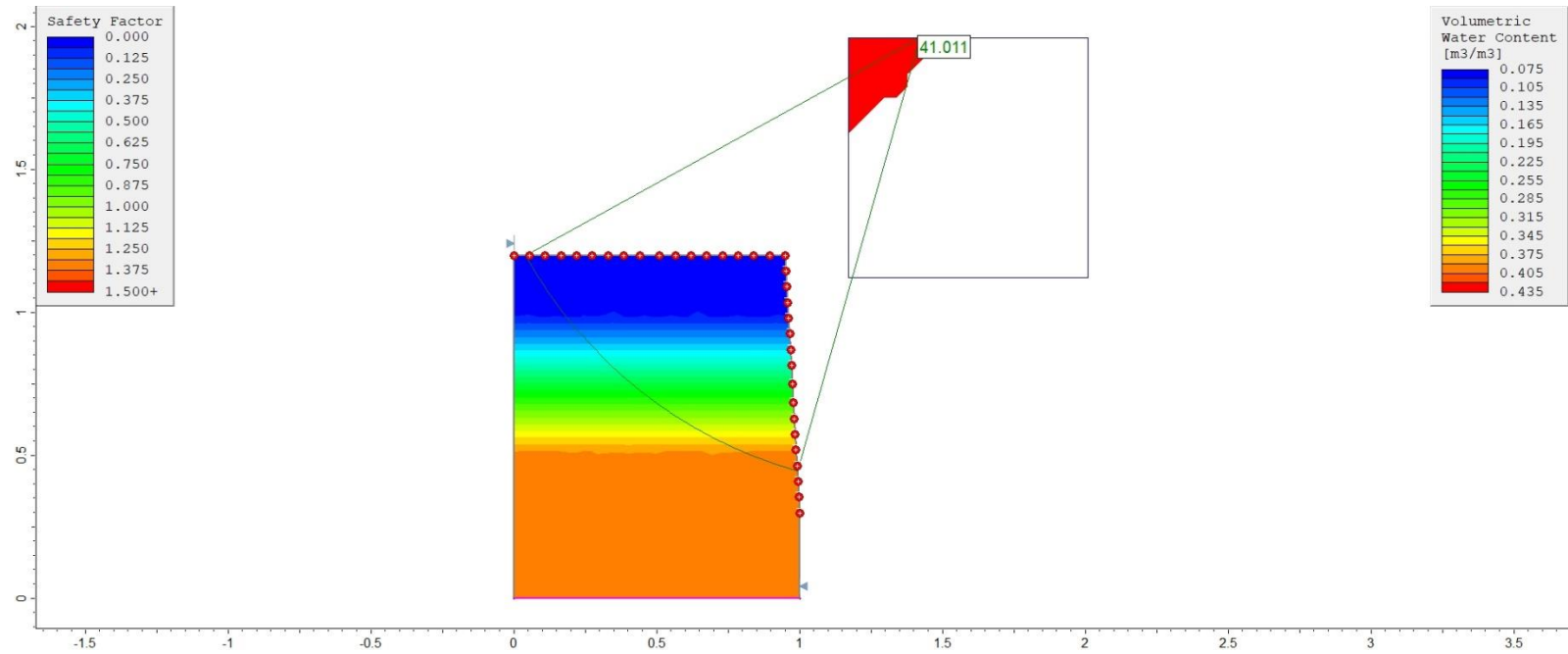


Figura 127. Modelo del talud de pendiente 90° en condición no drenada, caudal alto y calculado por método de Morgenstern-Price.



Anexos

1. Ficha técnica del SoilVUE™10



Economical Easy to Install Excellent Soil Contact

Overview

The SoilVUE[™]10 is a soil water content profile sensor powered by Campbell TrueWave[™]TDR technology. This soil moisture, electrical conductivity, and temperature profile sensor was developed with environmental researchers and environmental monitoring networks in mind. The SoilVUE[™]10 represents several exciting advancements in in-situ soil measurement that should make this an extremely compelling option for anyone in these applications who needs to make multiple measurements in a profile.

Campbell Scientific's proprietary TrueWave[™]TDR technology combines a best-in-class rise time with an advanced waveform analysis technique to determine the true travel time of a high-frequency pulse. This process achieves a high-resolution, smooth signal for measurements that are defensible and can be universally compared with other TDR measurements. Not all TDR-based sensors perform equally well.

Benefits and Features

- ▶ Measures VWC, permittivity, EC, and temperature
- ▶ Six or nine depths measured with one sensor
- ▶ Quick and low-impact installation
- ▶ Digital output is compatible with most Campbell Scientific data loggers
- ▶ Designed for long-term outdoor operation
- ▶ TrueWave[™]TDR technology is proven and trusted

Technical Description

The SoilVUE[™]10 consists of TDR circuitry connected to a series of six or nine helical wave guides that make up part of the overall threaded design. The threaded design with individual sensors built into the threads improves sensor contact with the soil to reduce potential error from air gaps. The TDR circuitry generates a short rise time electromagnetic pulse that is applied to the helical wave guides. The elapsed two-way travel time of the applied pulse is used to calculate the dielectric permittivity of the surrounding media and determine the volumetric water content using a mixing model.

The soil water content profile sensor can be installed in a hole made by a standard 5 cm (2 in.) hand auger. Excavation machinery or expensive custom tools are not necessary to install the sensor.

The included cable has an IP67 rated M12 connector that is detachable from the sensor for easy field replacement if the cable becomes damaged.



Specifications

Measurements Made	Volumetric water content (VWC), permittivity, electrical conductivity (EC), and temperature
Operating Temperature Range	-40° to +60°C
Maximum Installation Torque	54 N m (40 ft·lb)
Operating Voltage Range	9 to 36 Vdc
Diameter	› 5.8 cm (2.3 in.) including threads › 5.2 cm (2.05 in.) without threads
Maximum Cable Length	304.8 m (1,000 ft)
Length	0.55 m/1.05 m (21.5 in./41.2 in.) depending on the option ordered
Weight	1.9 kg/3.6 kg (4.2 lb/7.9 lb) depending on the option ordered

Current Drain

Active	~64 mA (@ 12 Vdc)
Quiescent	~1.5 mA (@ 12 Vdc)

Measurement Depths

0.5 m Option	5, 10, 20, 30, 40, and 50 cm (2, 4, 8, 12, 16, and 20 in.)
--------------	--

1 m Option	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, and 100 cm (2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 30, and 40 in.)
------------	---

Electrical Conductivity

Range	0 to 10 dS/m
Accuracy	› ±2% (0 to 2.5 dS/m) › ±5% (full range)

Relative Dielectric Permittivity

Range	1 to 80
Accuracy	±1 permittivity unit (between 4 and 42 permittivity)

Volumetric Water Content

Range	0 to 100%
Water Content Accuracy	±1.5% typical with most soils

Soils with high organic matter (> 12% soil organic carbon) or high clay content (> 45% clay) may need a soil-specific calibration due to the dispersive nature of these materials.

Soil Temperature

Accuracy	± 0.15°C (between -30° and +40°C)
----------	-----------------------------------

For comprehensive details, visit: www.campbellsci.eu/soilvue10 



80 Hathern Road, Shepshed, LE12 9GX UK | +(0)1509 828888 | sale@campbellsci.co.uk | www.campbellsci.eu
AUSTRALIA | BRAZIL | CANADA | CHINA | COSTA RICA | FRANCE | GERMANY | INDIA | SOUTH AFRICA | SPAIN | THAILAND | UK | USA

© 2020 Campbell Scientific, Ltd. | 10/26/2020

2. Tutorial del programa Slide 2.0

Transient Groundwater Analysis with Slope Stability

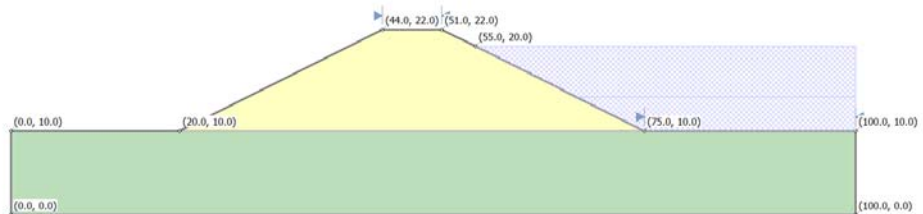
This tutorial describes how to use *Slide* to calculate factors of safety for a dam subjected to time-dependent changes in pore pressure. As part of the tutorial, a transient groundwater analysis is performed using finite elements.

The finished product of this tutorial can be found in the **Tutorial 19 Transient + Slope Stability.slim** data file. All tutorial files installed with *Slide* 6.0 can be accessed by selecting File > Recent Folders > Tutorials Folder from the *Slide* main menu.

Topics Covered

- Transient groundwater seepage analysis
- Slope stability with transient groundwater

Geometry



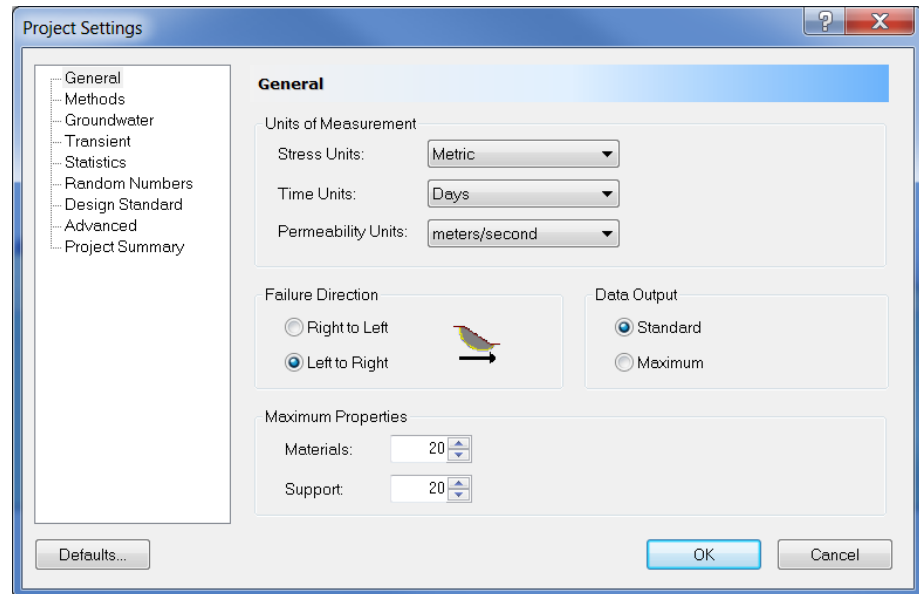
Model

Start the *Slide* Model program.

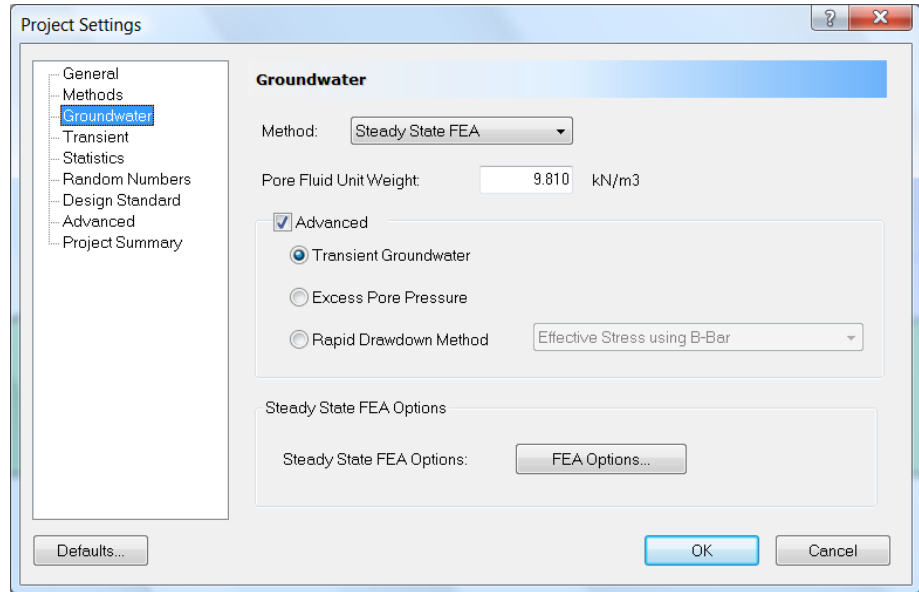
Project Settings



Open the **Project Settings** dialog from the **Analysis** menu. Set the Stress Units to Metric, set the Time Units to Days and the Permeability Units to meters/second. Set the Failure Direction to Left to Right as shown.

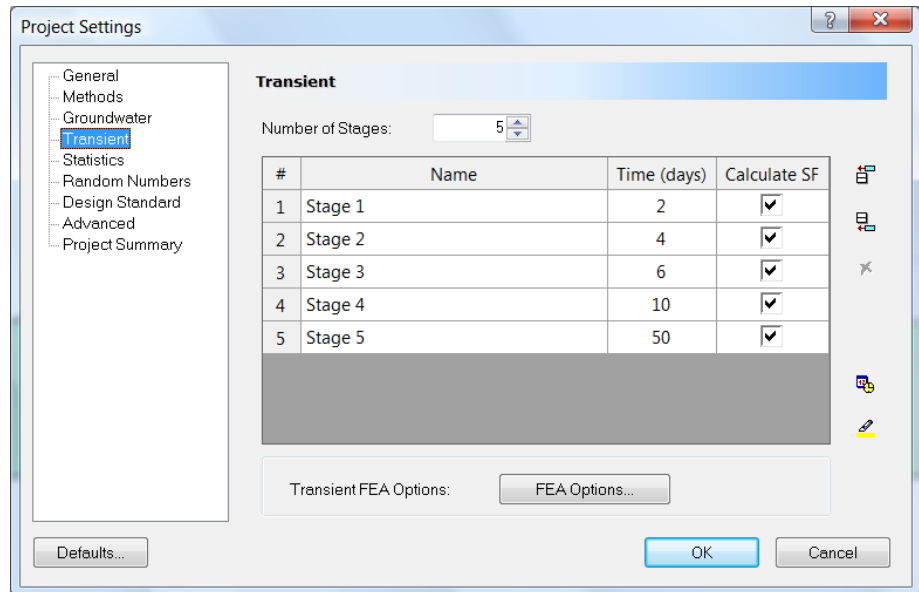


Click on the Groundwater link on the left side. For the Method choose Steady State FEA. Select the **Advanced** checkbox and choose Transient Groundwater.



The Method refers to the method used to obtain the *initial state* for the transient groundwater analysis. In this tutorial we will perform a steady state finite element analysis to get the initial state.

Now click on the Transient link on the left. Here we need to specify the times at which we wish to observe pore pressure results. Change the Number of Stages to 5. Enter the times for each stage as shown. Also select the Calculate SF (Safety Factor) checkbox for each stage.



This will set up the model to calculate factor of safety at each specified time as groundwater conditions are changing.

Click OK to close the Project Settings dialog.

Slope Stability

You will now see a blank screen with three tabs at the bottom. One for Slope Stability, one for Steady State Groundwater and one for Transient Groundwater. The first part of this tutorial involves setting up the model geometry. This can only be done in the Slope Stability mode, so click on the tab for **Slope Stability**.

Boundaries

The model represents a dam overlying a strong foundation holding back ponded water on one side. Here we will define the geometry of the problem.



Make sure that you are in 'Slope Stability' view. Select the **Add External Boundary** option in the **Boundaries** menu and enter the following coordinates:

0 , 0

100 , 0

100 , 10

75 , 10

55 , 20

51 , 22

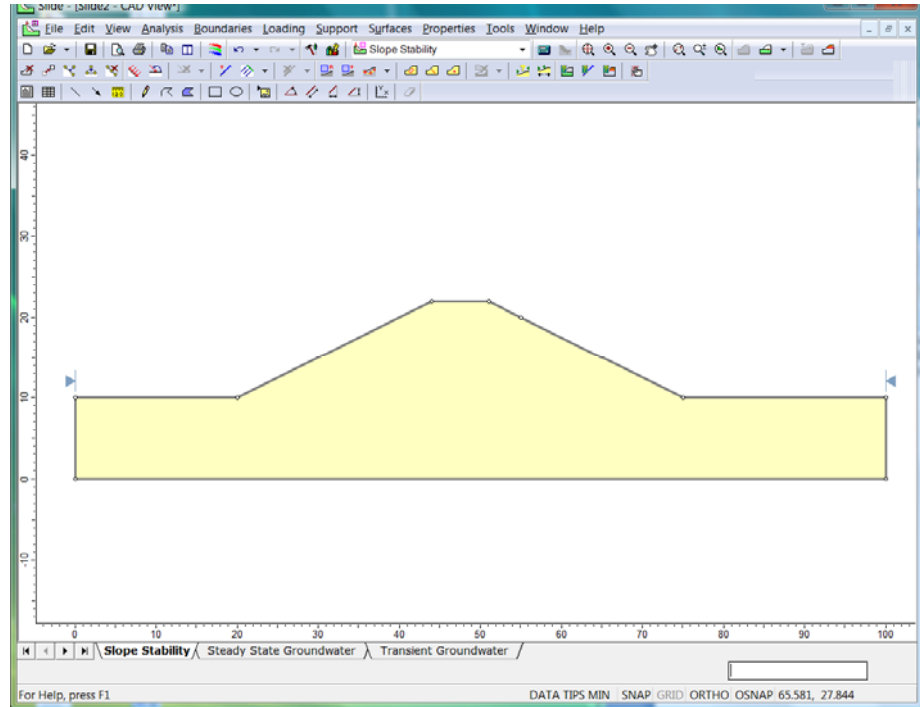
44 , 22

20 , 10

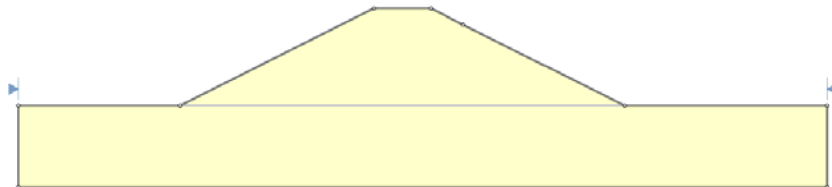
0 , 10

c (to close the boundary)

Hit Enter to finish entering points. The model will look like this:



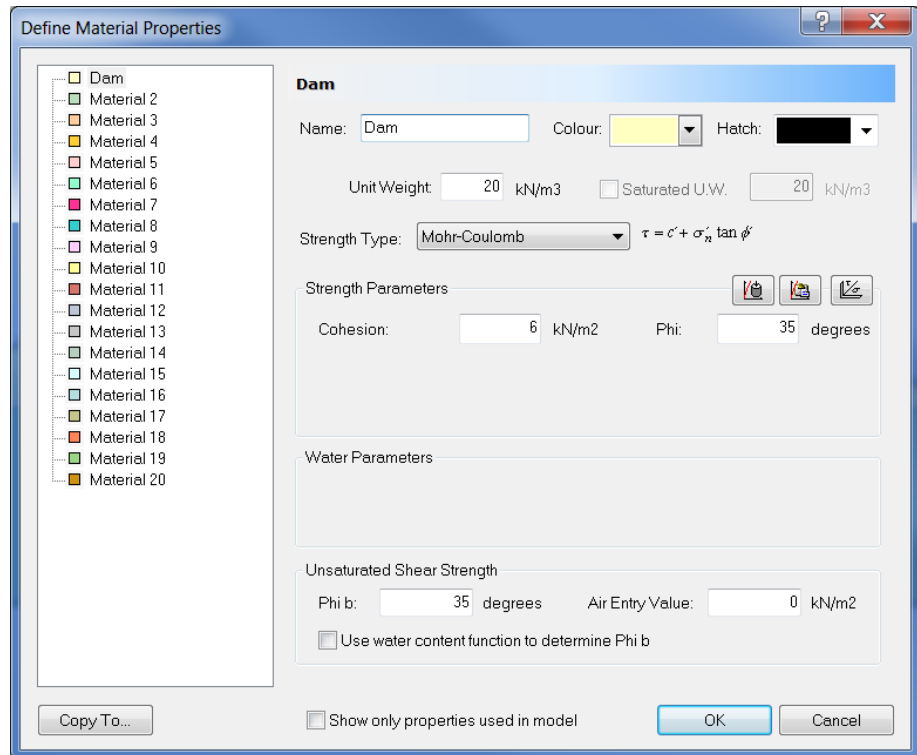
Now we need to define the boundary between the dam material and the foundation. Select **Boundaries** → **Add Material Boundary**. Click on the point at (0, 10) and then on the point at (100,10). Hit Enter to stop entering points. The model will look like this.



Materials

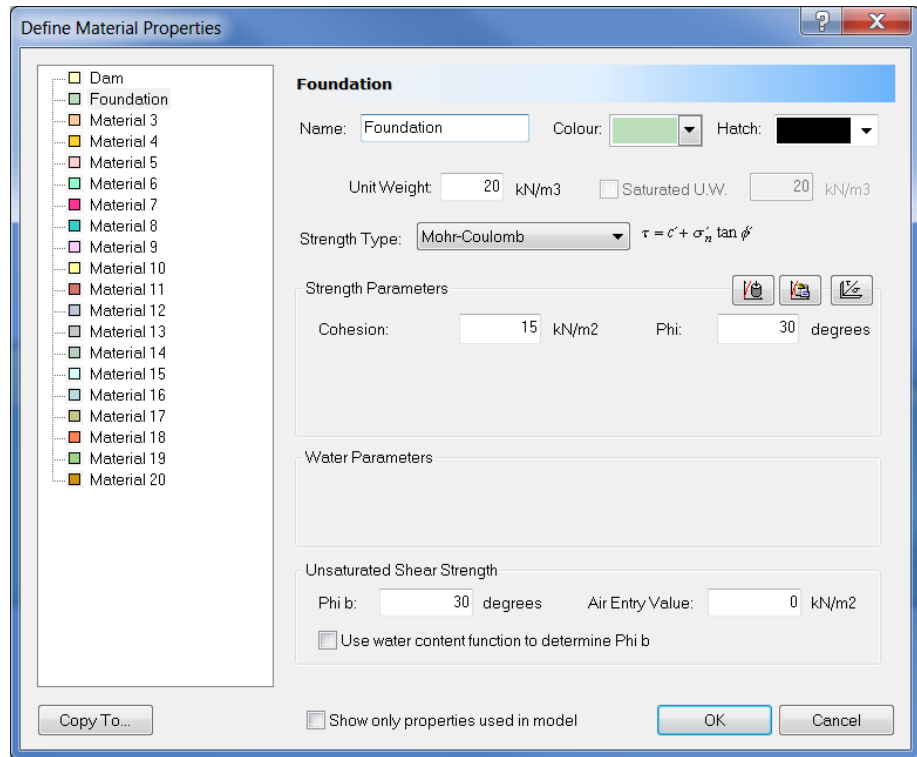


Select **Define Materials** from the **Properties** menu. Change the name of Material 1 to Dam. Set the Cohesion to 6 kN/m² and ϕ_b to 35° as shown.



When in Slope Stability mode, only the slope stability parameters can be set. We will set the groundwater flow parameters later.

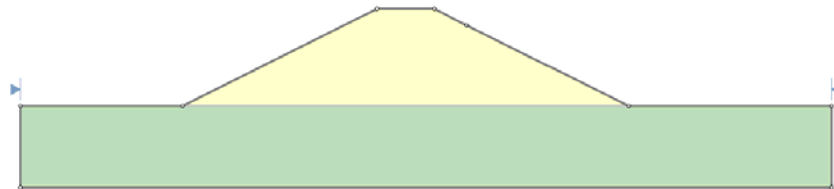
Click on the link for Material 2. Change the name to Foundation. Set the Cohesion to 15 kN/m² and set ϕ and ϕ_b to 30 degrees as shown.



Click OK to close the dialog.

Assigning Properties

By default, the entire model is assigned Material 1 (Dam). To set the foundation material, choose **Properties** → **Assign Properties**. Choose Foundation and click inside the bottom part of the model. Close the Assign Material dialog and the model should look like this.

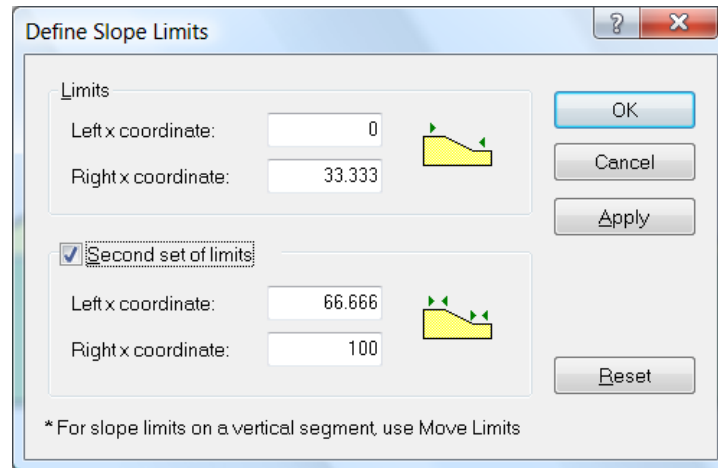


You could also simply right click inside the foundation area and choose Assign Material → Foundation.

Slip Surfaces

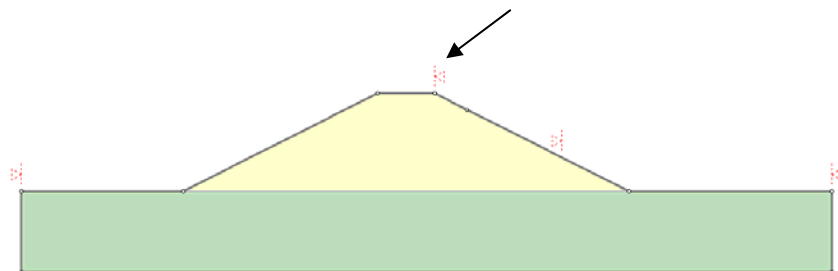
In this tutorial, we wish to restrict the search for slip surfaces to include only major failure surfaces extending from the top of the dam to the bottom. To do this, we need to add another set of Slope Limits.

Go to **Surfaces** → **Slope Limits** → **Define Limits**. Click the box for Second set of limits as shown.

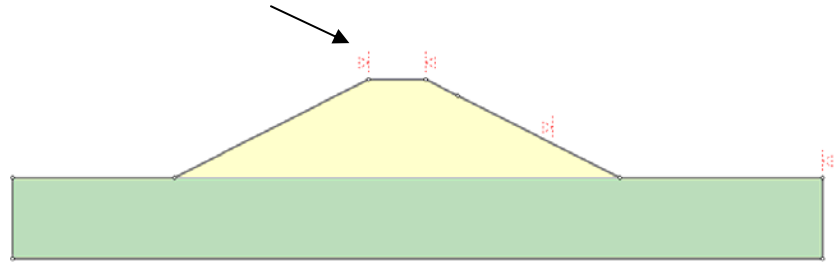


It is possible here to specify coordinates of the limits but it is easier to do this graphically by dragging them along the slope surface, so click on OK to close the dialog. You will now see two sets of slope limits on the model.

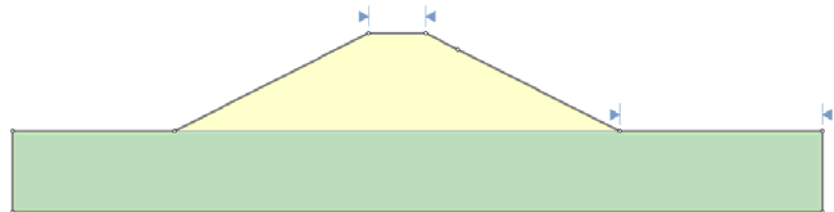
We want potential slip surfaces to start from the top of the dam. So right click on the slope limit icon at $x=33$ (second from the left) and select **Move Limits**. Now drag the icon to the right side of the flat top of the dam as shown.



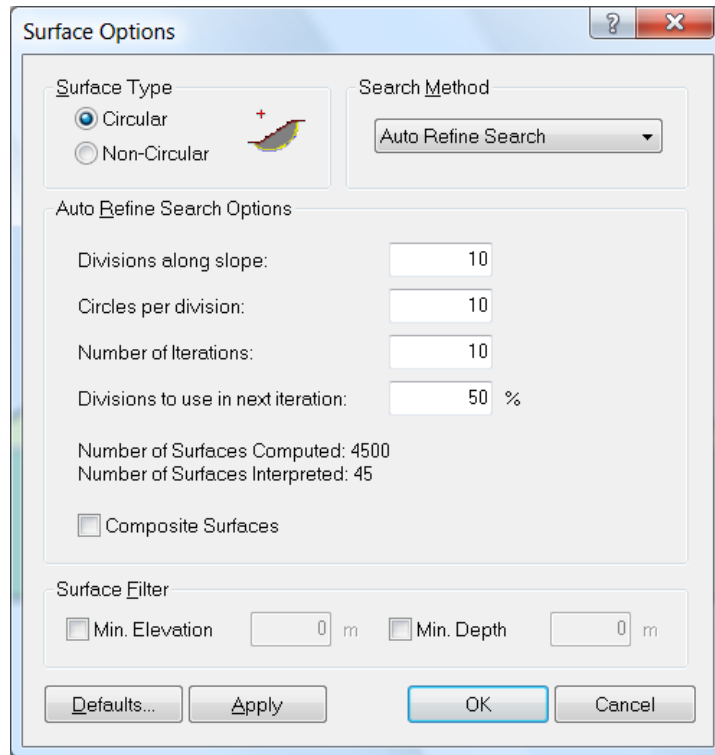
Now drag the left icon at $x=0$ to the top left of the dam.



Finally, drag the icon that is halfway down the slope at $x=66$ to the bottom of the slope. Hit Enter to finish moving the limits and the model should look like this:



Now that the slope limits are defined, we need to specify how *Slide* should search for potential failure surfaces. Go to **Surfaces** → **Surface Options**. Under Search Method, choose Auto Refine Search. This option means that we do not have to define a search grid.



Click OK to close the dialog.

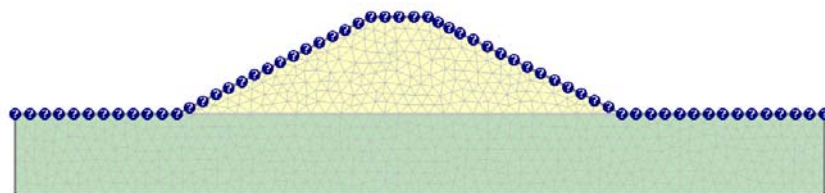
Groundwater

Now it is time to set up the finite element model for calculation of groundwater behaviour. First we will set up the initial state that exists prior to the drawdown, so select the tab for **Steady State Groundwater** at the bottom of the screen.

Mesh



Before we can set up the boundary conditions we need to create a finite element mesh. This is easily done by selecting **Mesh** → **Discretize and Mesh**. The model should now look like this:

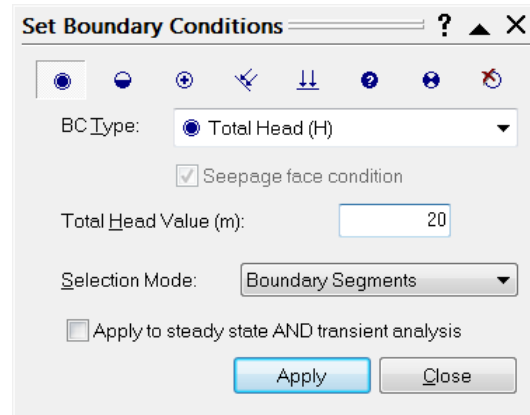


Boundary Conditions

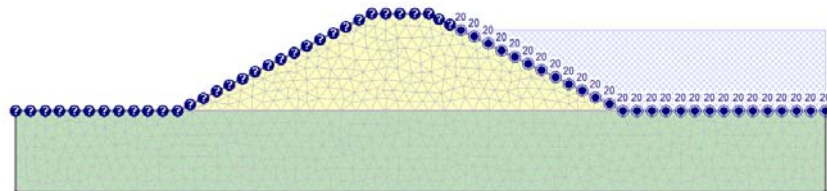
We will set up boundary conditions to simulate ponded water on the right side.



Select **Mesh** → **Set Boundary Conditions**. For BC Type choose Total Head and set the Total Head Value to 20 m. Uncheck the box for ‘Apply to steady state AND transient analysis’.



Click on the right side of the slope near the bottom, and the top of the foundation layer to the right of the dam. Click Apply. Click Close to close the dialog. The model should look like this:

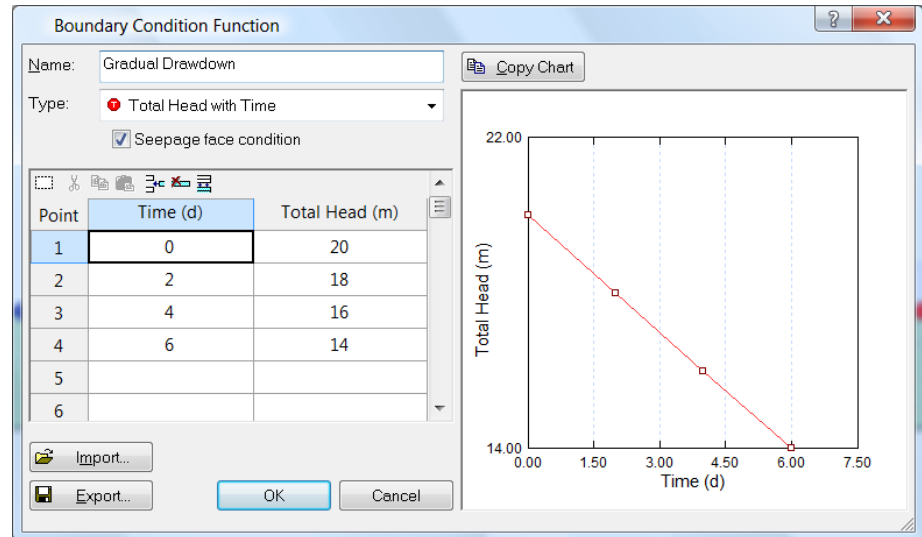


Transient Boundary Conditions

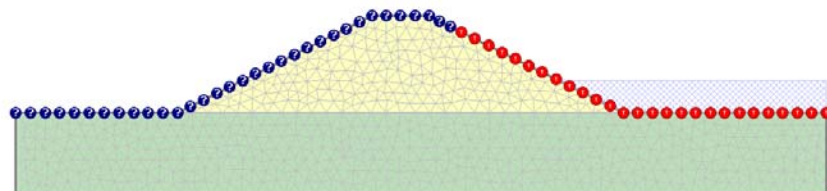
The ponded water model shown above represents the initial state. We will now implement transient boundary conditions to simulate a gradual drawdown of the water level.



Click on the tab for **Transient Groundwater** at the bottom of the screen. Select **Mesh** → **Set Transient Boundary Conditions**. Here we set up a function that will change the boundary conditions with time. Click the New button. Change the name to 'Gradual Drawdown' and set the Type to 'Total Head with Time'. Now fill in the Time and Total Head values as shown:



Click OK. Now click on the bottom right part of the slope and the top of the foundation layer as before. Click Apply. The model should look like this:



Click Close to close the dialog. The plot now shows the height of the ponded water at the last stage of the analysis.

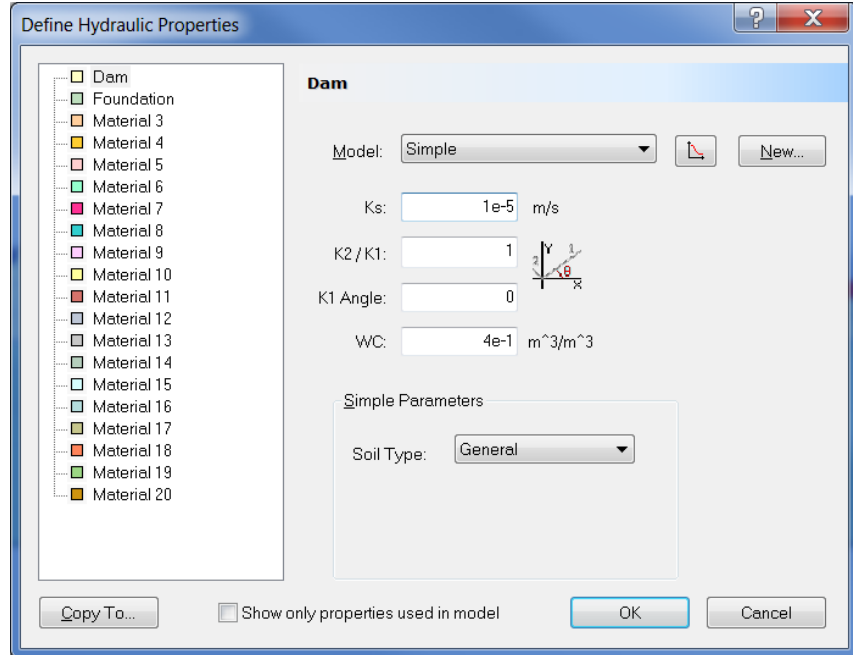
Material Properties (Groundwater)



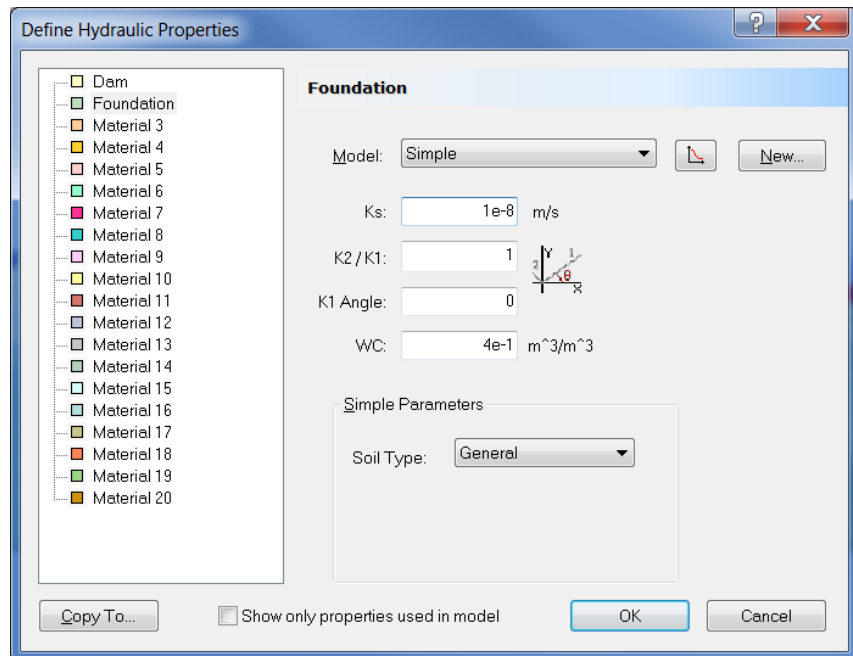
Select **Properties** → **Define Hydraulic Properties**. The hydraulic properties required for a transient analysis are the same as those for a steady state analysis except that water content (WC) must now be specified.



Click on the link for Dam material. For the Model, choose Simple. This is a simple built-in function that relates permeability and water content to matric suction. To view the relationships, click on the graph icon to the right. Set the permeability K_s to be $1e-5$ m/s. Leave the water content WC as the default value of 0.4. The dialog should appear as shown.



Click on the link for the Foundation material. Set K_s to $1e-8$ m/s.



Click OK to close the dialog.

Compute

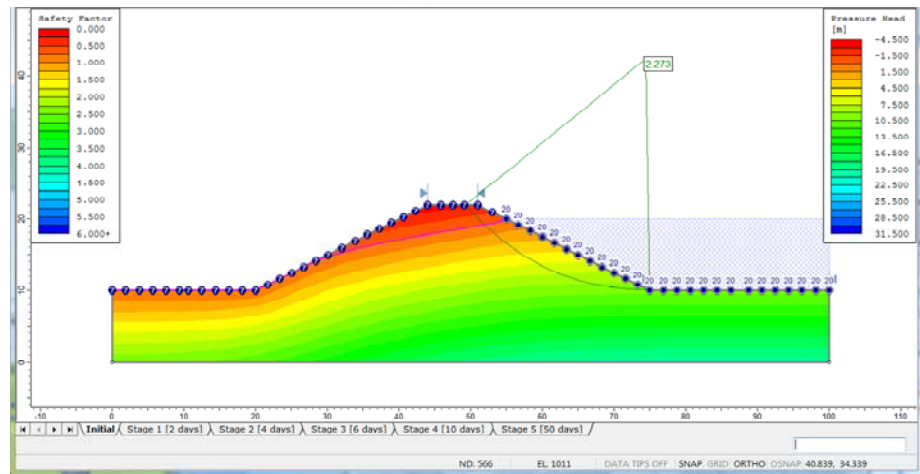


Save the model using the **Save As** option in the **File** menu. You could now choose Compute (groundwater) from the Analysis menu to perform the groundwater analysis. However, in this tutorial we want both the groundwater and slope stability results to be computed. So select the tab at the bottom for **Slope Stability**. Now select **Analysis** → **Compute**. This will compute both the groundwater results and the slope stability results. It may take a few minutes to perform the calculations. When it is finished, choose **Interpret (groundwater)** from the **Analysis** menu to view the results.

Interpret



You will now see the pressure head for the initial state. To show the factor of safety as well, click the button on the toolbar for ‘Slope Stability and Groundwater’.

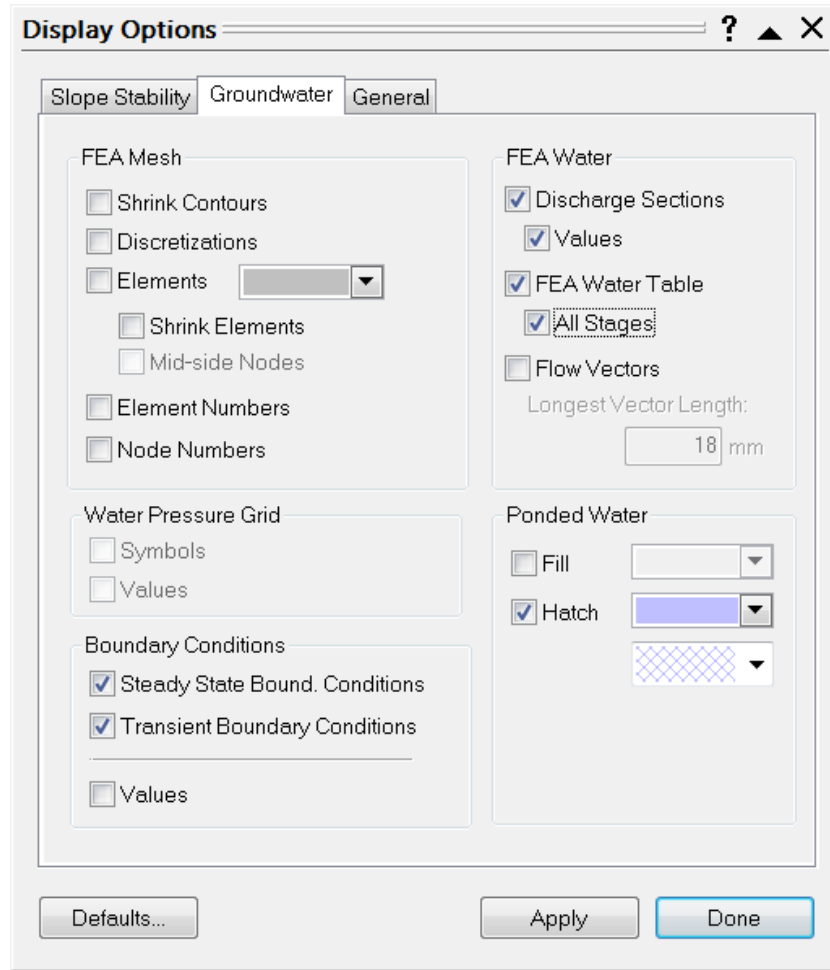


You can see that the slope is quite stable at this time.

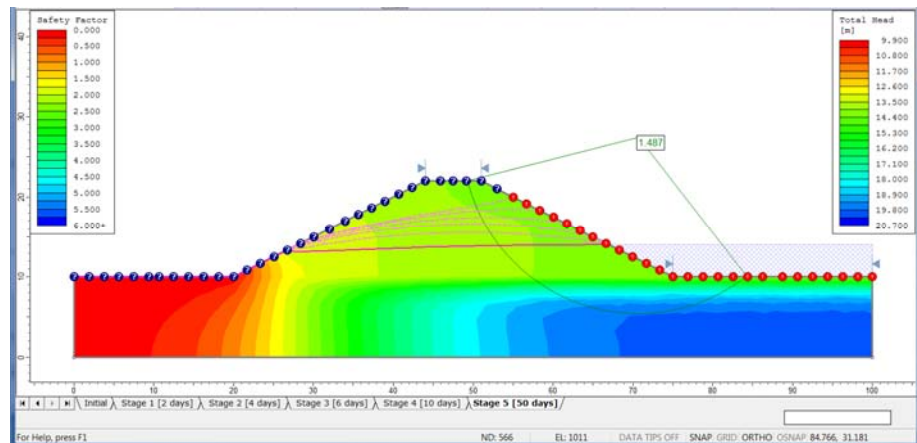
Click through the other stages using the tabs at the bottom. You will see how the pressure head changes as the water table is lowered. After 6 days, the ponded water has reached its final depth (4 m above the foundation) but the pressure head in the dam continues to change as water flows from regions of high pressure to low pressure.



Click on the tab for Stage 5 (50 days). This essentially represents the steady state. You can show the progression of the water table with time by going to **View** → **Display Options**. Select the **Groundwater** tab and under FEA water, select All Stages as shown.

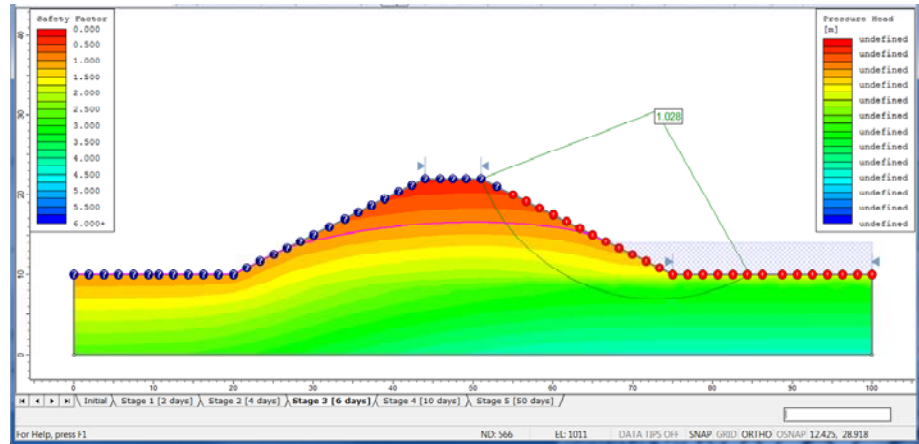


Click Done. The water tables at the different stages are now plotted as dashed pink lines. They are difficult to see on this plot so change the plot to show contours of Total Head using the drop down menu at the top. The plot will now look like this:

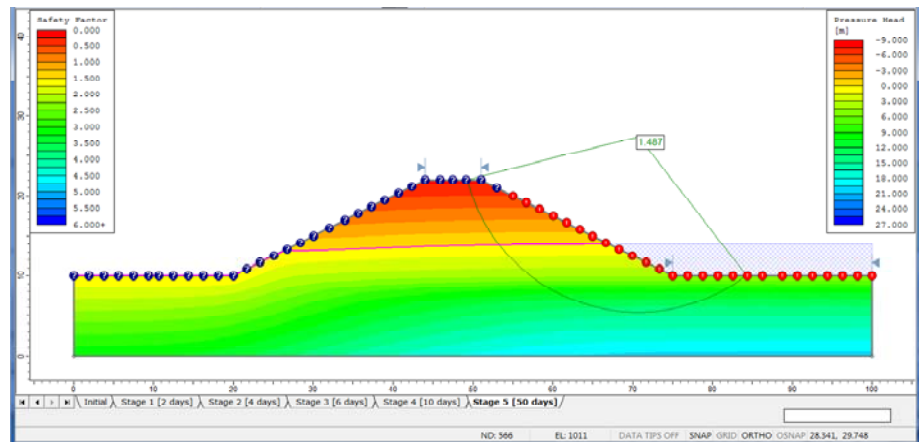


You can see that the solid pink line represents the water table at 50 days and the dashed pink lines represent the water table at other stages. Go back to the Display Options and turn off the water tables. Change the contours back to Pressure Head.

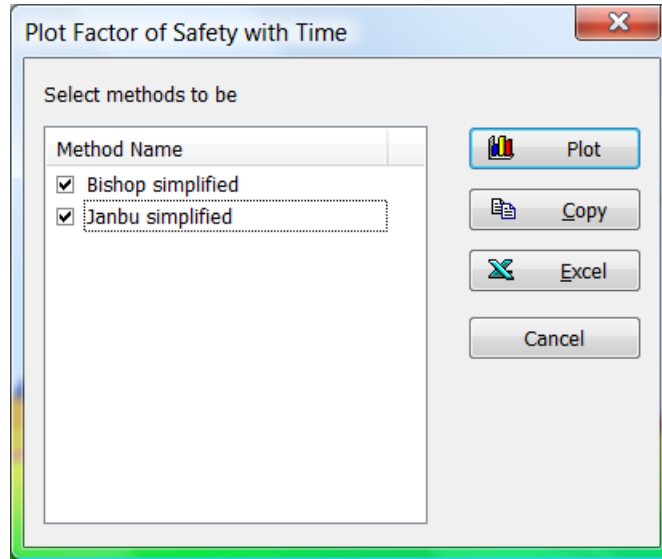
You can also see the changing factor of safety as the pore pressures change. When the water table is lowered, the factor of safety decreases dramatically since the weight of the water has been removed but the excess pore pressures have not yet dissipated. At 6 days, the factor of safety is just above 1, indicating that the slope will likely fail.



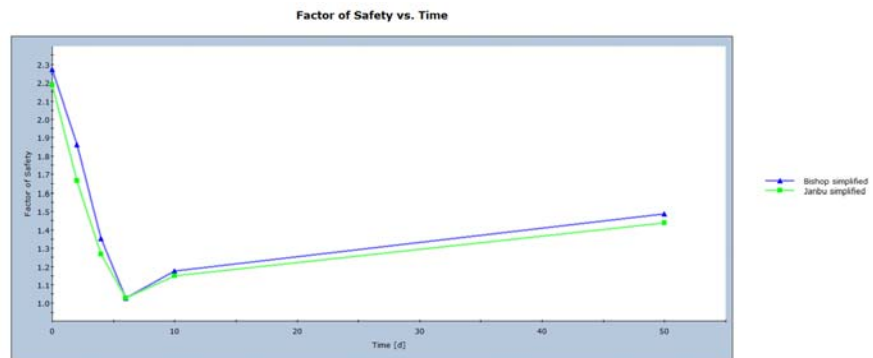
At 50 days, most of the excess pore pressures have dissipated and the dam becomes more stable.



You can plot the factor of safety versus time by going to **Data → Graph SF with Time**. You can choose which method results to plot. Choose both the Bishop method and the Janbu method as shown.



Click Plot to see the graph. It should look like this:



Here you can clearly see the rapid decrease in factor of safety as the water table is lowered and the gradual increase as the excess pore pressures dissipate. This example shows the importance of a transient groundwater analysis, since a steady state analysis would suggest that the dam is stable.

This concludes the tutorial.

Additional Exercise

At 50 days, the dam has not yet reached a steady state solution. Try adding another stage (at say 100 days) to see the final steady state factor of safety.