

**ANÁLISIS COMPARATIVO Y LIMITACIONES DE DISEÑO ENTRE
TERRAPLENES EJECUTADOS CON MATERIALES SELECCIONADOS Y
TERRAPLENES CON MATERIALES TOLERABLES**

**ANYELA MARCELA ESPINOSA ORTEGA
DIEGO ALFONSO ESCOBAR MARIÑO**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ**

2019

**ANÁLISIS COMPARATIVO Y LIMITACIONES DE DISEÑO ENTRE
TERRAPLENES EJECUTADOS CON MATERIALES SELECCIONADOS Y
TERRAPLENES CON MATERIALES TOLERABLES**

**ANYELA MARCELA ESPINOSA ORTEGA
DIEGO ALFONSO ESCOBAR MARIÑO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR
ING. LAURA MARCELA ESPINOSA HERMIDA**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación:

Ing. LAURA MARCELA ESPINOSA HERMIDA
Director de Proyecto

Ing.
Asesor de Proyecto

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

Fecha: 25 de noviembre de 2019.

CONTENIDO

Pág.	
	GLOSARIO.....10
	RESUMEN.....14
	ABSTRACT15
	1. INTRODUCCIÓN16
	2. GENERALIDADES18
	2.1. ANTECEDENTES18
	2.2. JUSTIFICACIÓN20
	3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....21
	3.1. Descripción del problema21
	3.2. Formulación del problema21
	4. OBJETIVOS.....22
	4.1. Objetivo General22
	4.2. Objetivos Específicos.....22
	5. ALCANCES Y LIMITACIONES23
	5.1. Alcances23
	5.2. Limitaciones.....23
	6. ESTADO DEL ARTE24
	7. MARCO DE REFERENCIA.....27
	7.1. Marco Teórico27
	7.2. Marco Legal.....30
	8. METODOLOGÍA33
	8.1. Recopilación de la información.....34

8.2. Elección del tipo de suelo.....	34
8.3. Ensayos de caracterización física.....	35
8.4. Modelaciones en el Software Slide	40
9. RESULTADOS.....	44
9.1. Modelación software Slide.....	51
10. Análisis y discusión de resultados	53
11. CONCLUSIONES	54
12. RECOMENDACIONES.....	56
13. BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXO 1	60
ANEXO 2	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Trabajos, investigaciones libros y tesis relacionados	24
Tabla 2: Requisitos de los materiales para terraplenes.....	29
Tabla 3. Ensayos de caracterización básica para material seleccionado.....	30
Tabla 4. Ensayos resistencia mecánica para material seleccionado.....	32
Tabla 5. Ensayo para material tolerable.	32
Tabla 6. Valores del factor de seguridad básicos mínimo directos.....	32
Tabla 7: suelo tseleccionado 2.....	35
Tabla 8: Datos de entrada para la modelación en el software Slide.....	40
Tabla 9: Metodología para el uso del software Slide.....	41
Tabla 10: Verificación de cumplimiento para Factor de Seguridad	50
Tabla 11: Resultados de ensayos para materiales Seleccionados y materiales tolerables tomados de la literatura.	51

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1: Sección transversal de la carretera en terraplén (Lavista M. M., 2017)	12
Imagen 2: Clasificación de los vehículos en Colombia (Sanchez, 2016)	30
Imagen 3: Metodología llevada a cabo.	33
Imagen 4: Informe de Ensayo de laboratorio de sondeo realizado para el informe 4G concesiones grupo 2 centro occidente Corredor Santander de Quilichao-Rumichaca, Tramo Pasto-Chachaguí (FONADE, 2015)	36
Imagen 5: Propiedades físicas de suelos obtenida en el “Estudio geológico y caracterización geotécnica en el sector rural de las veredas Helechal y Guasimal del municipio de tena departamento de Cundinamarca. (Barrera & Peña, 2015)	37
Imagen 6: Curva granulométrica del material principal y de aporte para las mezclas Artículo Diseño de mezclas de suelo compacto para la construcción de terraplenes. (Diseño de mezclas de suelo compacto para la construcción de terraplenes, 2007)	38
Imagen 7: Informe de estudio de suelos y análisis geotécnico del sector ubicado en el k4+180 de la vía puente Reyes-Gámeza (SANA, 2015)	39
Imagen 8: Valores máximos y mínimos de peso específico, ϕ y C para Suelos tolerables (Analysis, 2019)	40
Imagen 9: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para beta = 26°	46
Imagen 10: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para beta = 30°	46
Imagen 11: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para beta = 35°	47
Imagen 12: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para beta = 40°	47
Imagen 13: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para beta = 45°	47

Imagen 14: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para $\beta = 26^\circ$	48
Imagen 15: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para $\beta = 30^\circ$	49
Imagen 16: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para $\beta = 35^\circ$	49
Imagen 17: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para $\beta = 40^\circ$	50
Imagen 18: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para $\beta = 45^\circ$	50
Imagen 19: Modelación Angulo 26 Altura 3, SS1	52
Imagen 20: Modelación Angulo 26 Altura 3, ST1	52

GLOSARIO

- **Suelos:** son un agregado de partículas generalmente minerales, pero en ocasiones orgánica, de tamaño y familia muy variables, su principal origen se produce por la meteorización de las rocas y por la descomposición de los organismos vivos. (Sáez, 2010).

Desde el punto de vista de ingeniería se define suelo como cualquier material no consolidado, el cual está formado por partículas sólidas con líquidos y gases. Es el material de construcción más abundante en las prácticas de Ingeniería y es el soporte de las diversas estructuras.

El suelo contiene una amplia gama de materiales algunos de ellos son la arena, gravas, limos y arcillas.

- **Tipos de suelos**

- ✓ **Suelos no cohesivos:** Las partículas de suelo no tienden a juntarse ni a adherirse, sus partículas son relativamente grandes, también llamados suelos granulares o friccionantes. (Gravas, arenas, limos).

- ✓ **Suelos cohesivos:** Partículas muy pequeñas, predominan los efectos electroquímicos superficiales. Las partículas tienden a juntarse (interacción agua partícula). Suelos plásticos. (Arcillas)

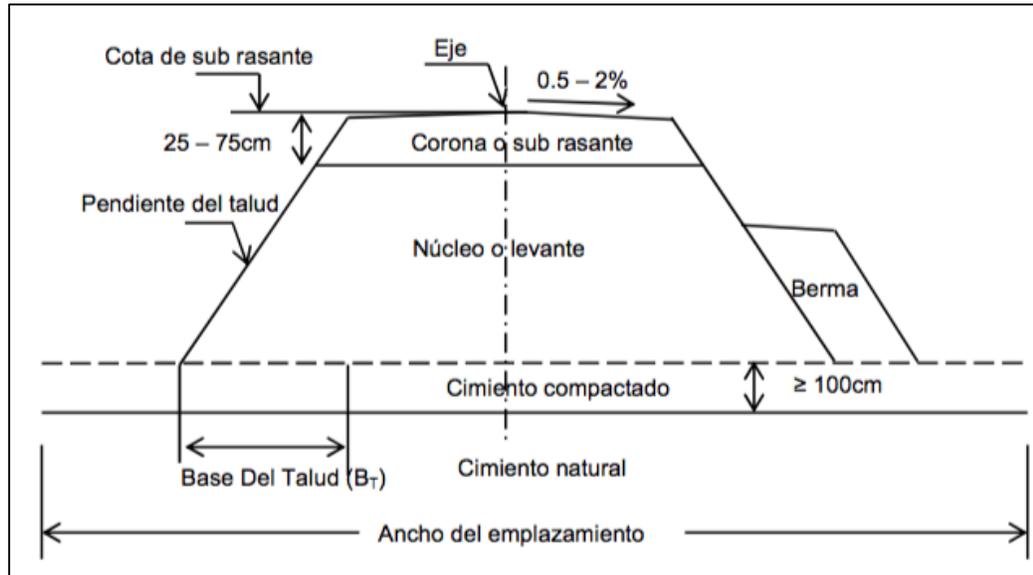
- ✓ **Suelos Organicos:** Suelos esponjosos, con grumos, compresibles. Prohibitivos para soporte de estructuras de ingeniería. (Turba, Muskeg) (Velazco, 2015)

- **Terraplén:** es la acumulación de tierra adecuada, tratada y compactada que permite levantar el nivel de un terreno y dar soporte a una vía (Beviá, 2000).

- **Partes de un terraplén:**

- ✓ **Corona:** es la capa de terminación del terraplén, en la que se asentará el firme, la cual está sometida a cargas de tráfico lo que implica fuertes sollicitaciones, por lo cual el material que la constituya debe tener una alta capacidad resistente. Su espesor puede variar dependiendo de la carga de suelo y del nivel de tráfico, además los suelos empleados en esta zona deben cumplir una serie de condiciones granulométricas y plásticas muy estrictas.
- ✓ **Núcleo:** es la parte central del terraplén, el cual tiene la mayor parte de su volumen, siendo el responsable directo de su geometría; en esta zona se asegura la estabilidad del talud como la altura necesaria para la cota definida en proyecto.
- ✓ **Cimiento:** se ubica debajo de la superficie original del terreno, es la capa más inferior de todas por lo cual está en contacto con el terreno natural directamente. Sus características mecánicas no son muy elevadas debido a que las tensiones que llegan son muy bajas al estar muy disipadas, cabe resaltar que existen condiciones donde se debe emplear material de buena calidad con el fin de mejorar las características resistentes del terreno. (Norato, 2013)

Imagen 1: Sección transversal de la carretera en terraplén



Fuente: Determinación de las dimensiones del dominio en la modelación numérica de terraplenes (Lavista, 2017)

- **Diagrama de masas:** se define como el volumen de material multiplicado por la distancia que se desplaza durante la construcción. Los diagramas de masas constan de dos objetos: una línea de diagrama de masas y una vista de diagrama de masas. La línea de diagrama de masas representa los volúmenes de transporte gratuito y transporte de pago en condiciones de desmonte y terraplén de una alineación. (AUTODESK, 2019)
- **Granulometría:** distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca (Sanchez, 2013)
- **Ensayo modificado de compactación:** es uno de los ensayos más utilizados en el estudio de compactación de suelos para la construcción de terraplenes y otras obras de tierra, determina la relación de humedad y la masa unitaria de los suelos compactados en molde. (Geotecnia, 2019)

- **Ensayo de corte directo:** determina los parámetros de resistencia al corte de los suelos, Angulo de fricción y cohesión. (INVIAS, 2012)
- **Ensayo de compresión inconfinado:** consiste en la aplicación de una carga axial a una probeta de suelo hasta llevarla a la falla, con el fin de determinar la resistencia a la compresión y la resistencia al corte. (INVIAS, 2012)
- **Ensayo de edométrico:** consta de un aparato, que, a modo de prensa, somete a una muestra de terreno a cargas verticales periódicas. Se realiza aplicando distintas cargas y midiendo la deformación producida en cada uno de los escalones de carga. (Geoquantics, 2017)
- **Modelación matemática:** 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 funcional del diseño. (Suárez, 2009)
- **Análisis de límite de equilibrio:** permite obtener un factor de seguridad a través de un análisis regresivo, obtener los valores de resistencia al cortante en el momento de falla. (Suárez, 2009)

RESUMEN

El presente proyecto contiene el desempeño de dos tipos de materiales de relleno permitidos por el instituto nacional de vías (INVIAS) en su capítulo 2 – Explanaciones, Artículo 220-12 Terraplenes, su aplicación y diseño. Para lo cual se estudió la caracterización física y el comportamiento mecánico de materiales seleccionados y materiales tolerables, evaluando los resultados de laboratorio obtenidos de la literatura donde se presentan resultados de los análisis de las propiedades mecánicas y de resistencia para materiales seleccionados por medio de ensayos como: granulometría, ensayo modificado de compactación, CBR, corte directo y compresión inconfiada.

Con los resultados obtenidos se estableció las condiciones de falla y se realizó un análisis comparativo en cuanto al desempeño que ofrecen los dos tipos de material exigidos por la normatividad colombiana frente a los requerimientos constructivos de los terraplenes y mediante el uso del método de análisis de equilibrio limite se obtuvo el factor de seguridad y la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre la superficie de falla, para ello se realizó la modelación de los parámetros de diseño previamente establecidos en el software Slide el cual mediante el criterio de equilibrio limite permite validar la condición de estabilidad de las diferentes configuraciones geométricas de los terraplenes.

Palabras clave: Terraplén, Suelos tolerables, Suelos seleccionados, Factor de seguridad, Cohesión, Angulo de Fricción.

ABSTRACT

This project contains the performance of two types of filling materials permitted by the National Institute of Roads (INVIAS) in Chapter 2 – Esplanades, Article 220-12 Terraplènes, their application and design. For which the physical characterization and mechanical behavior of selected materials and tolerable materials was studied, evaluating the laboratory results obtained from the literature where results of the analysis of the properties are presented mechanics and mechanics resistance for selected materials by means of tests such as: granulometry, modified compaction test, CBR, direct cutting and inferred compression.

The results obtained established the conditions of failure and conducted a comparative analysis as to the performance offered by the two types of material required by Colombian regulations against the constructive requirements of the embankments and by using the limit balance analysis method, the safety factor was obtained and the comparison of the resistant and acting forces or moments on the fault surface, for this purpose the modeling of the design parameters previously set in the Slide software which, through the limit balancing criterion, allows to validate the stability condition of the different geometric configurations of the embankments.

Keywords: Fill, Tolerable Floors, Selected Floors, Safety Factor, Cohesion, Friction Angle.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el hombre siempre se ha visto enfrentado a la necesidad de establecer diferentes vías de comunicación como parte del desarrollo social e individual, factores que lo han llevado a la innovación de diversos aspectos con el fin de suplir sus necesidades, una de ellas era la de unir poblaciones mediante la construcción de caminos, a los cuales se les ha venido realizando mejoras que han permitido generar estructuras viales resistentes acorde a la funcionalidad que tienen. Dichas mejoras de infraestructura han permitido incorporar conceptos como el desarrollo de pendientes máximas para lograr velocidades de diseño acordes a los requerimientos de cada una de las vías a proyectar. Así mismo, regulaciones ambientales requieren de manera general un aprovechamiento de tierras de corte en rellenos (terraplenes) en lo que se conoce como diagrama de masas, motivo por el cual el estudio de estas obras es importante y relevante para el correcto desarrollo de la vía.

En Colombia actualmente se está realizando una fuerte inversión en infraestructura vial, a través de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) se vienen desarrollando grandes proyectos como lo son las carreteras 4G, las cuales cuentan con el diseño y la construcción de grandes puentes y túneles.

Por otra parte, para las vías terciarias, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) estructuró el programa “Colombia Rural” con el fin de realizar mejoramiento y mantenimiento a esta red vial (INVIAS, 2019). Todos estos proyectos buscan favorecer el crecimiento y desarrollo del país y facilitar los desplazamientos de productos elaborados por los diferentes sectores económicos además de abastecer los mercados regionales.

Lo anterior es claramente el reflejo de un marco institucional fortalecido e interesado en el desarrollo de proyectos a nivel de infraestructura, vías primarias que conectan grandes capitales, vías secundarias que acercan municipios y vías terciarias que conectan las regiones más apartadas del país.

Según Luis Bañón Blázquez un terraplén es la acumulación de tierra debidamente tratada y posteriormente compactada para asegurar su estabilidad y servir de soporte a la Vía, estos son construidos en zonas donde se tiene una cota inferior a la prevista en el proyecto de construcción, para lo cual se utiliza material que se extrae en la zona de desmonte, siempre y cuando sea apta para el uso que se requiere, de no ser así se emplea tierras de zonas cercanas.

Teniendo en cuenta la topografía de nuestro país, surge la necesidad construir terraplenes, con el propósito de garantizar las pendientes adecuadas y lograr salvar depresiones y así formar un plano de apoyo adecuado para ejecutar la obra. Resaltando la importancia de la funcionalidad de los terraplenes en el desarrollo de las obras viales es necesario realizar estudios que nos permitan tener más precisión en su construcción.

En el presente documento contiene el desempeño de dos tipos de especificaciones de materiales permitidos según INVIAS en su capítulo 2 – Explanaciones, Artículo 220 - 12 Terraplenes, su aplicación y diseño. Para lo anterior se estudió la caracterización física, el comportamiento mecánico y la resistencia de los materiales seleccionados y materiales tolerables, evaluando los resultados de laboratorio obtenidos de la literatura donde se presentan los resultados de dichas caracterizaciones.

Con la información obtenida se estableció las condiciones de falla y se realizó un análisis comparativo en cuanto al desempeño que ofrecen los dos tipos de material exigidos por la normatividad colombiana frente a los requerimientos constructivos de los terraplenes y mediante el uso del método de análisis de equilibrio límite se obtuvo el factor de seguridad y la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre la superficie de falla.

2. GENERALIDADES

2.1. ANTECEDENTES

Hace un siglo todo tenía validez para formar el relleno de una carretera o una vía de ferrocarril, lo que importaba era obtener el volumen que se quería proyectar, los terraplenes se construían con un vertido del material que se tenía disponible en ese momento y se dejaban consolidar con el tiempo (Escario, 1981) .

La compactación que se utilizaba en aquellos terraplenes era más nominal que efectiva, puesto que no se tenía claridad sobre el comportamiento de los materiales de los suelos.

Diferentes científicos han realizado aportes importantes en la materia como lo son: Charles Agustín de Coulomb quien en 1773 publica su tratado sobre el fracaso de los suelos, William John Macquorn Rankie con el artículo de estrés de los suelos en 1857 y Henry Philibert Gaspard Darcy con su obra de permeabilidad de suelos en 1856 , obteniendo así las primeras contribuciones para dar una definición del comportamiento de los materiales de los suelos; Pero fue en 1929 Karl von Terzaghi en conocido como el padre de la mecánica de suelos, quien ideó un método racional que permitiera dar solución a los problemas de la ingeniería de suelos y cimentaciones, además de establecer una clasificación para los suelos (Escario, 1981), aportes necesarios en la actualidad para la construcción de la malla vial.

En 1981 el Ingeniero Ventura Escario de Madrid España, publica el libro Terraplenes y Pedraplenes, en el cual da a conocer las técnicas de proyecto y construcción de explanaciones tanto en España como en el Extranjero (Escario, 1981). En Cuba la ingeniera Milena Mesa Lavista realizó una investigación en la cual empleó la modelación para el diseño de terraplenes altos de carretera, ella buscó la forma de obtener especificaciones de diseño para los terraplenes con alturas de 30m, mediante la modelación numérica y evaluación de estado tenso-deformacional,

clasificando el terraplén alto en función de las propiedades físico-químicas y en una de sus recomendaciones menciona la realización de estudios de la disposición de los diferentes tipos de suelos en el interior del terraplén, teniendo en cuenta la disponibilidad de los mismos (Lavista, 2017).

En Colombia se han realizado varios estudios de la malla vial, en los cuales se han nombrado los problemas presentados por la deficiencia en los materiales de los terraplenes, uno de ellos es: “Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia”, donde la superficie de rodadura se encontró muy deteriorada, presentando asentamiento y empozamiento de agua, lo cual ha producido dificultad en el acceso para estos puentes. Dado lo anterior se llegó a la conclusión de realizar mejoramiento a los terraplenes de acceso con el fin de evitar la presencia de los mencionados inconvenientes (Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial nacional de Colombia, 2016), siendo necesaria un manejo idóneo de los materiales para la construcción de los mismos, teniendo en cuenta la clase de suelos que se presentan en los diferentes lugares y verificando si estos son aptos o no para su uso. De no ser así se debe emplear material de zonas cercanas que permitan cumplir adecuadamente con la funcionalidad del terraplén de acceso en los puentes de acero.

2.2. JUSTIFICACIÓN

El presente documentos se realiza con el objetivo de dar al constructor parámetros desde la estructuración del proyecto y la elaboración de diseños definitivos para la construcción de terraplenes, lo anterior teniendo en cuenta el déficit de información referente al comportamiento y caracterización de materiales aptos para la construcción; si bien es cierto en nuestro país contamos con especificaciones técnicas las cuales está dispuestas en la norma INVIAS Capítulo 2 – Explanaciones, Artículo 220 – 12 Terraplenes, no se cuentan con muchos estudios para este tipo de estructuras geotécnicas, y de los trabajos consultados como referencia teórica fue posible evidenciar se centran en fallas causadas por agentes específicos, un ejemplo de ello es la tesis realizada por Ana Avendaño en el 2018 denominado “Estudio de agrietamiento de terraplenes de pequeñas presas”, razón por la cual se hace necesario elaborar un estudio que permita con la caracterización física y el comportamiento mecánico de materiales seleccionados (tipo sub-base) y materiales tolerables (material de préstamo), evaluar el desempeño de las obras considerando parámetros obtenidos bajo condiciones controladas, además de validar las condiciones limitantes de la geometría.

Para la evaluación técnica de los materiales se realizaron modelos geotécnicos empleando el criterio de equilibrio limite que permita validar la condición de estabilidad de las diferentes configuraciones geométricas de los terraplenes mediante el uso del software SLIDE (Rocscience).

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

En Colombia, la construcción de terraplenes se encuentra especificada en la norma INVIAS Capítulo 2 – Explanaciones en el artículo 220-12, donde se informa las exigencias requeridas en los materiales, su uso, la preparación del terreno, compactación, volumen y su construcción, no obstante, es importante resaltar que las condiciones en las cuales se desarrolla la obra no son las mismas en todos los lugares de nuestro país, razón por la cual se han presentado fallas como son erosión, deslizamientos locales y asentamientos.

Estos problemas afectan el buen desarrollo del flujo vehicular de las diferentes zonas del país, razón por la cual se hace necesario realizar estudios que permitan tener referentes de los materiales idóneos en la construcción del terraplén, además de utilizar modelos de cálculo que permitan tener información más acertada como lo son análisis de estabilidad, de equilibrio limite y análisis por elementos finitos.

3.2. Formulación del problema

La realización de un análisis comparativo y limitaciones de diseño entre terraplenes ejecutados con materiales seleccionados y terraplenes con materiales tolerables surge de la necesidad de obtener información referente al comportamiento, desempeño y caracterización de materiales aptos para la construcción de estas estructuras y con ello evaluar el desempeño de las obras considerando parámetros obtenidos de ensayos en la literatura.

¿Cuáles es el desempeño y las limitaciones de diseño de terraplenes teniendo en cuenta los parámetros de resistencia mecánica obtenidos para materiales seleccionados y su comparación con materiales tolerables?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Analizar mediante un estudio comparativo el comportamiento de los terraplenes ejecutados con materiales seleccionados y terraplenes con materiales tolerables y sus limitaciones de diseño, utilizando modelación numérica como herramienta para obtener parámetros de diseño.

4.2. Objetivos Específicos

- Definir parámetros de resistencia mecánica a partir de resultados de ensayos tomados de la literatura de los materiales seleccionados y materiales tolerables.
- Validar la estabilización de terraplenes a partir de la caracterización mecánica de materiales seleccionados y materiales tolerables mediante modelos de cálculo evaluados a partir del software de equilibrio limite SLIDE (Rocscience).
- Determinar las ventajas y desventajas de la construcción de terraplenes con materiales seleccionados y materiales tolerables.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. Alcances

Con el presente proyecto se genera un análisis comparativo y de limitaciones de diseño entre terraplenes ejecutados con materiales seleccionados y terraplenes con materiales tolerables obteniendo información referente al comportamiento, desempeño y caracterización de materiales aptos para la construcción de estas estructuras y evaluando el desempeño de las obras considerando parámetros obtenidos de ensayos en la literatura.

Esta investigación fue desarrollada en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia en el año 2019 y contiene la metodología de los ensayos de laboratorio para caracterización básica y de resistencia mecánica tomados de la literatura, además de la modelación y los resultados obtenidos mediante el software SLIDE.

5.2. Limitaciones

Una de las limitaciones para el desarrollo del proyecto es la obtención de información de ensayos de laboratorio realizados para materiales seleccionados y materiales tolerables, además para este último la caracterización puede llegar a ser variable y su definición paramétrica está sujeta al contenido de finos que tenga el material. Por otra parte, otra limitación radica en las variables no previstas para control de modelos de cálculo como lo es el caso nivel freático.

6. ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del presente proyecto de grado fue necesario tener diferentes referencias como lo son tesis, trabajos libros e investigaciones, lo cual será de gran utilidad para complementar las ideas aquí descritas.

Tabla 1. Trabajos, investigaciones libros y tesis relacionados

AUTORES	TÍTULO DEL TRABAJO	RESUMEN	APOORTE O RELEVANCIA PARA EL TRABAJO INVESTIGATIVO	FECHA DE PUBLICACIÓN, INSTITUCIÓN Y CIUDAD
Ventura Escario	Terraplenes y Pedraplenes	Libro en el cual se expone los conocimientos de la época en cuanto a las técnicas de proyecto, construcción y control de explanaciones tanto en España como en el extranjero	Definiciones e historia de los terraplenes, además de los parámetros de diseño y construcción que en aquel tiempo se empleaban.	1981, M.O.P.U Dirección General de Carreteras, Madrid-España
Edwin García, Taro Uchimura	Estudio del mecanismo de falla de terraplenes debido a la infiltración de aguas lluvias mediante el monitoreo de presiones de poros y contenidos de agua	El artículo da a conocer diferentes experimentos para lo cual utilizaron varios modelos a escala y así estudiar el proceso de infiltración en terraplenes sometidos a aguas lluvias.	Tipo de falla en terraplén inducida por infiltración de aguas, utilizando modelos con suelo arenoso y alto contenido de finos.	2007, DYNA. Medellín- Colombia

Continuación tabla 1 Trabajos, investigaciones libros y tesis relacionados

AUTORES	TÍTULO DEL TRABAJO	RESUMEN	APORTE O RELEVANCIA PARA EL TRABAJO INVESTIGATIVO	FECHA DE PUBLICACIÓN, INSTITUCIÓN Y CIUDAD
Ana María Avendaño Flechas	Estudio de agrietamiento de terraplenes de pequeñas presas	La tesis indica los resultados obtenidos mediante una modelación física a escala de un terraplén de presas pequeñas, obteniendo que la principal causa de agrietamiento superficial se debe a procesos de desecación.	Causas de agrietamiento superficial en terraplenes de pequeñas presas, siendo de utilidad para mejorar las especificaciones de diseño y construcción de este tipo de terraplenes.	2018-UNAL, Bogotá-Colombia
Edgar Muñoz y Edgar Valbuena	Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia	Artículo que estudia el estado y los daños típicos de los puentes en acero y en estructura mixta una de ellas es el deterioro de la superficie de rodadura en los terraplenes	Fallas de la capa de rodadura en los terraplenes de acceso, por lo cual se necesitó cambios en la superficie del pavimento o cambio del concreto.	2004, Boletín Técnico, Bogotá-Colombia
Milena Mesa; José Álvarez; Eduardo Tejeda; Carlos Recarey.	Determinación de las dimensiones del dominio en la modelación numérica de terraplenes	El artículo presenta un estudio para determinar la distancia más propicia desde el pie del talud hasta la condición de frontera.	Recomendaciones para diferentes condiciones de contorno con variación de las pendientes de los taludes en problemas relacionados con la modelación de terraplenes	2016, DYNA, Medellín-Colombia

Continuación tabla 1 Trabajos, investigaciones libros y tesis relacionados

AUTORES	TÍTULO DEL TRABAJO	RESUMEN	APORTE O RELEVANCIA PARA EL TRABAJO INVESTIGATIVO	FECHA DE PUBLICACIÓN, INSTITUCIÓN Y CIUDAD
Milena Mesa Lavista	Empleo de la modelación para el diseño de terraplenes altos de carretera	Mediante el uso de la modelación numérica se obtuvo especificaciones para el diseño de terraplenes cuya altura alcanzaran lo 30m	Uso de la modelación numérica para obtener especificaciones de diseño de terraplenes de carretera con alturas de 30m	2017, Editorial universitaria, Habana-Cuba

Fuente: Autores

7. MARCO DE REFERENCIA

7.1. Marco Teórico

Un terraplén debe cumplir con las condiciones de estabilidad y resistencia, su adecuado diseño permite brindar una base segura al pavimento y su proceso constructivo comprende varias etapas y operaciones que le permiten cumplir con las características estructurales de cada capa que lo compone, de allí la importancia del adecuado tratamiento de los materiales empleados durante su construcción.

En la literatura se encuentran muy pocos estudios que investiguen el comportamiento de un terraplén, sus fallas y sus limitaciones. Estas características juegan un rol muy importante en su construcción, puesto que son estructuras susceptibles, a problemas de asentamientos diferenciales, fallas locales, fallas de fondo, deformación interna del material, contracción y expansión del material de relleno, todas estas atribuibles a deficientes procesos constructivos y mala selección de materiales de conformación (WSDOT, 2005).

Para evitar estos inconvenientes al momento de construir el terraplén se deben tener en cuenta factores que los afectan como son: la geometría, los parámetros geológicos, la presencia de grietas, cargas dinámicas, propiedades de resistencia y el peso unitario de los suelos.

Dentro de las metodologías existentes para la estabilidad de terraplenes se encuentra la teoría de equilibrio limite, que permite mediante la valoración de esfuerzos actuantes y resistentes la determinación de un factor de seguridad en la configuración geométrica de la estructura (Suárez, 2009). En la mayoría de las ocasiones los factores primarios que afectan la estabilidad no pueden ser incluidos en un modelo matemático, puesto que se tienen limitaciones como:

- ✓ Se basan solamente en la estática, y no tienen en cuenta deformaciones.
- ✓ Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos.

- ✓ Utilizan modelos de falla muy sencillo, teniendo en cuenta la simpleza del modelo por su configuración geométrica y el número de capas o estratos que se evalúan.

Para evaluar el factor de seguridad se utilizó el software SLIDE, este programa comercial permite realizar los análisis de equilibrio más rigurosos, proporcionando una muy buena predicción del comportamiento de la interacción de la estructura (Maula, 2011), por medio de los métodos de Bishop (asume todas las fuerzas cortantes entre dovelas son cero. Satisfaciendo el equilibrio de momentos), Janbu (permite el análisis de diferentes condiciones y factores de sobre carga en la corona del terraplén), Morgenstern y Price (satisface el equilibrio de fuerzas y momentos en bloques individuales, asumiendo que están varían con una función arbitraria), y Spencer (supone que la interacción entre rebanadas es paralela, con un componente de empuje y con un ángulo de inclinación constante).

Para mejorar la estabilidad del terraplén es recomendable utilizar materiales de calidad teniendo en cuenta los parámetros de resistencia como es el ángulo de fricción, la cohesión, propiedades físicas de los materiales, peso unitario, estos deben cumplir con los requisitos para poder ser utilizados como suelos seleccionado y suelos tolerables, según artículo 220 del 2012 de la norma INVIAS.

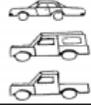
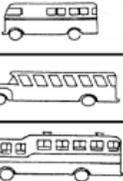
Tabla 2: Requisitos de los materiales para terraplenes

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES
Partes del terraplén a las que se aplican		Todas	Todas	Cimiento y Núcleo
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	150
Porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	E-123	80	80	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) en masa, máximo	E-123	25	35	35
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	0	1.0	1.0
Límite líquido, máximo (%)	E-125	30	40	40
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-126	10	15	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) <i>(Nota 1)</i>	E-148	10	5	3
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E-148	0.0	2.0	2.0
Índice de colapso, máximo (%) <i>(Nota 2)</i>	E-157	2.0	2.0	2.0
Contenido de sales Solubles, máximo (%)	E-158	0.2	0.2	-

Fuente: Instituto Nacional de vías, capítulo 2 Explanaciones Artículo 220 Terraplenes. (INVIAS, 2012)

Además de tener en cuenta la información suministrada por el INVIAS en su artículo 220 Terraplenes, se toma el ancho de la corona del terraplén teniendo en cuenta que el diseño se realiza para una vía primaria y por ende se toman las cargas por eje equivalente de los vehículos que transitan por este tipo de corredores viales.

Imagen 2: Clasificación de los vehículos en Colombia

TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA	TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA
AUTOS			C3 Y C4	CAMION C3	
BUSES				CAMION C4	
BUSETA				TRACTO-CAMION C2-S1	
BUS				TRACTO-CAMION C2-S2	
BUS METROPOLITANO		TRACTO-CAMION C3-S1			
C2-P	CAMION DE DOS EJES PEQUENO		C5	TRACTO-CAMION C3-S2	
C2-G	CAMION DE DOS EJES GRANDE		> C5	TRACTO-CAMION C3-S3	

Fuente: caracterización del tránsito (Sanchez, 2016)

7.2. Marco Legal

En las tablas 3, 4 y 5 ensayos de caracterización básica para material seleccionado, ensayos resistencia mecánica para material seleccionado y ensayo para material tolerable, se encuentran descritos los parámetros de ensayos de laboratorio según normatividad colombiana para la caracterización de suelos.

Tabla 3. Ensayos de caracterización básica para material seleccionado

Nombre	Descripción	Norma
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos	Es la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo	I.N.V.E. 123-13
Determinación del valor del 10% de finos	Procedimiento para evaluar la resistencia mecánica de un agregado grueso al aplastamiento cuando es sometido a un esfuerzo de compresión, y así determinar la carga necesaria para obtener 10% de finos	I.N.V.E. 224-13

Continuación Tabla 3. Ensayos de caracterización básica para material seleccionado

Nombre	Descripción	Norma
Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos	Determinar el limite plástico e índice de plasticidad de los suelos, contribuyendo a la caracterización de la fracción fina de estos	I.N.V.E. 126-13
Determinación de las masas unitarias máxima y mínima para el cálculo de la densidad relativa	Procedimiento para determinar la masa unitaria mínima y máxima de una arena seca, no cementada, que pase en su totalidad por el tamiz No. 4 y no contenga más de un 10% de material que pase por el tamiz N. 200	I.N.V.E. 136-13
Relaciones humedad-peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación y ensayo modificado de compactación)	Ensayos para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación), compactados en molde	I.N.V.E. 141-13 I.N.V.E. 142-13
CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada	Determinación de un índice de resistencia de los suelos de subrasante, subbase y base, para material que contenga tamaños máximos de partículas de menos de 19mm	I.N.V.E. 148-13

Fuente: Autores

Tabla 4. Ensayos resistencia mecánica para material seleccionado

Nombre	Descripción	Norma
Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD)	Determina la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada empleando el método de corte directo, deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de corte determinado	I.N.V.E. 154-13

Fuente: Autores

Tabla 5. Ensayo para material tolerable.

Nombre	Descripción	Norma
Compresión inconfiada en muestras de suelos	Determina la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación.	I.N.V.E. 152-13

Fuente: Autores

Tabla 6. Valores del factor de seguridad básicos mínimo directos

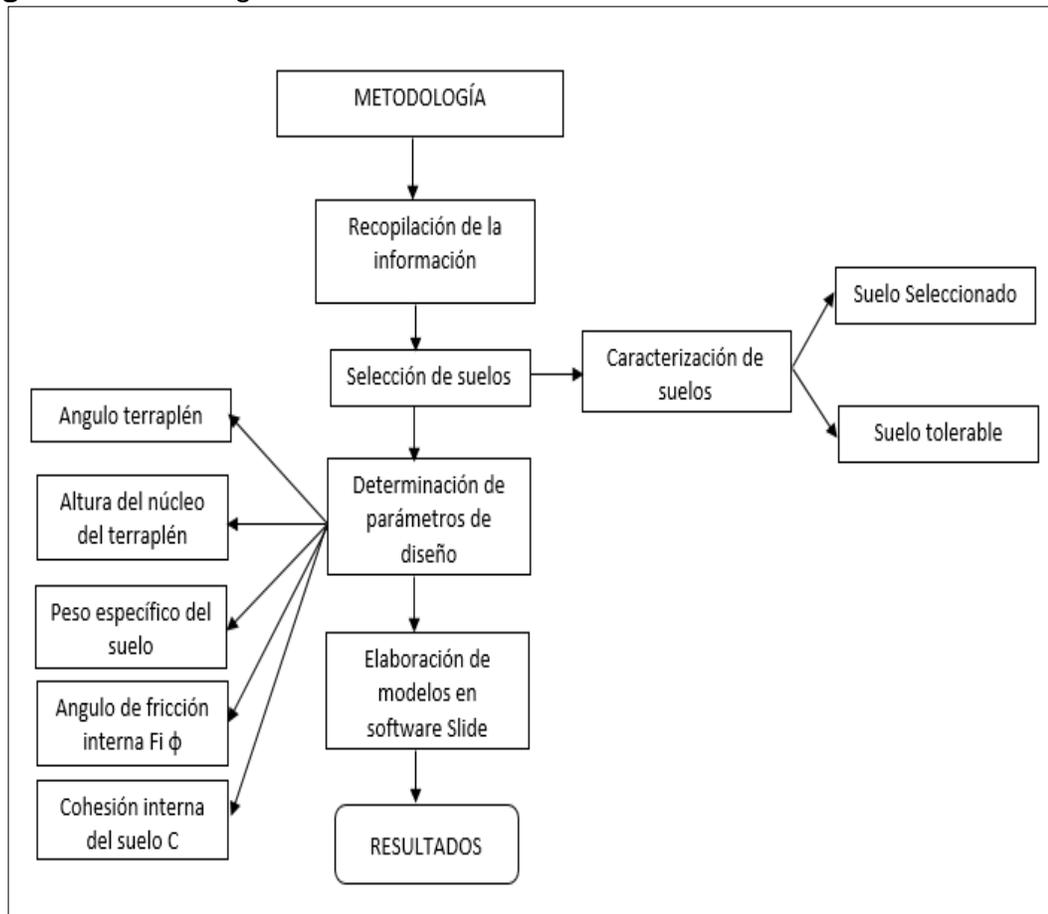
Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Fuente: NSR-10 título H. Tabla H.2.4.1. Factores de seguridad básicos mínimos directos. (Ministerio de Ambiente, 2010)

8. METODOLOGÍA

Para la presente investigación se realizaron diferentes modelaciones en el software Slide, en la cual se alternaron los datos obtenidos de compactación, peso específico corte directo y Ángulo de fricción interna obtenidos de fuentes bibliográficas, tanto para materiales seleccionados y materiales tolerables, realizando variaciones en los ángulos (26° , 30° , 35° , 40° y 45°) y la altura del núcleo del terraplén (3, 6, y 10m). La procedencia de los ángulos mencionados anteriormente surge como una condición entre los ángulos típicos con variación en la fricción en función del contenido de finos del material explorado.

Imagen 3: Metodología llevada a cabo.



Fuente: Autores

8.1. Recopilación de la información

Para recolectar la información necesaria se realizó una búsqueda exhaustiva en la base de datos Science Direct, Proquest y Google Academic, en los cuales se utilizaron diferentes palabras claves de búsqueda como “embankment roads”, “characterization of selected and tolerable soils” “factor de seguridad en terraplenes”, “Caracterización geotécnica y geológica de suelos”, lo cual nos permitió seleccionar la información pertinente para esta investigación. Cabe resaltar que también se obtuvo información de fuentes nacionales como libros y normatividad vigente para los suelos.

8.2. Elección del tipo de suelo

En el desarrollo del trabajo experimental se trabajó con dos tipos de suelos, que para el caso fueron suelos seleccionados y suelos tolerables, de los cuales se obtuvieron las características físicas a través de ensayos de laboratorio dispuestos en la literatura obtenida, para ello se seleccionó los datos de los suelos dispuestos en los informes denominados “Estudio geológico y caracterización geotécnica en el sector rural de las veredas Helechal y Guazimal del municipio de Tena departamento de Cundinamarca”, “4G concesiones. grupo 2 centro occidente Corredor Santander de Quilichao-Rumichaca, Tramo Pasto - Chachaguí”, “ en los cuales se realizaron diferentes apiques con sus respectivos ensayos de laboratorio, además se obtuvo información de los informes denominados Diseño de mezclas de suelo compacto para la construcción de terraplenes, Estudio de suelos y análisis geotécnico del sector ubicado en el k4+180 de la vía puente Reyes-Gámeza los datos dispuestos en la biblioteca del software denominado GeoStructural Analysis.

8.3. Ensayos de caracterización física

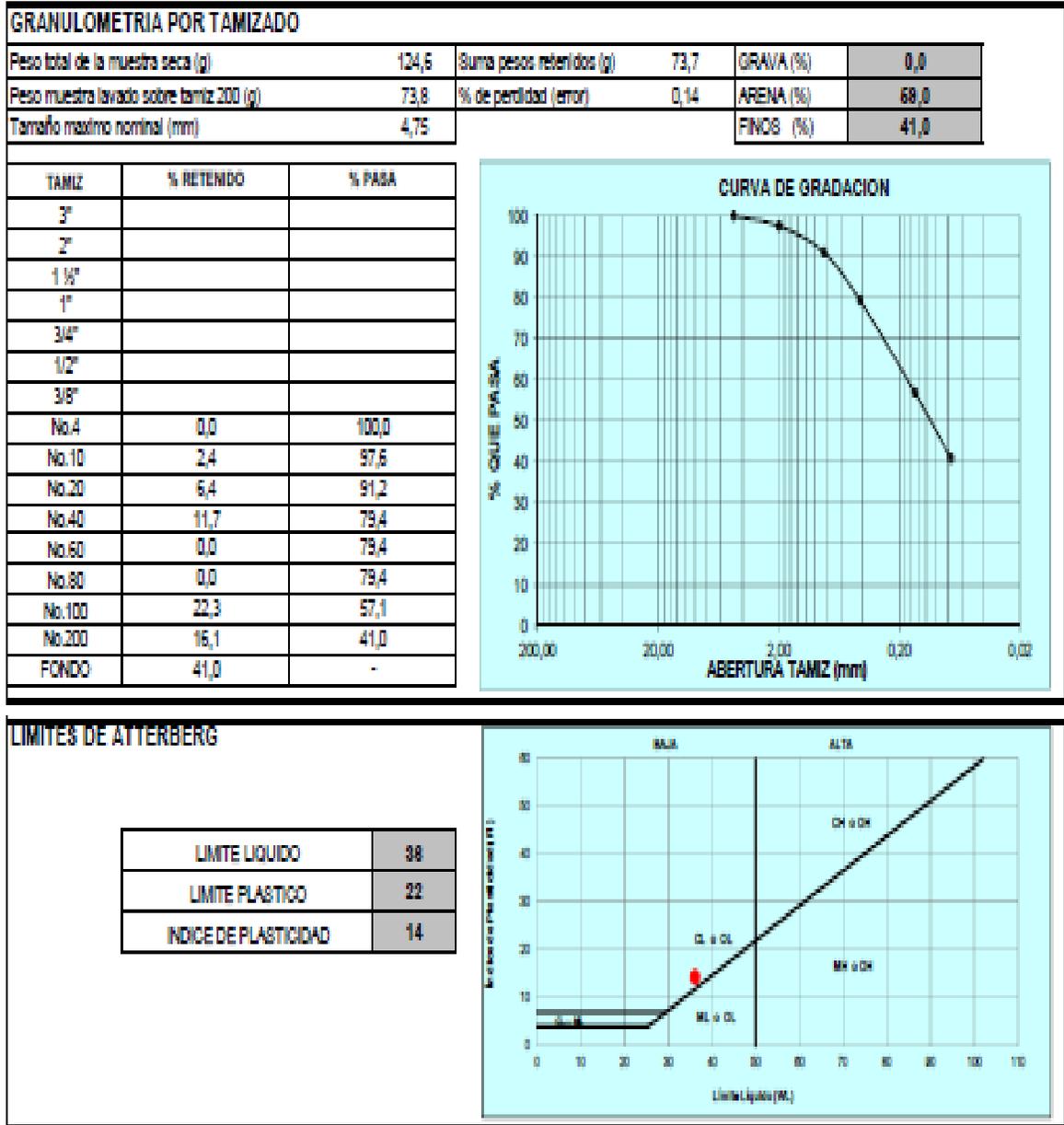
De la información recolectada se seleccionó los suelos que cumplieran con los parámetros de suelos seleccionados y suelos tolerables de la norma INVIAS descritos previamente en las tablas 3 (Ensayos de caracterización básica para material seleccionado), 4 (Ensayos resistencia mecánica para material seleccionado) y 5 (Ensayo para material tolerable), obteniendo la siguiente información:

Tabla 7: Suelo Seleccionado No. 1

SONDEO / APIQUE N°	MUESTR A N°	PROF. (m)	PROPIEDADES FISICAS SUELOS					CLASIF (U.S.C.)	P.T. # 200
			Wn (%)	LL	LP	IP			
S10	M1	1,50	14,79						
	M2	1,80	16,94	38,12	36,73	1,38	ML	1,117	
S11	M1	1,40	13,27						
	M2	2,00	14,37	30,71	21,95	8,76	ML	0,81	
S12	M1	1,70	5,32						
	M2	1,75	14,67	29,72	24,32	5,40	CL-ML	1,32	
S13	M1	1,70	18,45						
	M2	2,00	31,37	24,7	20,45	4,25	CL-ML	0,74	
S14	M1	1,60	23,24						
	M2	1,85	14,09	23,89	22,50	1,39	ML	7,69	
S15	M1	1,55	12,25						
	M2	1,90	40,92	21,77	20,00	1,77	ML	8,27	
S16	M1	1,70	20,10						
	M2	1,95	23,87	23,77	22,58	1,19	ML	6,71	
S17	M1	1,38	25,38						
	M2	1,80	22,59	28,50	20,22	8,28	CL	3,40	
S18	M1	1,40	13,79						
	M2	1,70	25,60	28,66	22,22	6,44	CL-ML	3,43	

Fuente: Propiedades físicas de suelos obtenida en el “Estudio geológico y caracterización geotécnica en el sector rural de las veredas Helechal y Guasimal del municipio de tena departamento de Cundinamarca. (Barrera, y otros, 2015)

Imagen 4: Suelo Seleccionado No. 2



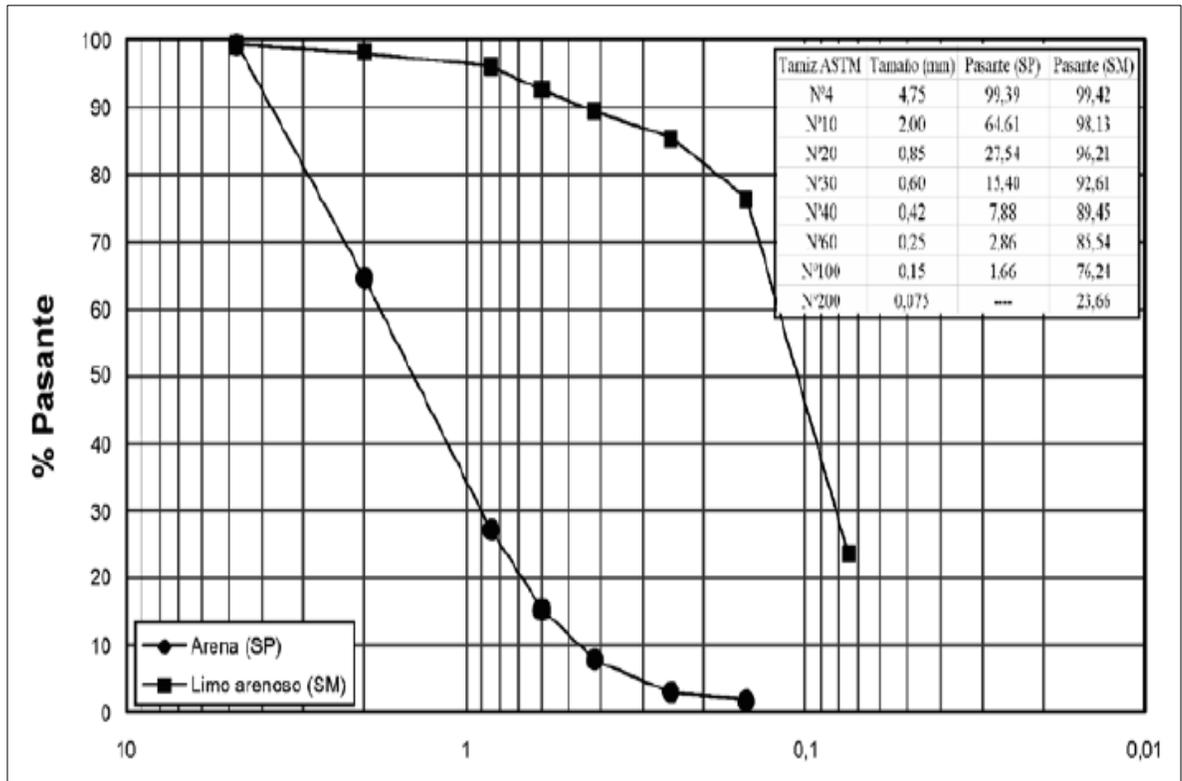
Fuente: Informe de Ensayo de laboratorio de sondeo realizado para el informe 4G concesiones grupo 2 centro occidente Corredor Santander de Quilichao-Rumichaca, Tramo Pasto-Chachagú (FONADE, 2015)

Tabla 8: Suelo Seleccionado No. 3

MEMORIA DE SONDEOS															
PROYECTO:		ESTUDIO GEOLOGICO Y CARACTERIZACION GEOTECNICA EN EL SECTOR RURAL DE LAS VEREDAS HELECHAL Y GUASIMAL DEL MUNICIPIO DE TENA - DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA													
APIQUES/MUESTREO LOCALIZACION:		810-811-812-813-814-815-816-817-818-819 SECTOR RURAL, VEREDAS GUASIMAL-HELECHAL, MUNICIPIO DE TENA, CUNDINAMARCA													
FECHA:		JULIO DE 2016													
Inalterada															
alterada															
		PROPIEDADES FISICAS SUELOS							CORTE DIRECTO		λ HUMEDO		RESISTENCIA AL CORTE SUELOS		PENETROMETRO
SONDEO / APIQUE N°	MUESTRA A N°	PROF. (m)	Wn (%)	LL	LP	IP	CLASIF (U.S.C.)	P.T. # 200	C	ψ	λ SECO	λ HUMEDO	COMPRESION INCONFINADA qu(kg/cm²)	C(kg/cm²)	BOLSILLO Kg/cm²
810	M1	1,50	14,79												3,5
	M2	1,80	16,94	38,12	36,73	1,38	ML	1,117	1,05	21,8	2,02	1,84	1,06	0,53	4
811	M1	1,40	13,27												4
	M2	2,00	14,37	30,71	21,95	8,76	ML	0,81	1,24	7,29	1,82	1,67	1,56	0,78	4
812	M1	1,70	5,32												4
	M2	1,75	14,67	29,72	24,32	5,40	CL-ML	1,32	1,28	5,48	1,83	1,52	1,28	0,64	4
813	M1	1,70	18,45												4
	M2	2,00	31,37	24,7	20,45	4,25	CL-ML	0,74	1,12	21,8	2,03	1,82	2,09	1,045	4
814	M1	1,60	23,24												3,5
	M2	1,85	14,09	23,89	22,50	1,39	ML	7,69	0,96	7,74	1,97	1,66	1,61	0,805	3,5
816	M1	1,55	12,25												3,5
	M2	1,90	40,92	21,77	20,00	1,77	ML	8,27	0,72	8,19	1,98	1,66	1,65	0,825	3,5
816	M1	1,70	20,10												4
	M2	1,95	23,87	23,77	22,58	1,19	ML	6,71	1,0	10,24	2,0	1,68	1,68	0,84	4
817	M1	1,25	25,28												3,5
	M2	1,80	22,59	28,50	20,22	8,28	CL	3,40	1,93	20,6	2,14	1,8400	1,01	0,505	4
818	M1	1,40	13,79												4
	M2	1,70	25,60	28,66	22,22	6,44	CL-ML	3,43	1,52	9,31	2,18	1,88	1,10	0,55	4

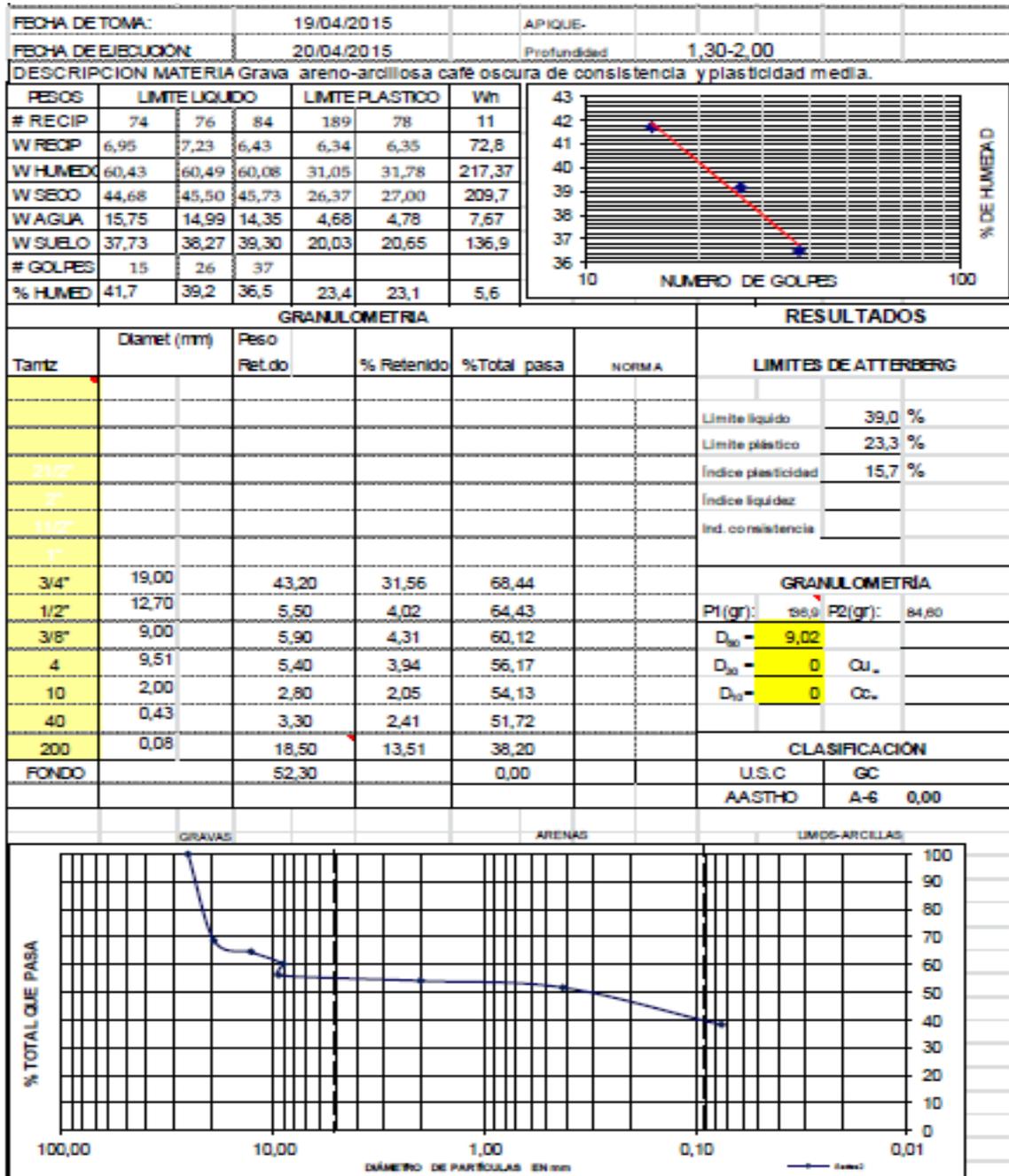
Fuente: Propiedades físicas de suelos obtenida en el “Estudio geológico y caracterización geotécnica en el sector rural de las veredas Helechal y Guasimal del municipio de tena departamento de Cundinamarca. (Barrera, y otros, 2015)

Imagen 5: Suelo Seleccionado No. 4



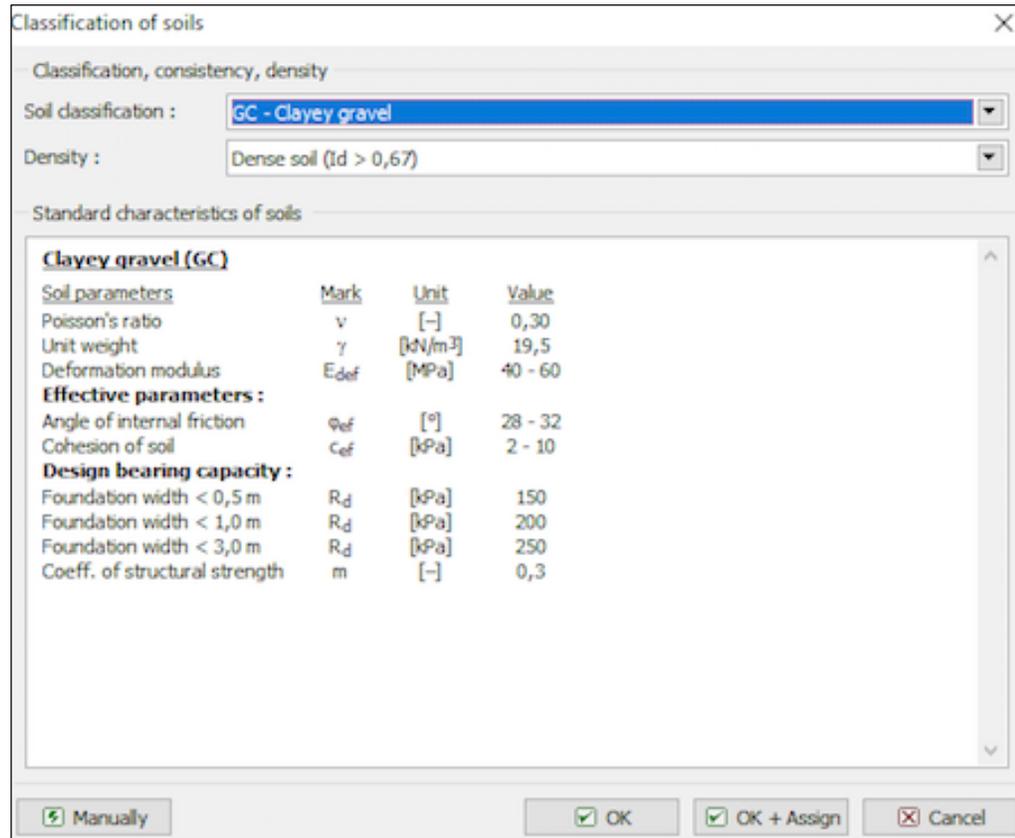
Fuente: Curva granulométrica del material principal y de aporte para las mezclas Artículo Diseño de mezclas de suelo compacto para la construcción de terraplenes. (Diseño de mezclas de suelo compacto para la construcción de terraplenes, 2007)

Imagen 6: Suelo Tolerable No. 1



Fuente: Informe de estudio de suelos y análisis geotécnico del sector ubicado en el k4+180 de la vía puente Reyes-Gámez (SANA, 2015)

Imagen 7: valores de peso específico Suelo Tolerable No. 2



Fuente: Valores máximos y mínimos de peso específico, ϕ y C para Suelos tolerables (Analysis, 2019)

8.4. Modelaciones en el Software Slide

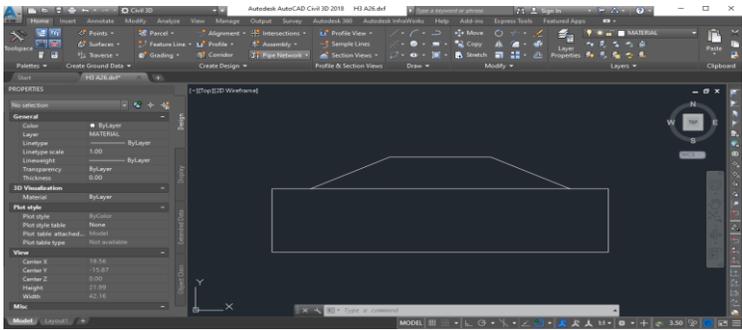
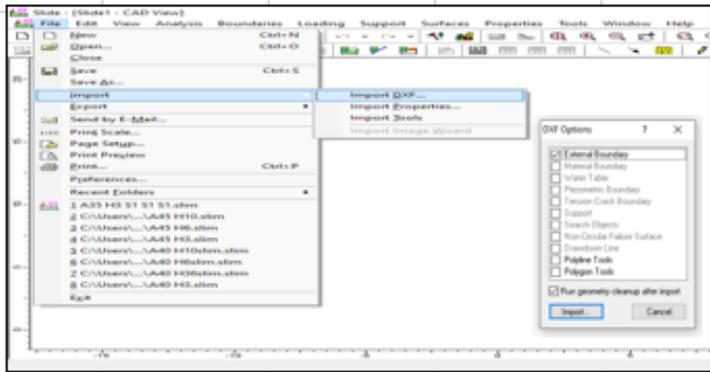
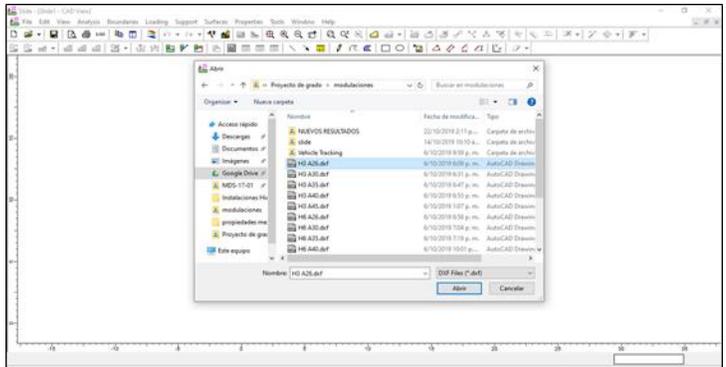
Con la información obtenida de cada uno de los suelos seleccionados y suelos tolerables, se procedió a realizar la modelación en el software Slide, realizando los siguientes pasos:

Tabla 9: Datos de entrada para la modelación en el software Slide

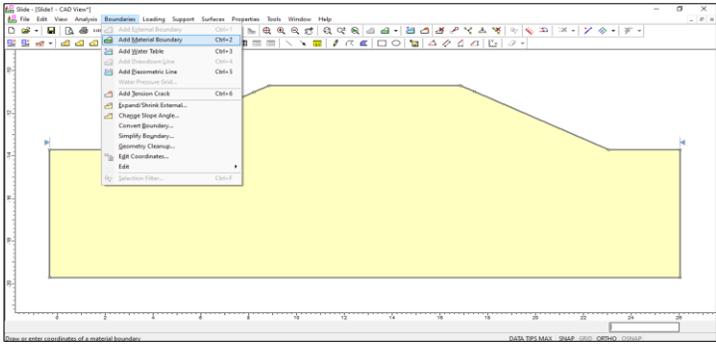
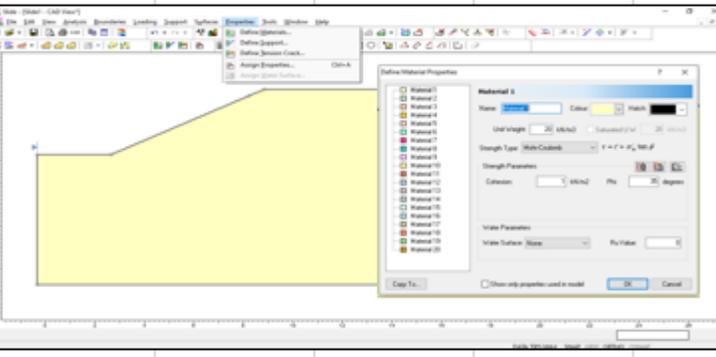
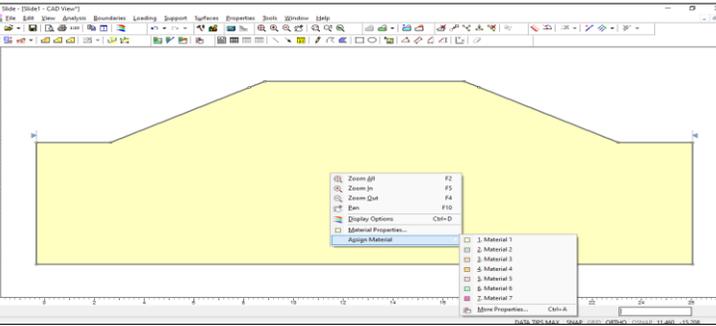
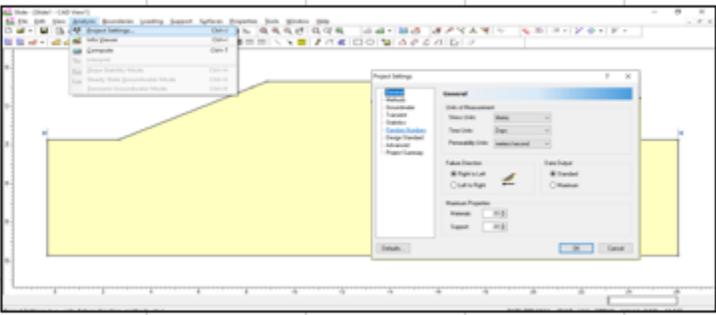
Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B (°)	H
SS1	21	18	11	26	3
SS2	18	28	10	30	6
SS3	21	17	8	35	10
SS4	17,4	28	5	40	
ST1	19,5	28	2	45	
ST2	19,5	32	10		

Fuente: Autores

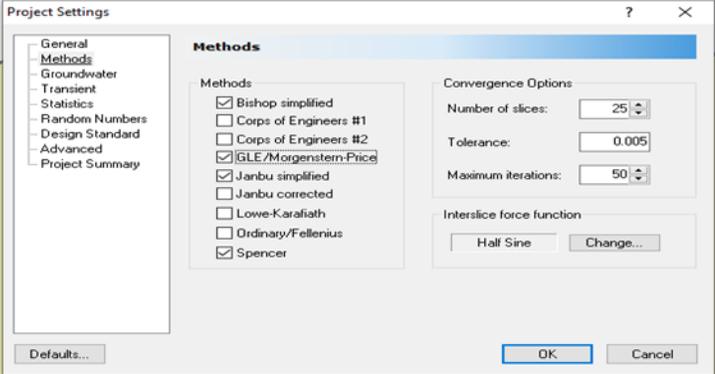
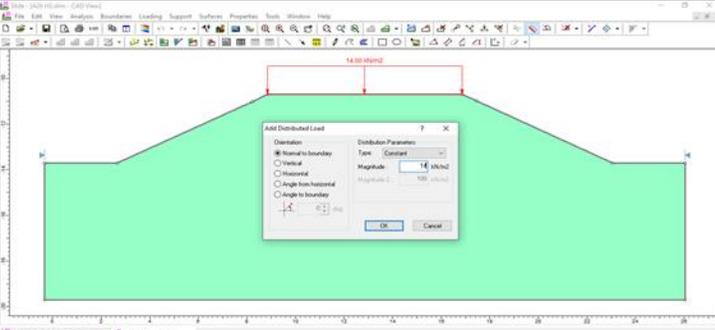
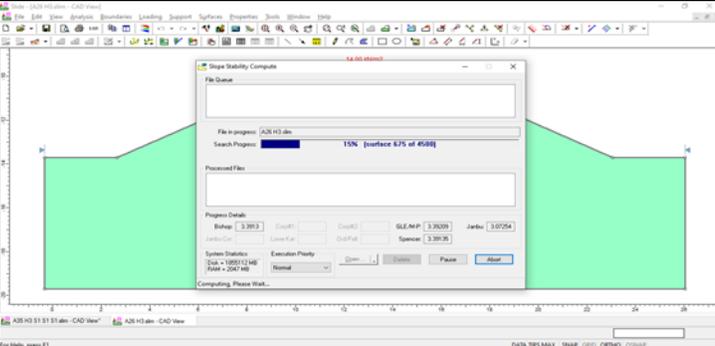
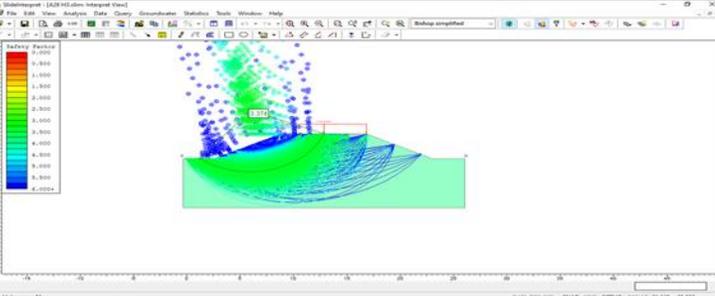
Tabla 10: Metodología para el uso del software Slide

Imagen	paso a paso
	<p>Elaborar los terraplenes en AutoCAD para posteriormente importar el archivo desde un formato “.dxf” al software Slide</p>
	<p>Seleccionar el software Slide para iniciar las modelaciones</p>
	<p>Ingresamos a File-import-import DXF. Emerge un cuadro denominado DXF Opciones y damos clic en Import</p>
	<p>Seleccionamos el archivo y damos clic en abrir</p>

Continuación Tabla 10: Metodología para el uso del software Slide

Imagen	paso a paso
 <p>The screenshot shows the Slide software interface with a yellow trapezoidal area representing a slope. The 'Boundaries' menu is open, and the option 'Add Material Boundary' is highlighted. Other options in the menu include 'Expand Shrink External...', 'Change Slope Angle...', 'Convert Boundary...', 'Simplify Properties...', 'Geometry Cleanup...', 'Edit', and 'Assign Material'.</p>	<p>Asignamos los materiales al terraplén, para ellos damos clic en Boundaries -Add material boundary</p>
 <p>The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box open over the yellow slope area. The dialog box has a list of materials on the left and a 'Material 1' tab selected on the right. The 'Material 1' tab contains fields for 'Name', 'Color', 'Unit Weight', 'Strength Type', 'Strength Parameters', and 'View Parameters'.</p>	<p>Ingresamos a la opción Properties y asignamos las propiedades del material según los datos obtenidos de los ensayos</p>
 <p>The screenshot shows a context menu open over the yellow slope area. The 'Assign Material' option is selected. The menu also includes options for 'Zoom All', 'Zoom In', 'Zoom Out', 'Pan', 'Display Options', and 'More Properties'.</p>	<p>Clic derecho sobre el terraplén y seleccionamos la opción Assign material y escogemos el material que precisamente ingresamos</p>
 <p>The screenshot shows the 'Project Settings' dialog box open over the yellow slope area. The 'Material' tab is selected, and the 'Analysis' section is visible. The 'Analysis' section has radio buttons for 'Plane Strain', 'Plane Stress', and '3D', with 'Plane Strain' selected. There are also checkboxes for 'Use Topography' and 'Use Failure'.</p>	<p>Seleccionamos la opción Analysis y damos clic en Project Settings, verificamos las unidades y seleccionamos la dirección de la falla</p>

Continuación Tabla 10: Metodología para el uso del software Slide

Imagen	paso a paso
	<p>En la opción Methods, seleccionamos a Bishop Simplified, GLE/Morgenstern-Price, Janbu Simplified y Spencer</p>
	<p>Ingresamos a la opción Add distributed load, donde asignamos una Magnitud de 14 KN/m2, sobre el terraplén. Procedemos a guardar el archivo.</p>
	<p>Clic en la opción Compute, la cual nos permite correr el programa con la información ya suministrada</p>
	<p>Clic en la opción Interpret, la cual nos permite observar la falla producida en el terraplén y el Factor de Seguridad</p>

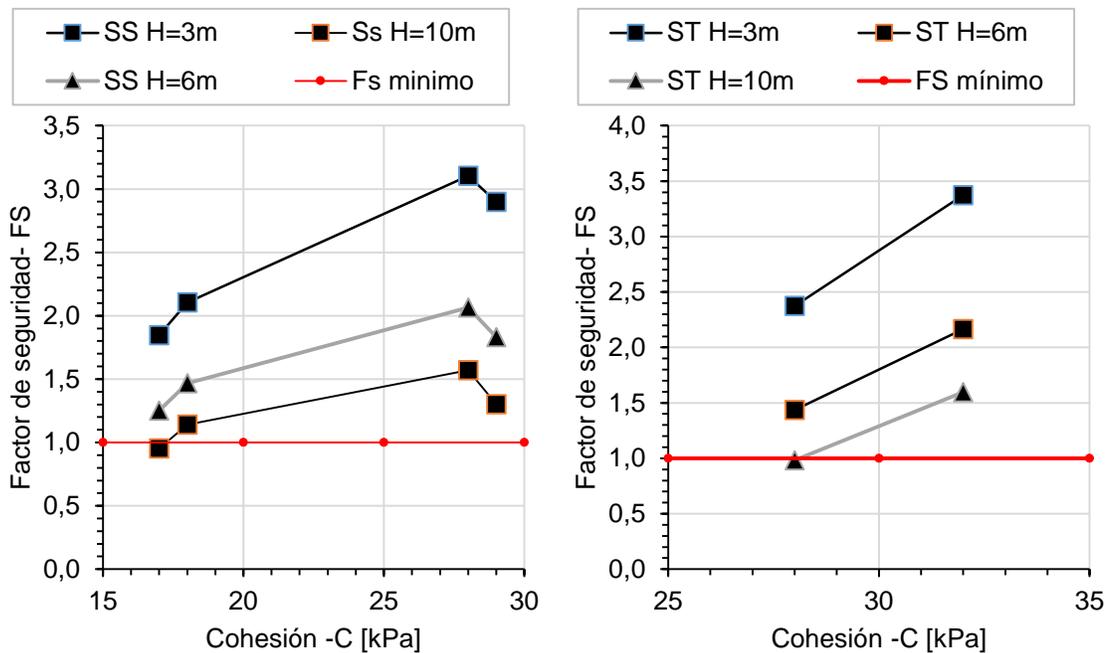
Fuente: Autores

9. RESULTADOS

En el presente capítulo se abordan los resultados obtenidos a partir de la modelación de los datos para suelos seleccionados (SS) y suelos tolerables (ST) en el software Slide, para ello se realizaron diferentes combinaciones con los tipos de suelos, además para cada una de estas se tomó un ángulo inclinación del terraplén de 26°, 30°, 35°, 40° y 45° y una altura del terraplén de 3m, 6m y 10m.

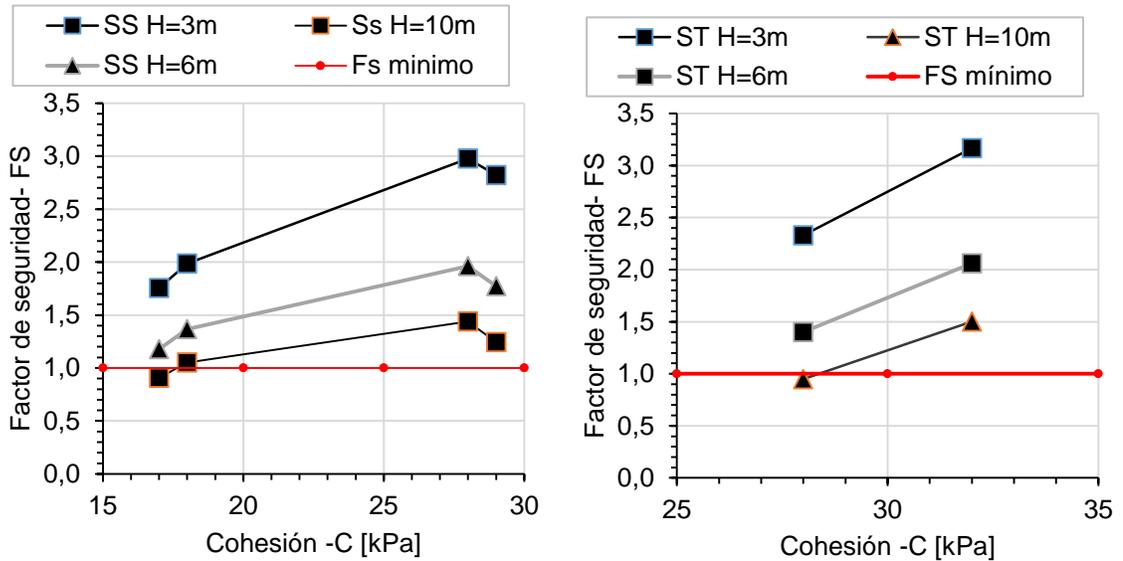
Los cálculos realizados para cada una de las combinaciones descritas anteriormente se encuentran en el Anexo No. 2 del presente proyecto, en este capítulo se muestran los resultados obtenidos de dichos cálculos.

Imagen 8: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 26°



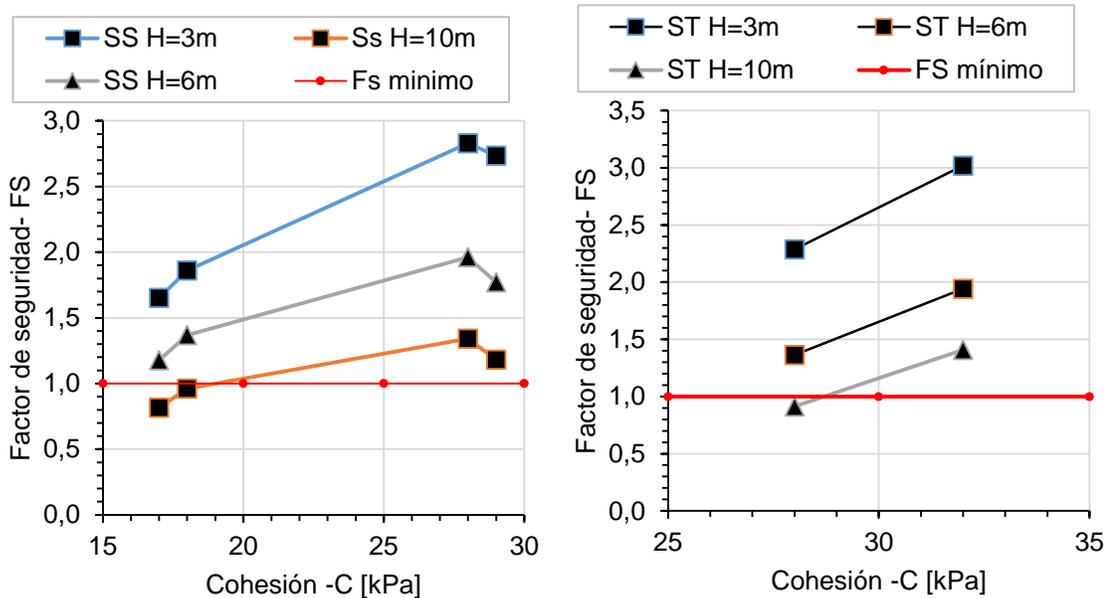
Fuente: Autores

Imagen 9: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 30°



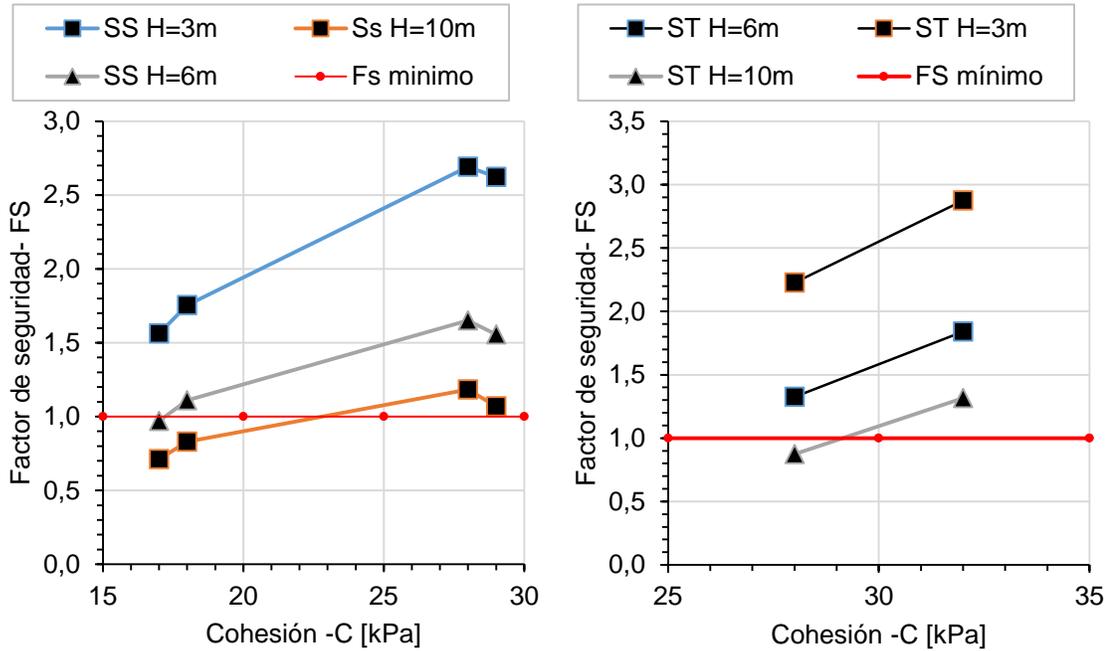
Fuente: autores

Imagen 10: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 35°



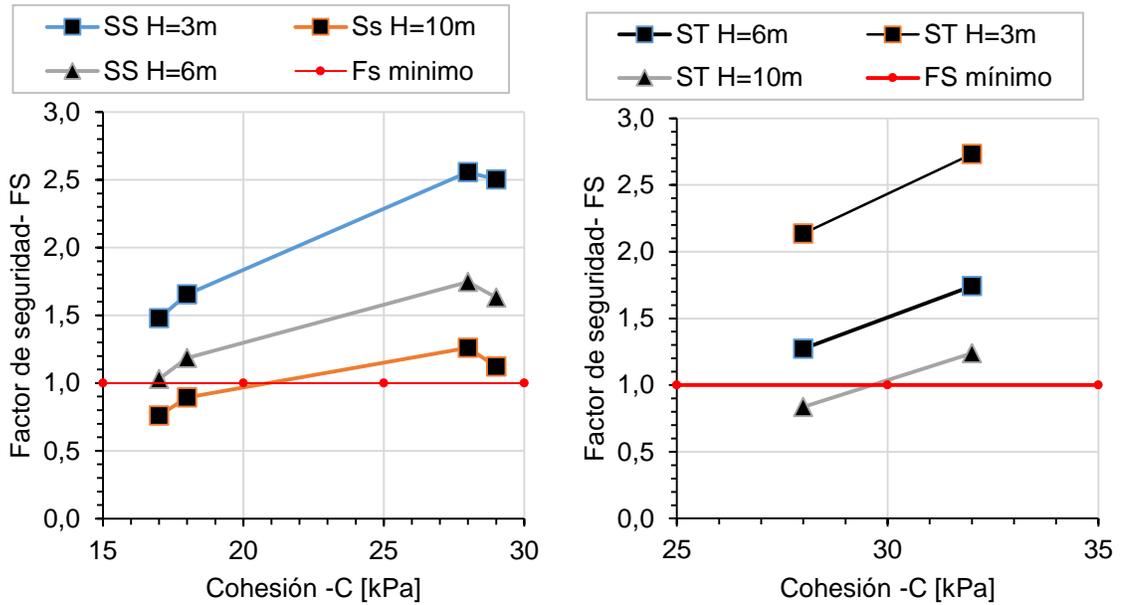
Fuente: autores

Imagen 11: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 40°



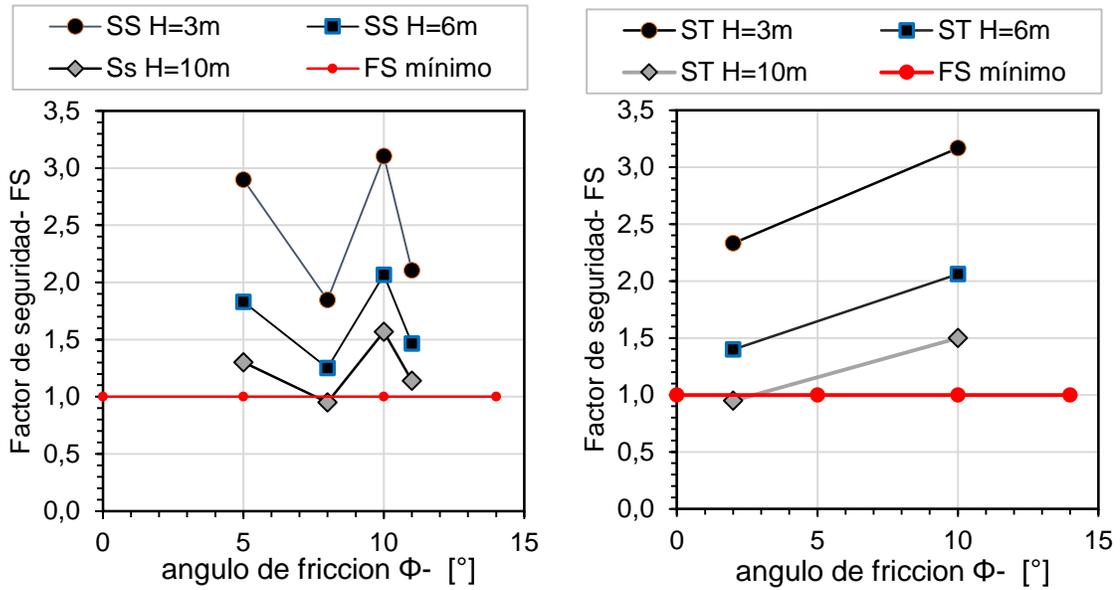
Fuente: autores

Imagen 12: Evolución del Factor de seguridad con la cohesión (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 45°



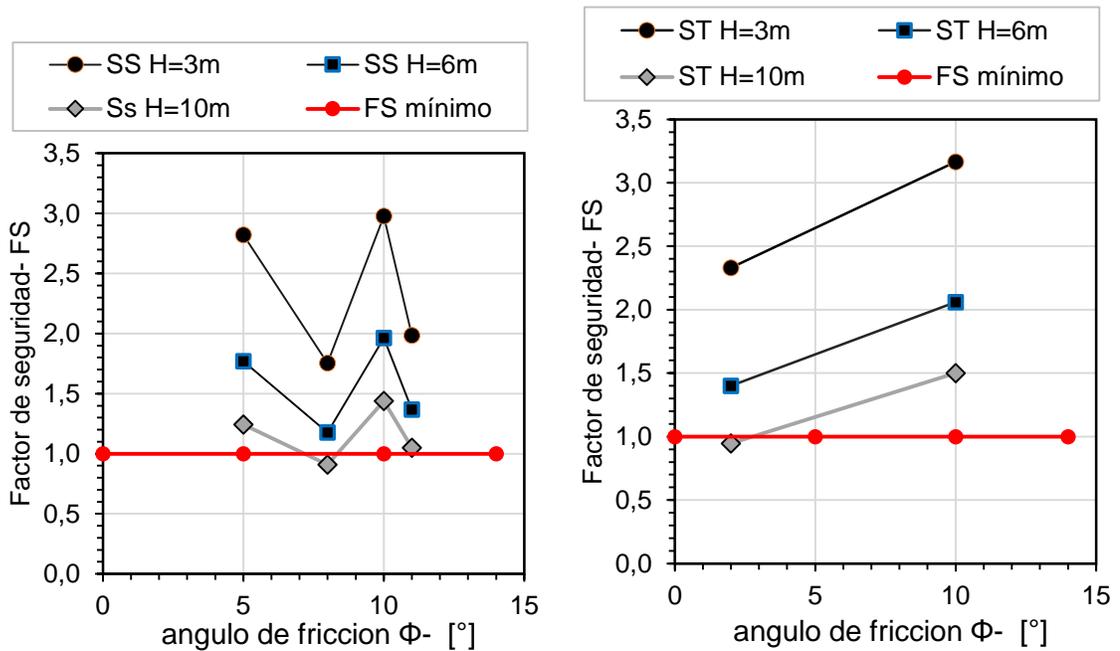
Fuente: autores.

Imagen 13: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 26°



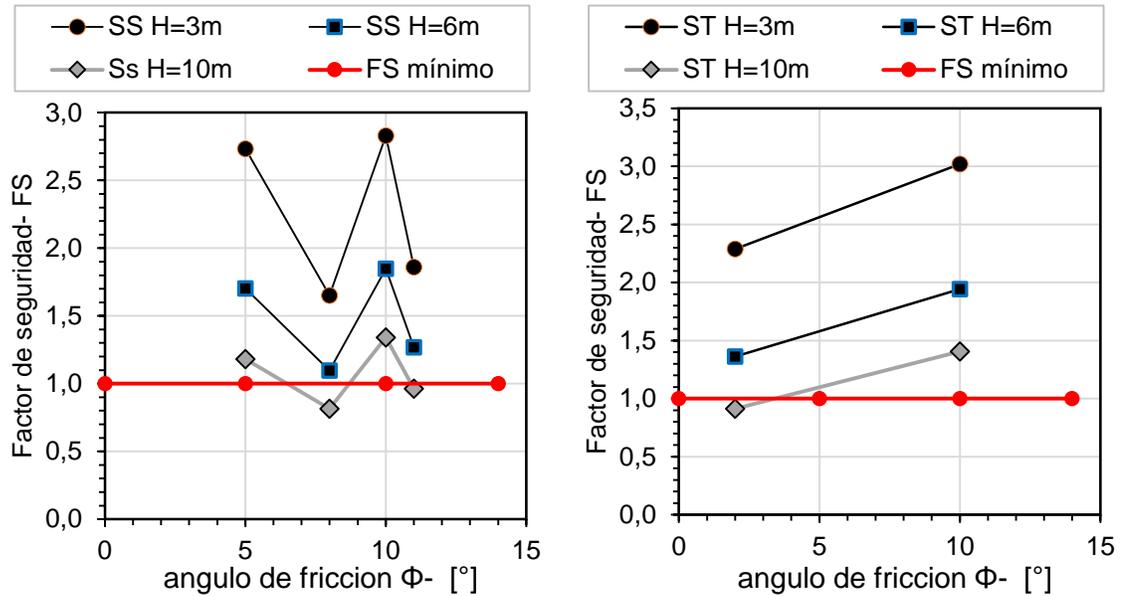
Fuente: autores

Imagen 14: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 30°



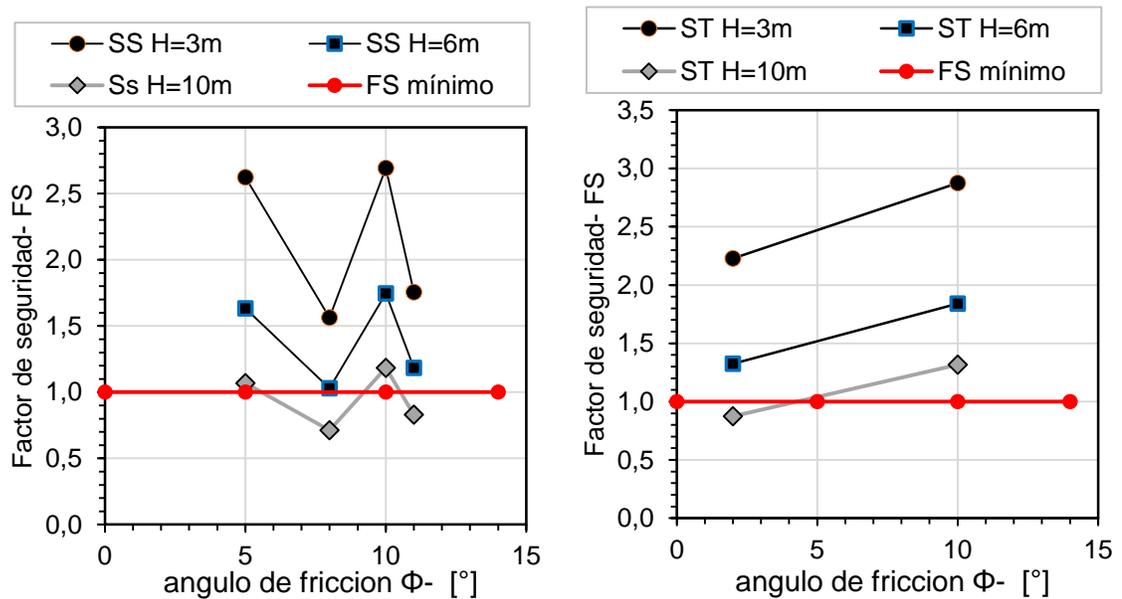
Fuente: autores

Imagen 15: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 35°



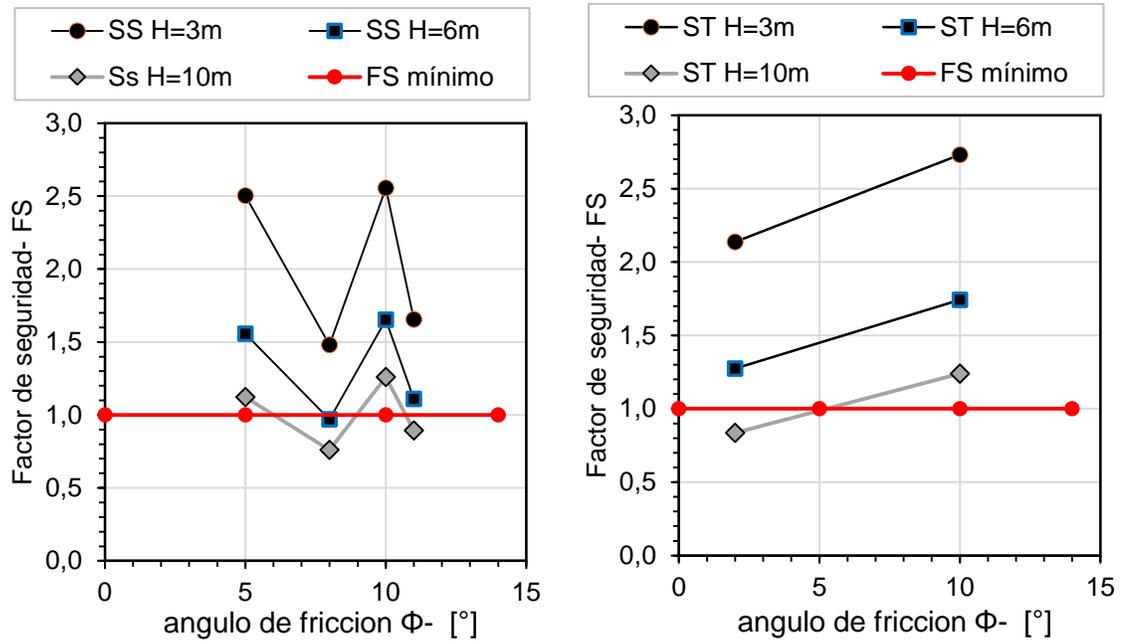
Fuente: autores

Imagen 16: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 40°



Fuente: autores

Imagen 17: Evolución del Factor de seguridad con el ángulo de fricción interna (SS y ST) para un ángulo de inclinación del terraplén de 45°



Fuente: autores

Tabla 11: Verificación de cumplimiento para Factor de Seguridad

	ANGULOS Y ALTURAS														
	A26° H3m	A30° H3m	A35° H3m	A40° H3m	A45° H3m	A26° H6m	A30° H6m	A35° H6m	A40° H6m	A45° H6m	A26° H10m	A30° H10m	A35° H10m	A40° H10m	A45° H10m
SS1	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple
SS2	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
SS3	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
SS4	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
ST1	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
ST2	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Autores

Tabla 12: Resultados de ensayos para materiales Seleccionados y materiales tolerables tomados de la literatura.

		suelos seleccionados				suelos tolerables	
		SS1	SS2	SS3	SS4	ST1	ST2
granulometría	% pasa tamiz # 10		97,6		54,1	54,13	54,13
	% pasa tamiz # 200	7,69	23,7	3,4	0	38,2	38,2
Caracterización	humedad natural	1,97	17	22,59	17	5,6	5,6
	Limite Liquido	23,89	36	28,5	29	39	39
	Limite Plástico	22,5	22	20,22	16	23,8	23,8
	Índice de Plasticidad	1,39	14	8,28	13	15,2	15,2
	gama	21	18	21	17,4	19,5	19,5
Corte directo	fi	18	28	17	29	28	32
	C	11	10	8	5	2	10

Fuente: Autores

9.1. Modelación software Slide

Con los datos obtenidos, se procede a realizar la modelación en el software Slide, el cual utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad, con ello obtenemos el valor del factor de seguridad para cada una de las combinaciones, así como se evidencia en las siguientes imágenes:

Donde:

SS1= Suelo Seleccionado No. 1

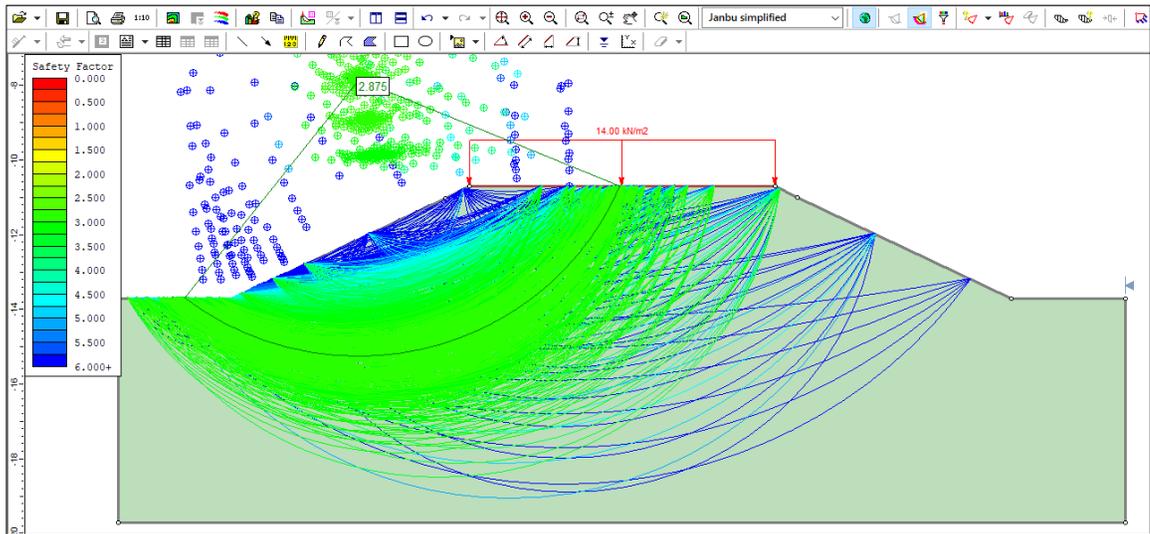
SS2= Suelo Seleccionado No. 2

SS3= Suelo Seleccionado No. 3

ST1= Suelo Tolerable No.1

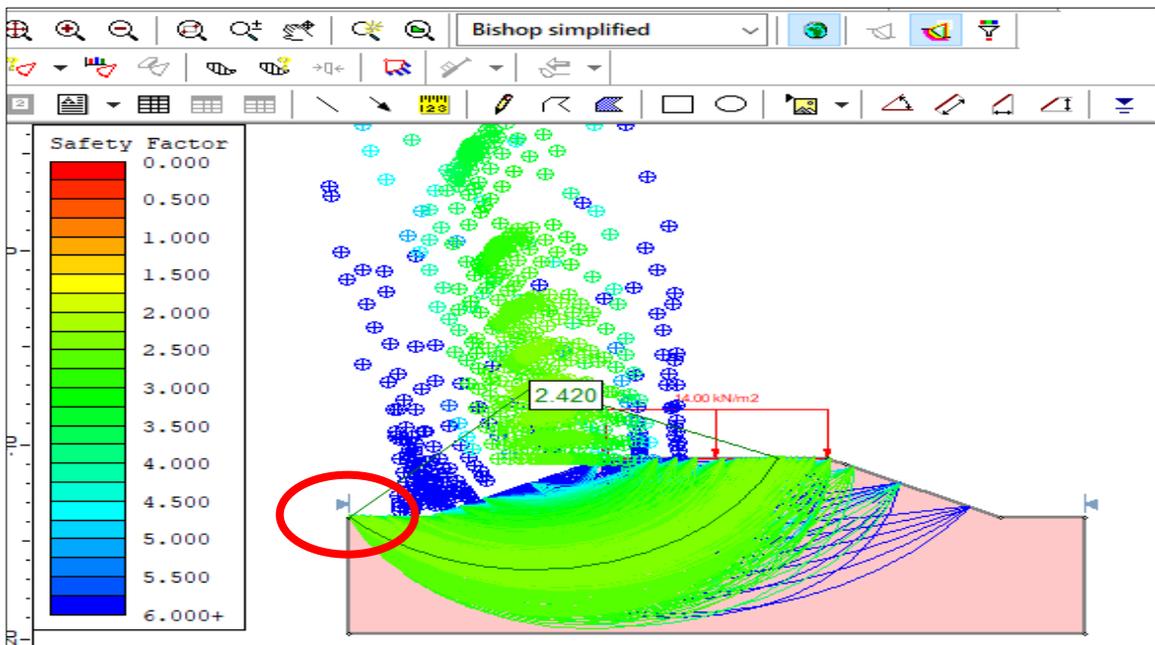
ST2= Suelo Tolerable No. 2

Imagen 18: Modelación Angulo 26 Altura 3, SS1



Fuente: Autores

Imagen 19: Modelación Angulo 26 Altura 3, ST1



Fuente: Autores

Ver Anexo 1: 88 modelaciones realizadas en el software Slide

10. Análisis y discusión de resultados

En este trabajo de grado se han presentado aspectos geotécnicos de construcción y diseño de terraplenes analizando el comportamiento mecánico de diferentes tipos de suelos seleccionados y suelos tolerables, permitiendo así determinar las condiciones de estabilidad y así como también un diseño óptimo en términos de seguridad.

Teniendo en cuenta lo anterior se desarrollaron unos gráficos que permiten determinar de forma rápida y sencilla los factores de seguridad de un terraplén, es decir el factor de amenaza para que este falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual fue diseñado, ello teniendo en cuenta la clase de suelo del que se compone, es decir ya sea seleccionado o tolerable.

Los resultados más relevantes obtenidos del análisis efectuado en este trabajo son:

- Para terraplenes hasta 3 metros de altura con ángulos entre 26° y 45° , es posible utilizar suelos tolerables y suelos seleccionados, puesto que el factor de seguridad no es inferior a 1,0.
- Para terraplenes de 6 metros de altura con un ángulo de 45° , no es recomendable utilizar el suelo seleccionado No.3, lo anterior teniendo en cuenta que el factor de seguridad es inferior a 1,0, o anterior, dado que el suelo 3 presenta una baja cohesión y un bajo ángulo de fricción, con lo cual se genera menor tratamiento interno entre las partículas del suelo.
- Para terraplenes de 10 metros de altura con un ángulo entre 26° y 45° , no es recomendable utilizar el suelo seleccionado tolerable No. 1, lo anterior teniendo en cuenta que el factor de seguridad es inferior a 1,0, lo que indica que hay movimiento de la masa del suelo.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos frente al factor de seguridad, tal como se evidencia en la Tabla 24 Verificación de cumplimiento para Factor de Seguridad, a mayor altura y mayor ángulo B, menor factor de seguridad tanto para suelos seleccionados como también para suelos tolerables.

11. CONCLUSIONES

El objetivo del trabajo consistió en evaluar el desempeño de terraplenes conformados con suelos tolerables y seleccionados por medio de la obtención del factor de seguridad. A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que:

- El factor de seguridad es positivo y adimensional, lo que permite tener control indirecto de las deformaciones y la estimación de probabilidad falla de los terraplenes, a través de modelos de cálculo evaluados a partir del software SLIDE (Rocscience).
- La efectividad tanto de los suelos seleccionados como de los tolerables en la construcción de un terraplén están ligados a su cohesión como también al Ángulo de fricción del suelo, puesto que estos permiten obtener mayor estabilidad y brindando así un factor de seguridad más alto.
- Los parámetros de resistencia mecánica se obtuvieron a partir de los ensayos obtenidos de la literatura, donde se observa que los dos tipos de materiales tienen gran diferencia en su tamaño máximo, en los resultados de CBR y porcentaje de finos, lo que nos permito realizar un filtro para su selección y uso en el presente proyecto.
- Empleando el criterio de equilibrio limite, en el cual se tienen en cuenta los factores que afectan la estabilidad de un terraplén, como lo es su geometría, las propiedades de los suelos, se generó una evaluación técnica de los materiales, permitiendo realizar modelos geotécnicos, los cuales permitieron validar así la condición de estabilidad con diferentes configuraciones geométricas como lo son el Angulo y la altura, usando para ello el software SLIDE (Rocscience).

- Las limitaciones de diseño radican notoriamente en los suelos Tolerables, esto debido a su difícil obtención, puesto que en la mayoría de los lugares contamos con suelos seleccionados los cuales pueden ser utilizados en la construcción de terraplenes, caso contrario sucede con el material tolerable, donde su uso se ve limitado por el difícil acceso a su obtención y por sus costos.

12. RECOMENDACIONES

- Abordar el estudio de los terraplenes mediante diferentes métodos que permitan calcular los factores de seguridad y los asentamientos.
- Disponer de gran cantidad de suelos seleccionados, tolerables y adecuados, con el fin de ampliar los resultados del factor de seguridad, siendo de fácil acceso para el ingeniero, permitiendo definir condiciones de construcción con base a los resultados obtenidos.
- Realizar los ensayos en escala real, de tal forma que permita tener más exactitud en el comportamiento de los materiales, siguiendo los parámetros exigidos por la normatividad colombiana .
- Para futuros estudios, disponer de diferentes tipos de suelos para formación del terraplén, puesto que no siempre en obra se cuenta con el volumen total de material requerido para su construcción.

13. BIBLIOGRAFÍA

Analysis, GeoStructural. 2019. GeoStructural Analysis. 2019.

AUTODESK. 2019. AUTODESK. *AUTODESK CIVIL 3D*. [En línea] 21 de Enero de 2019. [Citado el: 12 de marzo de 2019.] <https://knowledge.autodesk.com/es/support/civil-3d/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ESP/Civil3D-Tutorials/files/GUID-FE54D3EB-0701-4F90-997A-1D86EEFC947-htm.html>.

Avendaño, Ana. 2018. Estudio de agrietamiento de terraplenes de pequeñas presas. *Estudio de agrietamiento de terraplenes de pequeñas presas*. Bogotá : s.n., 2018.

Barrera, Ana y Peña, Geraldine. 2015. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. [En línea] UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, 2015. <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1578/1/TGT-314.pdf>.

Beviá, Luis Bañon y Jose. 2000. *Manual de Carreteras: Vol I*. España : Universidad de Alicante, 2000. pág. 409. Vol. I. ISBN: 84-607-0123-9.

Determinación de las dimensiones del dominio en la modelación numérica de terraplenes. **Lavista, Milena, y otros. 2016.** 198, Cuba : DYNA, 2016, DYNA, Vol. 83. ISSN 0012-7353. .

Diseño de mezclas de suelo compacto para la construcción de terraplenes. **Aiassa, Gonzalo y Arrúa, Pedro. 2007.** [ed.] Revista EIA. Medellín : Revista EIA, 2007, Vol. 1. ISSN 1794-1237 Número 7.

Escario, Ventura. 1981. *Terraplenes y Pedraplenes*. Madrid-España : MOPU Dirección General de Carreteras, 1981. pág. 123.

Estudio del mecanismo de falla de terraplenes debido a la infiltración de aguas lluvias mediante el monitoreo de presiones de poros y contenidos de agua. **Uchimura, Edwin Garcia: Taro. 2007.** Medellín : Dyna, Julio de 2007. ISSN: 0012-7353.

Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial nacional de Colombia. **valbuena, Edgar Muñoz y Edgar. 2016.** 2, Bogotá : Revista facultad de ingeniería UCV, 2016, Vol. 31. pp. 462-489, 2016.

FONADE. 2015. FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO – FONADE. [En línea] Abril de 2015.

ftp://ftp.ani.gov.co/Tercera%20Ola/Cajamarca%20Calarca/CAJ%20%E2%80%93%20CAL%20VOL%2011%20PLANOS/PDF/5-%20DG_PP-CaCj_%201-22.pdf.

Geoquantics. 2017. Geoquantics. *Geoquantics*. [En línea] 21 de diciembre de 2017. [Citado el: 14 de marzo de 2019.] <https://geoquantics.com/2017/12/21/el-ensayo-edometrico/>.

Geotecnia. 2019. Geotecnia facil. *Geotecnia facil*. [En línea] 2019. [Citado el: 13 de marzo de 2019.] <http://geotecniafacil.com/ensayo-proctor-normal-y-modificado/>.

INVIAS. 2012. ANI. ANI.GOV. [En línea] 2012. [Citado el: 14 de marzo de 2019.] <ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCI%C3%93N%20100.pdf>.

—. **2012.** ANI. *INVIAS*. [En línea] 2012. ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGLP%20001-2016-M-1/Especificaciones%20Generales%20de%20Construccion%20de%20carreteras/CAP%C3%8DTULO%202_1.pdf.

—. **2019.** Instituto Nacional de Vías. *Instituto Nacional de Vías*. [En línea] INVIAS.GOV, 23 de ENERO de 2019. [Citado el: 27 de FEBRERO de 2019.] <https://www.invias.gov.co/index.php/mas/sala/noticias/3409-comunicado-a-la-opinion-publica-2>.

Lavista, Milena Mesa. 2017. UNAN-Managua. *UNAN-Managua*. [En línea] 2017. [Citado el: 28 de febrero de 2019.] <http://beduniv.reduniv.edu.cu/fetch.php?data=1659&type=pdf&id=1664&db=1>. ISBN 978-959-16-3400-9..

Maula, B H & L. ZHANG. 2011. Assessment of Embankment Factor Safety Using Two Commercially Available Programs in Slope Stability Analysis. [Online] 2011. [Cited: 03, 27, 2019.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811011477>. 1877-7058.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. IDR.D.GOV. *IDRD.GOV*. [En línea] 2010. <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/8titulo-h-nsr-100.pdf>.

Norato, Isaac. 2013. Importancia de la construcción de un buen terraplen. Panamá : Universidad Tecnológica de Panamá, 16 de Septiembre de 2013. Vol. 1.

Rocscience. 2019. Rocscience. [En línea] Rocscience, 2019. [Citado el: 15 de marzo de 2019.] <https://www.rocscience.com/learning/research>.

Sáez, Esteban. 2010. *Fundamentos de Geotecnia* . Santiago : Pontificia Universidad Católica de Chile, 2010. pág. 173.

SANA, JENNY LORENA NIÑO. 2015. *Estudio de suelos y analisis del sector ubicado en el K4+180 de la vía Puente Reyes-Gameza.* Cundinamarca, UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. Sogamoso : s.n., 2015. pág. 100.

Sanchez, Nestor Luis. 2013. Civilgeeks.com. *Civilgeeks.com Ingeniería y Diseño.* [En línea] Noviembre de 2013. [Citado el: marzo de 13 de 2019.] <https://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/>.

Sanchez, Sabogal. 2016. Blog Emilio Castillo Aroni. [En línea] 23 de Diciembre de 2016. [Citado el: 14 de Octubre de 2019.] <http://emiliocastilloaroni.blogspot.com/2016/12/modulo-4-caracterizacion-del-transito.html>.

Suárez, Jaime. 2009. *Deslizamientos. Analisis Geotecnico Vol. 1.* [ed.] Universidad Industrial de Santander UIS y Edición: Unknown (2009). Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander UIS, 2009. pág. 588. Vol. 1. ISBN-10: 9588504031 ISBN-13: 978-9588504032.

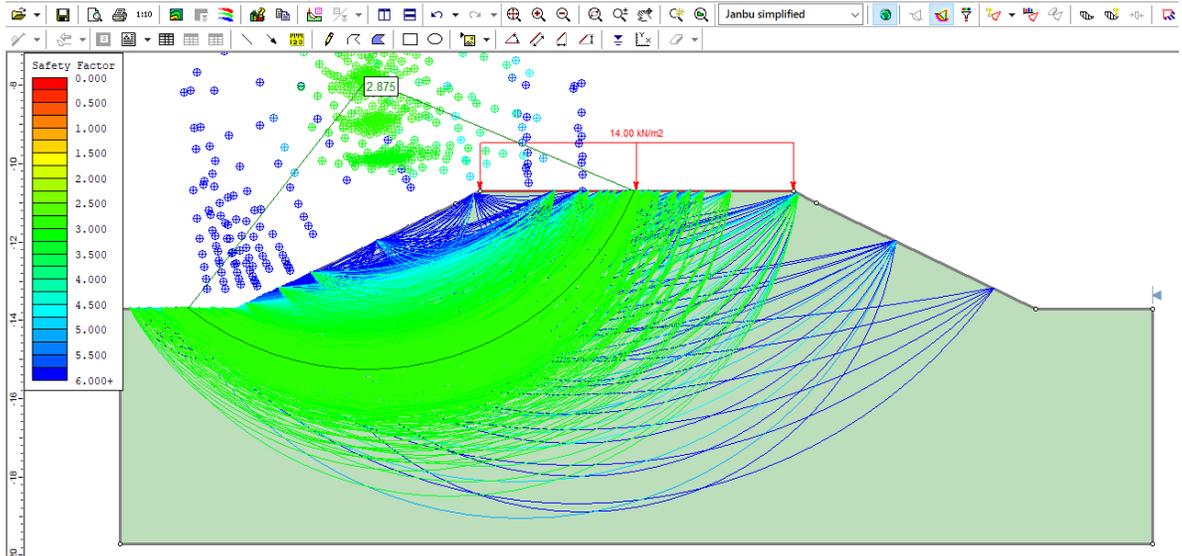
Velazco, Lucio Gerardo Cruz. 2015. Civilgeeks.com. *Civilgeeks.com ingeniería y construcción.* [En línea] Universidad del Cauca, 2015. [Citado el: 5 de marzo de 2019.] <https://civilgeeks.com/2015/09/30/tipos-de-suelos-mecanica-de-suelos/>.

WSDOT. 2005. Geotechnical design manual M46-03. [Online] 2005. [Cited: 03 27, 2019.] <https://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-03/Chapter9.pdf>.

ANEXO 1

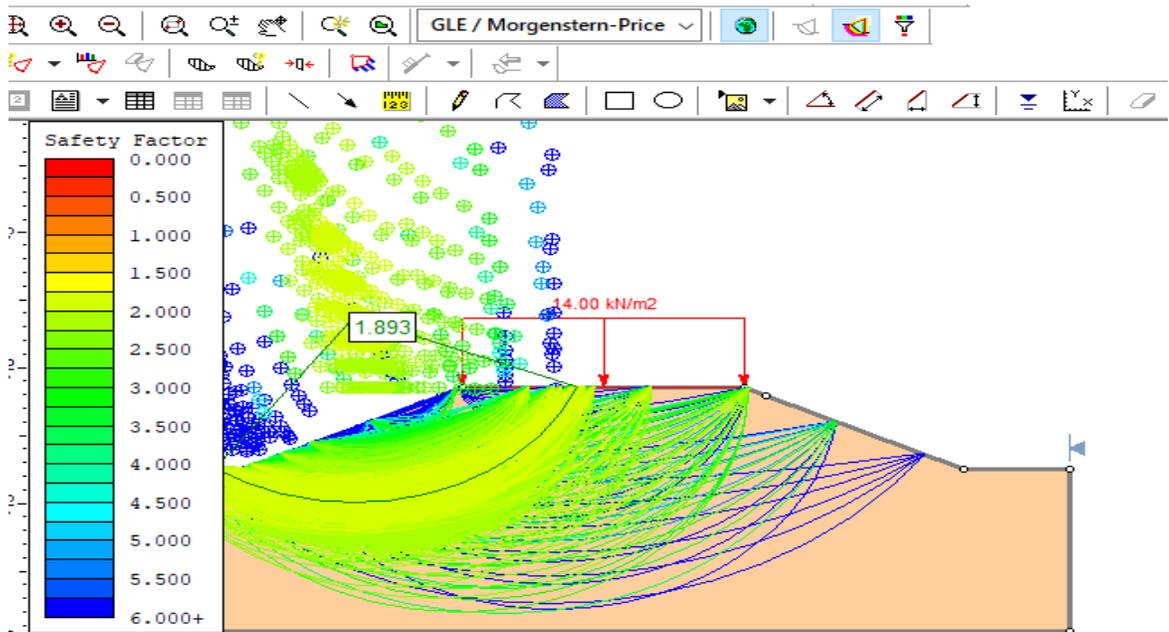
Modelaciones Slide

A26° H3 SS1



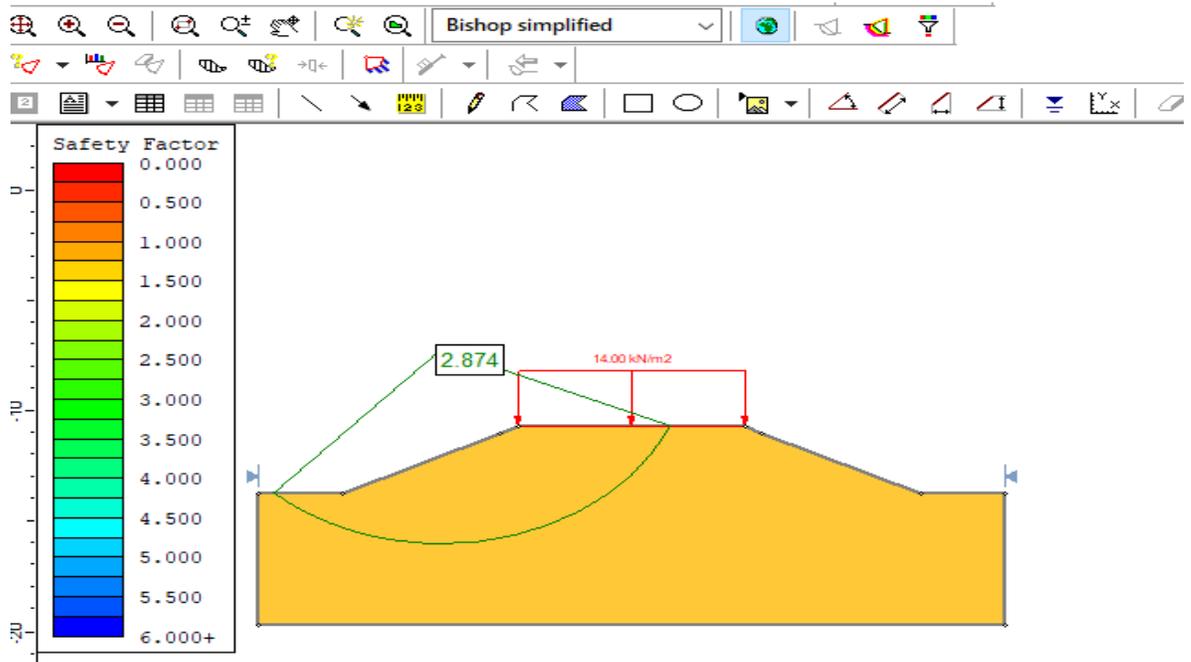
Fuente. autores

A26° H3 SS3



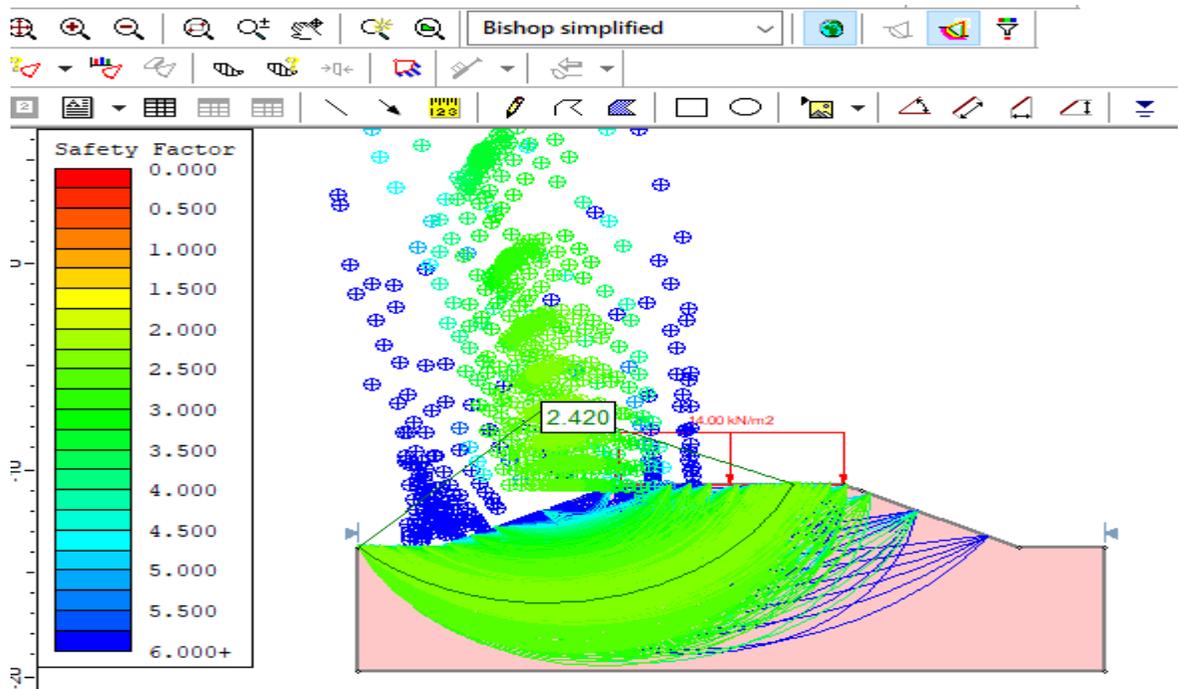
Fuente. autores

A26° H3 SS4



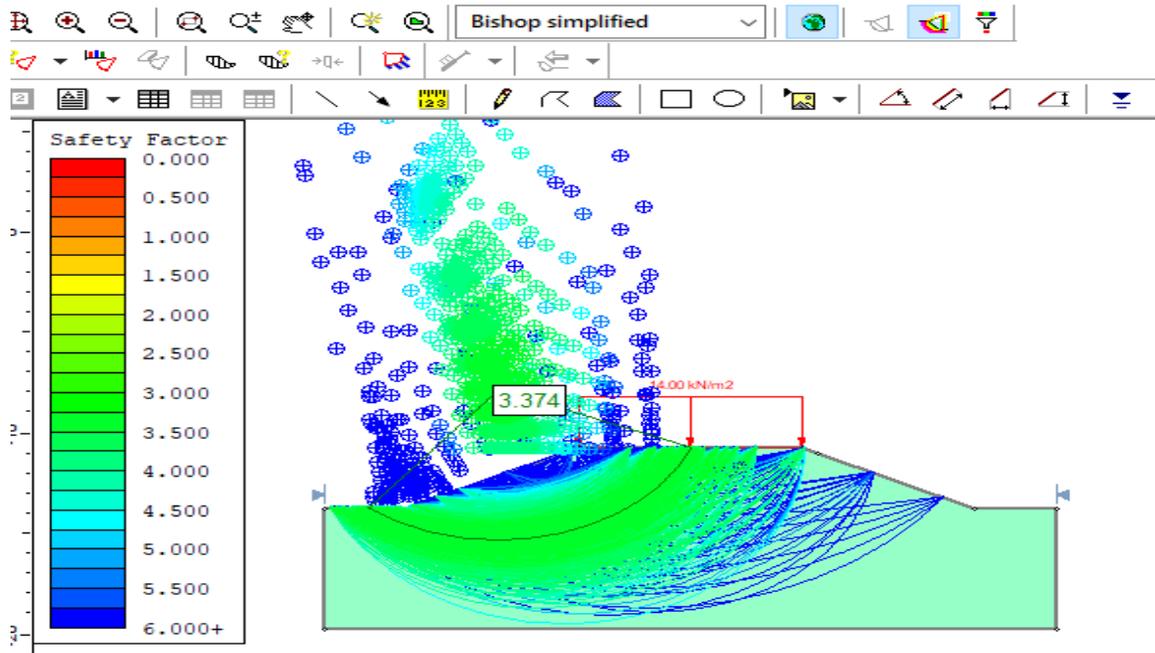
Fuente. autores

A26° H3 ST1



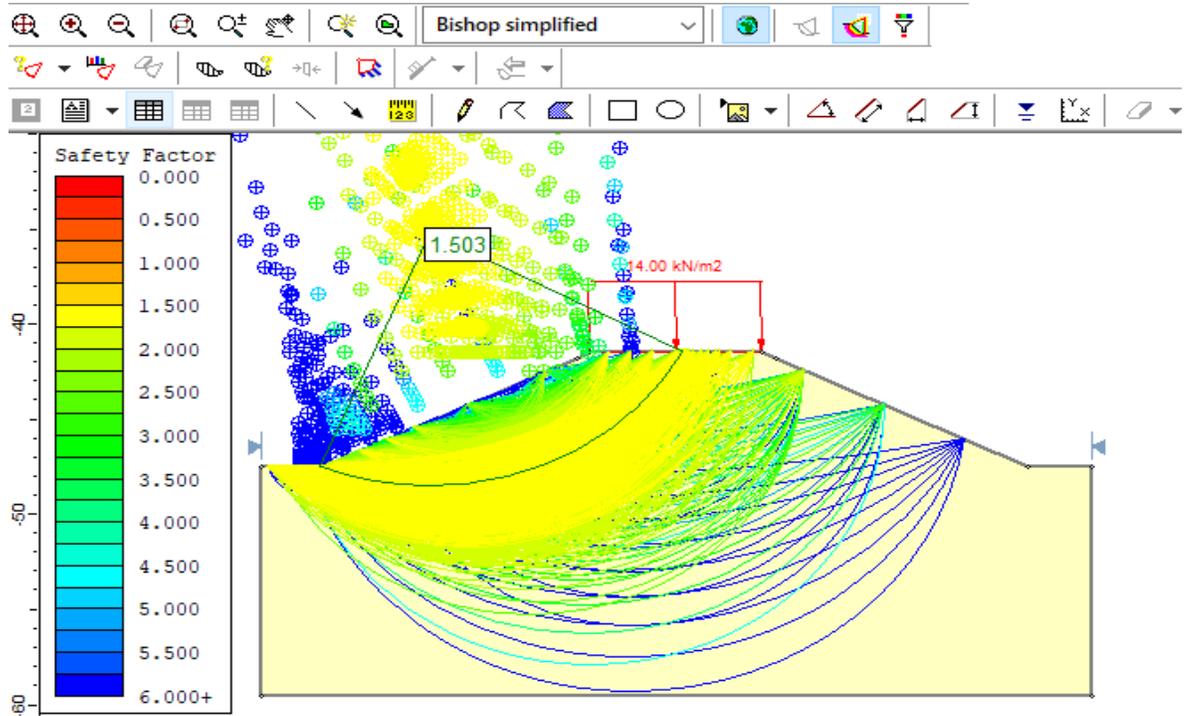
Fuente. autores

A26° H3 ST2



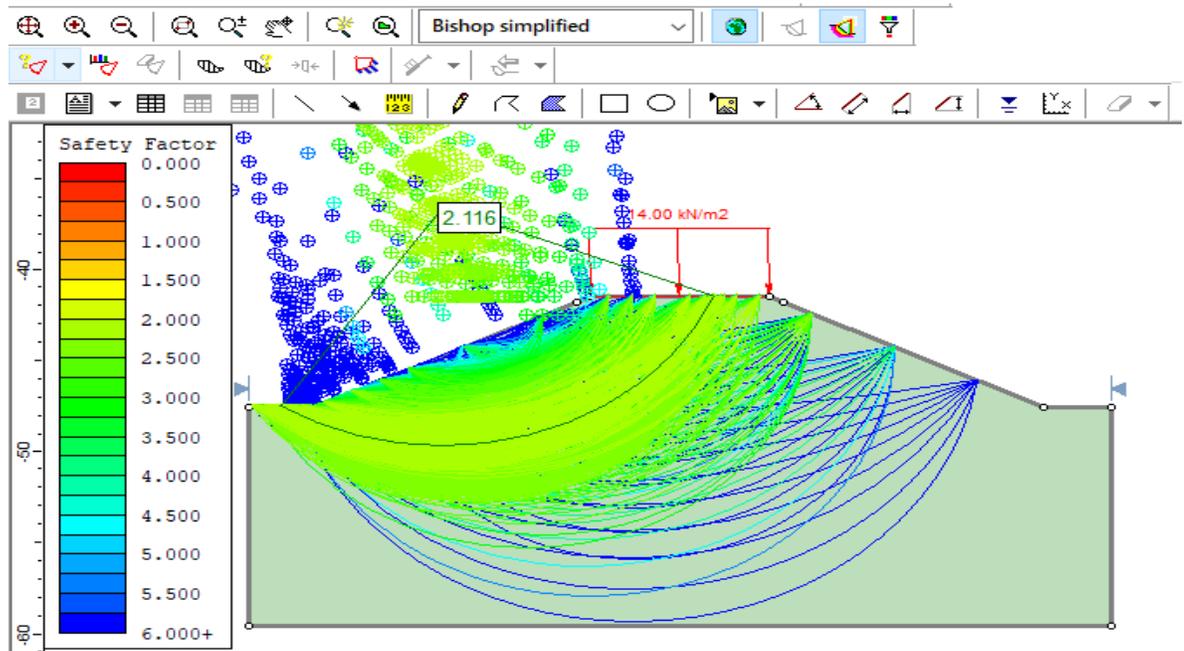
Fuente. autores

A26° H6m SS1



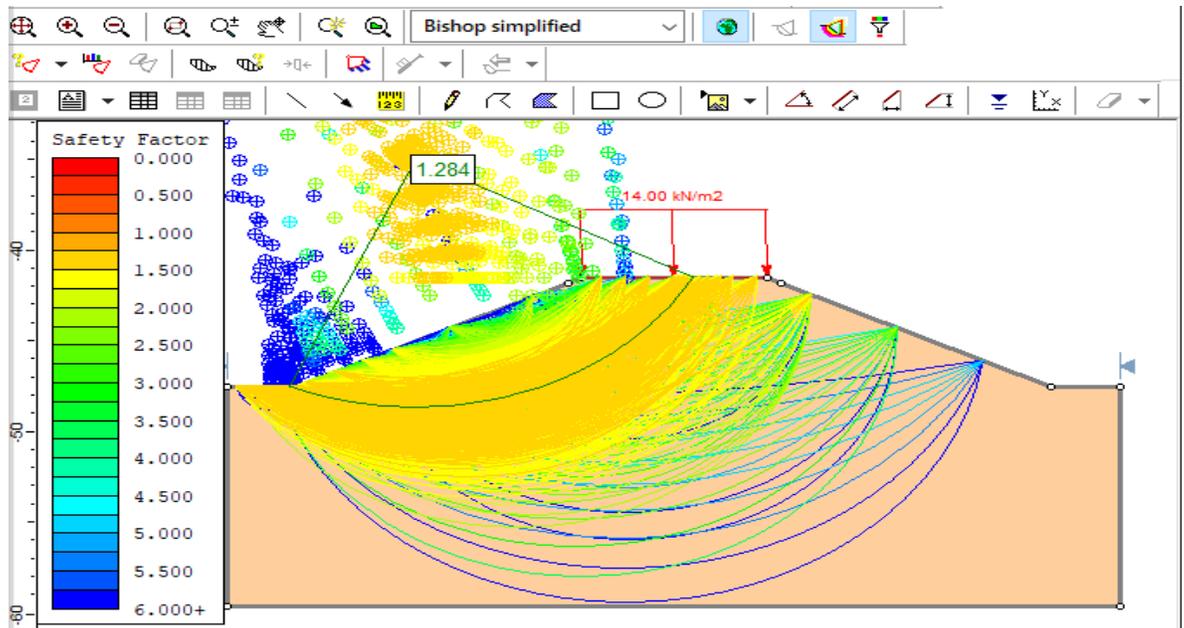
Fuente. autores

A26° H6m SS2



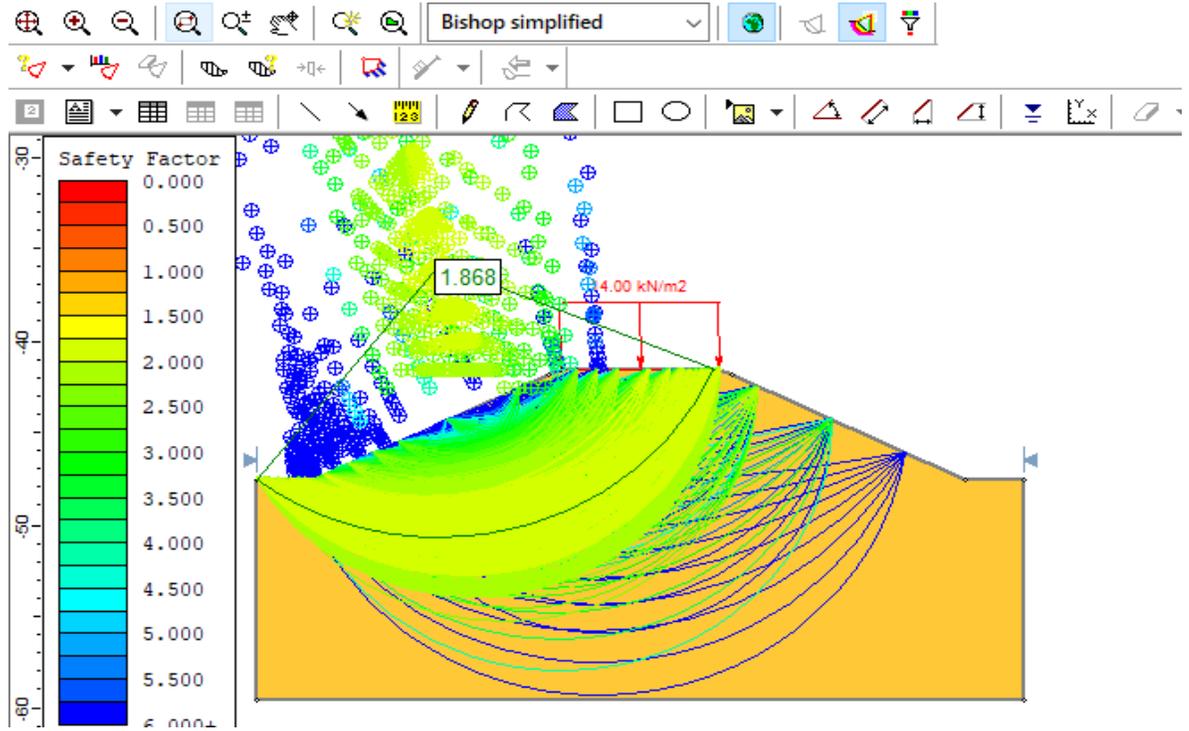
Fuente. autores

A26° H6m SS3



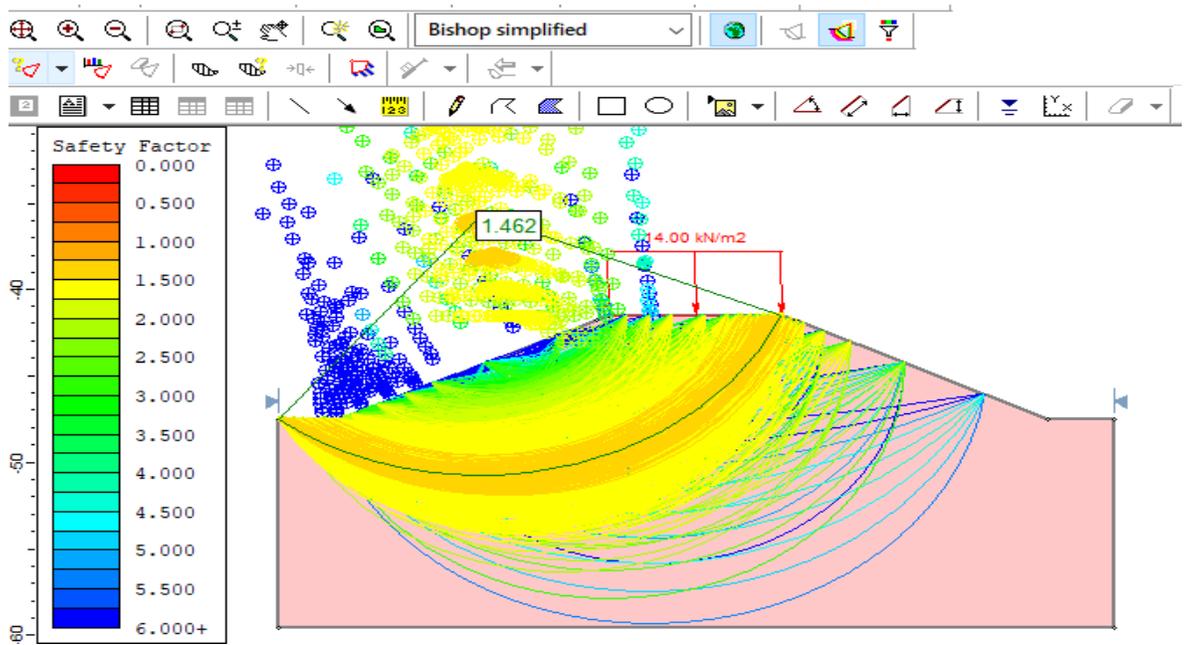
Fuente. autores

A26° H6m SS4



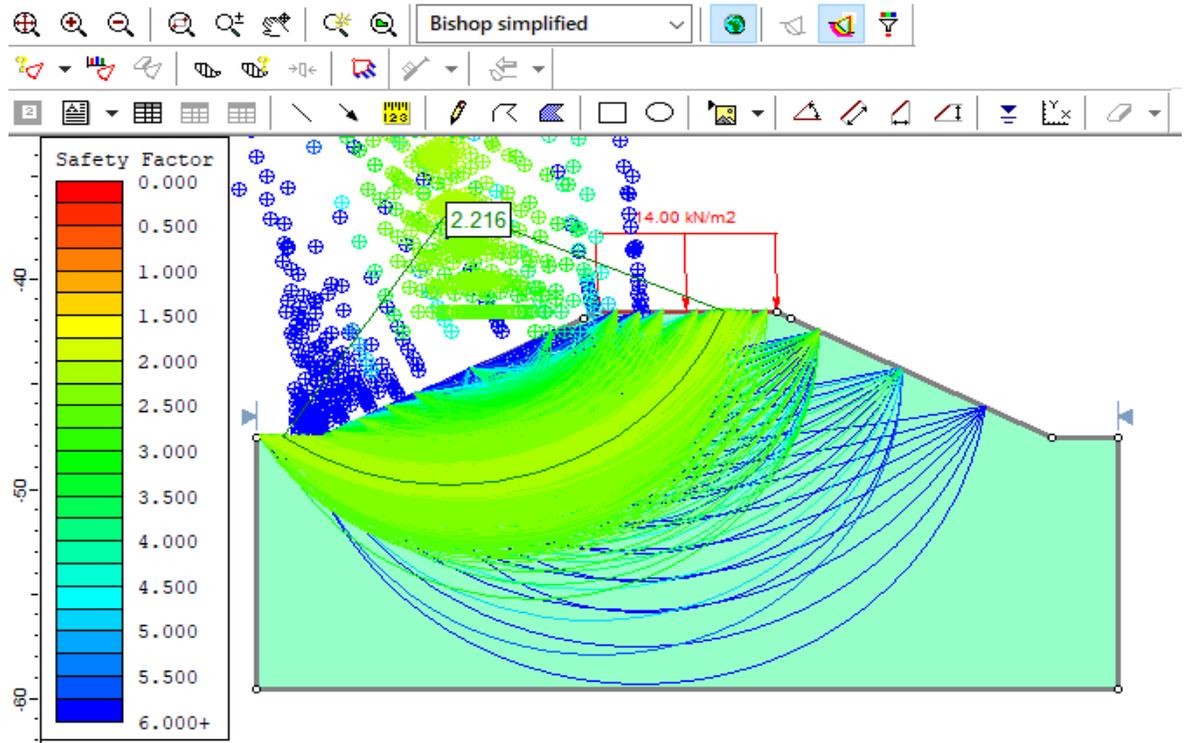
Fuente. autores

A 26° H6m ST1



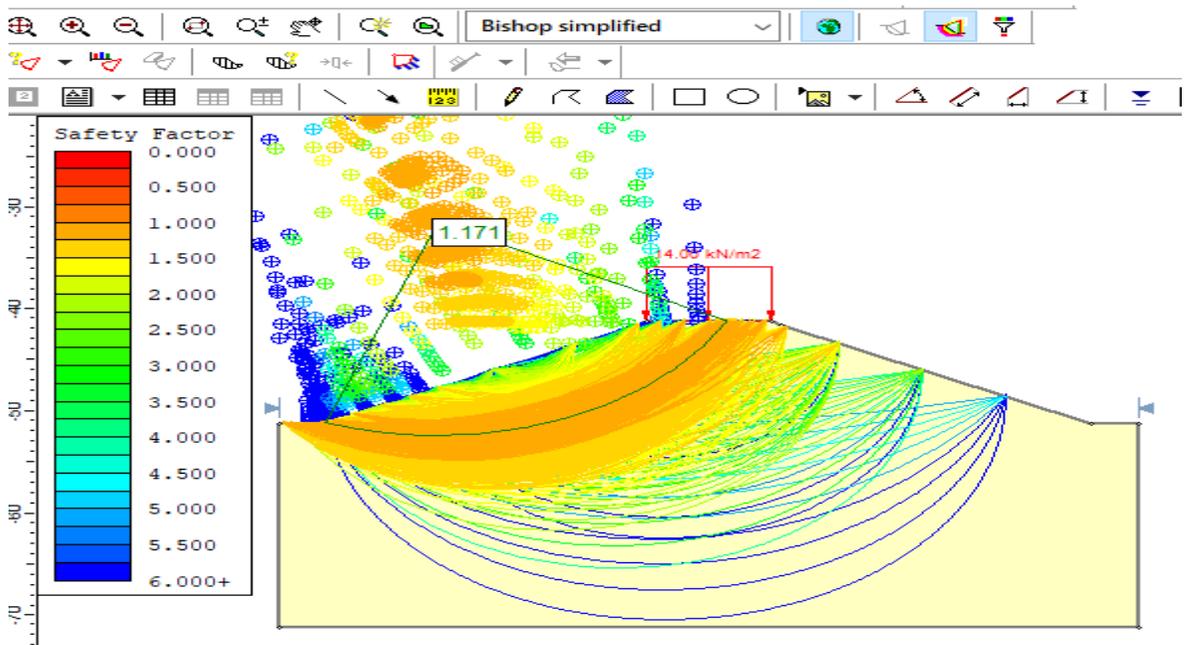
Fuente. autores

A 26° H6m ST2



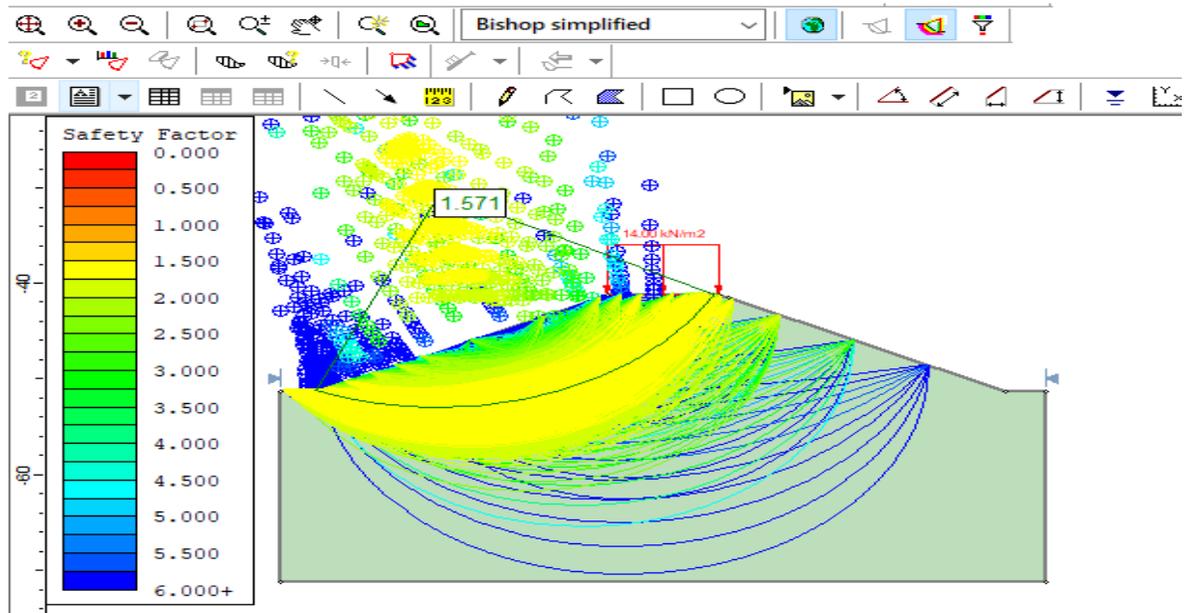
Fuente. autores

A26° H10 SS1



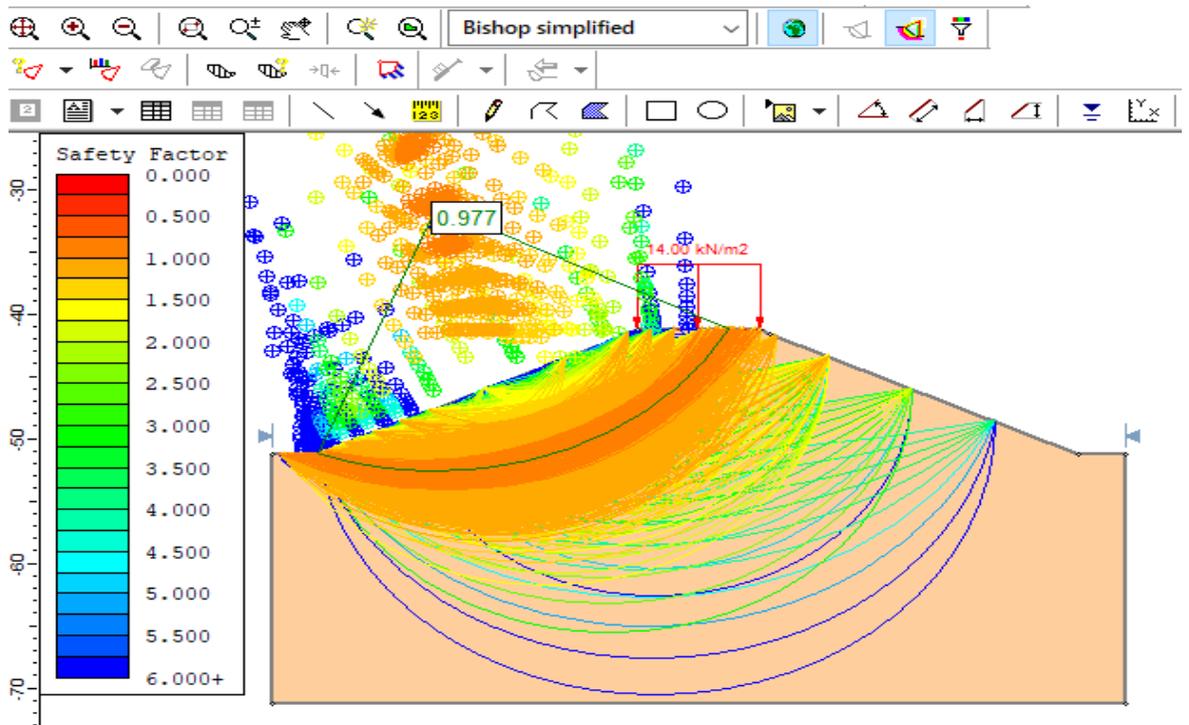
Fuente. autores

A26° H10 SS2



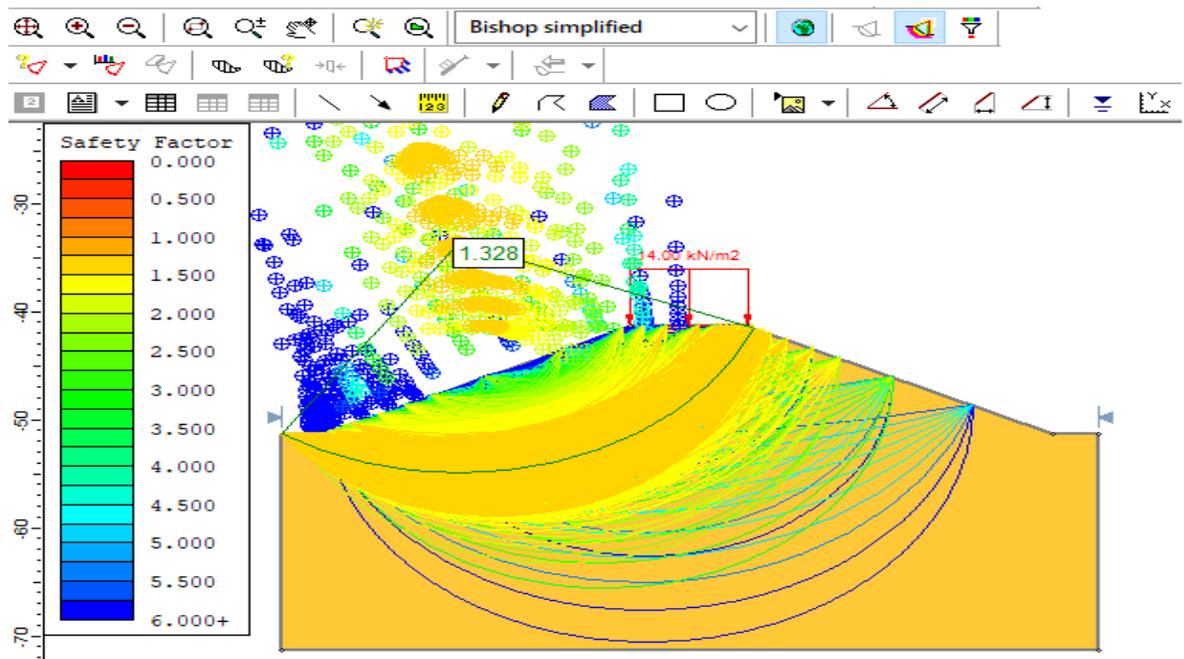
Fuente. autores

A26° H10 SS3



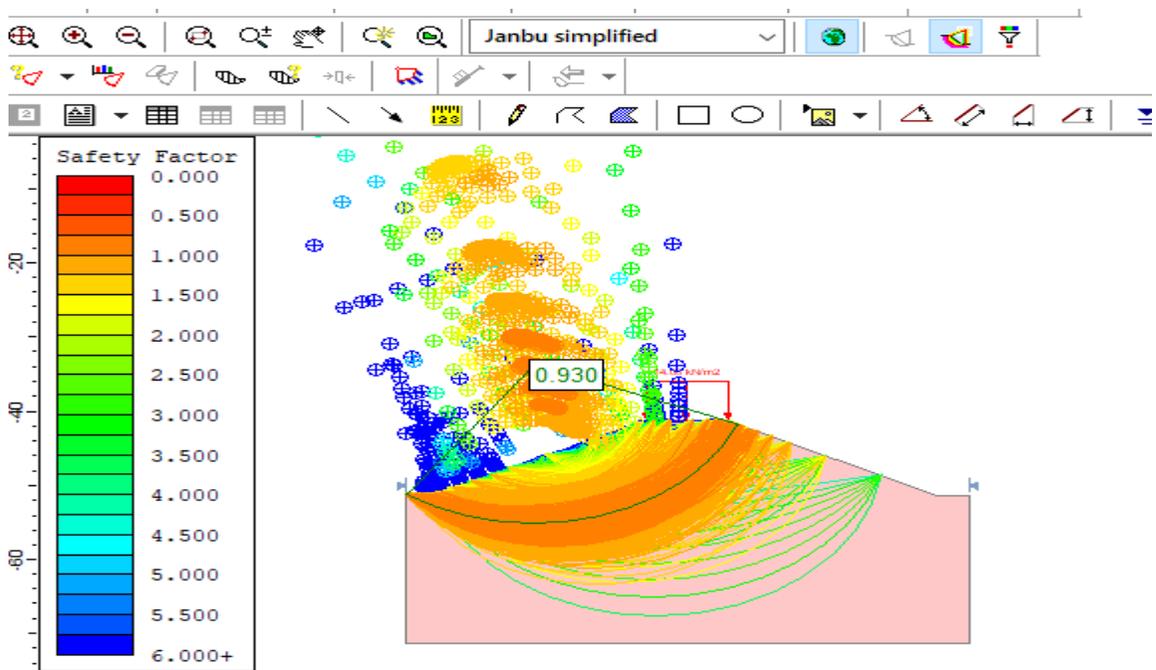
Fuente. autores

A26° H10M SS4



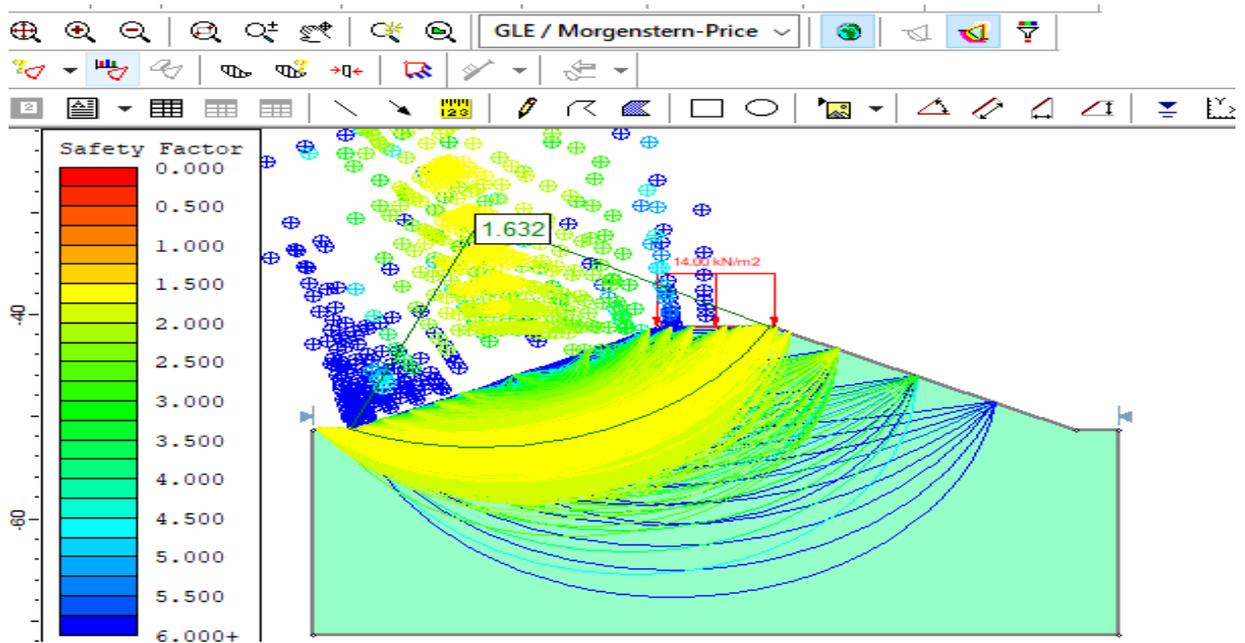
Fuente. autores

A26° H10m ST1



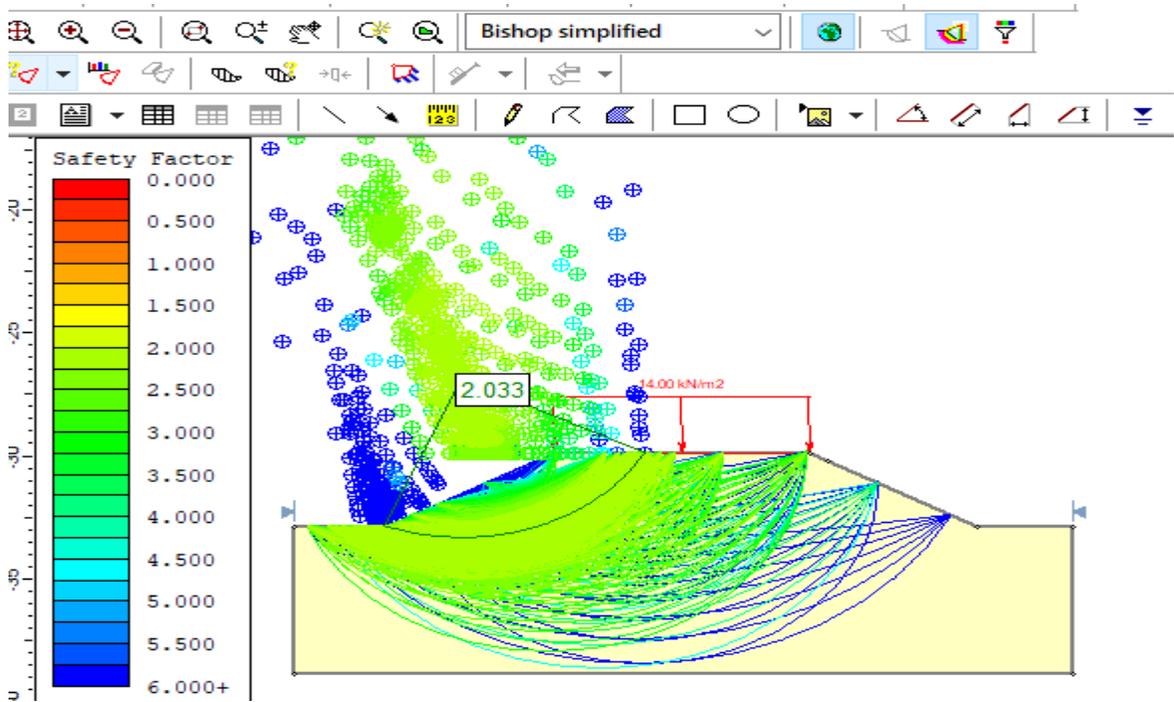
Fuente. autores

A26° H10m ST2



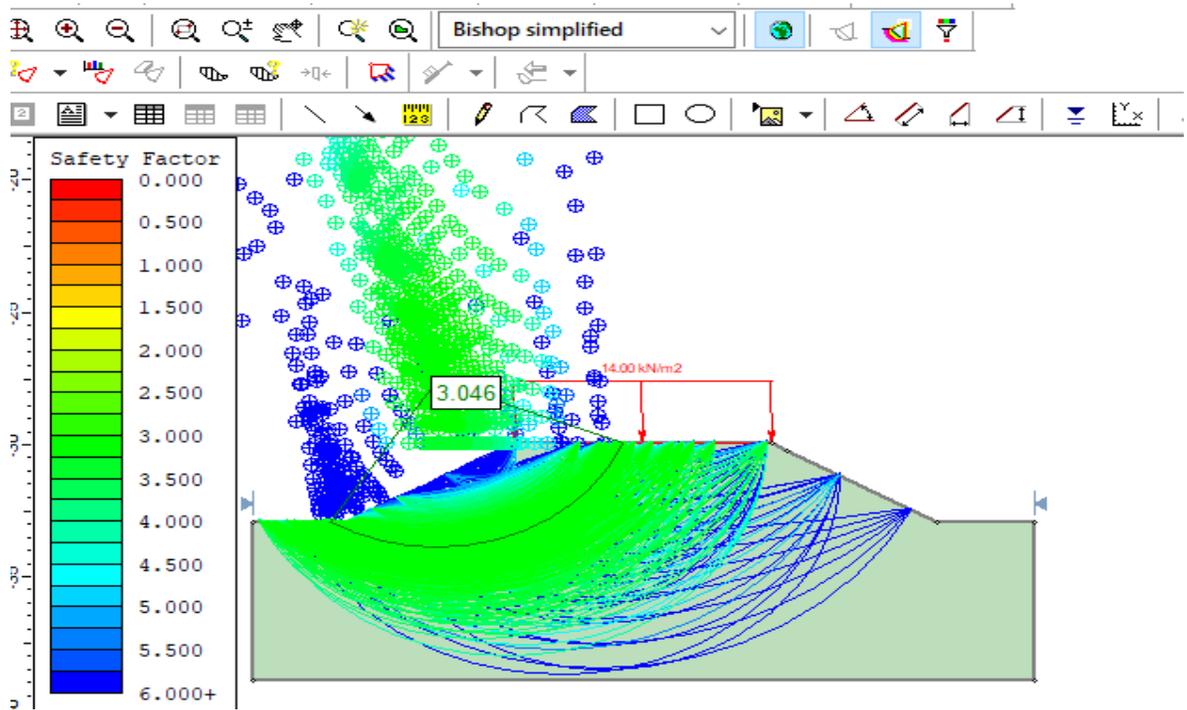
Fuente. autores

A30° H3 SS1



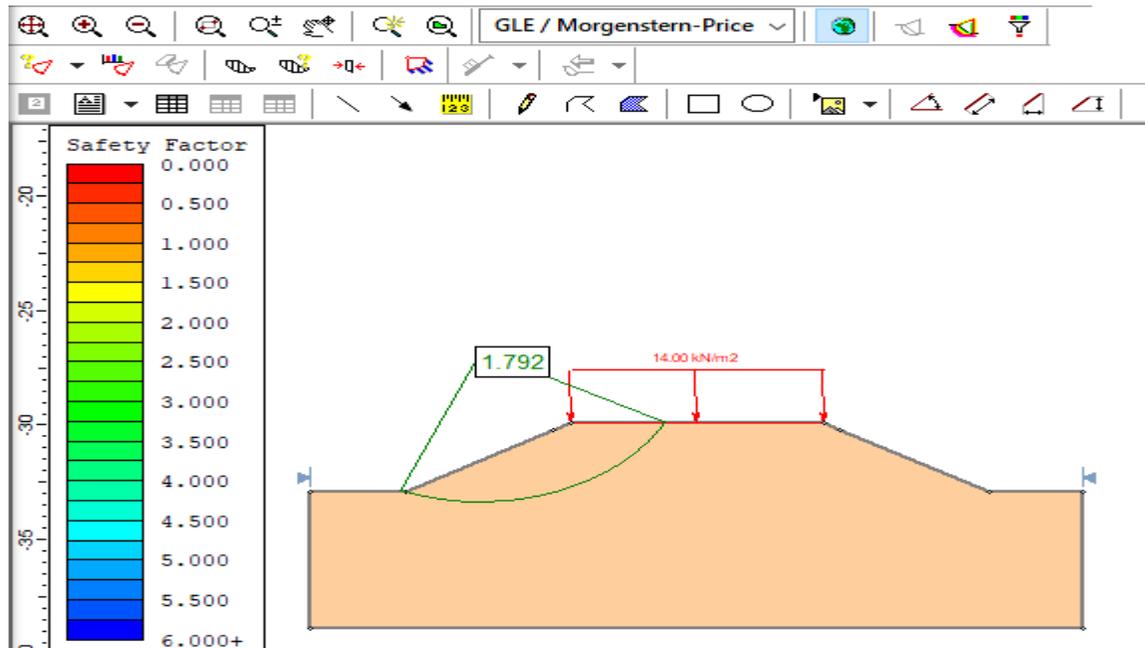
Fuente. autores

A30° H3 SS2



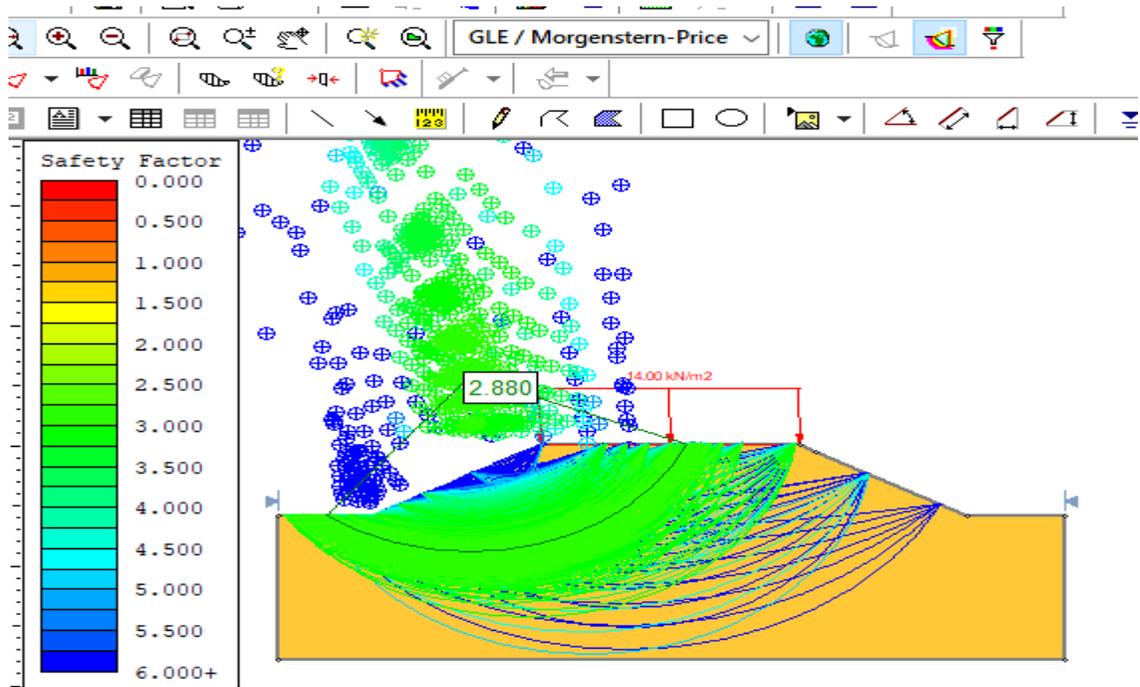
Fuente. autores

A30° H3 SS3



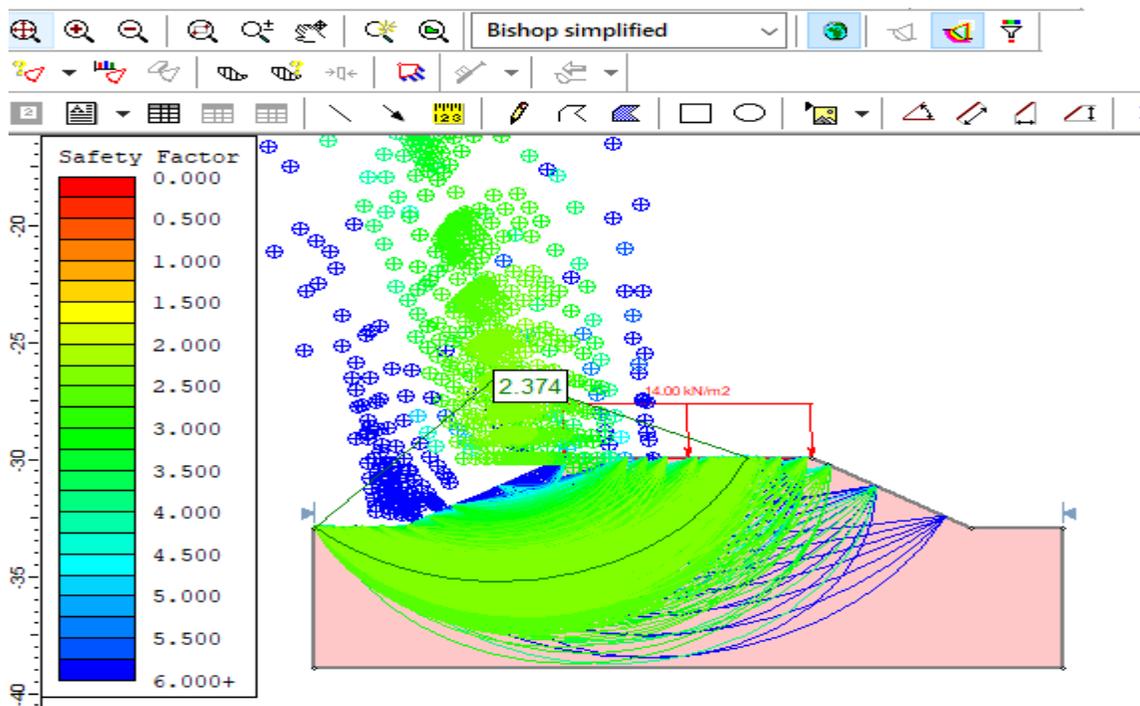
Fuente. autores

A30° H3 SS4



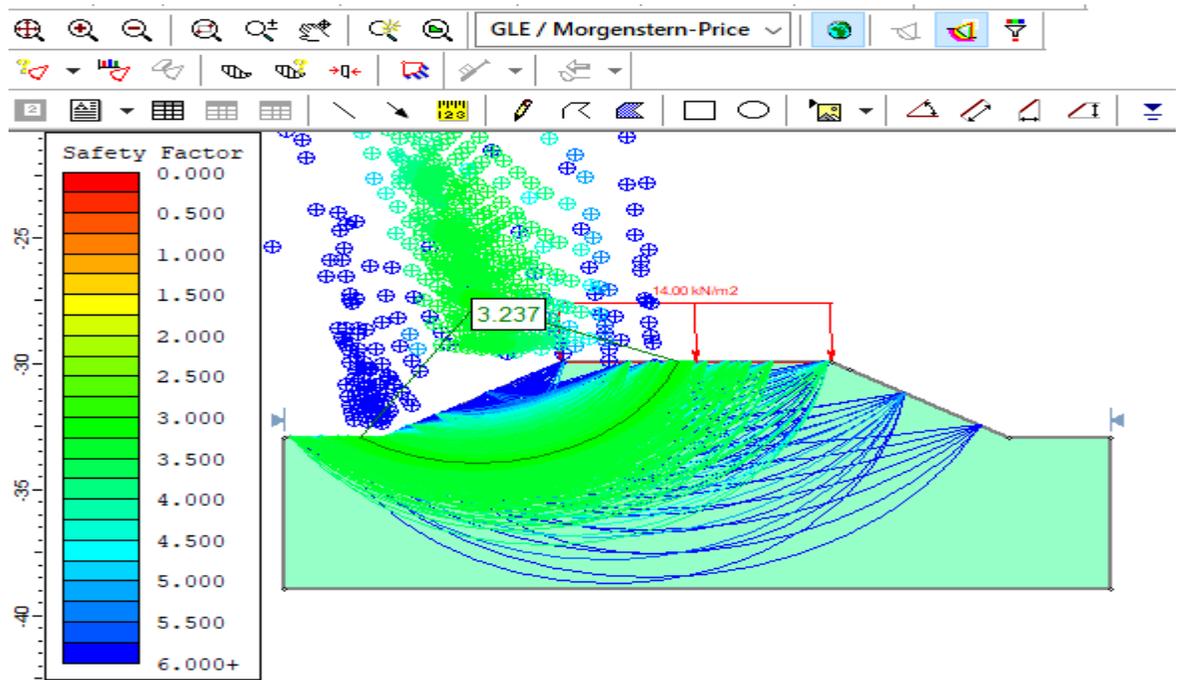
Fuente. autores

A30° H3 ST1



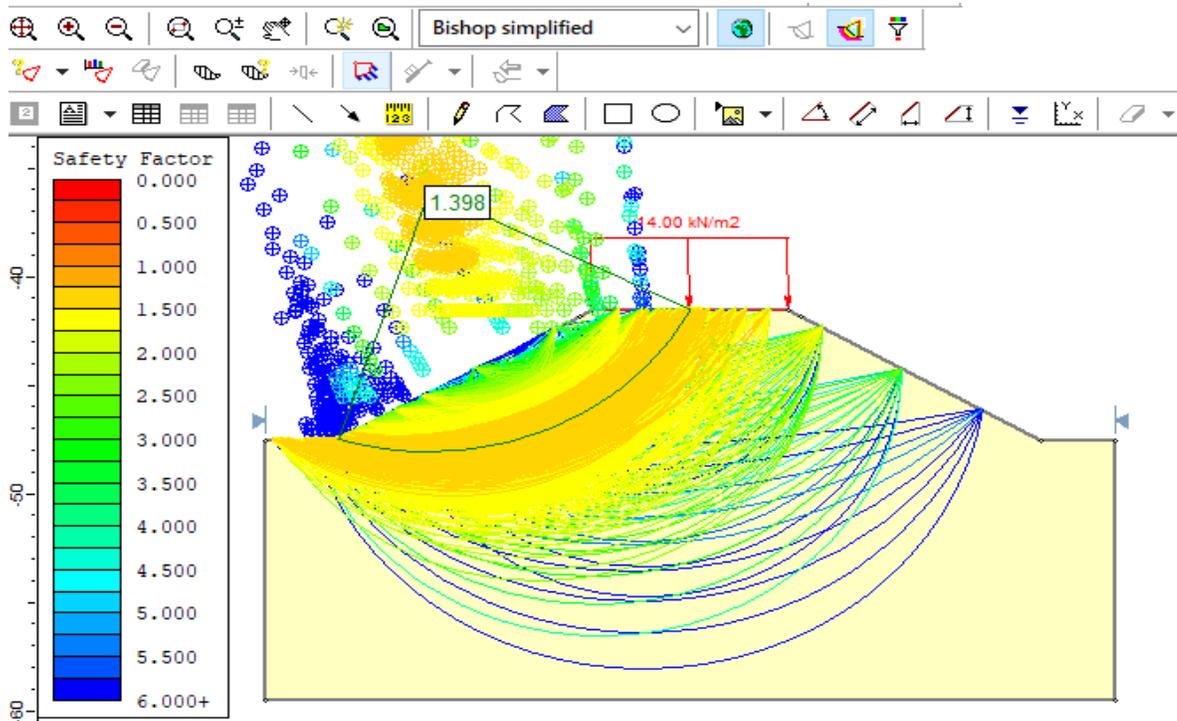
Fuente. autores

A30° H3 ST2



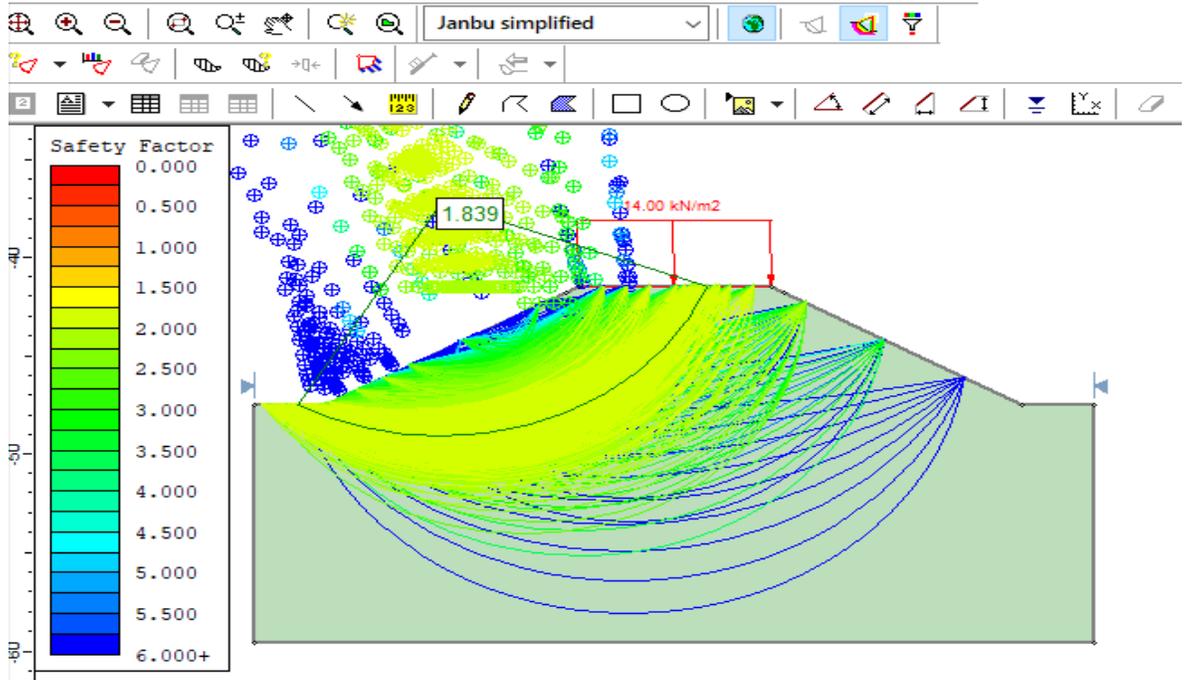
Fuente. autores

A30° H6m SS1



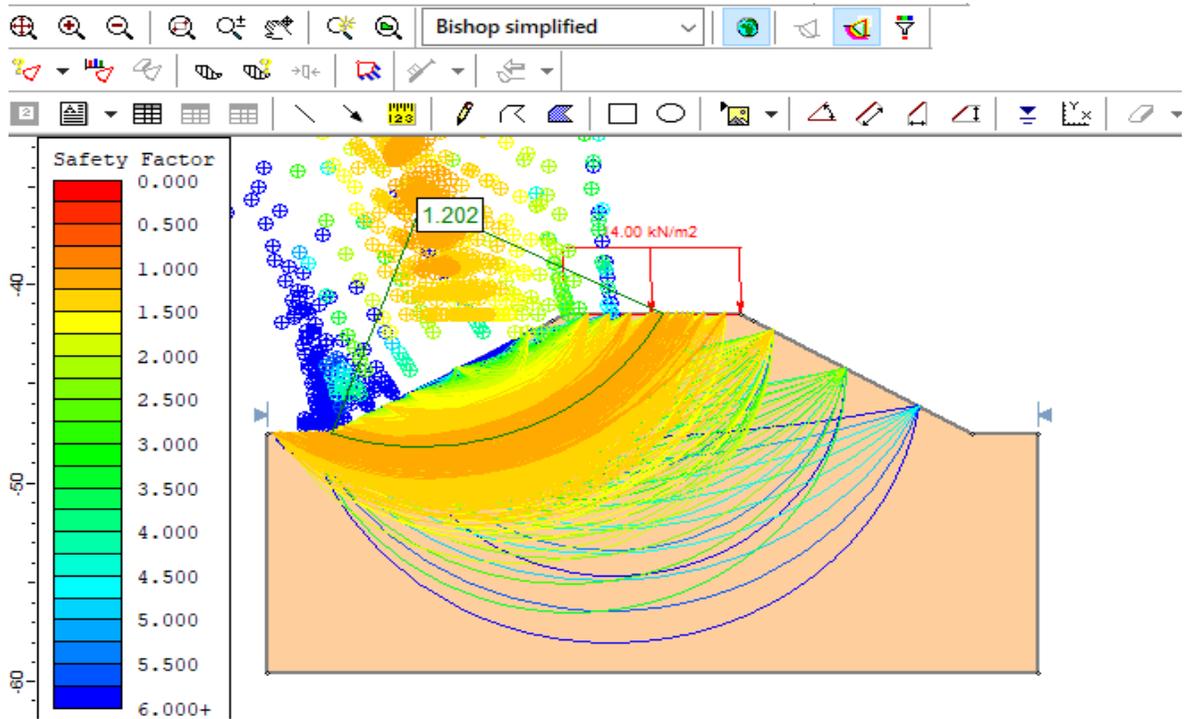
Fuente. autores

A30° H6m SS2



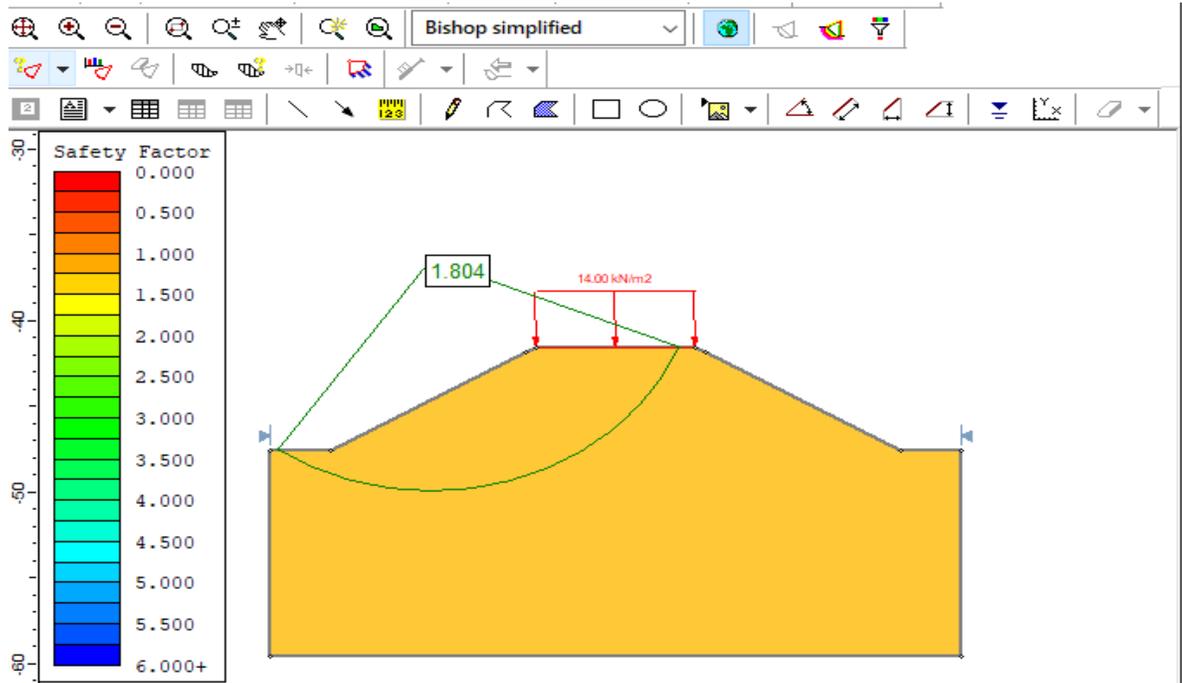
Fuente. autores

A30° H6m SS3



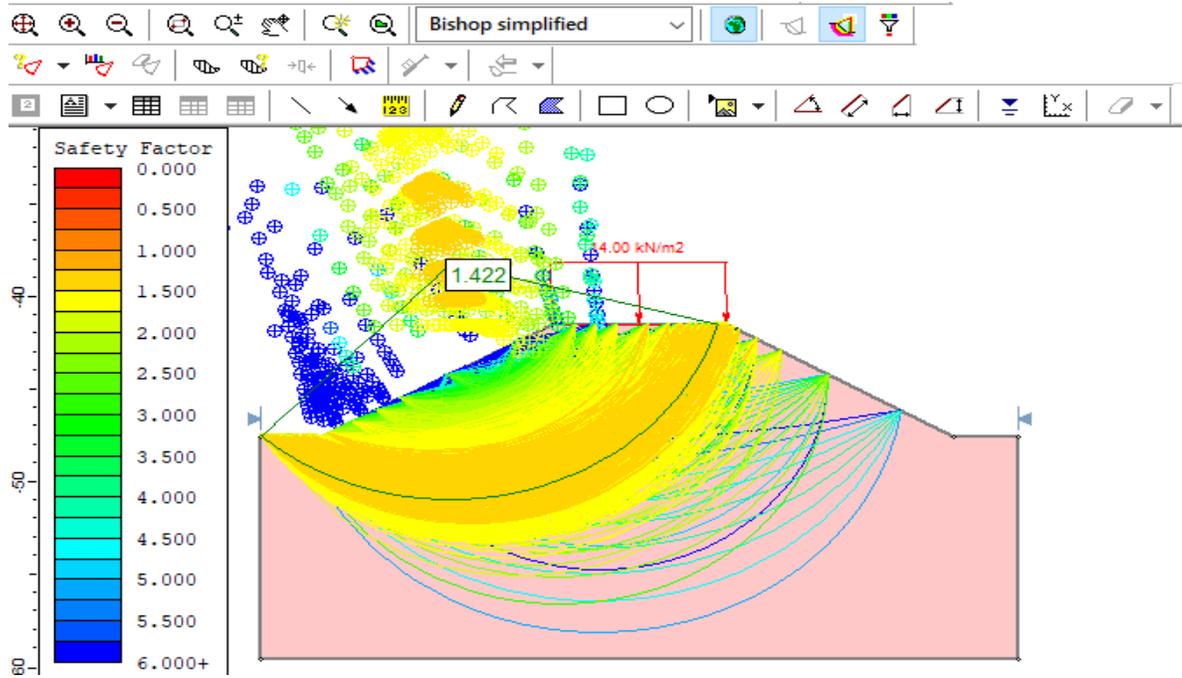
Fuente. autores

A30° H6m SS4



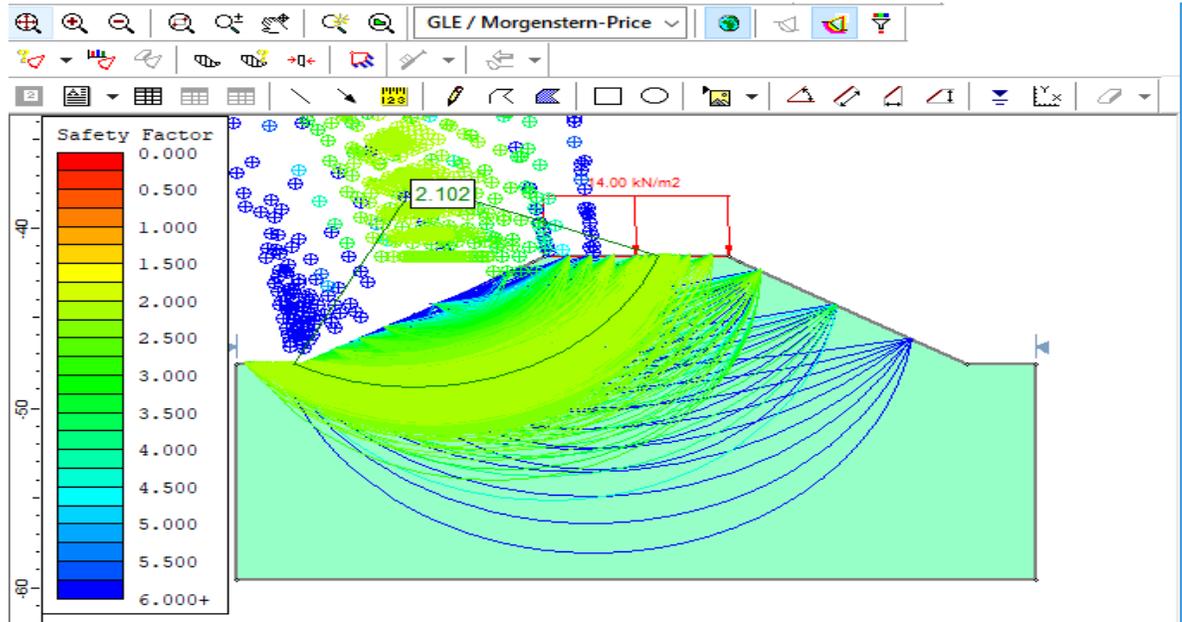
Fuente. autores

A30° H6m ST1



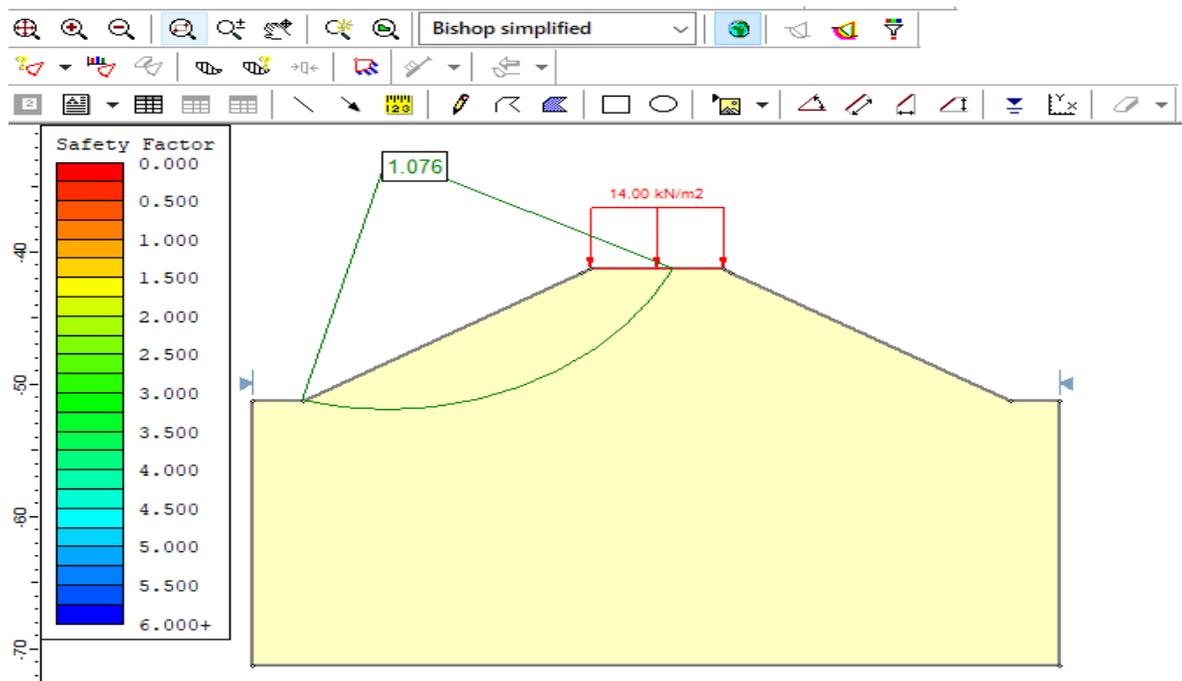
Fuente. autores

A30° H6m ST2



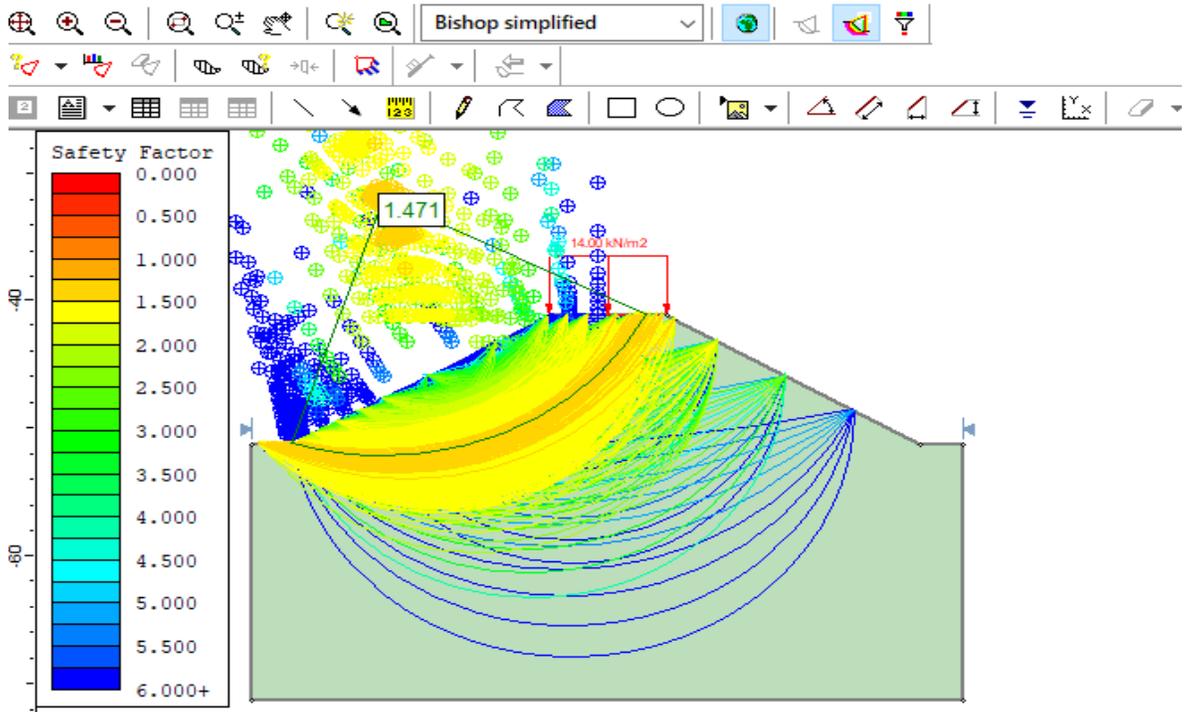
Fuente. autores

A30° H10m SS1



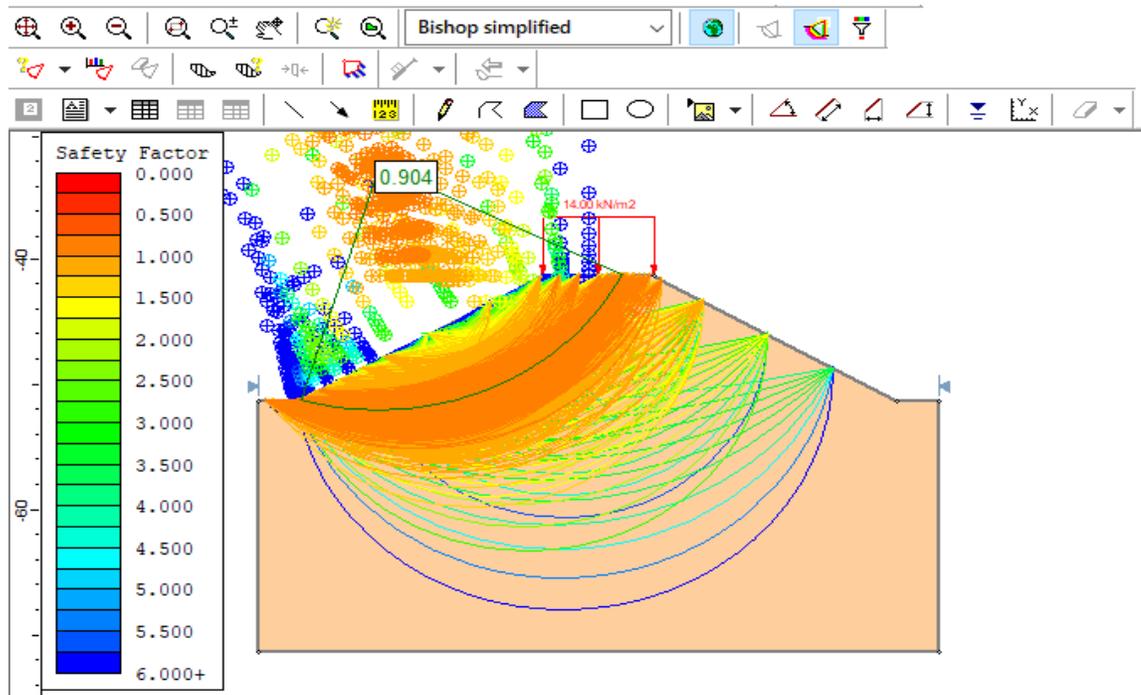
Fuente. autores

A30° H10m SS2



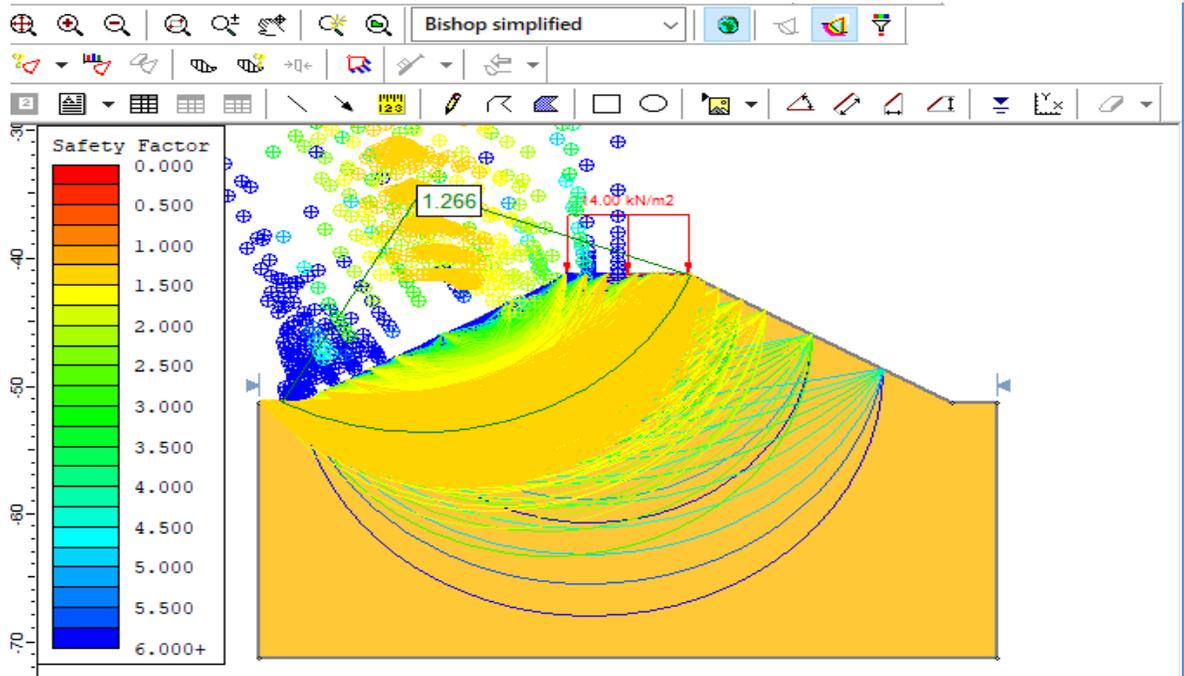
Fuente. autores

A30° H10m SS3



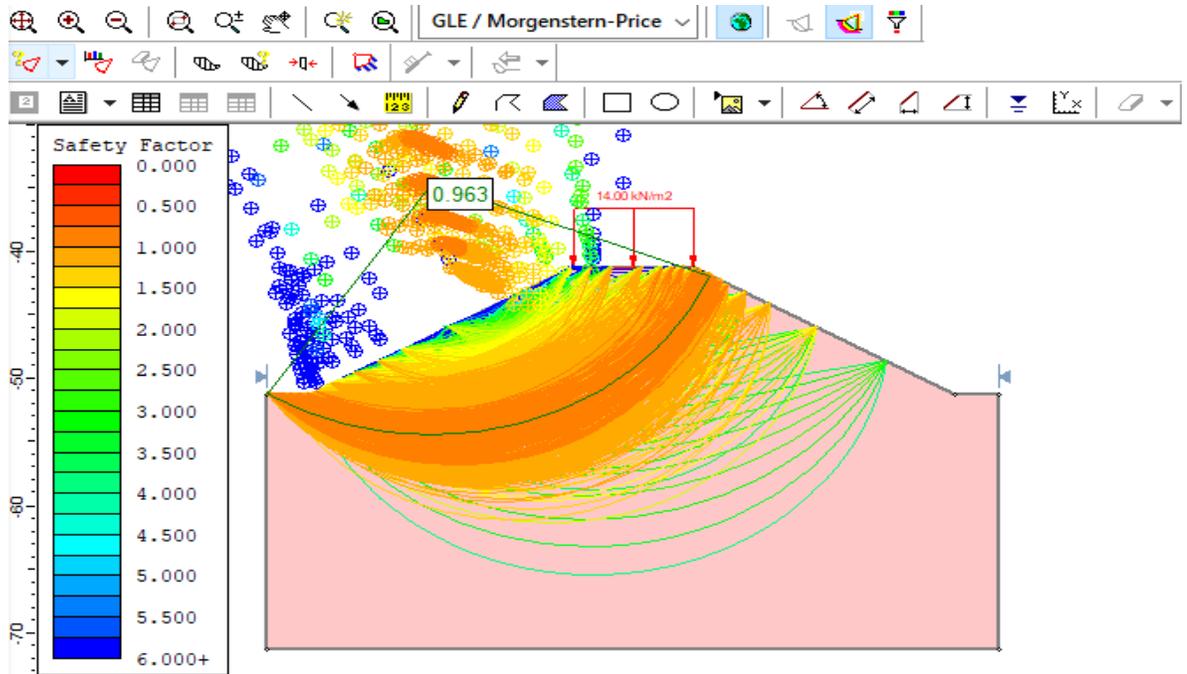
Fuente. autores

A30° H10m SS4



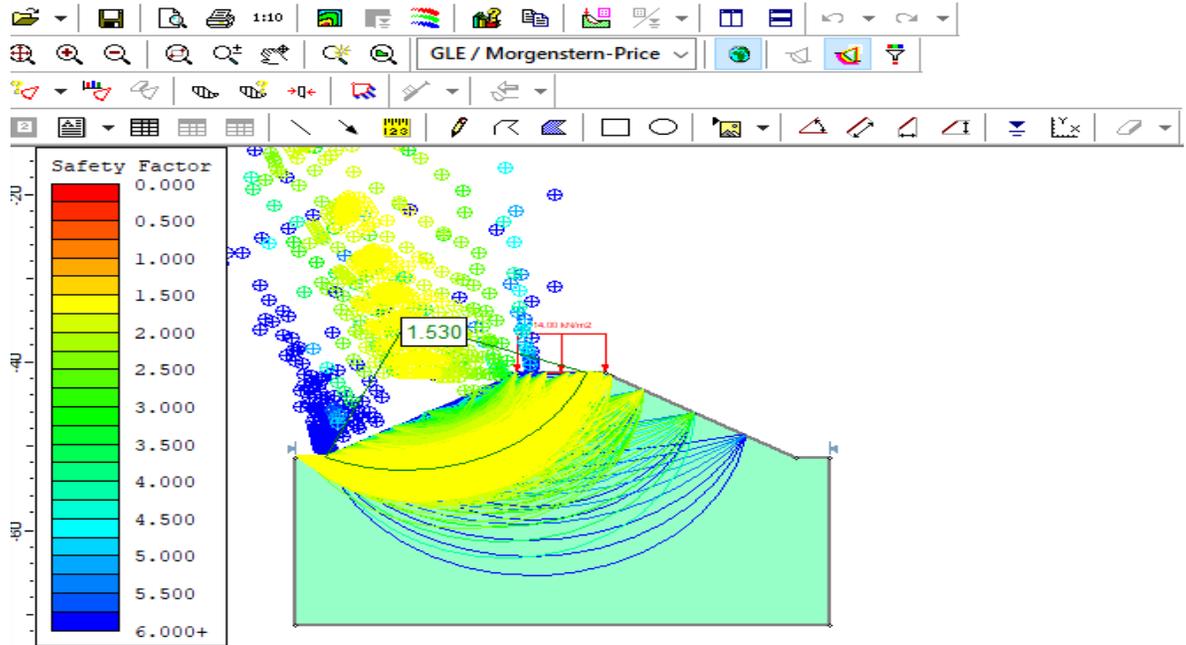
Fuente. autores

A30° H10m ST1



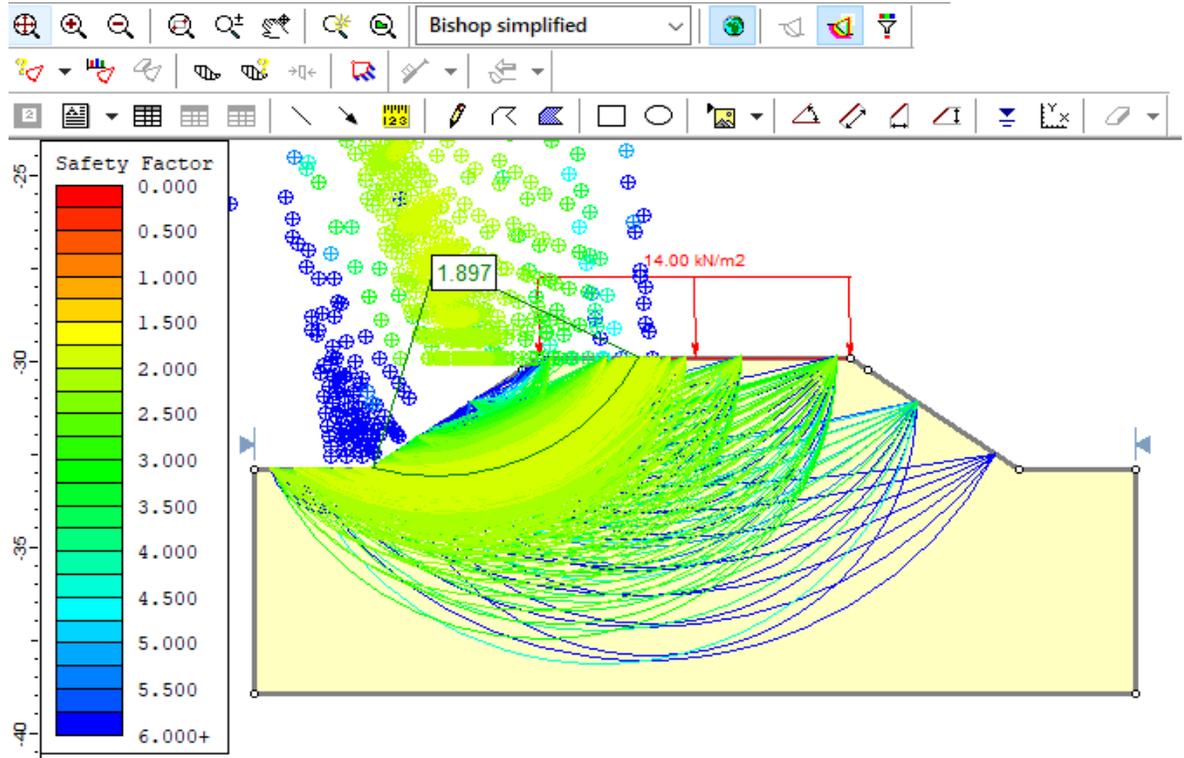
Fuente. autores

A30° H10m ST2



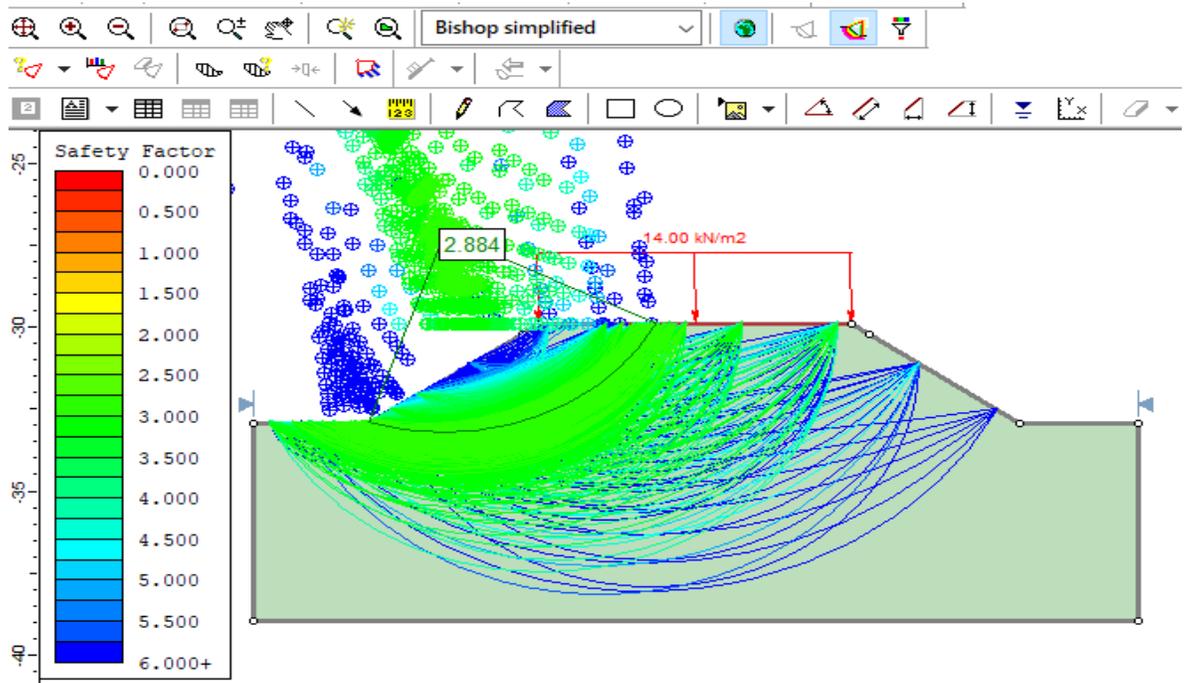
Fuente. autores

A35° H3m SS1



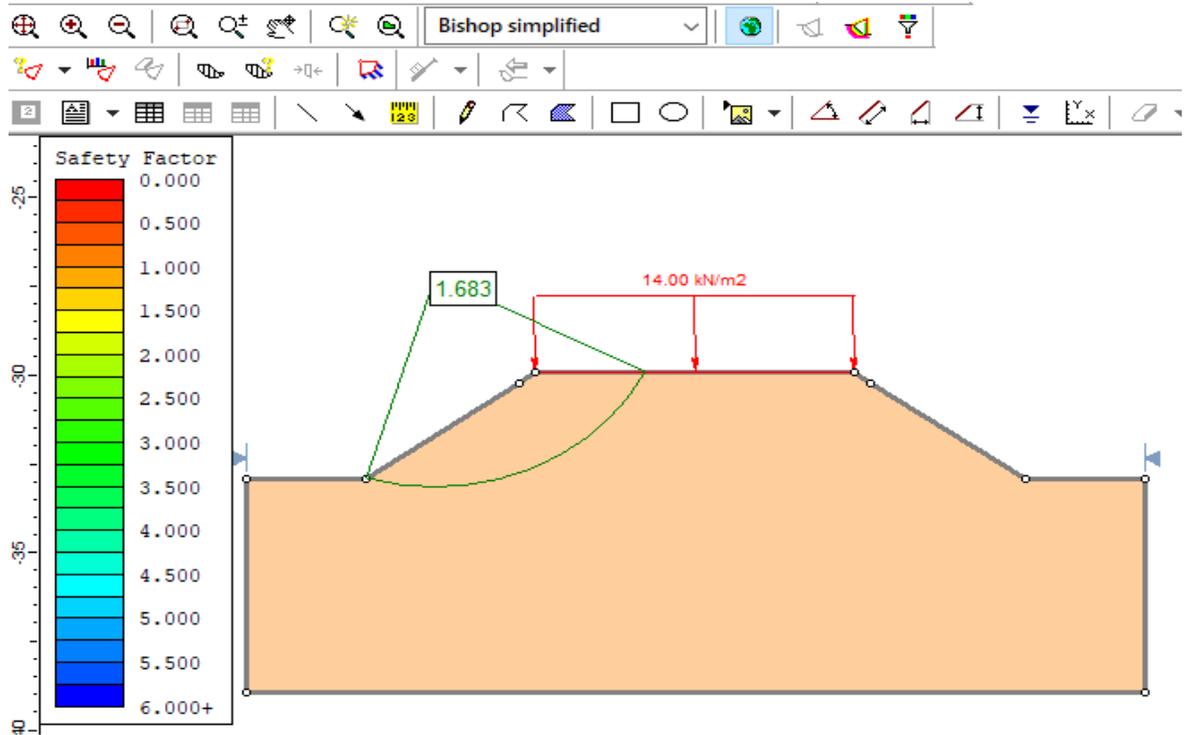
Fuente. autores

A35° H3m SS2



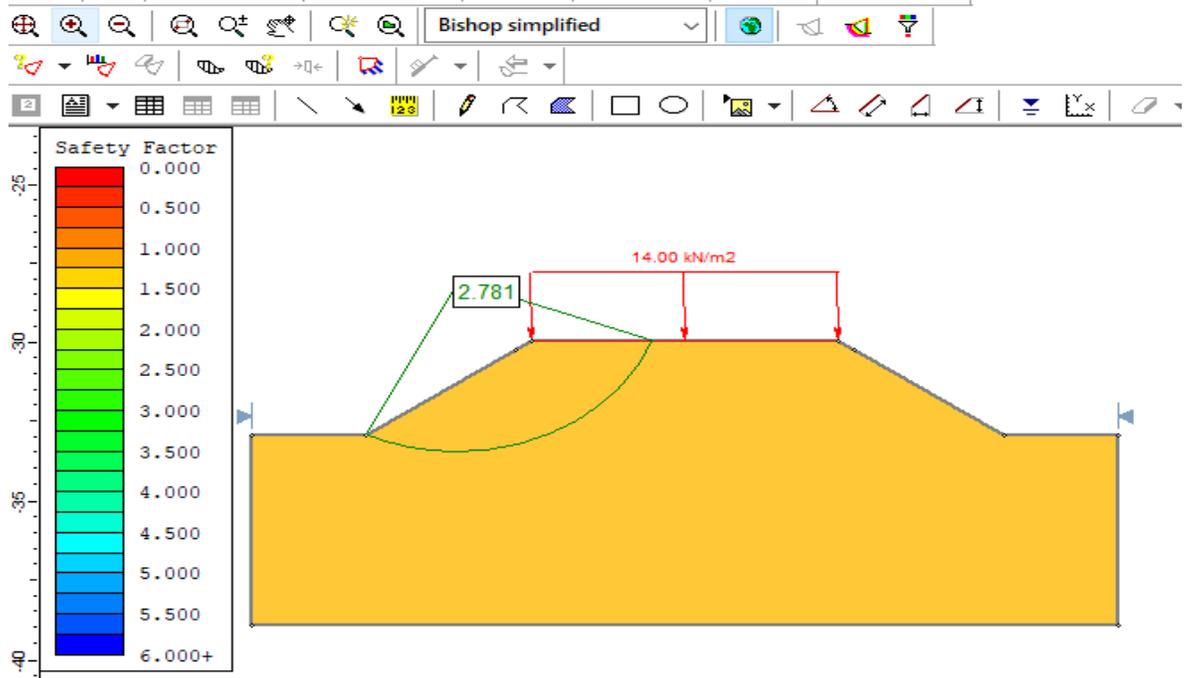
Fuente. autores

A35° H3m SS3



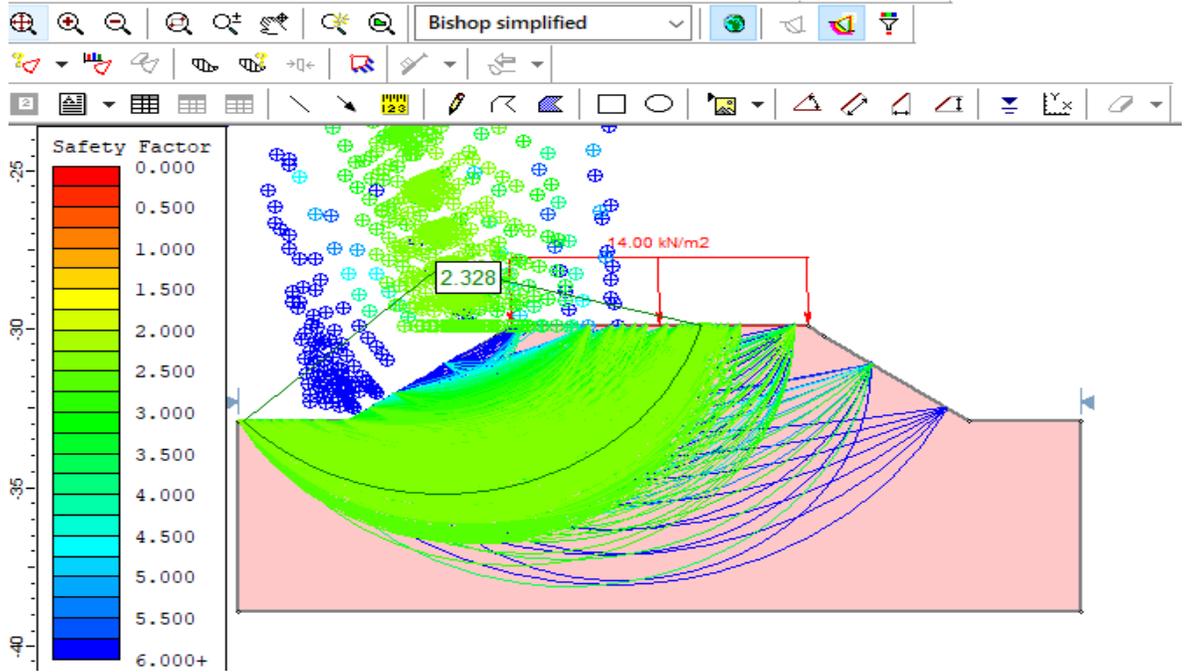
Fuente. autores

A35° H3m SS4



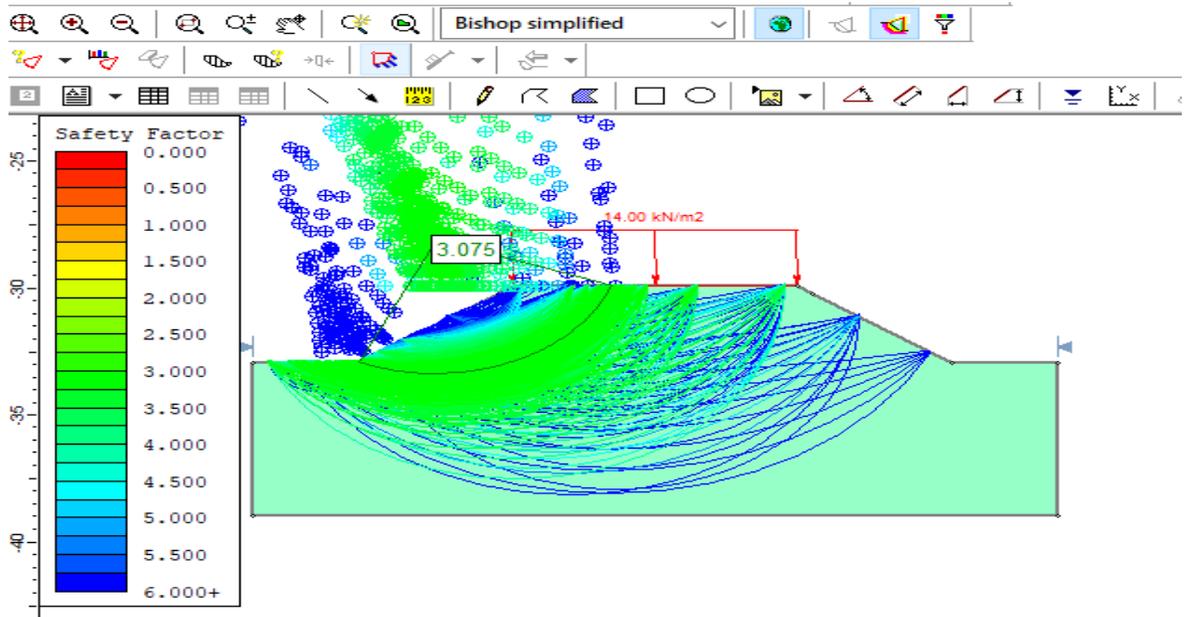
Fuente. Autores

A35° H3m ST1



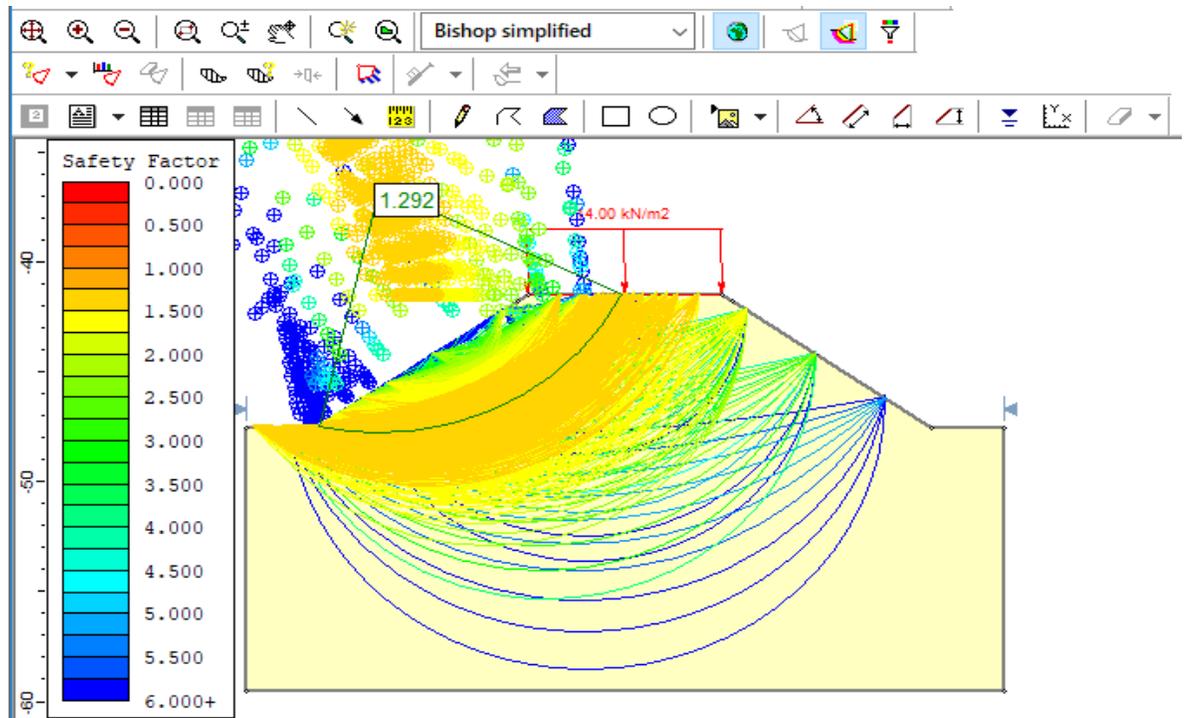
Fuente. autores

A35° H3m ST2



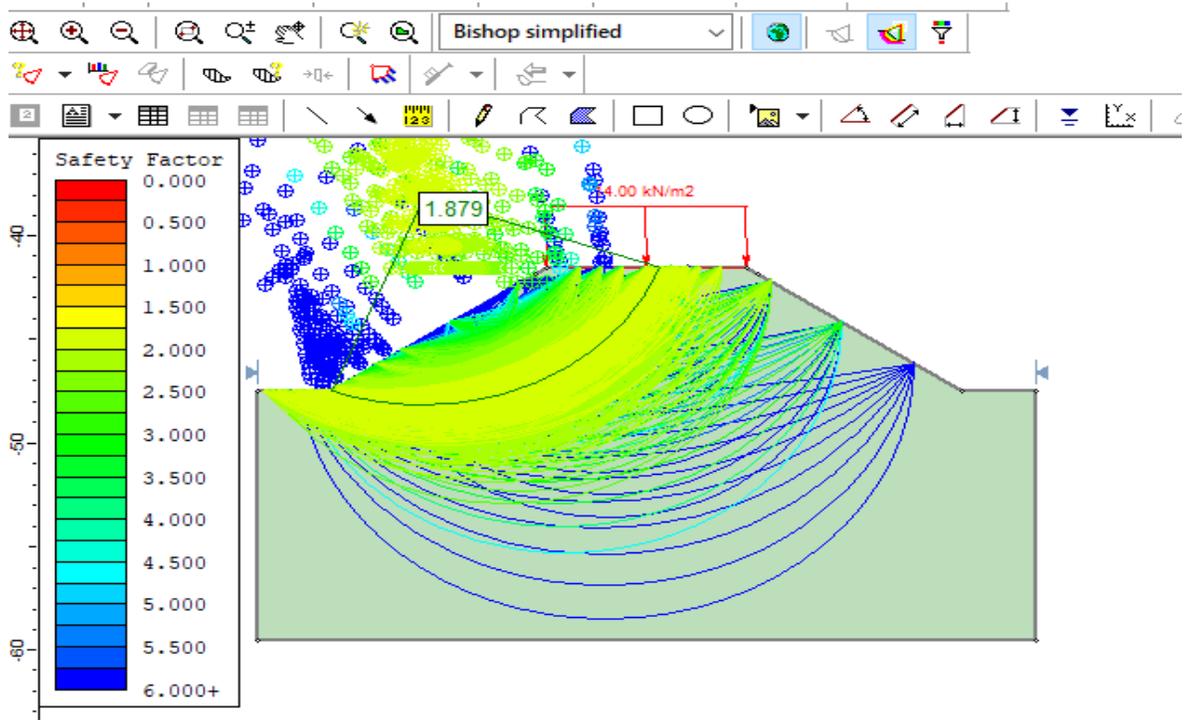
Fuente. autores

A35° H6m SS1



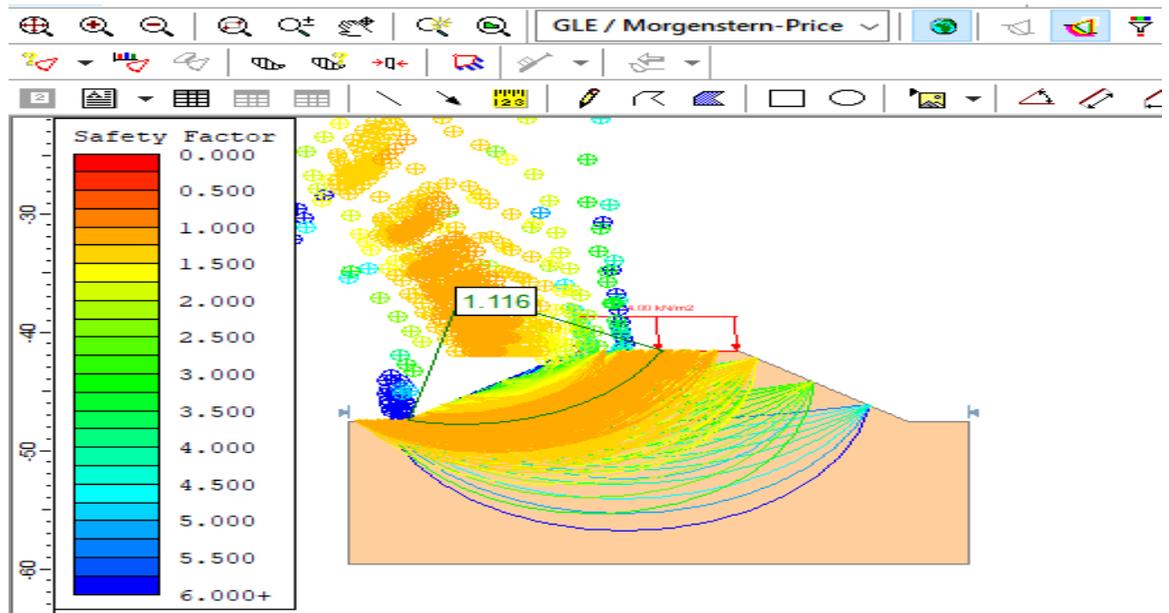
Fuente. autores

A35° H6m SS2



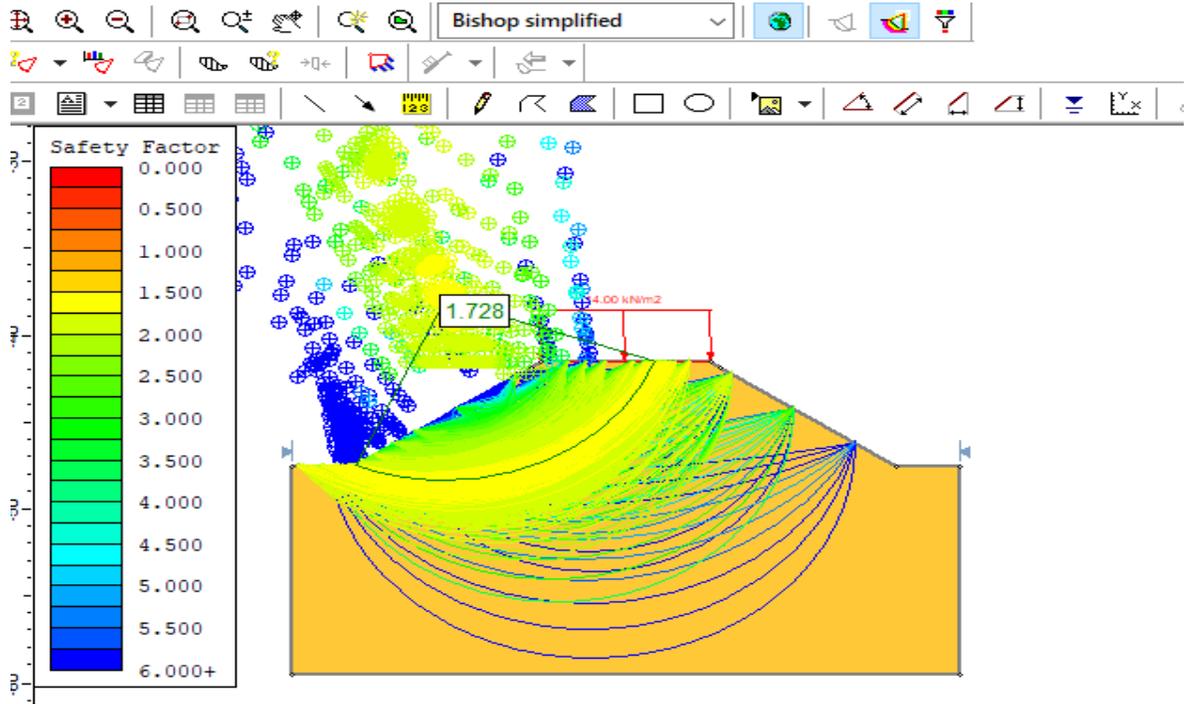
Fuente. autores

A35° H6m SS3



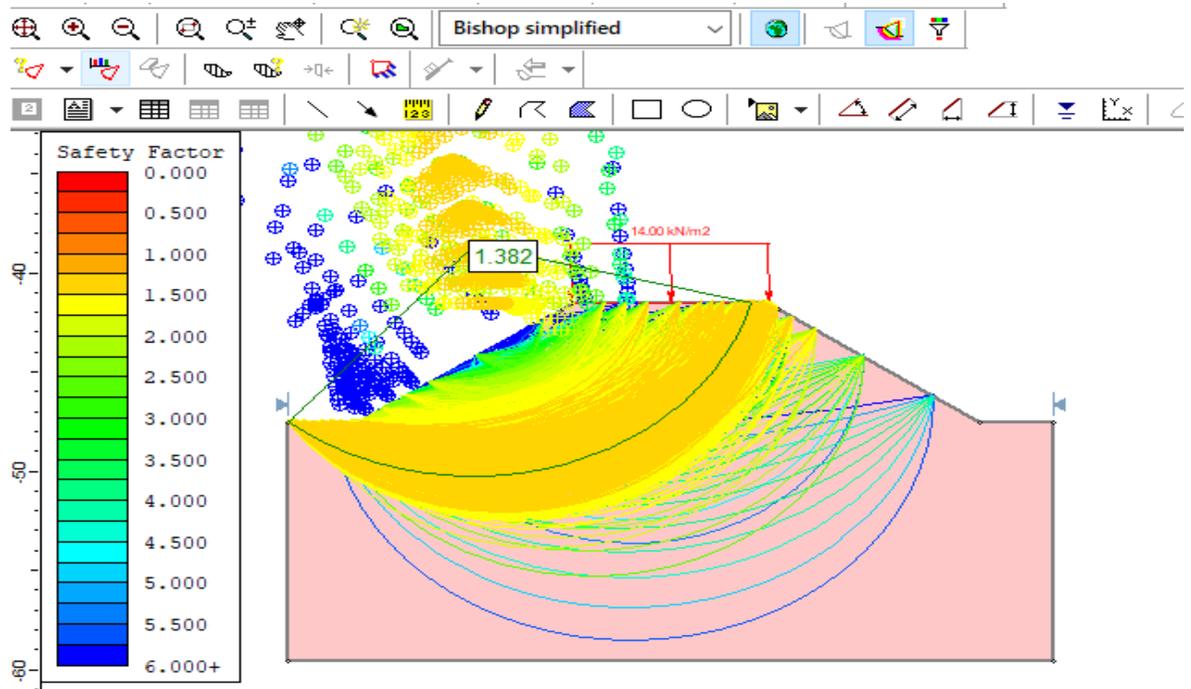
Fuente. autores

A35° H6m SS4



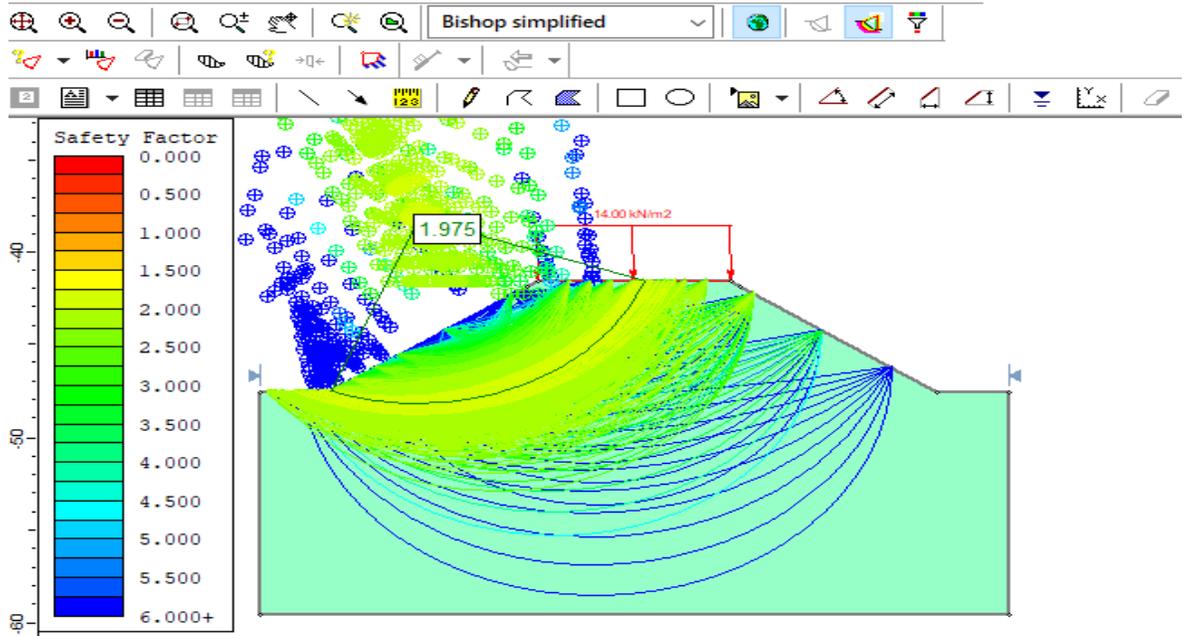
Fuente. autores

A35° H6m ST1



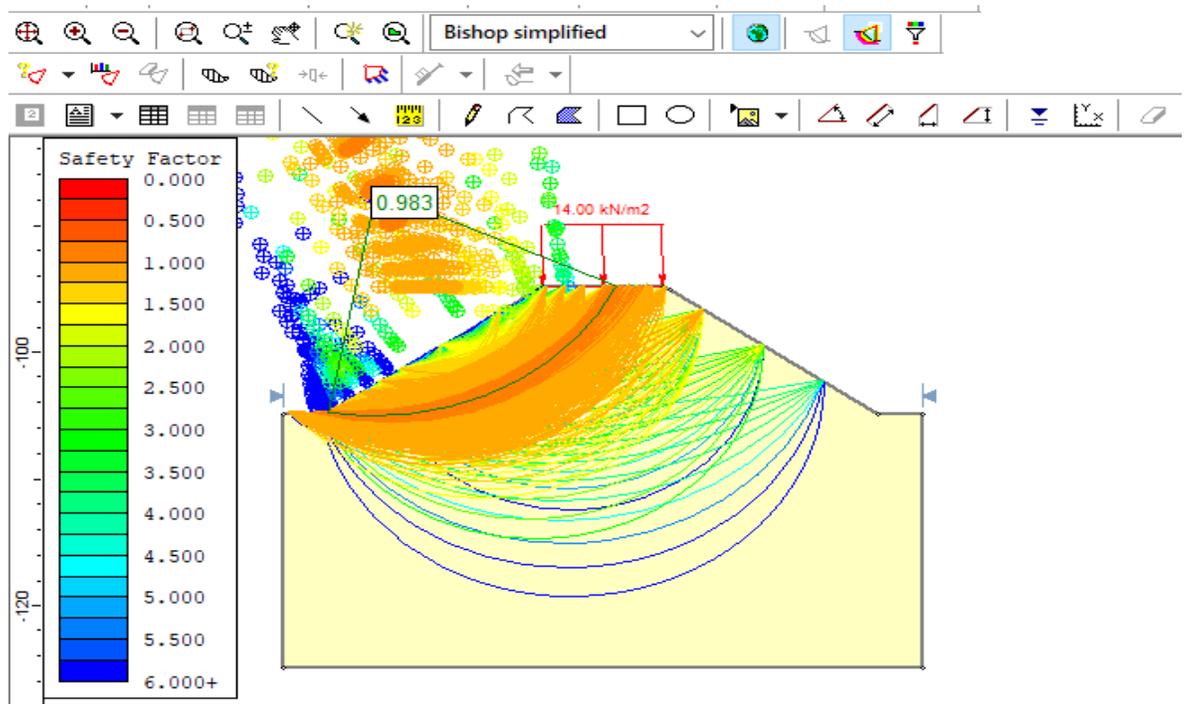
Fuente. autores

A35° H6m ST2



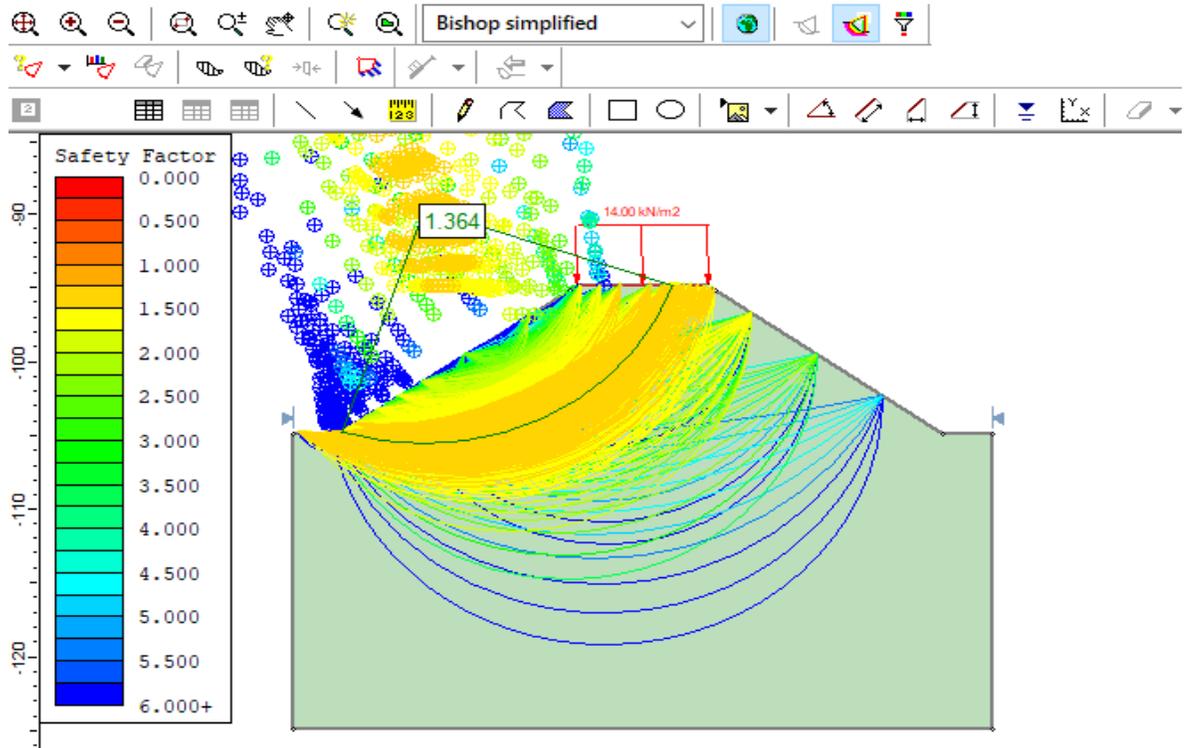
Fuente. autores

A35° H10m SS1



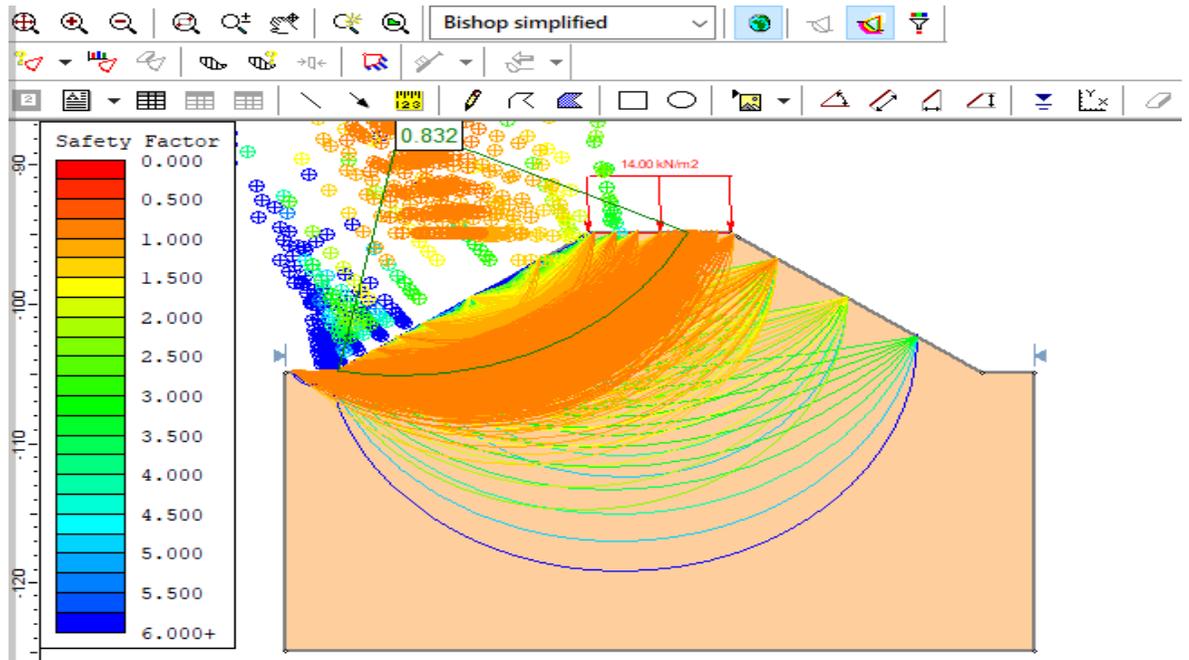
Fuente. autores

A35° H10m SS2



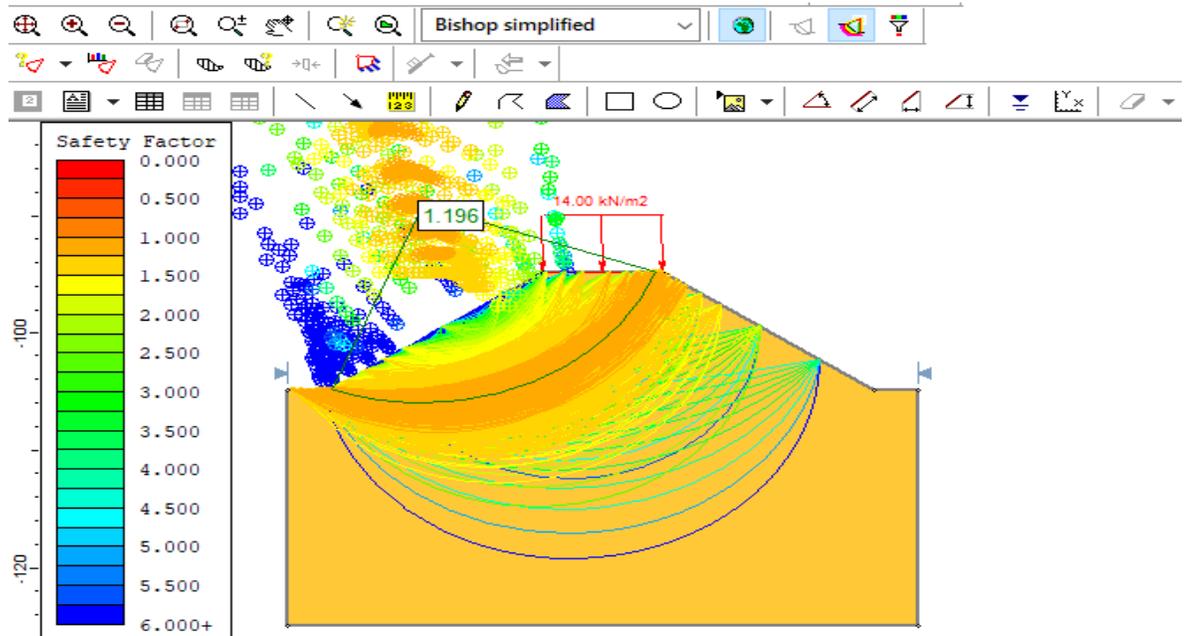
Fuente. autores

A35° H10m SS3



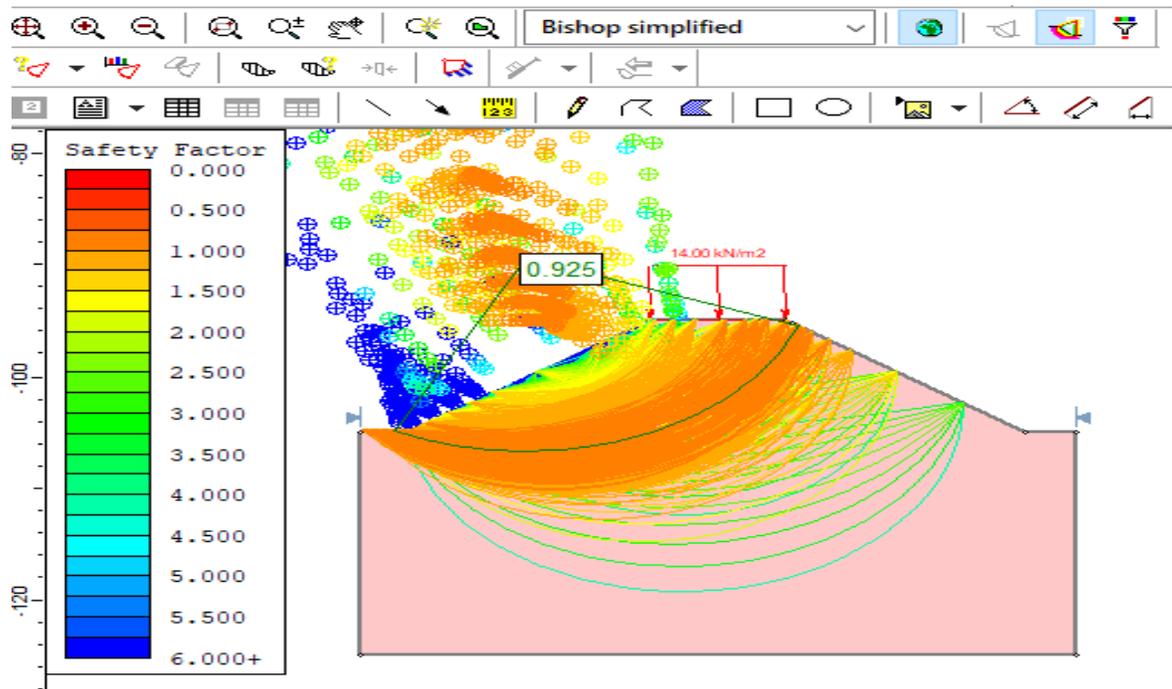
Fuente. autores

A35° H10m SS4



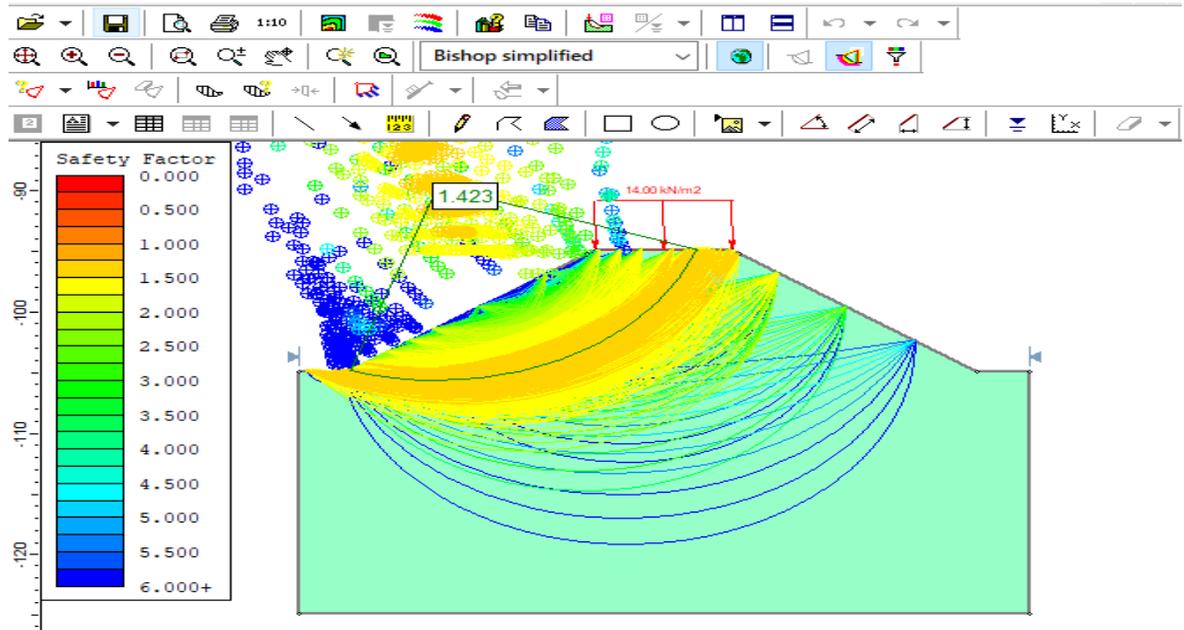
Fuente. autores

A35° H10m ST1



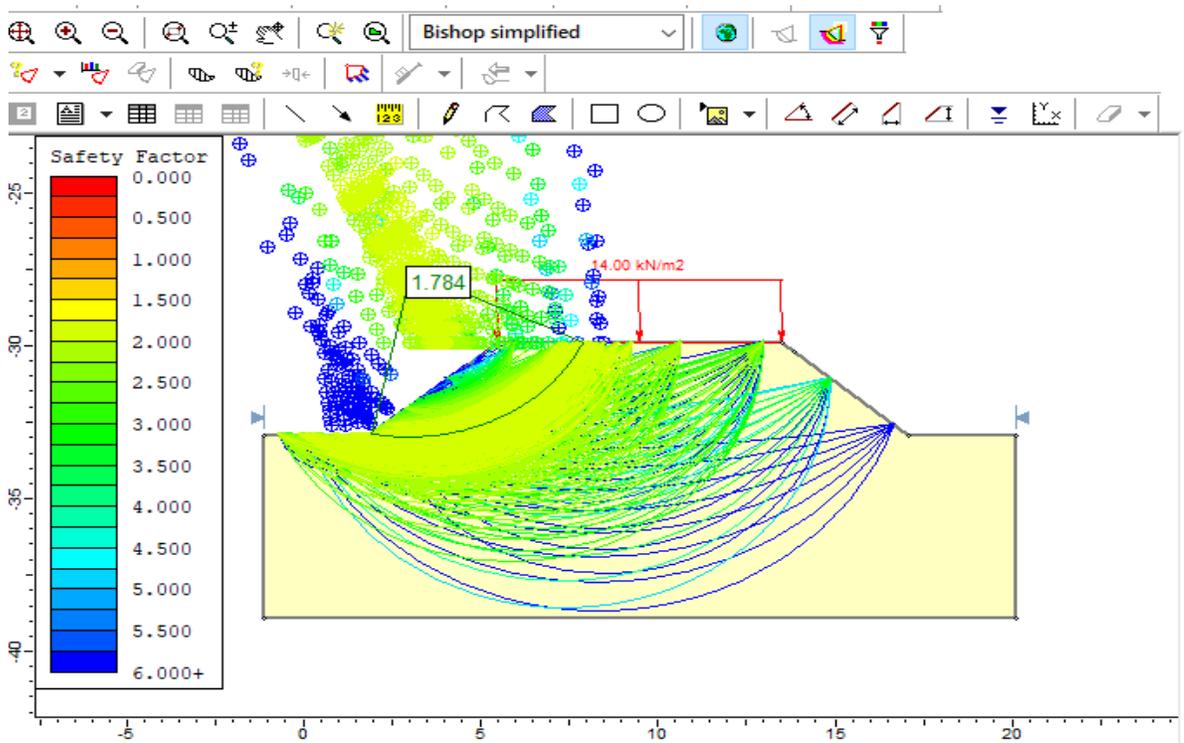
Fuente. autores

A35° H10m ST2



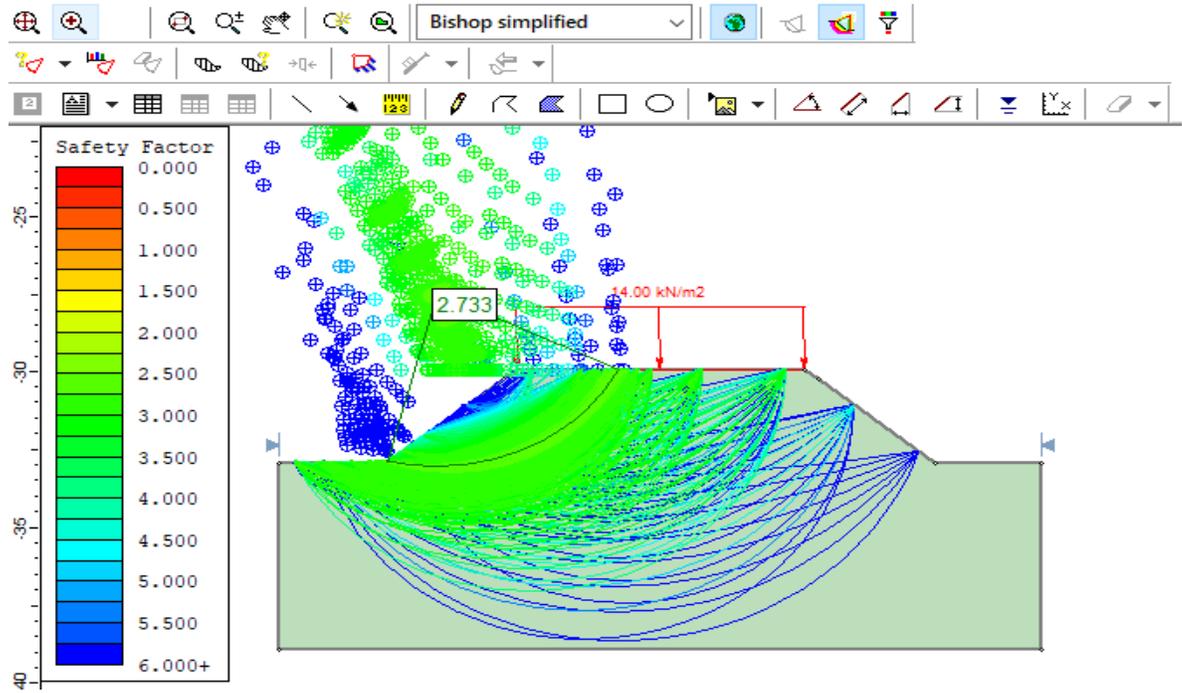
Fuente. autores

A40° H3m SS1



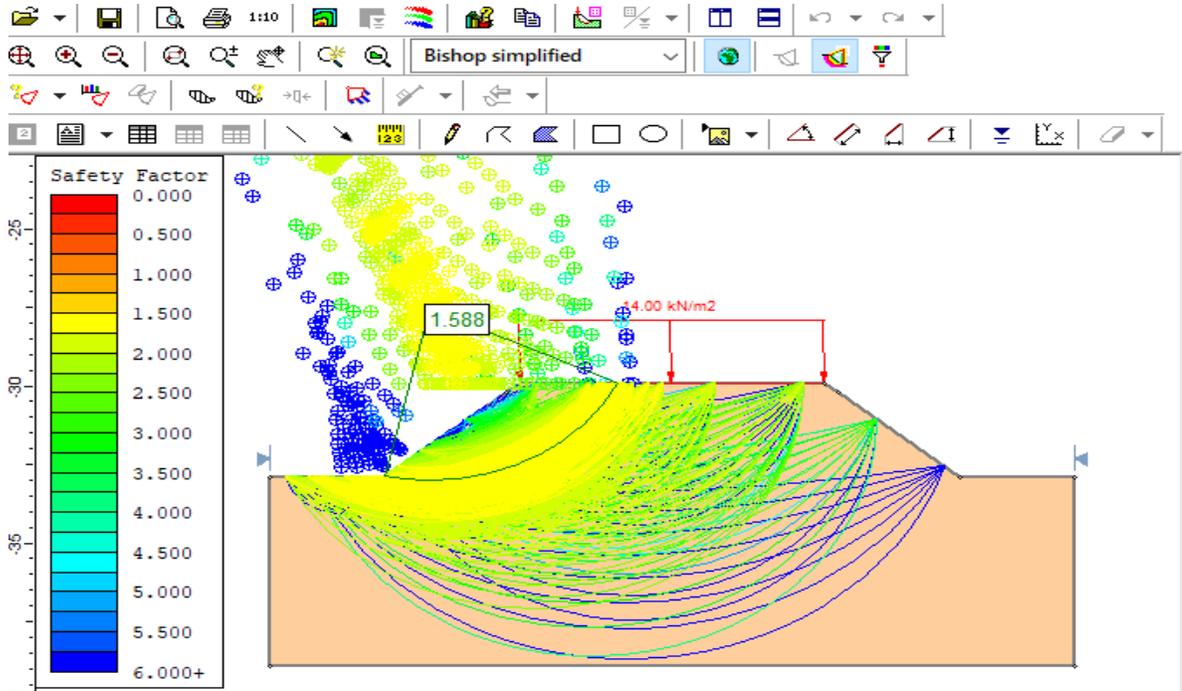
Fuente. autores

A40° H3m SS2



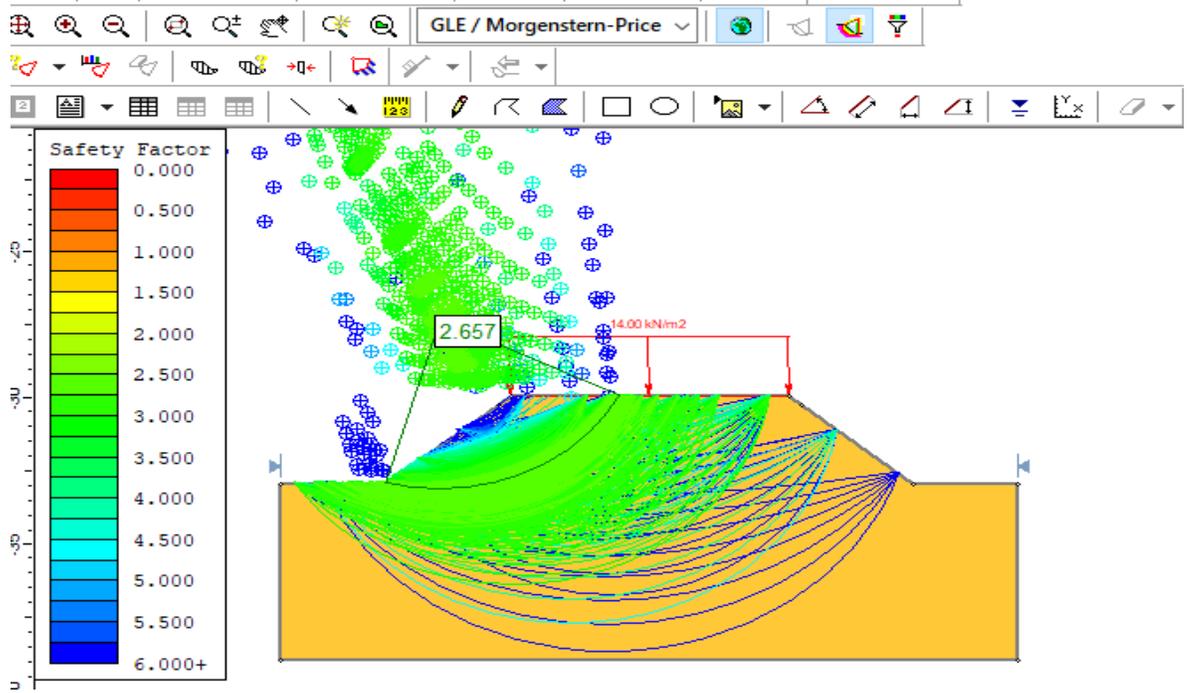
Fuente. autores

A40° H3m SS3



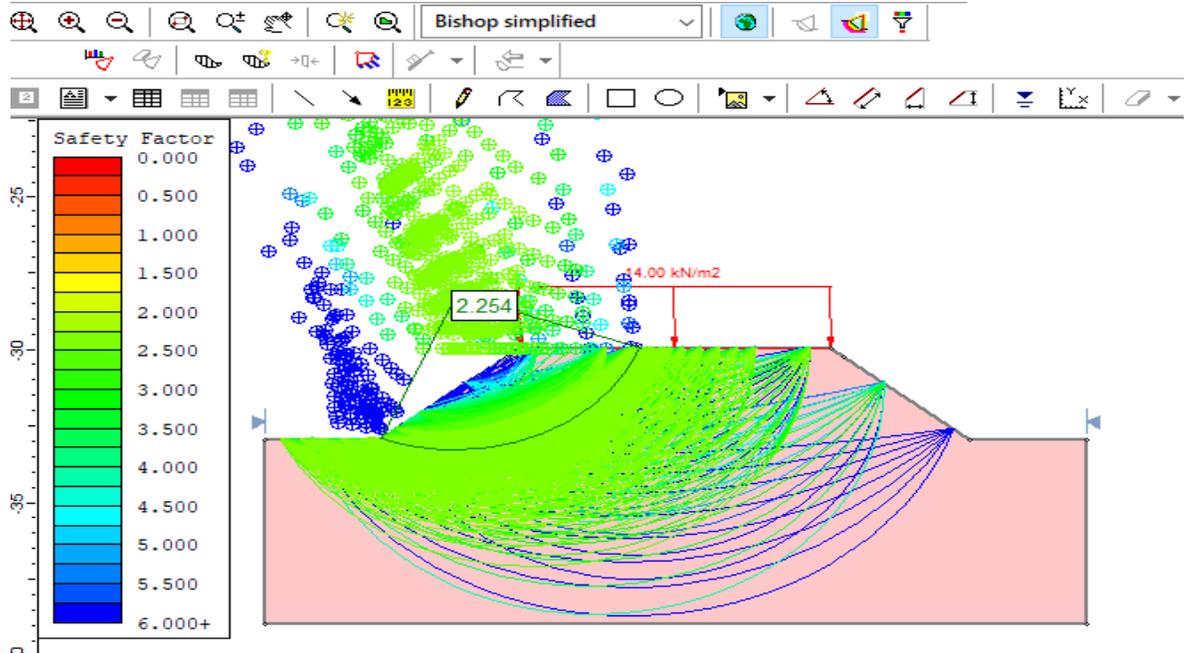
Fuente. autores

A40° H3m SS4



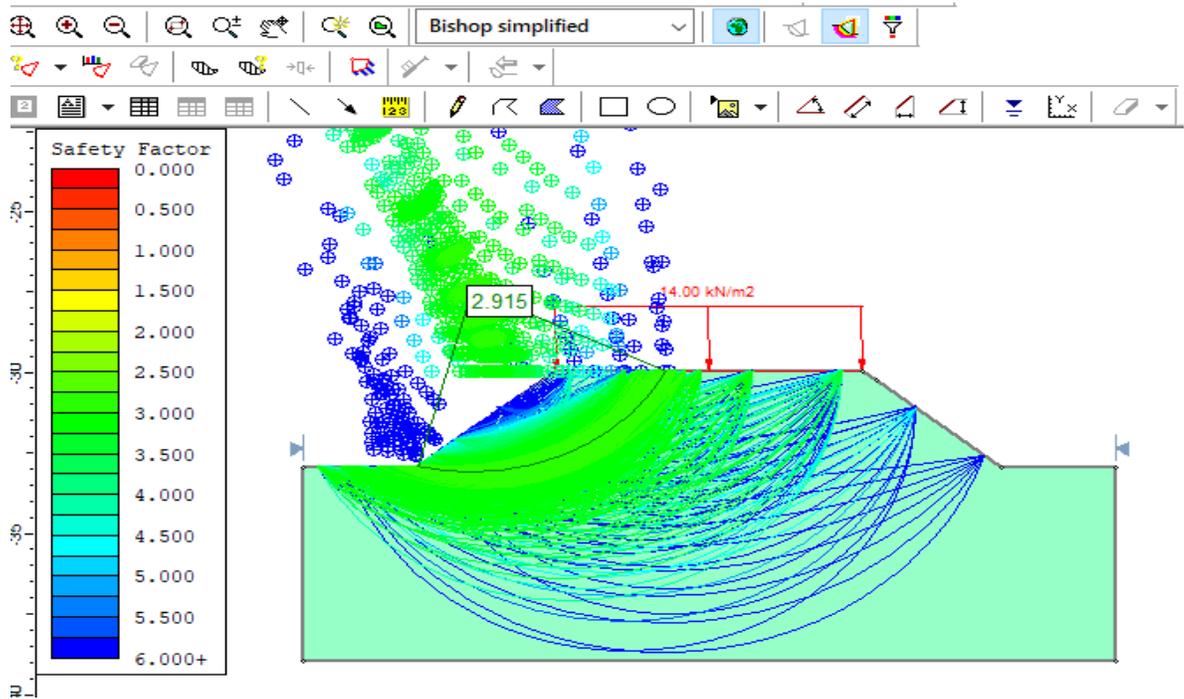
Fuente. autores

A40° H3m ST1



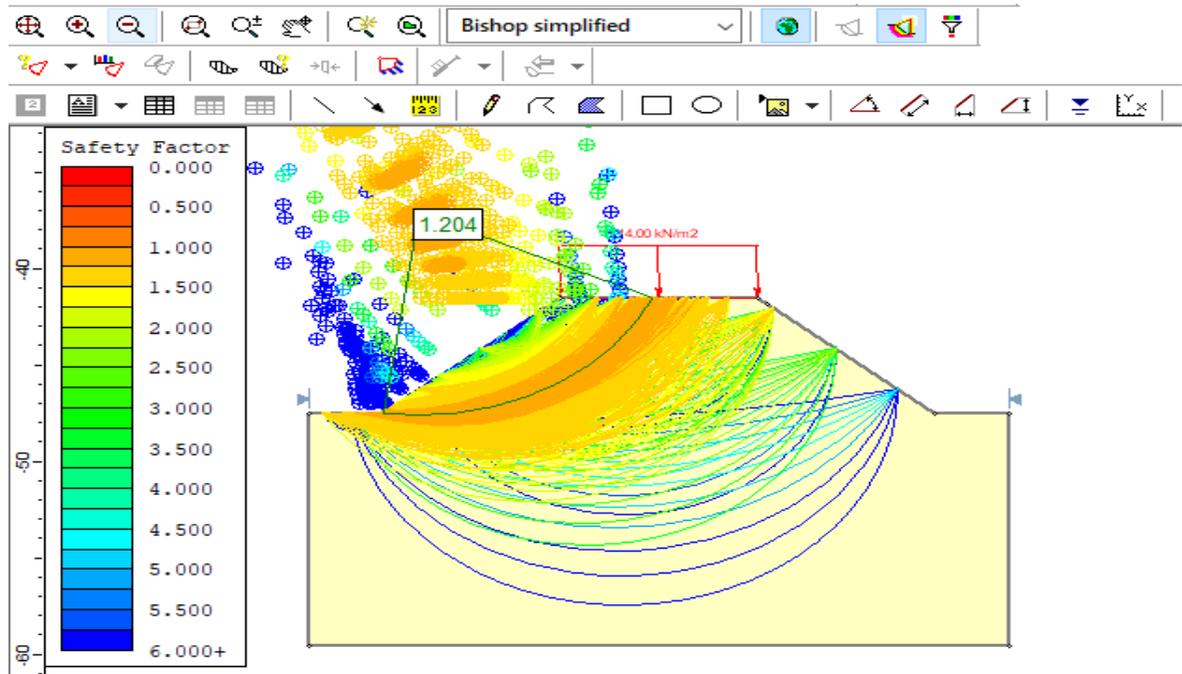
Fuente. autores

A40° H3m ST2



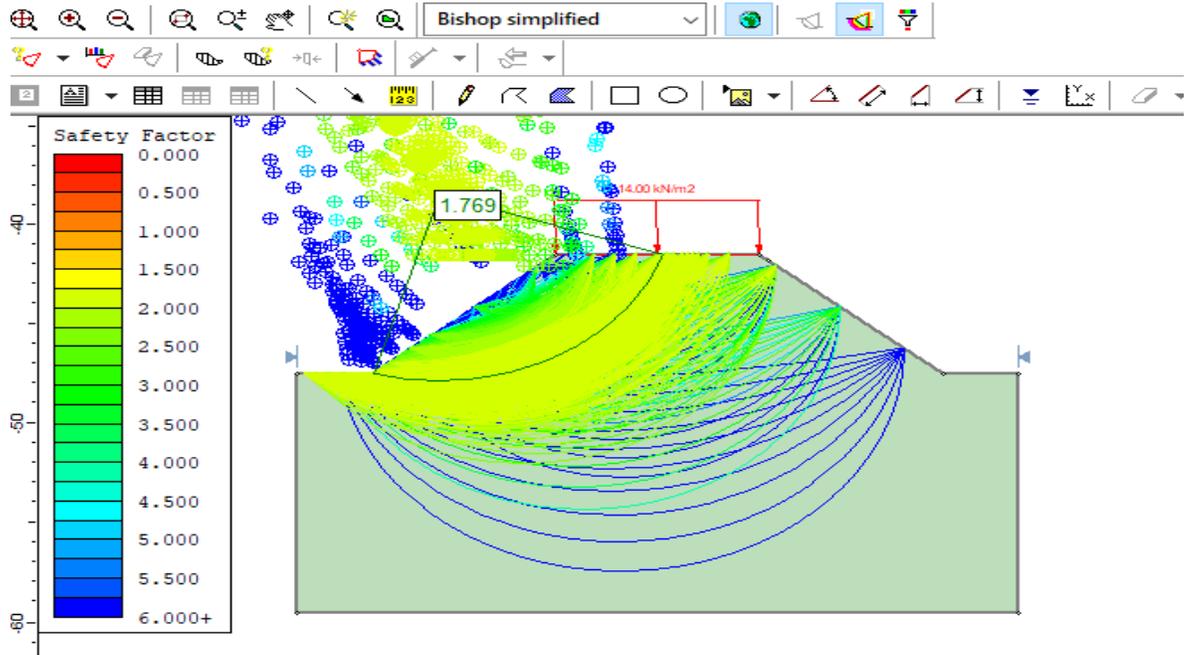
Fuente. autores

A40° H6m SS1



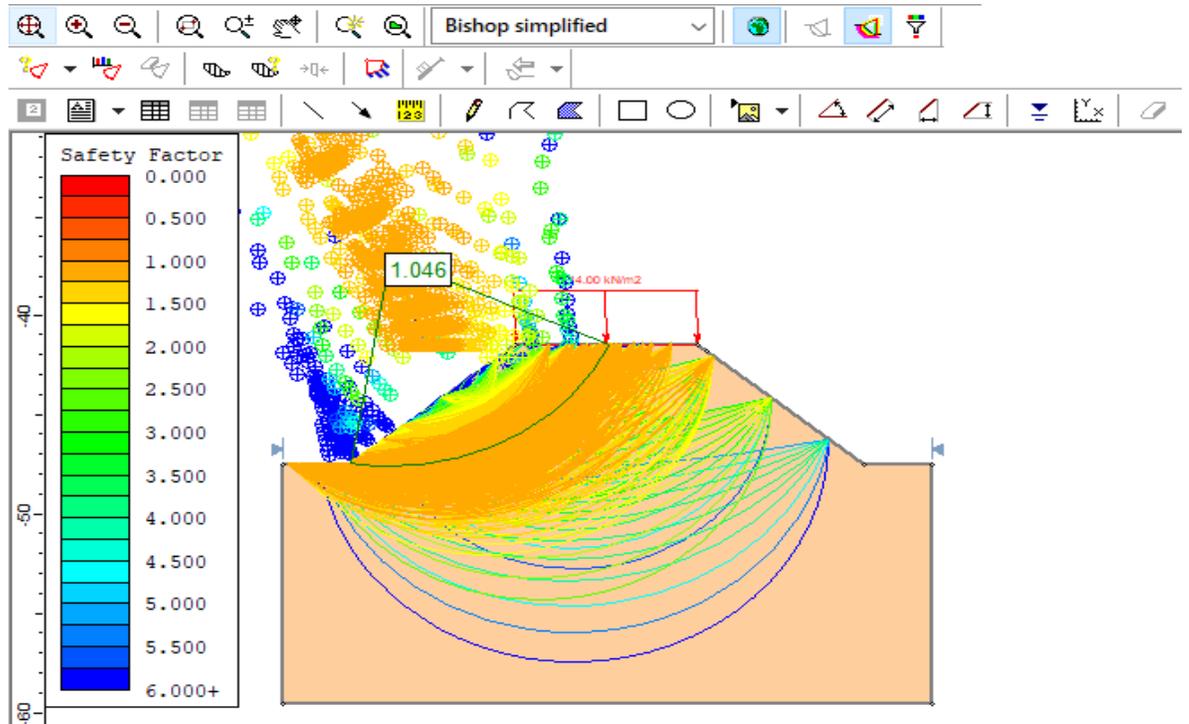
Fuente. autores

A40° H6m SS2



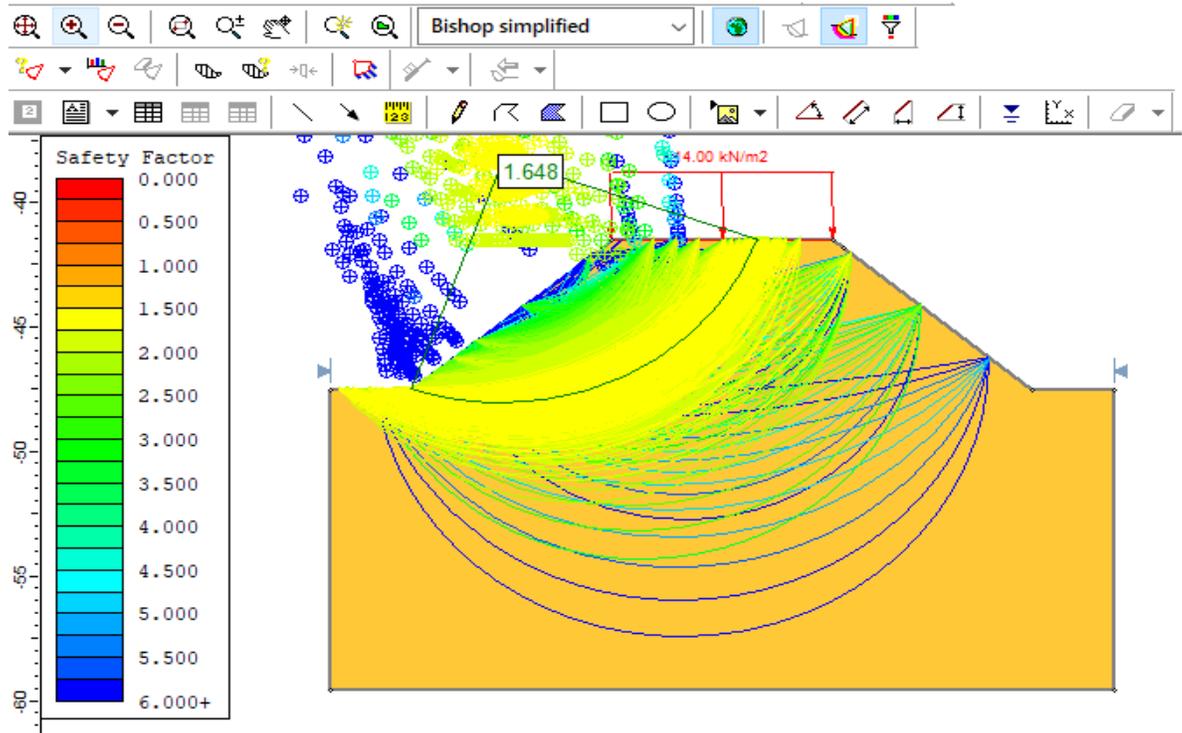
Fuente. autores

A40° H6m SS3



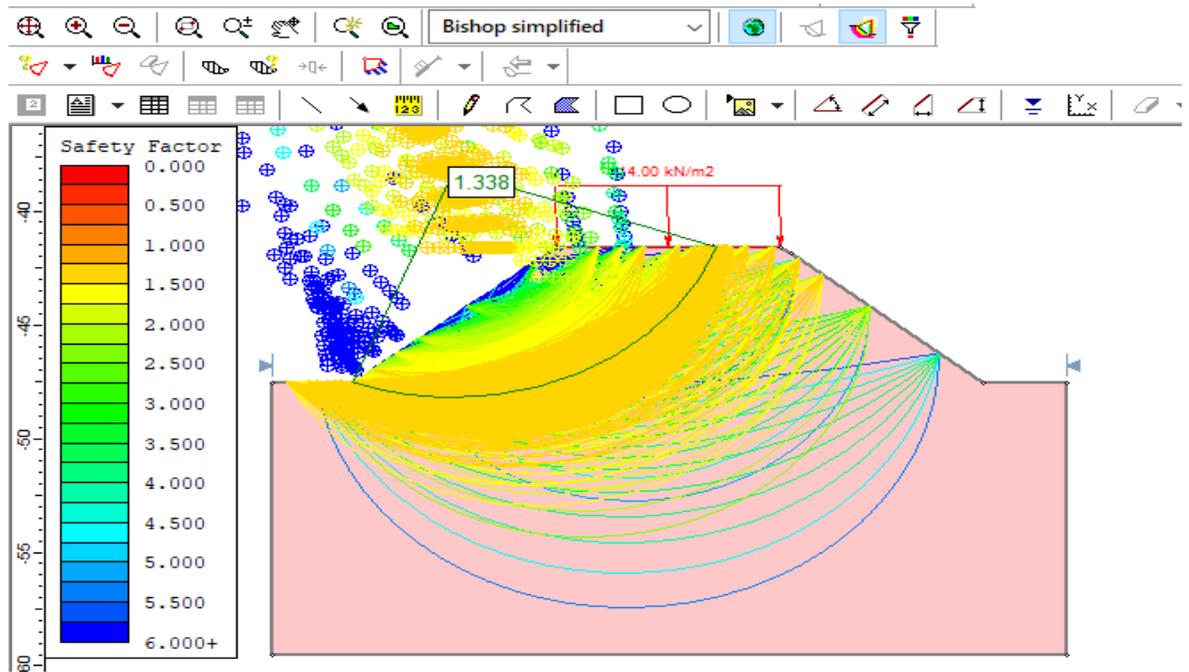
Fuente. autores

A40° H6m SS4



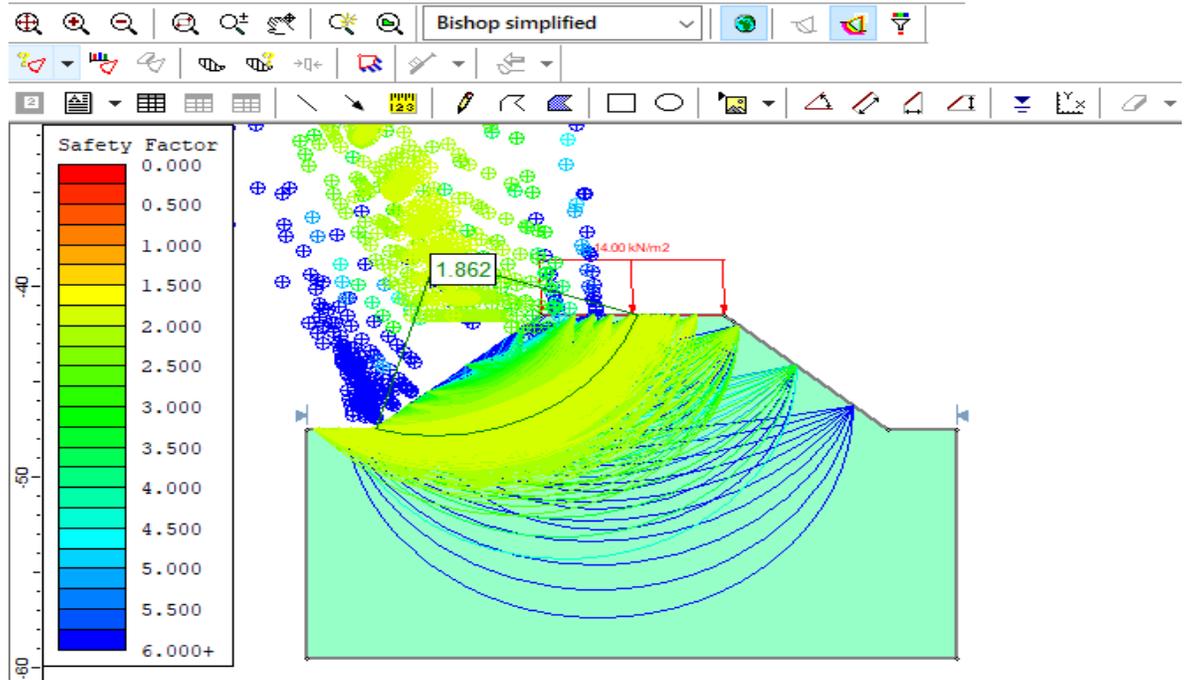
Fuente. autores

A40° H6m ST1



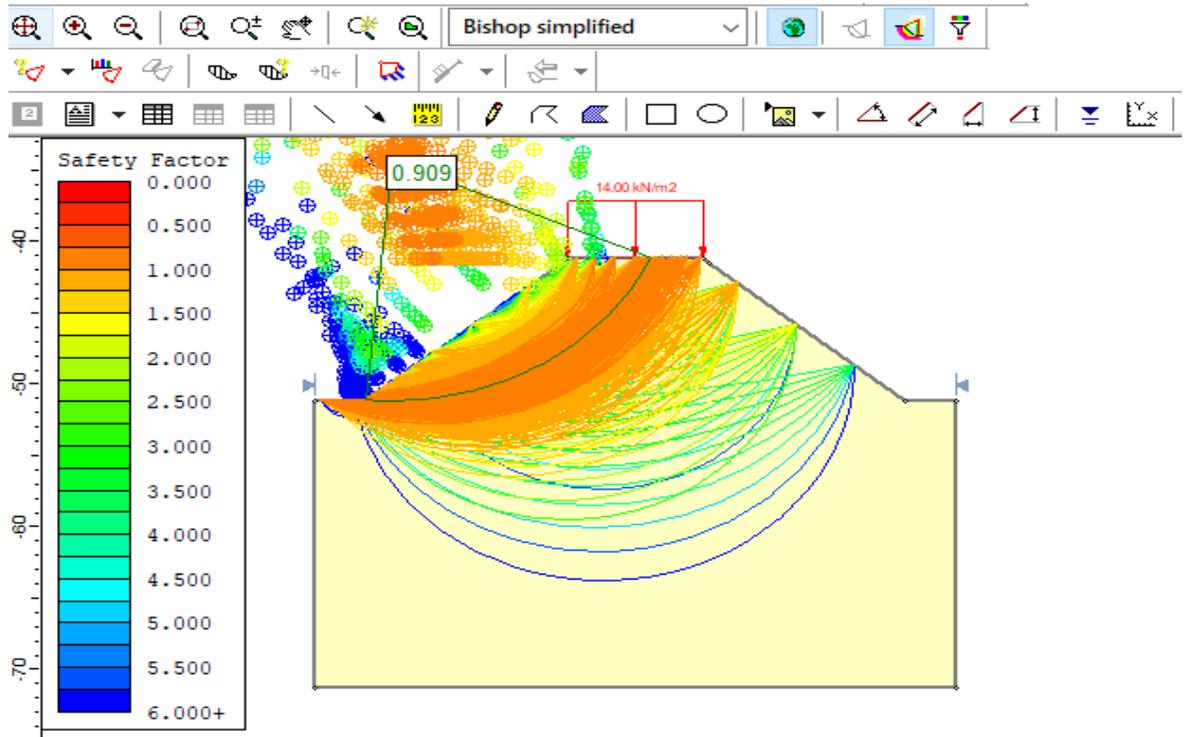
Fuente. autores

A40° H6m ST2



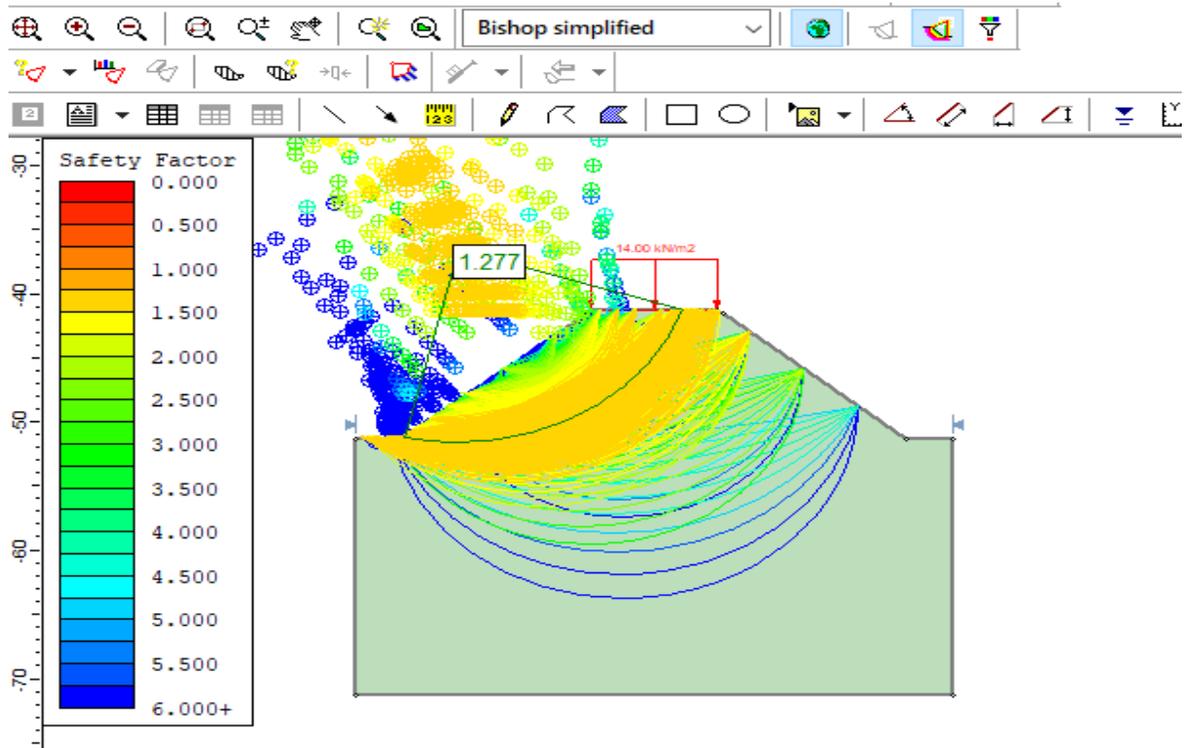
Fuente. autores

A40° 10m SS1



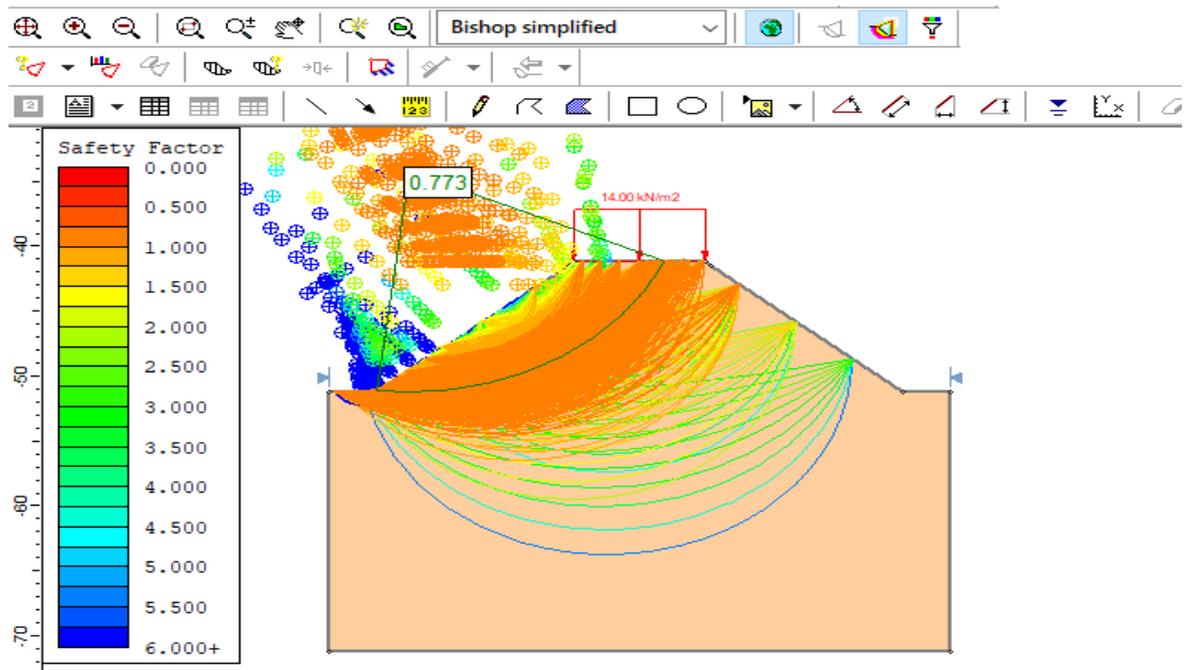
Fuente. autores

A40° 10m SS2



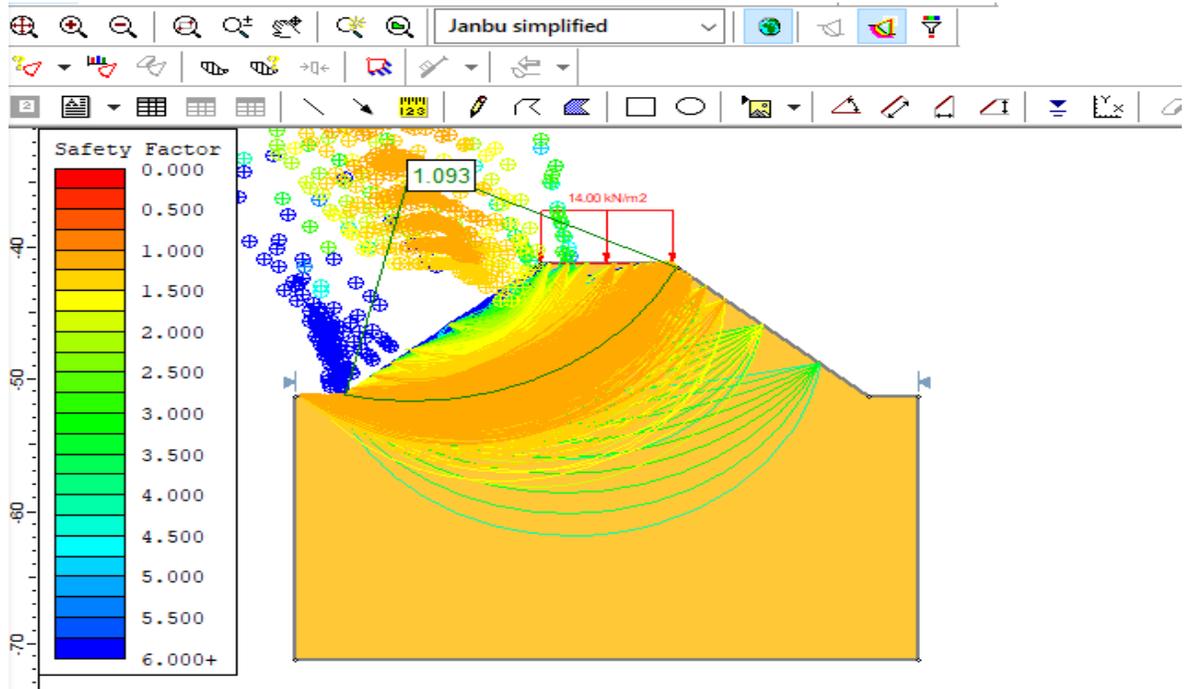
Fuente. autores

A40° 10m SS3



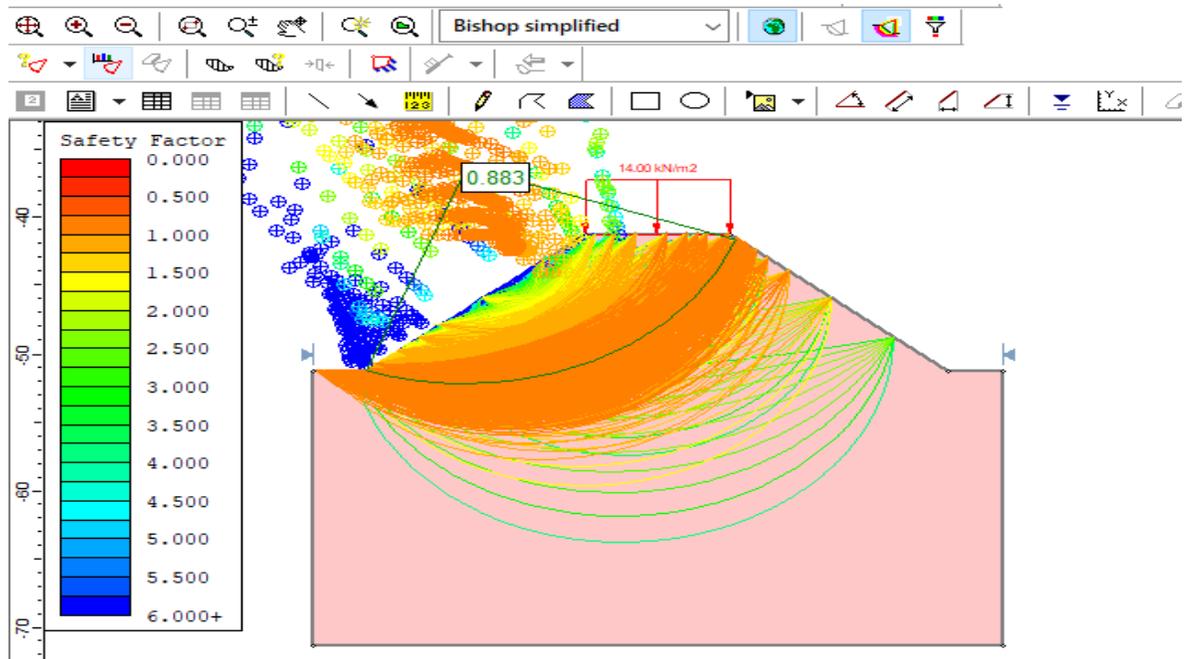
Fuente. autores

A40° 10m SS4



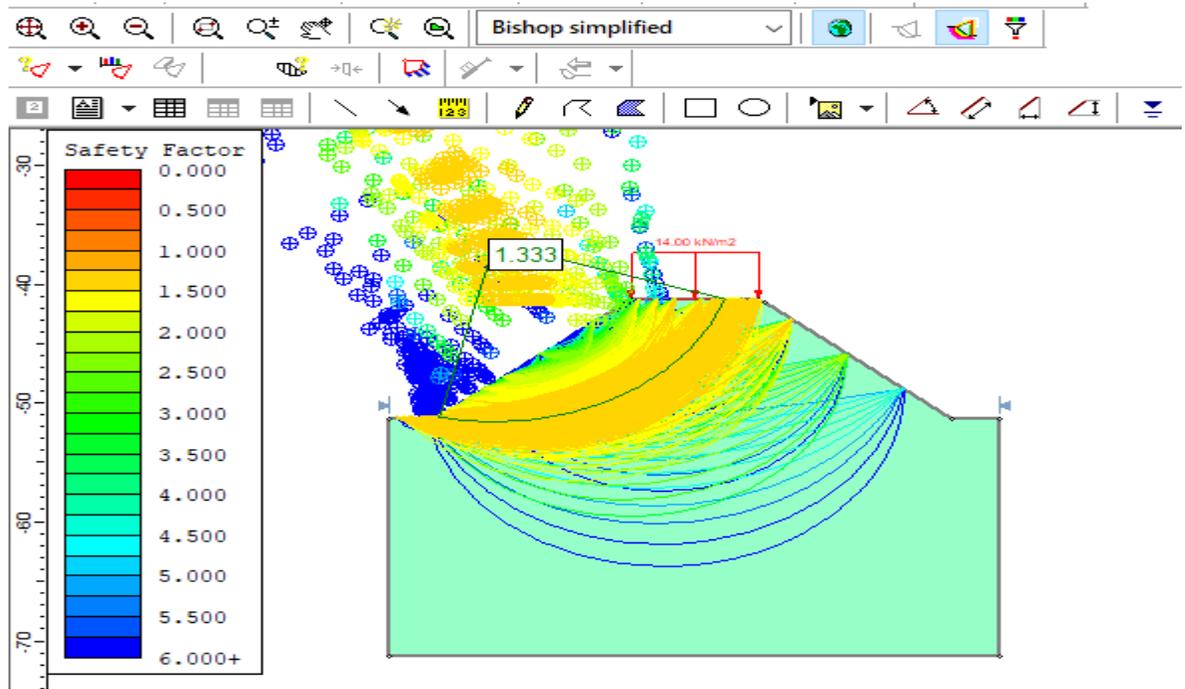
Fuente. autores

A40° 10m ST1



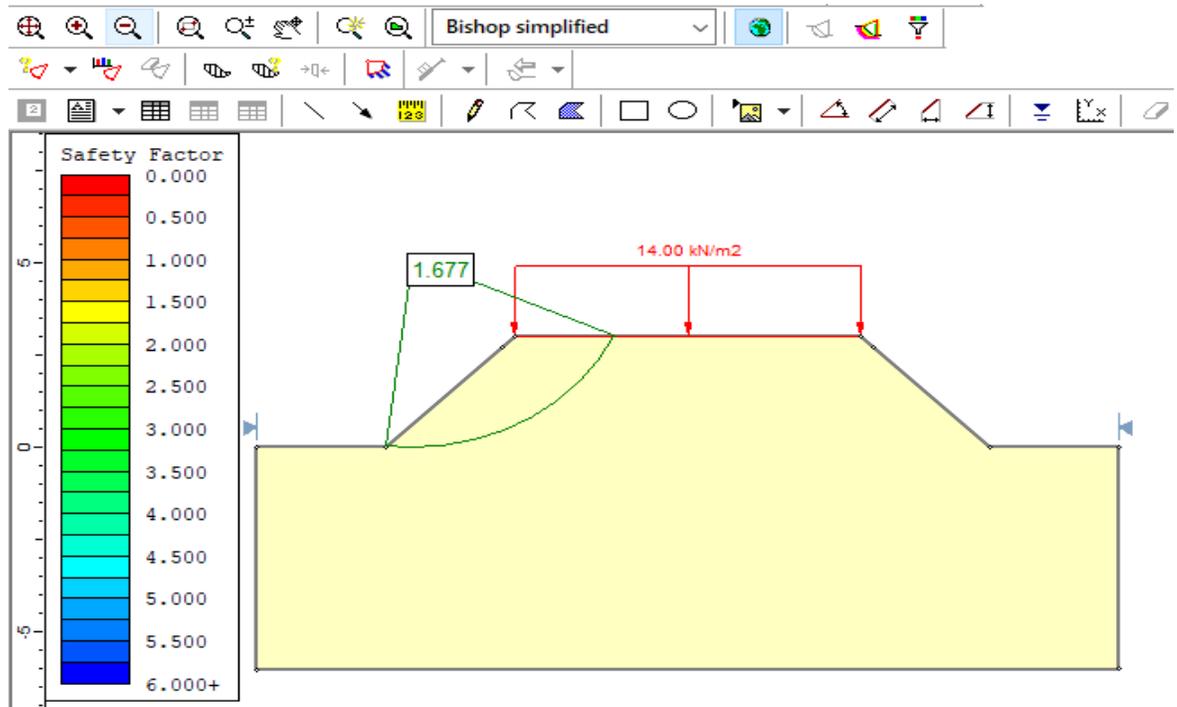
Fuente. autores

A40° 10m ST2



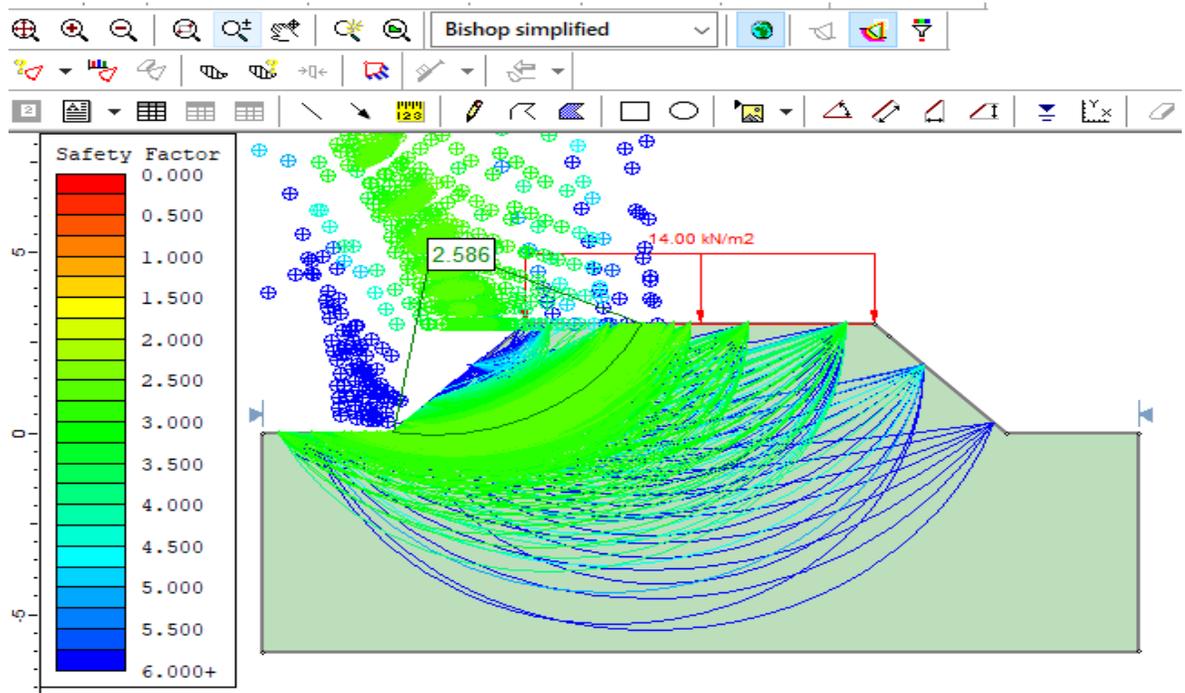
Fuente. autores

A45° 3m SS1



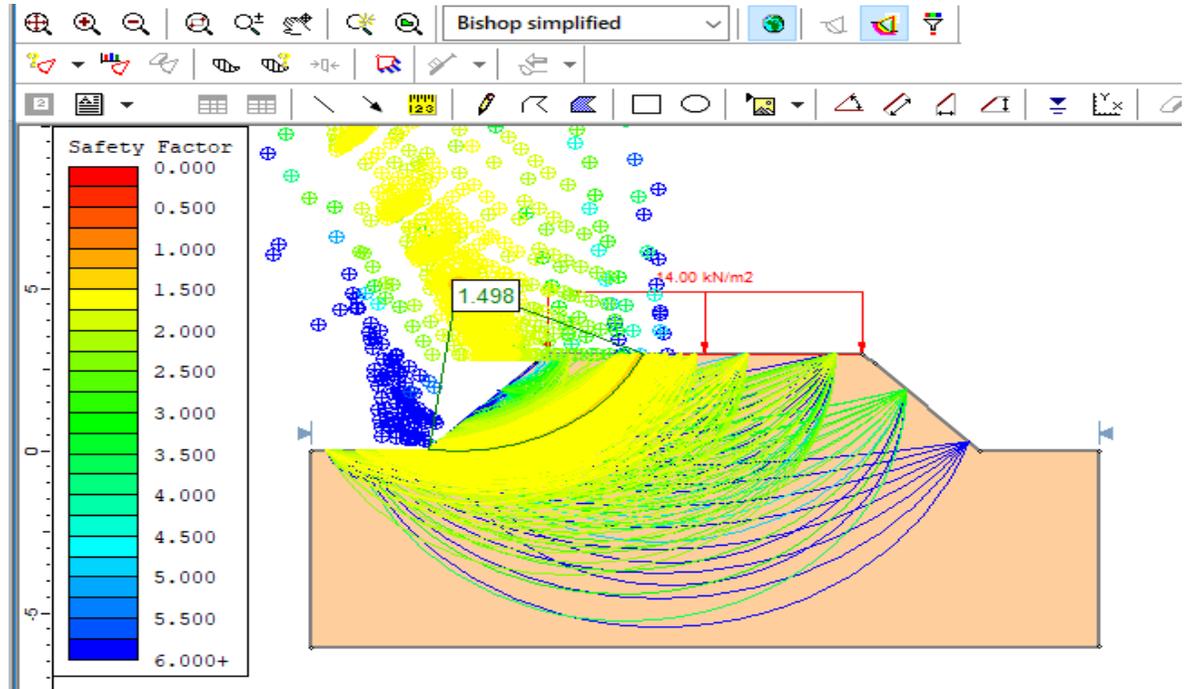
Fuente. autores

A45° 3m SS2



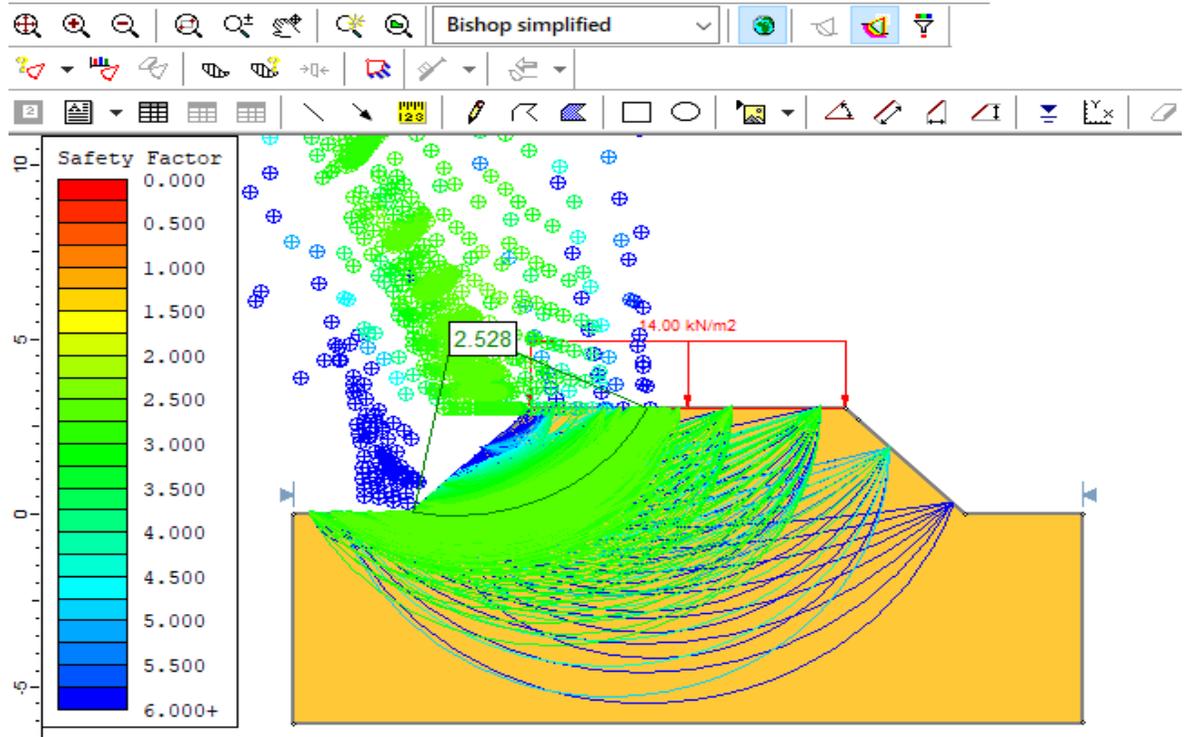
Fuente. autores

A45° 3m SS3



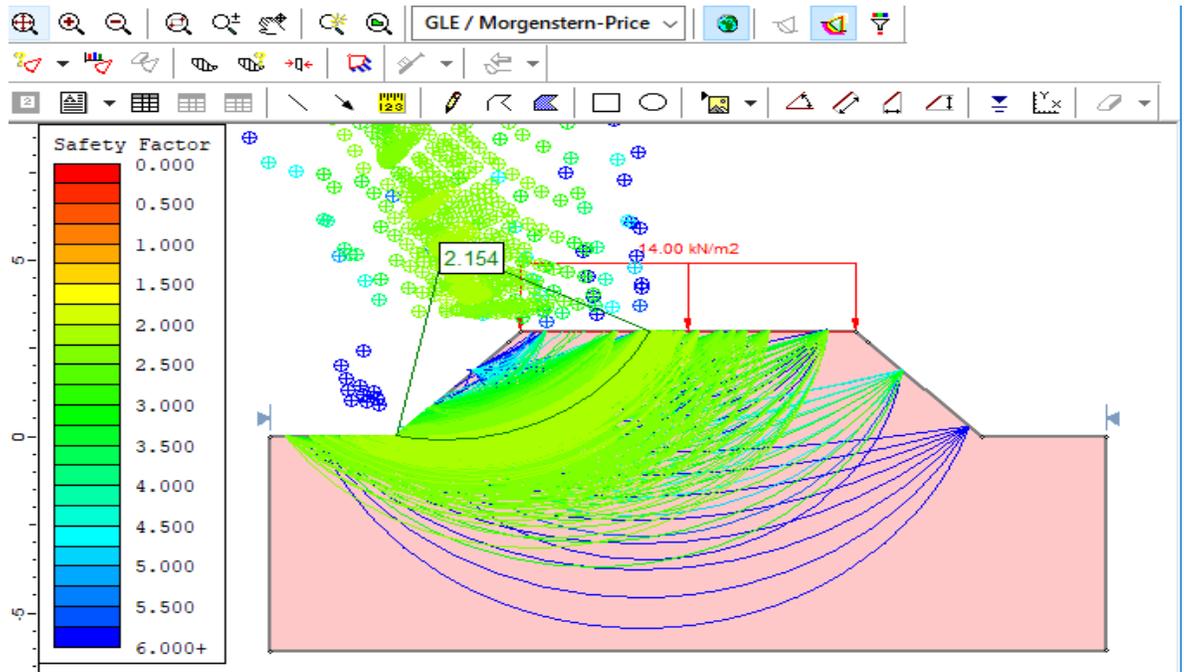
Fuente. autores

A45° 3m SS4



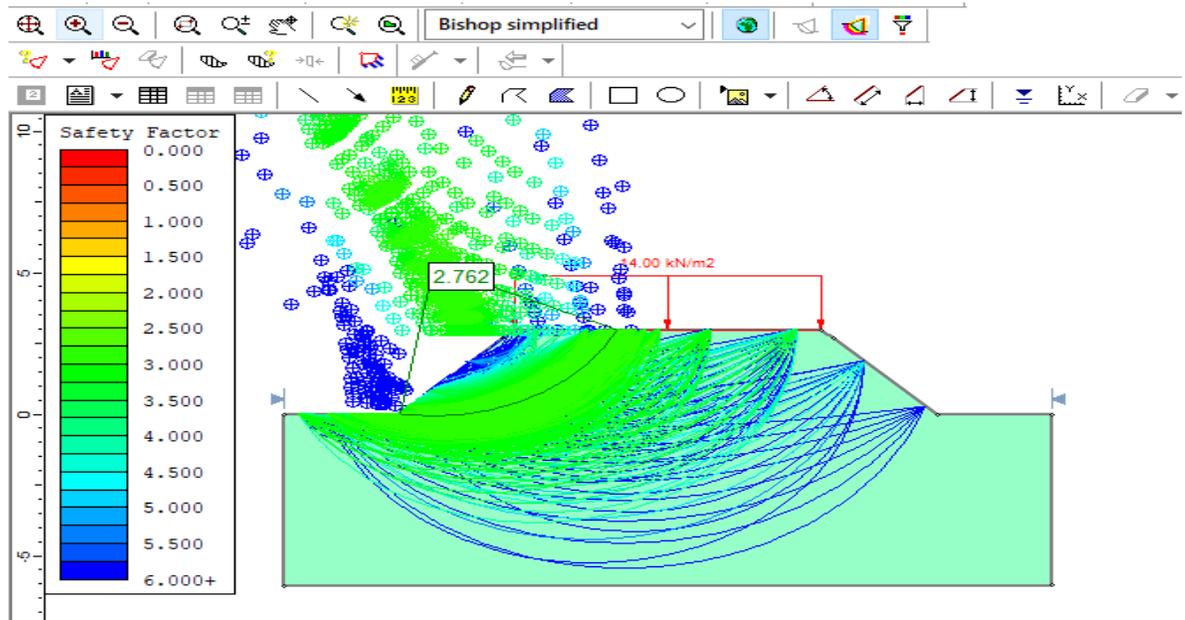
Fuente. autores

A45° 3m ST1



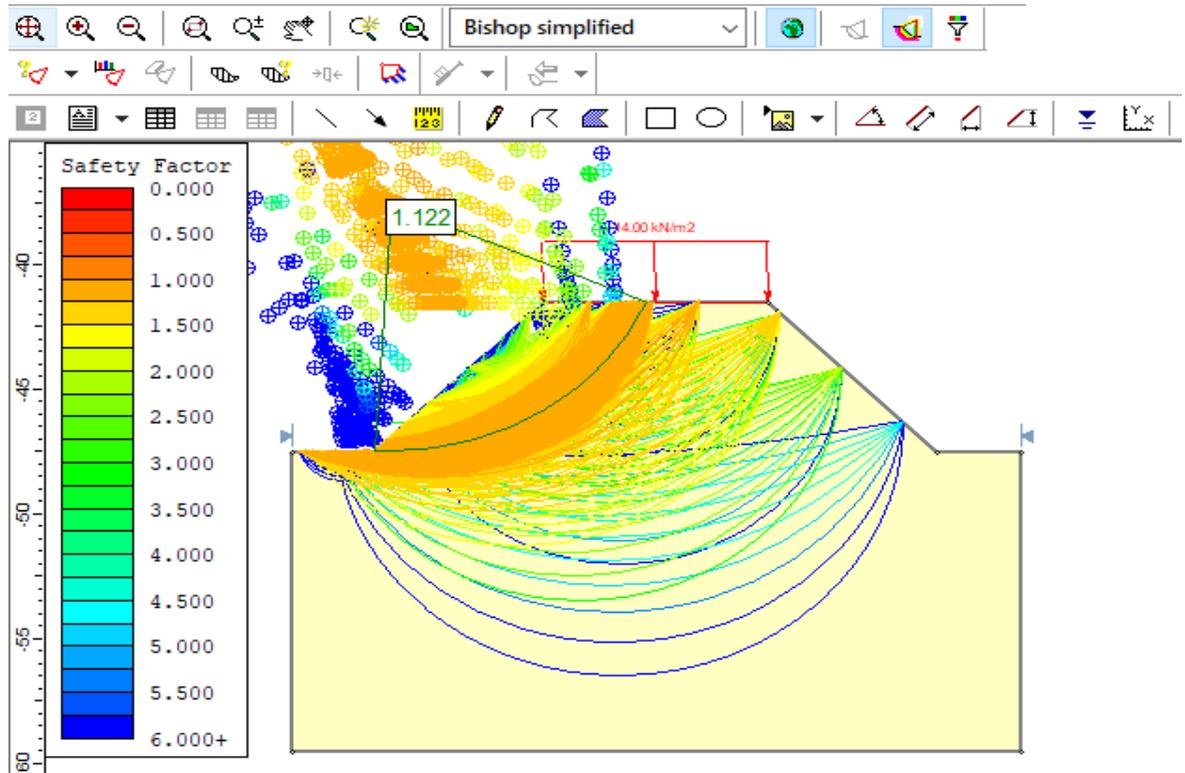
Fuente. autores

A45° 3m ST2



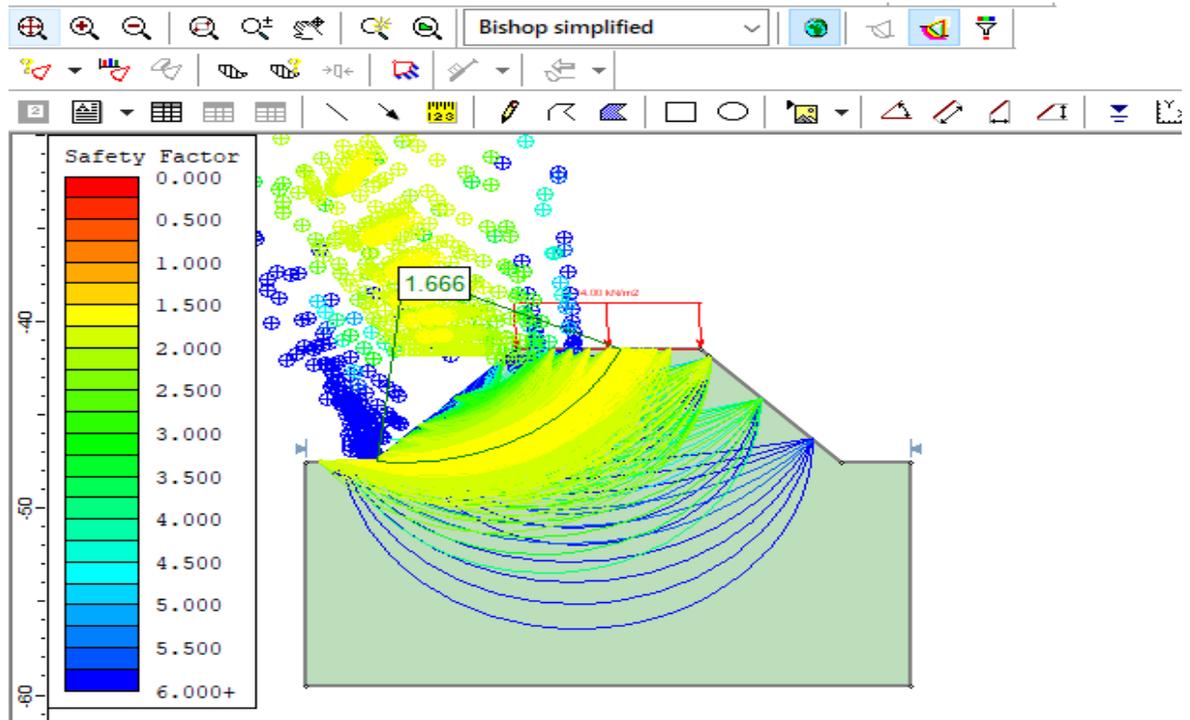
Fuente. autores

A45° H6m SS1



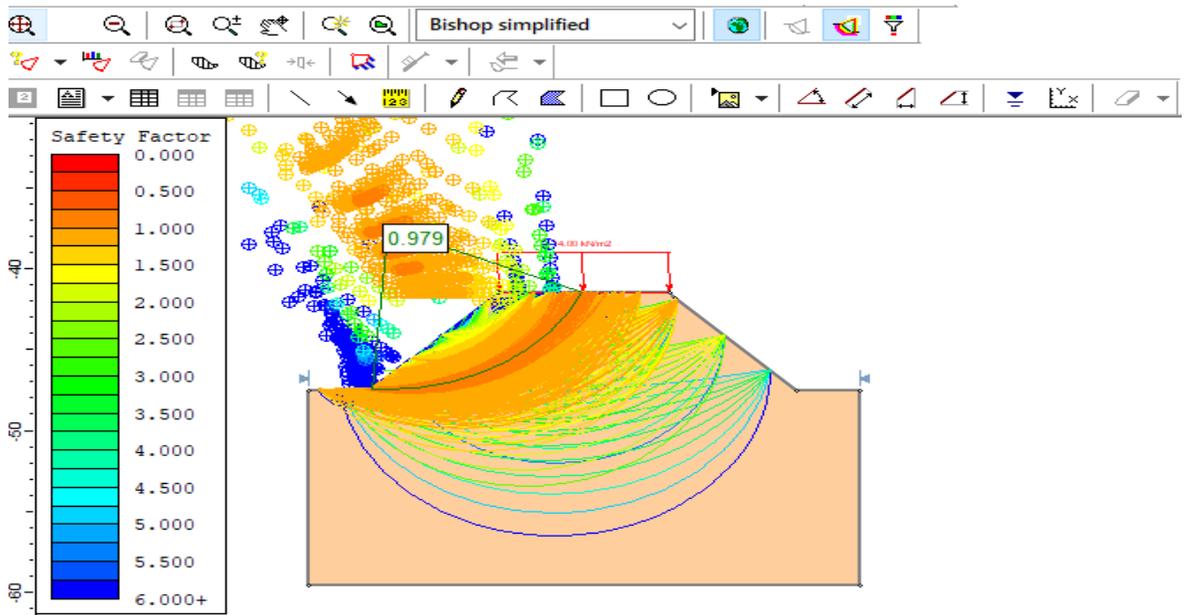
Fuente. autores

A45° H6m SS2



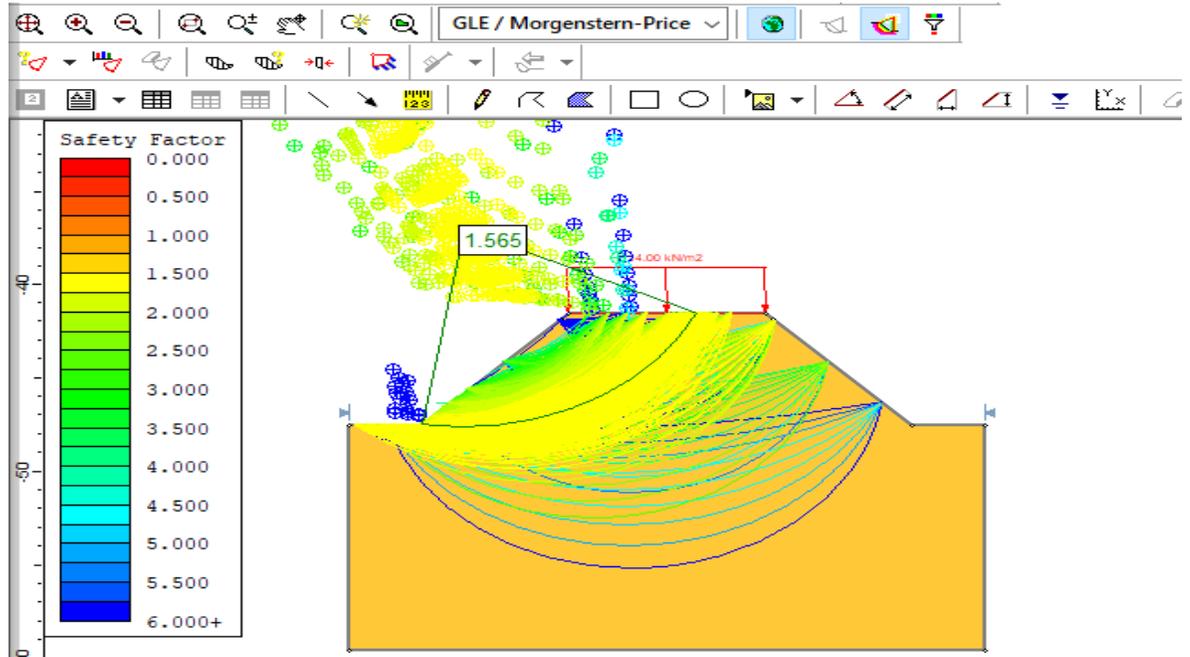
Fuente. autores

A45° H6m SS3



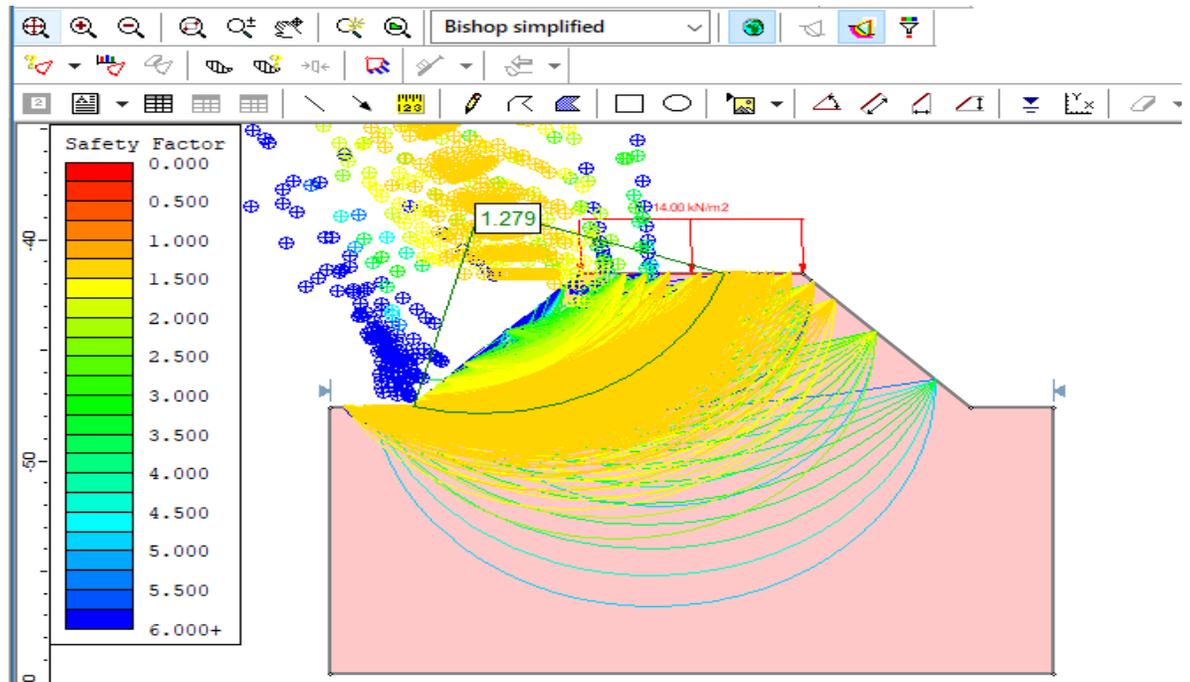
Fuente. autores

A45° H6m SS4



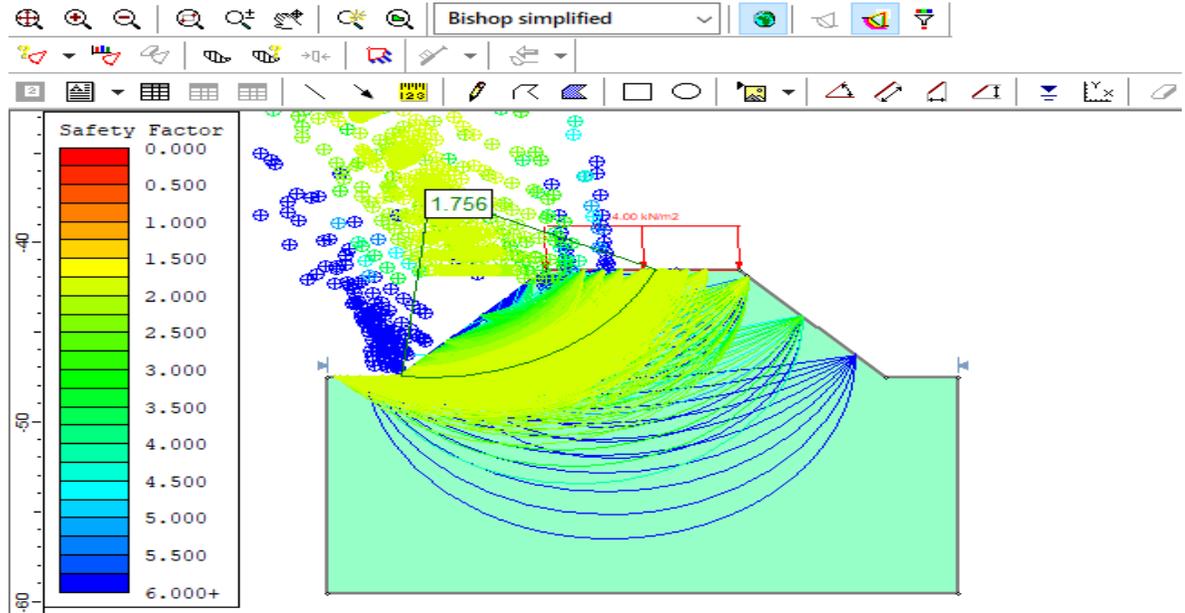
Fuente. autores

A45° H6m ST1



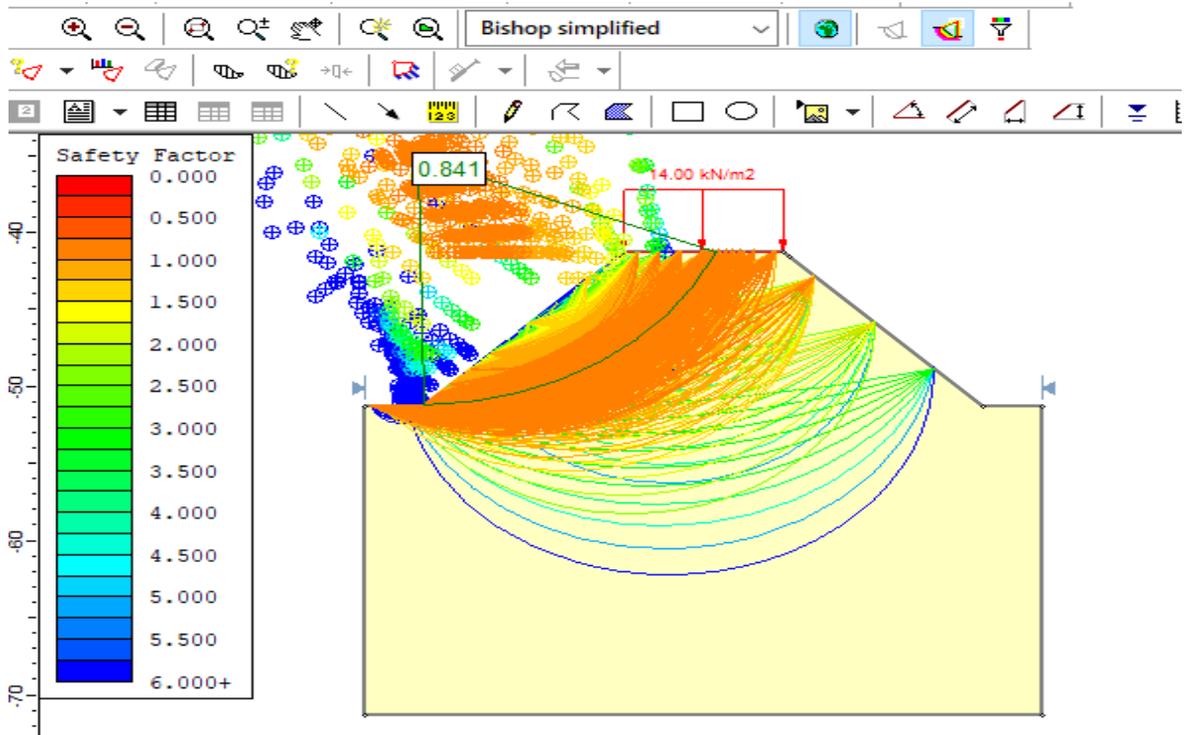
Fuente. autores

A45° H6m ST2



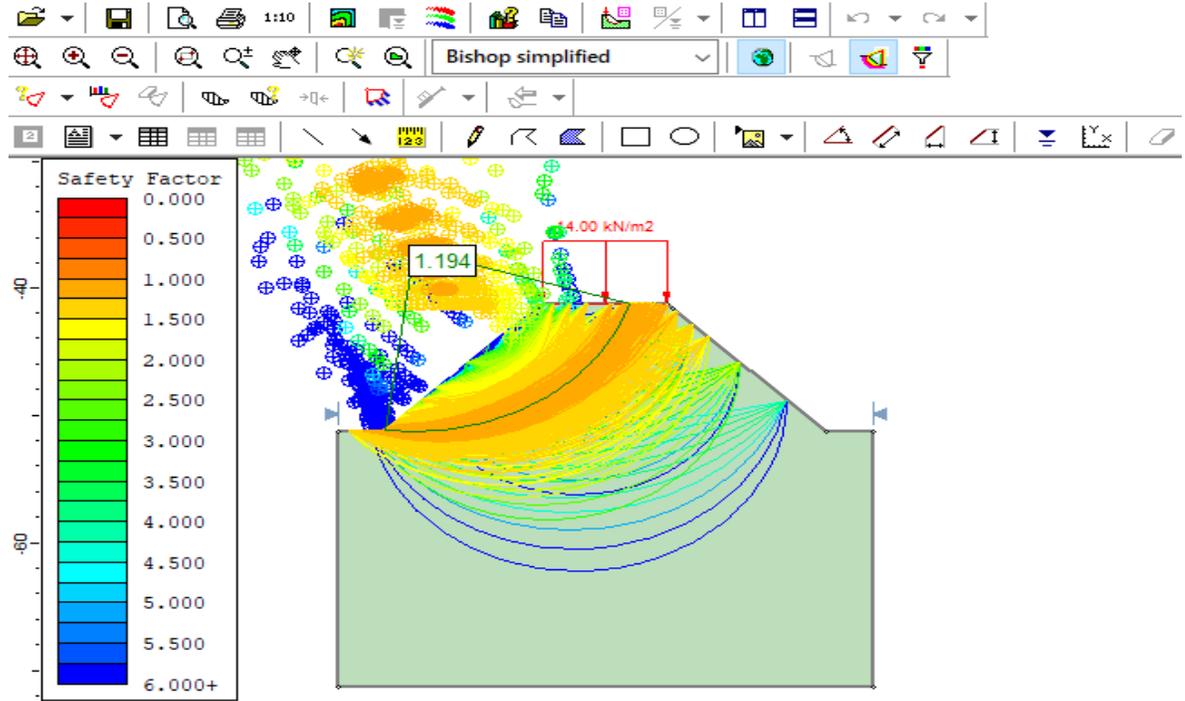
Fuente. autores

A45° H10m SS1



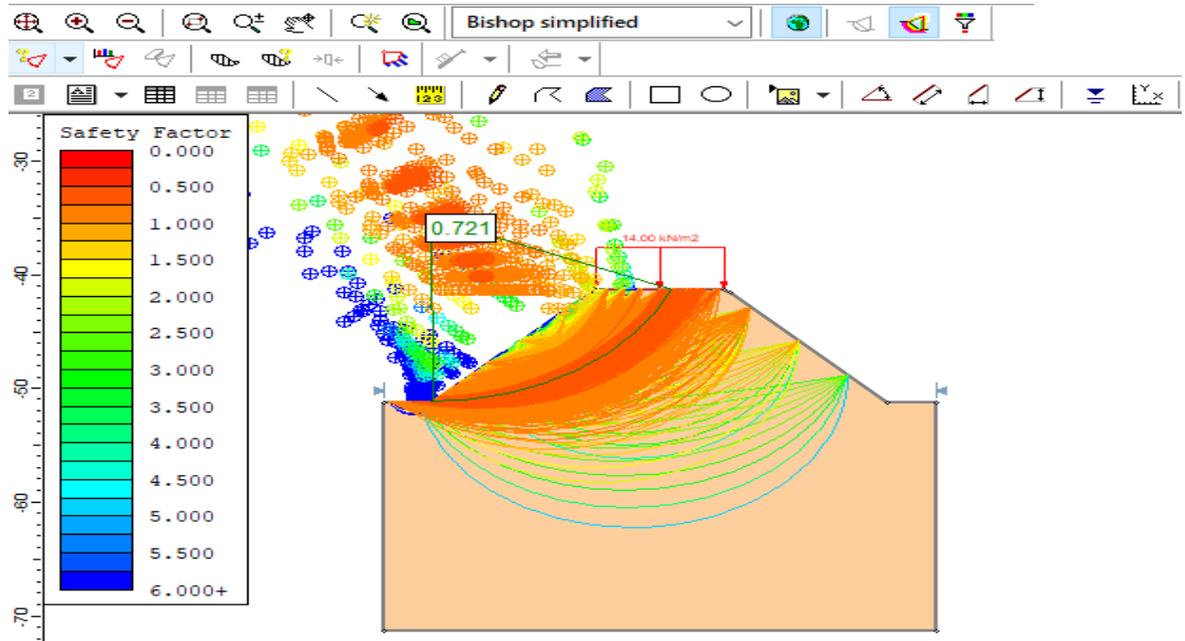
Fuente. autores

A45° H10m SS2



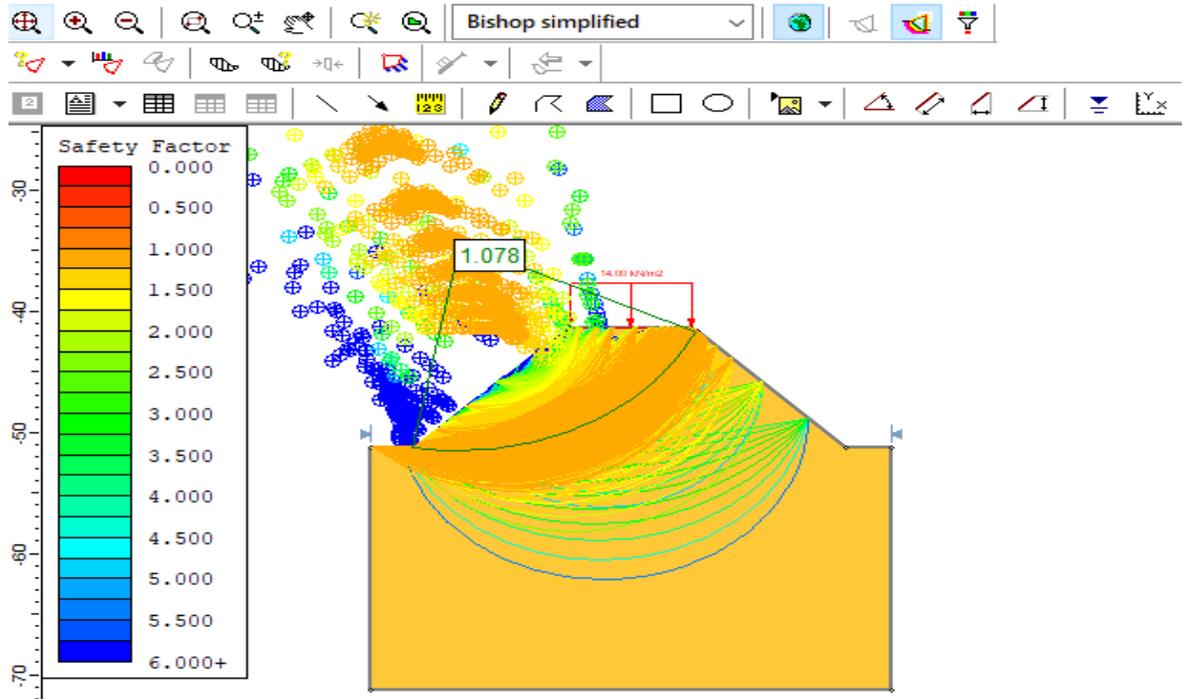
Fuente. autores

A45° H10m SS3



Fuente. autores

A45° H10m SS4

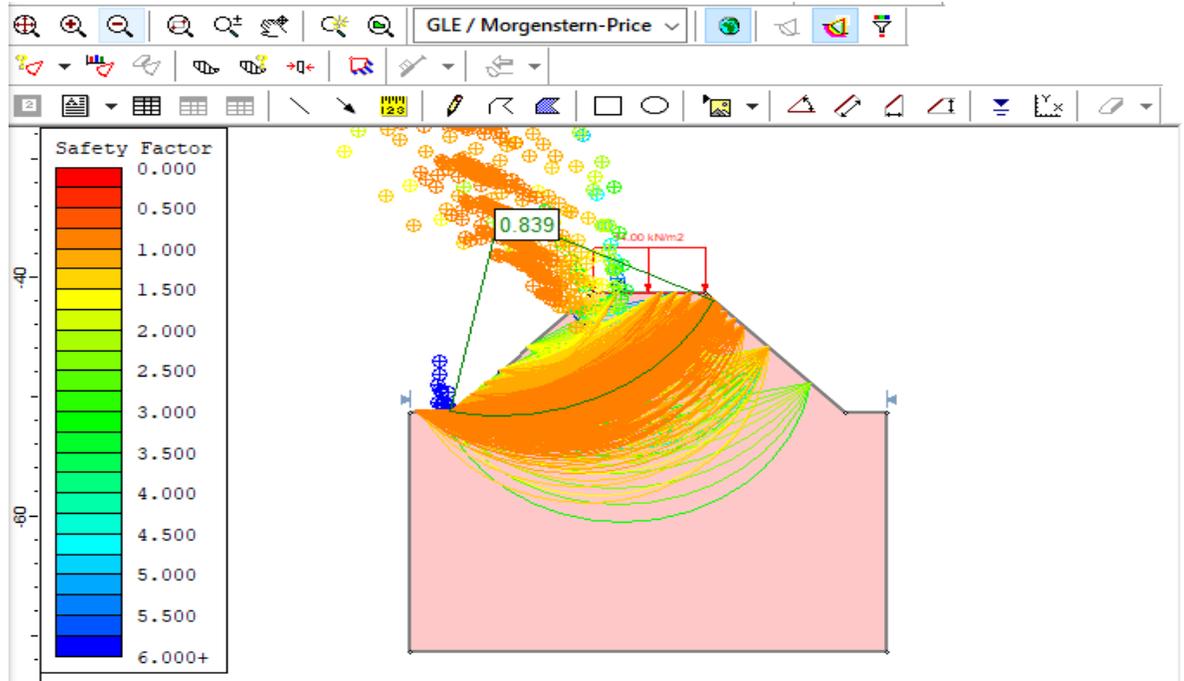


Fuente. autores

A45°

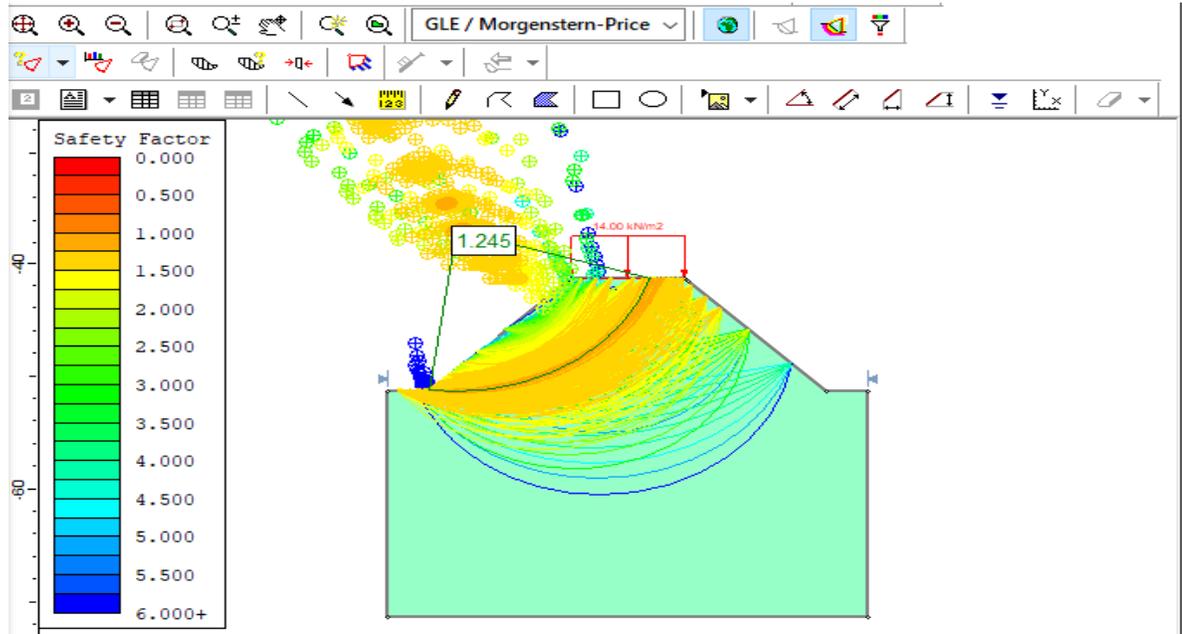
H10m

ST1



Fuente. autores

A45° H10m ST2



Fuente. autores

ANEXO 2

Cálculos del factor de seguridad según característica geotécnica de los suelos seleccionados y suelos tolerables.

Donde:

SS1=Suelo Seleccionado 1

SS2=Suelo Seleccionado 2

SS3=Suelo Seleccionado 3

SS4=Suelo Seleccionado 4

ST1=Suelo Tolerable 1

ST2=Suelo Tolerable 2

Angulo 26, altura 3m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	26	3	2,162	1,939	2,160	2,160	2,105	0,111	5,265
SS2	18	28	10	26	3	3,181	2,875	3,178	3,182	3,104	0,153	4,919
SS3	21	17	8	26	3	1,894	1,703	1,893	1,893	1,846	0,095	5,156
SS4	17,4	29	5	26	3	2,962	2,705	2,961	2,965	2,898	0,129	4,446
ST1	19,5	28	2	26	3	2,42	2,231	2,424	2,423	2,375	0,096	4,030
ST2	19,5	32	10	26	3	3,374	3,371	3,371	3,375	3,373	0,002	0,061

Fuente: Autores

Angulo 26, altura 6m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	26	6	1,503	1,360	1,501	1,501	1,466	0,071	4,831
SS2	18	28	10	26	6	2,116	1,917	2,115	2,115	2,066	0,099	4,801
SS3	21	17	8	26	6	1,284	1,161	1,283	1,282	1,253	0,061	4,871
SS4	17,4	29	5	26	6	1,868	1,715	1,869	1,869	1,830	0,077	4,198
ST1	19,5	28	2	26	6	1,462	1,357	1,461	1,464	1,436	0,053	3,669
ST2	19,5	32	10	26	6	2,216	2,014	2,213	2,215	2,165	0,100	4,636

Fuente: Autores

Angulo 26, altura 10m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	26	10	1,171	1,063	1,168	1,163	1,141	0,052	4,580
SS2	18	28	10	26	10	1,571	1,569	1,569	1,568	1,569	0,001	0,080
SS3	21	17	8	26	10	0,977	0,887	0,975	0,970	0,952	0,044	4,579
SS4	17,4	29	5	26	10	1,328	1,220	1,326	1,328	1,301	0,054	4,127
ST1	19,5	28	2	26	10	0,999	0,930	0,997	1,000	0,982	0,034	3,500
ST2	19,5	32	10	26	10	1,634	1,484	1,633	1,632	1,596	0,075	4,669

Fuente: Autores

Angulo 30, altura 3m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	30	3	2,033	1,846	2,030	2,030	1,985	0,093	4,661
SS2	18	28	10	30	3	3,046	2,779	3,041	3,045	2,978	0,133	4,450
SS3	21	17	8	30	3	1,795	1,634	1,792	1,792	1,753	0,080	4,535
SS4	17,4	29	5	30	3	2,881	2,648	2,879	2,880	2,822	0,116	4,111
ST1	19,5	28	2	30	3	2,374	2,200	2,374	2,375	2,331	0,087	3,740
ST2	19,5	32	10	30	3	3,237	2,961	3,232	3,237	3,167	0,137	4,332

Fuente: Autores

Angulo 30, altura 6m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	30	6	1,398	1,280	1,396	1,396	1,368	0,058	4,266
SS2	18	28	10	30	6	2,004	1,839	2,004	2,002	1,962	0,082	4,188
SS3	21	17	8	30	6	1,202	1,103	1,201	1,200	1,177	0,049	4,165
SS4	17,4	29	5	30	6	1,804	1,671	1,804	1,804	1,771	0,067	3,755
ST1	19,5	28	2	30	6	1,422	1,333	1,422	1,422	1,400	0,045	3,179
ST2	19,5	32	10	30	6	2,103	1,937	2,100	2,102	2,061	0,082	3,996

Fuente: Autores

Angulo 30, altura 10m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	30	10	1,076	0,986	1,069	1,068	1,050	0,043	4,063
SS2	18	28	10	30	10	1,471	1,353	1,467	1,468	1,440	0,058	4,019
SS3	21	17	8	30	10	0,904	0,93	0,901	0,898	0,908	0,015	1,619
SS4	17,4	29	5	30	10	1,266	1,178	1,264	1,265	1,243	0,044	3,500
ST1	19,5	28	2	30	10	0,963	0,905	0,961	0,963	0,948	0,029	3,026
ST2	19,5	32	10	30	10	1,532	1,412	1,527	1,53	1,500	0,059	3,924

Fuente: Autores

Angulo 35, altura 3m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	35	3	1,897	1,752	1,894	1,894	1,859	0,072	3,846
SS2	18	28	10	35	3	2,884	2,674	2,882	2,881	2,830	0,104	3,681
SS3	21	17	8	35	3	1,683	1,560	1,681	1,680	1,651	0,061	3,675
SS4	17,4	29	5	35	3	2,781	2,592	2,782	2,782	2,734	0,095	3,468
ST1	19,5	28	2	35	3	2,328	2,171	2,327	2,327	2,288	0,078	3,416
ST2	19,5	32	10	35	3	3,075	2,861	3,071	3,073	3,020	0,106	3,510

Fuente: Autores

Angulo 35, altura 6m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	35	6	1,292	1,201	1,290	1,289	1,268	0,045	3,524
SS2	18	28	10	35	6	1,879	1,756	1,877	1,877	1,847	0,061	3,294
SS3	21	17	8	35	6	1,118	1,042	1,111	1,116	1,097	0,037	3,339
SS4	17,4	29	5	35	6	1,728	1,629	1,725	1,727	1,702	0,049	2,870
ST1	19,5	28	2	35	6	1,382	1,308	1,380	1,384	1,364	0,037	2,716
ST2	19,5	32	10	35	6	1,975	1,854	1,97	1,974	1,943	0,060	3,064

Fuente: Autores

Angulo 35, altura 10m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	35	10	0,983	0,913	0,977	0,976	0,962	0,033	3,427
SS2	18	28	10	35	10	1,364	1,278	1,360	1,362	1,341	0,042	3,134
SS3	21	17	8	35	10	0,832	0,777	0,827	0,827	0,816	0,026	3,180
SS4	17,4	29	5	35	10	1,196	1,135	1,196	1,196	1,181	0,031	2,583
ST1	19,5	28	2	35	10	0,925	0,879	0,924	0,923	0,913	0,023	2,467
ST2	19,5	32	10	35	10	1,423	1,366	1,419	1,421	1,407	0,028	1,957

Fuente: Autores

Angulo 40, altura 3m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	40	3	1,784	1,674	1,781	1,782	1,755	0,054	3,087
SS2	18	28	10	40	3	2,733	2,577	2,727	2,73	2,692	0,077	2,843
SS3	21	17	8	40	3	1,588	1,497	1,584	1,585	1,564	0,044	2,838
SS4	17,4	29	5	40	3	2,658	2,523	2,655	2,657	2,623	0,067	2,548
ST1	19,5	28	2	40	3	2,254	2,149	2,253	2,255	2,228	0,053	2,357
ST2	19,5	32	10	40	3	2,915	2,76	2,91	2,915	2,875	0,077	2,668

Fuente: Autores

Angulo 40, altura 6m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	40	6	1,204	1,134	1,198	1,201	1,184	0,034	2,836
SS2	18	28	10	40	6	1,769	1,683	1,766	1,767	1,746	0,042	2,416
SS3	21	17	8	40	6	1,046	0,992	1,041	1,044	1,031	0,026	2,514
SS4	17,4	29	5	40	6	1,648	1,585	1,648	1,648	1,632	0,032	1,930
ST1	19,5	28	2	40	6	1,338	1,293	1,335	1,335	1,325	0,022	1,626
ST2	19,5	32	10	40	6	1,862	1,780	1,861	1,862	1,841	0,041	2,218

Fuente: Autores

Angulo 40, altura 10m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	40	10	0,909	0,855	0,906	0,902	0,893	0,025	2,855
SS2	18	28	10	40	10	1,277	1,216	1,271	1,275	1,260	0,029	2,324
SS3	21	17	8	40	10	0,773	0,733	0,767	0,768	0,760	0,018	2,414
SS4	17,4	29	5	40	10	1,133	1,093	1,130	1,133	1,122	0,020	1,742
ST1	19,5	28	2	40	10	0,883	0,856	0,878	0,882	0,875	0,013	1,450
ST2	19,5	32	10	40	10	1,333	1,274	1,33	1,331	1,317	0,029	2,179

Fuente: Autores

Angulo 45, altura 3m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	45	3	1,677	1,596	1,671	1,673	1,654	0,039	2,352
SS2	18	28	10	45	3	2,586	2,472	2,582	2,583	2,556	0,056	2,186
SS3	21	17	8	45	3	1,498	1,432	1,492	1,495	1,479	0,032	2,136
SS4	17,4	29	5	45	3	2,528	2,429	2,530	2,527	2,504	0,050	1,985
ST1	19,5	28	2	45	3	2,154	2,084	2,152	2,154	2,136	0,035	1,624
ST2	19,5	32	10	45	3	2,762	2,648	2,759	2,759	2,732	0,056	2,050

Fuente: Autores

Angulo 45, altura 6m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	45	6	1,122	1,076	1,118	1,120	1,109	0,022	1,989
SS2	18	28	10	45	6	1,666	1,611	1,665	1,664	1,652	0,027	1,636
SS3	21	17	8	45	6	0,979	0,944	0,975	0,978	0,969	0,017	1,729
SS4	17,4	29	5	45	6	1,565	1,526	1,564	1,565	1,555	0,019	1,244
ST1	19,5	28	2	45	6	1,279	1,260	1,275	1,280	1,274	0,009	0,727
ST2	19,5	32	10	45	6	1,756	1,702	1,757	1,752	1,742	0,027	1,527

Fuente: Autores

Angulo 45, altura 10m

Suelos	peso específico (KN/M3)	C (kPa)	Fi (°)	Angulo B	H	factor de seguridad					desviación estándar	coeficiente de variación [%]
						Bishop simplificado	Janbu simplificado	Spencer	Morgenstern Price	prom FS		
SS1	21	18	11	45	10	0,841	0,808	0,837	0,835	0,830	0,015	1,812
SS2	18	28	10	45	10	1,194	1,159	1,191	1,193	1,184	0,017	1,425
SS3	21	17	8	45	10	0,721	0,695	0,717	0,717	0,713	0,012	1,659
SS4	17,4	29	5	45	10	1,078	1,047	1,073	1,077	1,069	0,015	1,372
ST1	19,5	28	2	45	10	0,844	0,826	0,839	0,839	0,837	0,008	0,920
ST2	19,5	32	10	45	10	1,248	1,215	1,246	1,245	1,239	0,016	1,269

Fuente: Autores