

Emisión para comentarios

Memo Técnico

22/08/2025

A lozsef Miskolczi
De Juan Mussat, Facundo Nicuesa
Cc Matías Calvente, Pedro Fernández
Asunto Análisis de estabilidad de la pila coberturas
Cliente GeoSystems Analysis, Inc.
Proyecto M-A8Z0

1 Introducción

GeoSystems Analysis (GeoSystems) tiene a su cargo los estudios de cierre para el Botadero Este de la Compañía Minera Antamina S.A. (Antamina). SRK Consulting (Argentina) S.A. fue contactada por GeoSystems para analizar la estabilidad de los paneles de prueba que componen las alternativas de coberturas a ser emplazadas sobre el Botadero Este.

1.1 Objetivo

El objetivo de este documento es evaluar la estabilidad física de las coberturas según las configuraciones propuestas por el cliente bajo condiciones estáticas y dinámicas. El desempeño en condiciones reales de las coberturas en estos paneles de prueba será evaluado para realizar los ajustes necesarios de cara al diseño definitivo de cierre.

1.2 Alcances

Este es un estudio de gabinete de ingeniería a nivel básico, basado en la información suministrada por GeoSystems y Antamina. El análisis y validación de esta información está fuera del alcance del servicio de SRK.

El alcance del servicio se limita a proporcionar recomendaciones para la caracterización de los materiales de cobertura, revisar la amenaza sísmica y realizar un análisis de desempeño de las alternativas de cobertura frente a escenarios estáticos y dinámicos. La estabilidad del botadero de base se analiza en forma aislada de manera de cuantificar la seguridad del sistema de soporte.

El efecto de la erosión de la cobertura y el impacto de deformaciones diferidas en el botadero y su erosión quedan excluidos de este análisis.

1.3 Información de referencia

Los documentos de referencia son:

1. Piteau, 2022. Evaluación de la Estabilidad Actual del Botadero Este en la Mina Antamina. 3300-22-M013

2. Stantec, 2024. Plan de manejo de suelo orgánico – Informe análisis de estabilidad física.
3. Stantec, 2025a. Ingeniería conceptual de pilas de suelo orgánico de la MEIA 2024, Informe análisis de estabilidad física – Pilas Cuña Norte 1 y 2.
4. Stantec, 2025b. Ingeniería de pilas de suelo orgánico de MEIA, Reporte factual de investigaciones geotécnicas
5. Hawley, Hogarth, Cuning y Haynes, 2017. Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design
6. Golder, 2016. Actualización del análisis de peligro sísmico determinístico y probabilístico – puerto y presa de relaves
7. GeoSystems Analysis, Inc, 2024. Slope Stability Evaluation of Closure Alternatives for Antamina Mine East Waste Rock Facility
8. Sorensen, K. K., and Okkels, N. (2013). “Correlation between Drained Shear Strength and Plasticity Index of Undisturbed Overconsolidated Clays,” Proceedings, 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, Presses des Ponts, Vol. 1, 423–428.
9. JCSS. 2006. Probabilistic Model Code. Copenhagen, Denmark: The Joint Committee on Structural Safety. ISBN 978-3-909386-79-6.
10. Behrens, W. 2008. Stability Assessment of Mineral Capping-Systems for Landfills including the use of Trisoplast. Trisoplast Mineral Liners.
11. Golder Associates Perú S.A. (Golder). 2021. Informe de Interpretación de Ensayos de Laboratorio, Proyecto Almacenamiento Eco-Estable de Desmonte y Relaves – Commingling. Etapa: Estudio Conceptual.
12. Howell, G.C., and A.H. Kirsten. 2016. Interface Shear: Towards understanding the significance in Geotechnical Structures. Proceedings of the first Southern African Geotechnical Conference.
13. Electric Power Research Institute. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design (EPRI EL-6800, Project 1493-6, Final Report). Electric Power Research Institute.

2 Descripción del problema

El proyecto piloto de coberturas se ubica dentro del Botadero Este de la mina Antamina, en el recuadro que se detalla en la Figura 2-1. La Figura 2-2 presenta el diseño para el reperfilado del botadero y la disposición de los paneles de cobertura. El área de estudio comprende cinco taludes principales con una altura aproximada de 80 metros y pendientes variables entre 1.7V:1.0H y 2.2V:1.0H.

Si bien el diseño actual no contempla la ejecución de bermas intermedias, SRK recomienda tener en cuenta la ejecución de estas por cuestiones de estabilidad, seguridad y constructibilidad.

El movimiento de suelos previsto para la ejecución del proyecto implica un volumen estimado de excavación y relleno de aproximadamente 25.000 m³. En estos taludes se aplicarán cinco tipologías de cobertura diferentes con el objetivo de evaluar en campo su desempeño y realizar los ajustes necesarios para el futuro diseño definitivo de cierre. En la Figura 2-3 se muestra un corte típico de uno de los taludes.

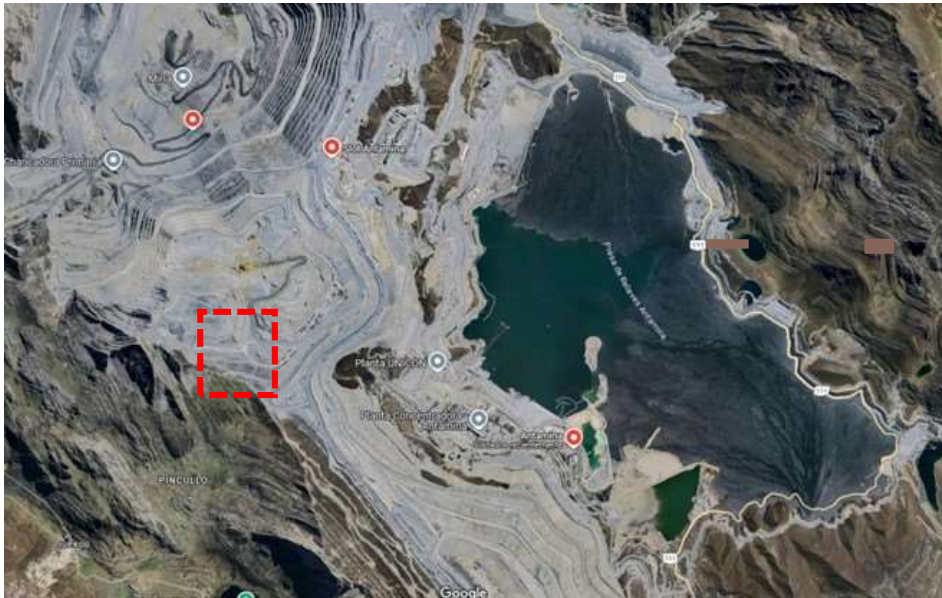


Figura 2-1: Vista aérea de la Mina Antamina y el área bajo estudio



Figura 2-2: Paneles de prueba y secciones típicas en el Botadero Este

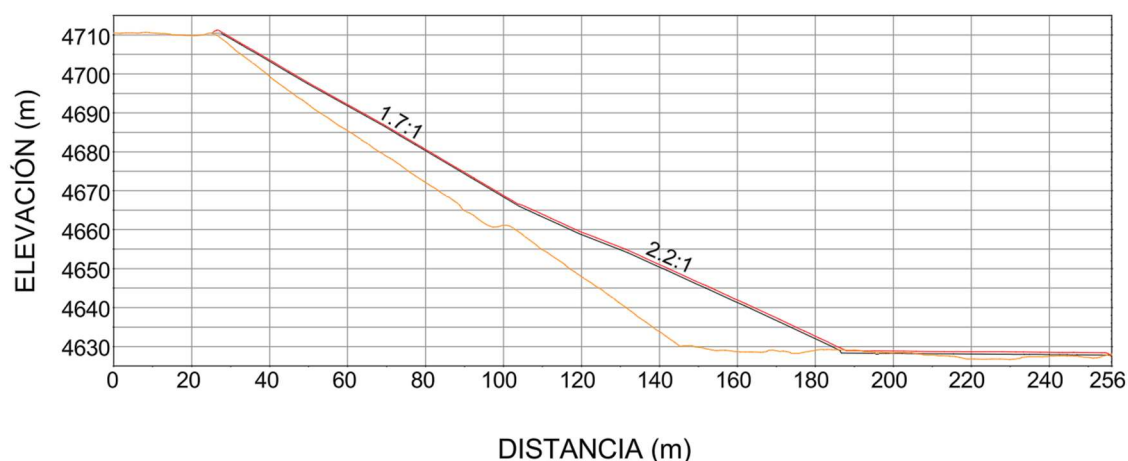


Figura 2-3: Detalle Sección 1

2.1 Coberturas de prueba

Se evaluó la estabilidad de las alternativas de coberturas A, B, D, I, J, que se describen a continuación y representan en la Figura 2-4.

- Alternativa A – 0.3 m de suelo orgánico sobre el relleno de desmonte; alternativamente (sección 6) se contempla la colocación de geoceldas como elemento de soporte y refuerzo;
- Alternativa B – 0.5 m de suelo orgánico sobre 0.15 m de arena de drenaje y 0.3 m de arcilla compactada;
- Alternativa D – 0.3 m de suelo orgánico sobre 0.3 m de arena de drenaje y una geomembrana texturizada de HDPE/LLDPE;
- Alternativa I – 0.5 m de suelo orgánico sobre 0.15 m de arena de drenaje y 75 mm de una capa de Trisoplast compactado;
- Alternativa J – 0.3 m de suelo orgánico sobre 0.15 m de arena de drenaje y 0.3 m de relaves;

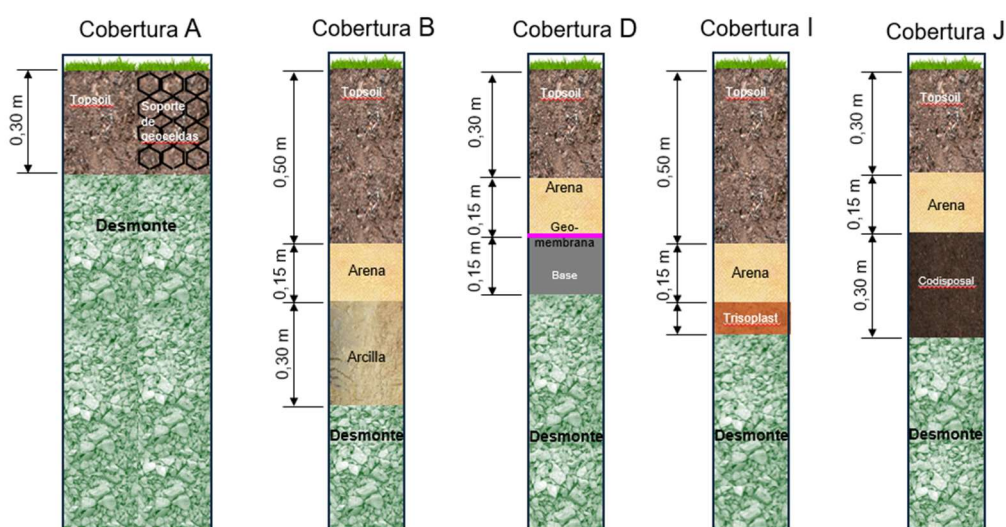


Figura 2-4: Tipologías de coberturas de prueba según los materiales

2.2 Secciones de análisis

La Figura 2-5 presenta la distribución de las coberturas de prueba a lo largo del Botadero Este. A partir de esta, se definieron seis secciones representativas de análisis. A saber,

- Sección 1 – Cobertura tipo A en pendientes 1.7:1 y tipo D en bancos y pendientes 2.2:1.
- Sección 2 – Cobertura tipo A en pendiente 2:1 y tipo B en bancos.
- Sección 3 - Cobertura tipo A en pendiente 1.7:1 y tipo B en bancos y pendientes 2.2:1.
- Sección 4 - Cobertura tipo A en pendiente 1.7:1 y tipo I en bancos y pendientes 2.2:1.
- Sección 5 - Cobertura tipo A en pendiente 1.7:1 y tipo J en bancos y pendientes 2.2:1.
- Sección 6 – Cobertura tipo A en pendientes 1.7:1 con implementación de geoceldas.

Los esquemas de coberturas y pendientes se respaldan en el Adjunto 1.

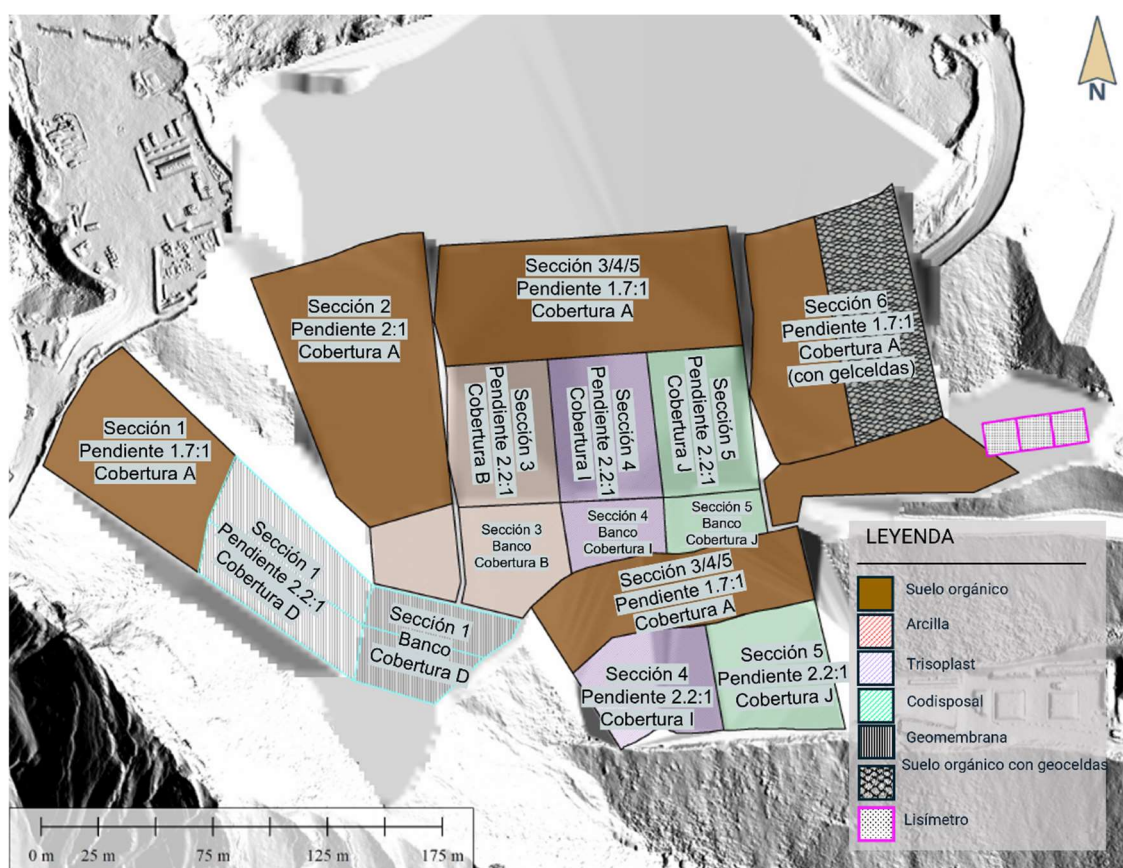


Figura 2-5: Distribución de paneles de prueba según tipos de coberturas, ángulos de taludes y bermas en el Botadero Este

2.3 Materiales

Las propiedades de los materiales utilizados para las coberturas fueron derivados de los reportes previos de depósitos orgánicos y botaderos [1, 3, 4, 7], proporcionados por el cliente y revisados por SRK únicamente a partir de bibliografía de referencia. La caracterización de los materiales se fundamenta principalmente en los resultados de ensayos de laboratorio y estudios geotécnicos presentados en dichos informes, así como en valores típicos reportados en literatura técnica para materiales similares, cuando la información específica no estuvo disponible.

Los resultados de los ensayos complementarios de corte directo realizados sobre muestras extraídas de terraplenes de prueba no han sido considerados para la selección de los parámetros

geotécnicos empleados en el análisis de estabilidad. Esto se debe a que los valores obtenidos presentaron inconsistencias significativas respecto a lo esperable para los materiales evaluados (arenas con cohesión elevada, suelos finos y orgánicos con ángulos de fricción internos atípicamente altos), probablemente asociadas a limitaciones en la preparación de muestras, ejecución de los ensayos o en la documentación de estos. Por lo tanto, cualquier interpretación adicional de estos resultados debería ser respaldada por ensayos complementarios específicos.

Por último, cabe destacar que estos parámetros constituyen la base para las verificaciones de estabilidad y el análisis comparativo de las distintas alternativas de cobertura propuestas en este estudio, y que SRK no realizó una validación independiente de estos.

2.3.1 Suelo orgánico

El suelo orgánico disponible proviene de acopios existentes en el sitio y presenta una granulometría variable, con contenido de finos entre 22% y 91%, y un contenido de gravas que varía entre 0 y 35%. Su plasticidad es moderada a alta, con índices de plasticidad entre 19 y 26 y límites líquidos de 56% a 63%.

El estudio preliminar de alternativas de cierre [7] indica la presencia de dos tipos de materiales: un suelo orgánico fino, con un ángulo de fricción interna de 25° y cohesión de 1 kPa, y otro de naturaleza más gruesa, con un ángulo de fricción de 30° y cohesión de 0.5 kPa. Los pesos unitarios adoptados son de 16.5 kN/m³ y 17 kN/m³, respectivamente. Estos valores de peso unitario y cohesión se encuentran dentro del rango esperado [9]. Asimismo, de acuerdo con Sorensen & Okkels [8], los ángulos de fricción utilizados se encuentran dentro del rango esperable para suelos con los índices de plasticidad reportados, estimándose entre 23° y 30°, para índices de 26 y 19 respectivamente.

2.3.2 Arcillas

Las arcillas propuestas como material de cubierta presentan una alta variabilidad mineralógica, mostrando límites líquidos entre 33 y 125 y un índice de plasticidad entre 13 y 96, lo que indica la presencia de minerales de alta plasticidad (como montmorillonita). Para su utilización, en el estudio preliminar [7] se plantea la compactación al 95% de densidad máxima según el ensayo Proctor estándar. Sin embargo, estos suelos exhiben comportamientos muy diversos según su plasticidad: los suelos con índice de plasticidad menor a 15 o 20, probablemente puedan compactarse adecuadamente, pero los materiales con plasticidad mayor, en cambio, son incompatibles con ese grado de compactación y, de ser necesario su empleo en zonas inclinadas, deberán ser estabilizados, tal como se señala en las recomendaciones. Dado que la estabilización puede ser antieconómica, se sugiere reservar los materiales de mayor plasticidad para bermas y sectores horizontales donde los requerimientos de compactación y resistencia sean menores.

Para las condiciones de estabilidad pico se utilizan parámetros representativos de una arcilla compactada: ángulo de fricción de 22° y cohesión de 5 kPa; para grandes deformaciones, los valores son de 22° y 2 kPa, respectivamente.

Se reconoce que estos valores pueden variar en función del tiempo debido a procesos de hinchamiento o ablandamiento. El peso unitario considerado es 17 kN/m³. Estos valores de peso unitario y cohesión se encuentran dentro del rango esperado [9]. Asimismo, de acuerdo con Sorensen & Okkels [8], los ángulos de fricción adoptados se encuentran dentro del rango esperable para arcillas con los índices de plasticidad reportados, estimándose ángulos de fricción entre 17° y 27°, para índices entre 96 y 13 respectivamente.

2.3.3 Arenas

La arena utilizada en las cubiertas corresponde a arena limpia colocada con una compactación baja o nula, aunque una ligera compactación adicional puede ocurrir tras la colocación del suelo orgánico superior. Estas arenas aseguran una adecuada permeabilidad y son también utilizadas como material de cama bajo geomembranas. El material se caracteriza como no cohesivo, típico

de arenas para drenaje, y su resistencia se basa únicamente en la fricción interna. El estudio preliminar de alternativas de cierre [7] considera un ángulo de fricción de 34° , cohesión nula, peso unitario húmedo de 18.5 kN/m^3 y saturado de 20.8 kN/m^3 . Sin embargo, SRK considera que este ángulo de fricción puede resultar elevado para un material colocado sin un control de compactación y recomienda adoptar un valor de 31° , aproximadamente igual al ángulo de fricción interna a volumen constante [13].

2.3.4 Trisoplast

El Trisoplast es un material compuesto por arena, bentonita y un polímero, diseñado para tener baja permeabilidad y cierta resistencia estructural. La interacción del polímero con la bentonita y la arena genera una estructura tipo gel, aportando cohesión al ensamblado granular. El material es compactado al 95% de su densidad relativa y se emplea como barrera en la cubierta. Los parámetros resistentes del material han sido provistos por el proveedor y han sido verificados mediante ensayos de laboratorio en otros estudios de análisis de estabilidad publicados [10].

Para el análisis se consideran un ángulo de fricción interna de 30° y una cohesión de 10 kPa , junto a un peso unitario de 16.6 kN/m^3 , valores que reflejan su comportamiento de tipo “arena cementada” con cohesión aportada por su estructura interna.

2.3.5 Mezcla de relaves y roca triturada (*commingled tailings*)

Las mezclas de relaves y roca triturada corresponden a combinaciones de materiales con granulometría predominantemente gruesa, usando proporciones de entre 4:1 y 1:1 (roca de desmonte:relave), y considerando relaves filtrados, en pasta y ciclados. Los parámetros resistentes del material han sido determinados por Golder [11] a través de ensayos triaxiales, los cuales muestran que bajo 100 kPa de confinamiento el material se comporta como un material granular puro en las condiciones del sistema de cubierta, con cohesión despreciable y ángulos de fricción internos entre 41.5° y 43° . El peso unitario estimado es de 19.0 kN/m^3 , y la capacidad de resistencia proviene de la fricción entre partículas de roca y relave.

Para el análisis se considera un ángulo de fricción con un valor medio de 42° . Si bien este valor medio puede considerarse algo elevado para este tipo de suelos, especialmente en las mezclas con proporciones 1:1, en el análisis de sensibilidad se evaluaron también casos con un ángulo de 37.8° , valor que resulta más adecuado para dichas condiciones.

2.3.6 Relleno de desmonte (*waste rock*)

El relleno de desmonte está conformado por material de roca ocupando un rango amplio de granulometría, presentando una envolvente de resistencia no lineal y dependencia del nivel de confinamiento. Para los análisis de estabilidad a baja profundidad, se adopta una función de resistencia no lineal definida por Antamina (Figura 2-6), sin presencia de cohesión, respaldado por ensayos previos y observaciones de campo [1]. Su peso unitario es de 19.6 kN/m^3 .

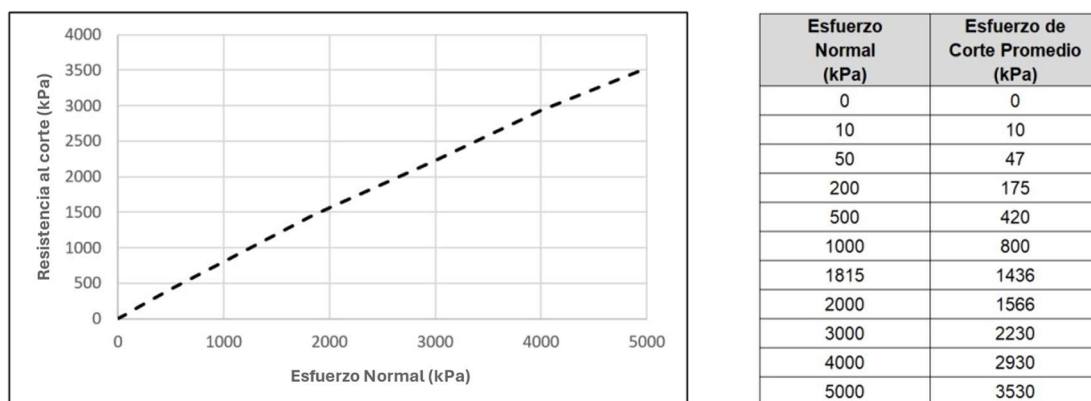


Figura 2-6: Función de resistencia no lineal para roca de desmonte - Antamina [1]

2.3.7 Interfaz geomembrana y arena

La interacción entre la geomembrana texturizada de HDPE/LLDPE y la arena drenante determina la resistencia por fricción y adhesión en la interfaz, influyendo en la estabilidad ante deslizamientos superficiales. El ángulo de fricción interna de la interfaz es 31° y la adhesión es 1 kPa en condiciones de esfuerzo pico; en condiciones de grandes deformaciones, el ángulo de fricción disminuye a 26° , manteniéndose la adhesión en 1 kPa. Estos valores se han determinado mediante ensayos específicos y representan un comportamiento intermedio entre el material granular puro y la interfaz de materiales sintéticos [12]. Para el diseño ejecutivo, estos valores asumidos deberán ser validados o ajustados de acuerdo con las especificaciones del proveedor.

2.3.8 Resumen de parámetros geotécnicos

La Tabla 2-1 resume los parámetros geotécnicos considerados para las verificaciones de estabilidad. SRK considera que la información disponible sobre los materiales no resulta suficiente para adoptar valores característicos en los cálculos de estabilidad y por este motivo, se definieron rangos de propiedades para cada material, contruidos a partir de los parámetros característicos presentados en los informes previos y un desvío estándar [9]. En este contexto, se adoptaron variaciones del $\pm 10\%$ para el ángulo de fricción interna y $\pm 25\%$ para la cohesión, con el fin de reflejar de manera más realista la dispersión esperada en las propiedades geotécnicas de los materiales involucrados.

Tabla 2-1: Propiedades materiales utilizados en el análisis de estabilidad físico de las coberturas. Valores característicos.

Material	Peso unit. (γ') [kN/m ³]	Ángulo de fricción efectivo (ϕ') [deg]	Cohesión (c') [kPa]
Suelo orgánico fino (<i>fine topsoil</i>)	16.5	25	1
Suelo orgánico grueso (<i>coarse topsoil</i>)	17	30	0.5
Arena	20.8	31	0
Arcilla compactada (pico)	17	22	5

Material	Peso unit. (γ') [kN/m ³]	Ángulo de fricción efectivo (ϕ') [deg]	Cohesión (c') [kPa]
Arcilla compactada (residual)	17	22	2
Trisoplast, 95% Densidad de compactación	16.6	30	10
Mezcla de relaves y roca triturada (commingled tailings)	2.06	42	0
Relleno de desmonte (waste rock)	19.6	Función de resistencia no lineal ¹	
Interfaz geomembrana y arena (pico)	0 (interfaz)	31	1
Interfaz geomembrana y arena (residual)	0 (interfaz)	26	1

¹ (Piteau, 2022)

2.4 Criterios de diseño

Para la evaluación de la estabilidad se siguieron los lineamientos adoptados por Piteau [1] y Stantec [2], basados en los criterios definidos en [6]. Los factores de seguridad (FoS) mínimos recomendados se indican en la Tabla 2-1:

Tabla 2-2: Factores de seguridad mínimos

Condición	FoS_{min}
Estabilidad superficial de coberturas. Condición estática	1.30
Estabilidad global de taludes. Condición estática	1.50
Condición de carga extrema (sismo). Pseudo-estático.	1.00

Además de los factores de seguridad considerados en el análisis determinístico, en este estudio se ha tomado en cuenta la probabilidad de falla (PoF) como criterio complementario de aceptación del diseño. De acuerdo con lo recomendado por Hawley et al [5], cuando los datos disponibles presentan baja confiabilidad y las consecuencias asociadas a una eventual falla son moderadas o bajas, resulta apropiado aceptar valores de PoF máxima de 10%, en correspondencia con factores de seguridad mayores a 1.3 (intervalo verde en Figura 2-7). La adopción de este criterio permite una evaluación más realista de la seguridad, incorporando la incertidumbre inherente a los parámetros empleados en el análisis de estabilidad.

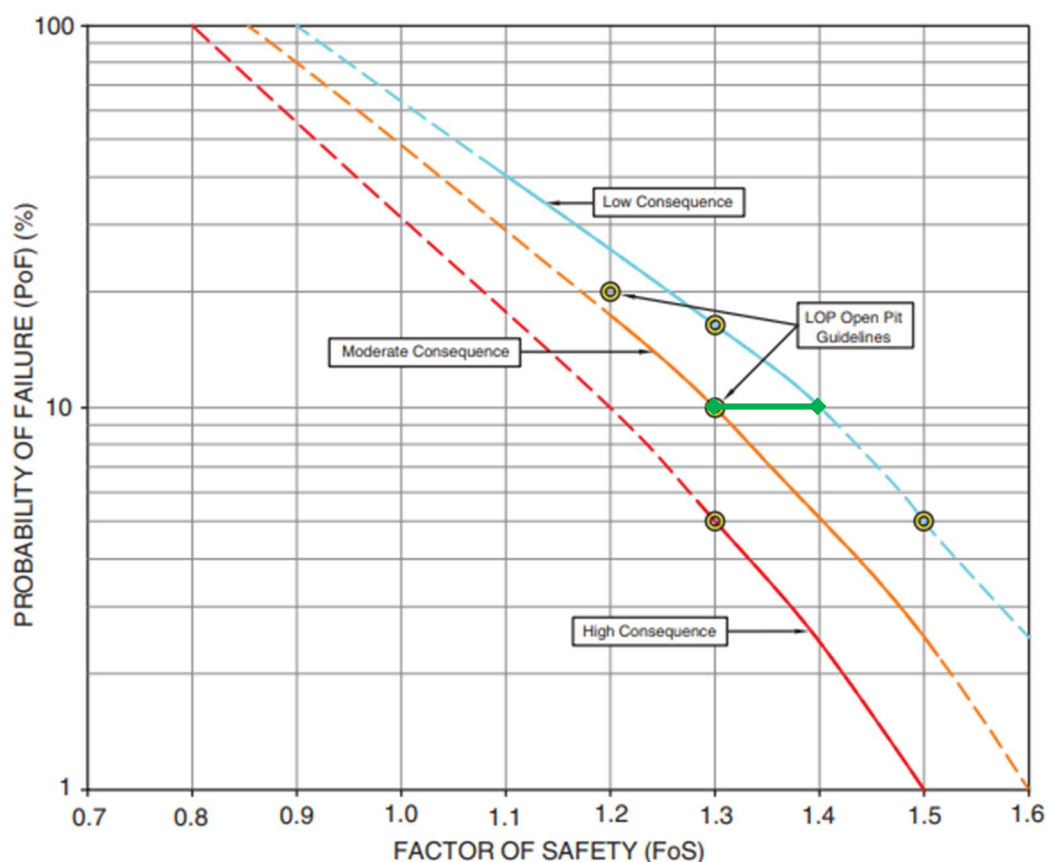


Figura 2-7: Relación entre el factor de seguridad y la probabilidad de falla admisible [5].

Según lo establecido por Piteau [1] en el diseño preliminar, las consecuencias asociadas a la falla de la cobertura se consideran bajas y la confianza en las propiedades de los materiales es baja a moderada. Esta apreciación se refuerza por el hecho de que la reparación de posibles daños en la cobertura puede ser realizada con relativa facilidad. Este enfoque está en línea con los criterios de Hawley et al [5], que clasifican como moderada la consecuencia de falla en botaderos con pendientes globales menores a 30° y alturas inferiores a 250 m, o con pendientes iguales al ángulo de reposo de menos de 100 m de altura, siempre que no exista infraestructura crítica aguas abajo, acceso irrestricto o bien existan medidas robustas de mitigación y contención para proteger elementos sensibles ante un evento de inestabilidad.

La definición final del nivel de consecuencia y, por ende, la probabilidad de falla admisible debe ser determinada y asumida en conjunto con Compañía Minera Antamina de acuerdo con sus estándares internos, su nivel de tolerancia al riesgo y los objetivos de manejo ambiental y operacional del sitio.

2.5 Métodos de análisis

2.5.1 Estabilidad superficial de cobertura

La estabilidad de las diferentes alternativas para el sistema de cubierta fue evaluada utilizando métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite. En este tipo de análisis, se compara la resistencia de los materiales del suelo frente a las fuerzas gravitacionales que pueden provocar inestabilidad en el talud.

Se utilizó el procedimiento del talud infinito para el análisis de la cobertura dado que, cuando la cobertura es de un espesor reducido en comparación con la longitud de la pendiente, se puede

suponer que el talud es “*infinito*”, lo que implica que la resistencia que aporta el pie del talud es mínima y se puede despreciar. Este método considera que cualquier posible deslizamiento ocurre de manera paralela a la cara de la pendiente, lo que simplifica considerablemente el análisis.

Esta metodología es aplicable sin caer en supuestos conservadores siempre que la altura vertical del talud sea al menos 30 veces mayor que el espesor de la cobertura.

Para llevar a cabo los cálculos determinísticos, se utilizó una hoja de cálculo en Excel, donde se detallaron los datos intermedios y resultados obtenidos. Además de considerar los valores medios de los parámetros geotécnicos, se realizó un análisis de sensibilidad en el que se variaron de manera aislada la cohesión y el ángulo de fricción interna según los porcentajes indicados. Toda la información relacionada con este proceso se encuentra detallada en el Adjunto 2 del informe.

De manera complementaria, se realizó una evaluación probabilística de la estabilidad de taludes, con el objetivo de incorporar explícitamente la incertidumbre asociada a la variabilidad de los parámetros resistentes de los materiales de las coberturas. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes de este análisis, cuyo calculo detallado puede encontrarse en el Adjunto 3.

Se llevaron a cabo simulaciones de Monte Carlo con un total de 10.000 muestras. En cada simulación se variaron aleatoriamente los valores del ángulo de fricción interna y la cohesión de los diferentes suelos presentes, tomando como base la caracterización mecánica realizada. Los parámetros de fricción y cohesión se definieron mediante distribuciones normales truncadas, utilizando como valores medios aquellos obtenidos de la caracterización mecánica de cada material. Los desvíos estándar se fijaron como fracción del valor medio: un 10% para el ángulo de fricción interna y un 25% para la cohesión, en concordancia con lo considerado para el análisis de sensibilidad. Asimismo, se establecieron límites mínimos y máximos para evitar la simulación de valores no representativos del comportamiento de los diferentes tipos de suelo.

En particular, se hizo un análisis separado para dos tipos de suelo orgánico (topsoil), diferenciados según su contenido de finos, a fin de evaluar el desempeño de cada uno en distintas secciones y configuraciones de coberturas.

Tabla 2-3: Propiedades materiales utilizadas en el análisis probabilístico.

Material	Peso unitario (kN/m3)	Ángulo de fricción (°) (mín)	Ángulo de fricción (°) (medio)	Ángulo de fricción (°) (máx)	Ángulo de fricción (°) (desvío)	Cohesión (kPa) (medio)	Cohesión (kPa) (desvío)
TOPSOIL-F	16.5	20	25	27	2.5	1	0.250
TOPSOIL-G	17.0	25	30	32	3.0	0	0.125
ARENA	20.8	28	31	34	3.1	0	0.000
ARCILLA	17.0	18	22	26	2.2	2	0.500
GEOMEMBRANA	0.0	21	26	31	2.6	1	0.250
TRISOPLAST	16.6	24	30	36	3.0	10	2.500
RELAVES	20.6	37	42	47	4.2	0	0.000

2.5.2 Estabilidad global del talud

Para el análisis de la estabilidad del talud de global, los factores de seguridad se determinaron mediante métodos de equilibrio límite utilizando el software especializado Slide2 de Rocscience, En particular, se analizaron posibles mecanismos de falla tanto circulares como poligonales, empleando los métodos de Spencer y Morgenstern-Price, que permiten evaluar de manera precisa la estabilidad ante deslizamientos complejos.

En la modelación, se asumió que el extremo este del depósito de residuos (East WRF) está fundado sobre materiales de roca base con mayor resistencia que la propia roca de desecho. Por este motivo, no se consideraron posibles superficies de deslizamiento profundas que atraviesen la fundación, ya que se espera que el mayor potencial de inestabilidad se encuentre restringido a la masa de waste rock.

Para este informe se seleccionó una sección representativa con la mayor pendiente proyectada (1.7H:1V) y una altura total de 50 metros, configurando el escenario más crítico para la evaluación de la estabilidad.

3 Verificación geotécnica

3.1 Estabilidad superficial de coberturas

En la Tabla 3-1 se presentan los factores de seguridad mínimos, probabilidad de falla y la capa en la que se produce la falla. Debido a la variabilidad de los parámetros de suelo considerados en el análisis de sensibilidad, se presentan los valores medios y el rango de los resultados de los FoS determinados.

En el Adjunto 2 y Adjunto 3 se detallan los cálculos para todas las capas, respectivamente. Como se puede apreciar, algunos valores de FoS no alcanzan los valores mínimos requeridos indicados en la Tabla 2-2, pero todas las probabilidades de falla asociadas se encuentran por debajo del 10%.

Tabla 3-1: Factores de seguridad de estabilidad superficial de coberturas.

Caso	Pendiente (1V:xH)	Cobertura	Factor de seguridad			PoF (%)	Capa débil
			Mínimo	Medio	Máximo		
Sección 1	1.7:1	A	1.06	1.17	1.28	8.10	Topsoil
	2.2:1	D	1.16	1.37	1.49	0.06	Interfaz geomembrana
Sección 2	2:1	A	1.24	1.37	1.49	0.40	Topsoil
Sección 3	1.7:1	A	1.06	1.17	1.28	8.10	Topsoil
	2.2:1	B	1.08	1.18	1.28	5.13	Arcilla
Sección 4	1.7:1	A	1.06	1.17	1.28	8.10	Topsoil
	2.2:1	I	1.20	1.32	1.44	0.35	Topsoil
Sección 5	1.7:1	A	1.06	1.17	1.28	8.10	Topsoil
	2.2:1	J	1.36	1.51	1.63	0.03	Topsoil
Sección 6	1.7:1	A	1.06	1.17	1.28	8.1	Topsoil

Del análisis realizado, se observa que en dos casos los factores de seguridad obtenidos no cumplen con el valor mínimo recomendado de 1.3 para los valores medios. Específicamente, estas situaciones corresponden al uso de suelo orgánico sobre pendientes de 1.7:1 y suelos finos sobre pendientes de 2.2:1. Cabe destacar que todos los factores de seguridad obtenidos resultan mayores a la unidad para todo el rango de parámetros materiales considerados, como puede también verse en mayor detalle en la Figura 3-1 y Figura 3-2. Para mayor claridad, se excluyen de los gráficos las capas con mezcla de relaves y Trisoplast, con factores de seguridad mayores a 1.70 para todos los casos.

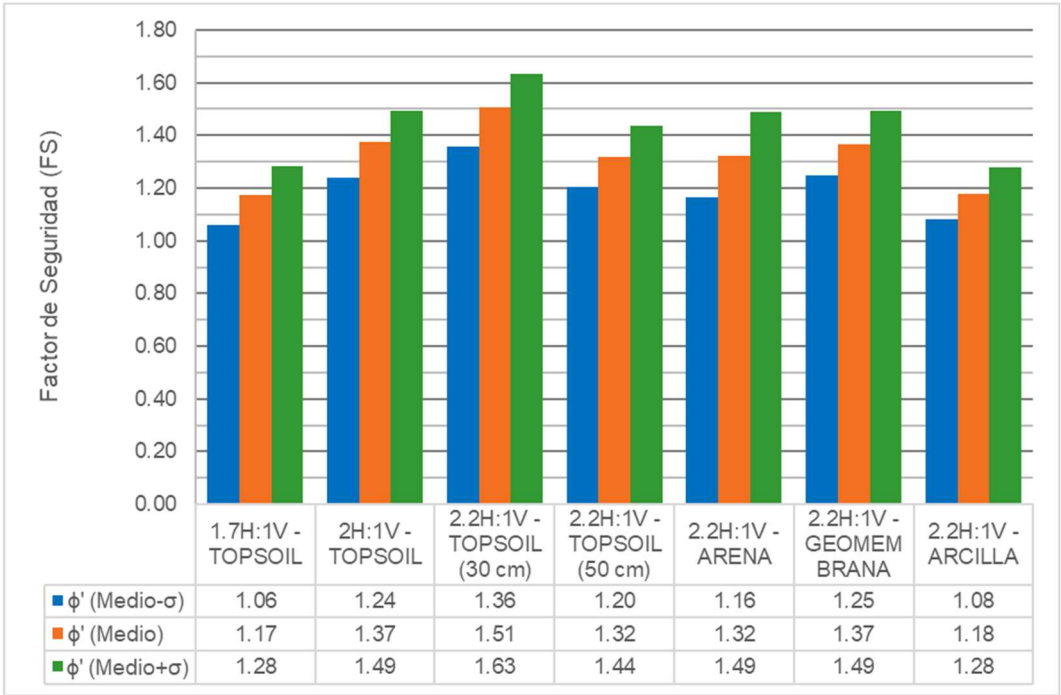


Figura 3-1: Factores de seguridad calculados para distintos ángulos de fricción (ϕ).

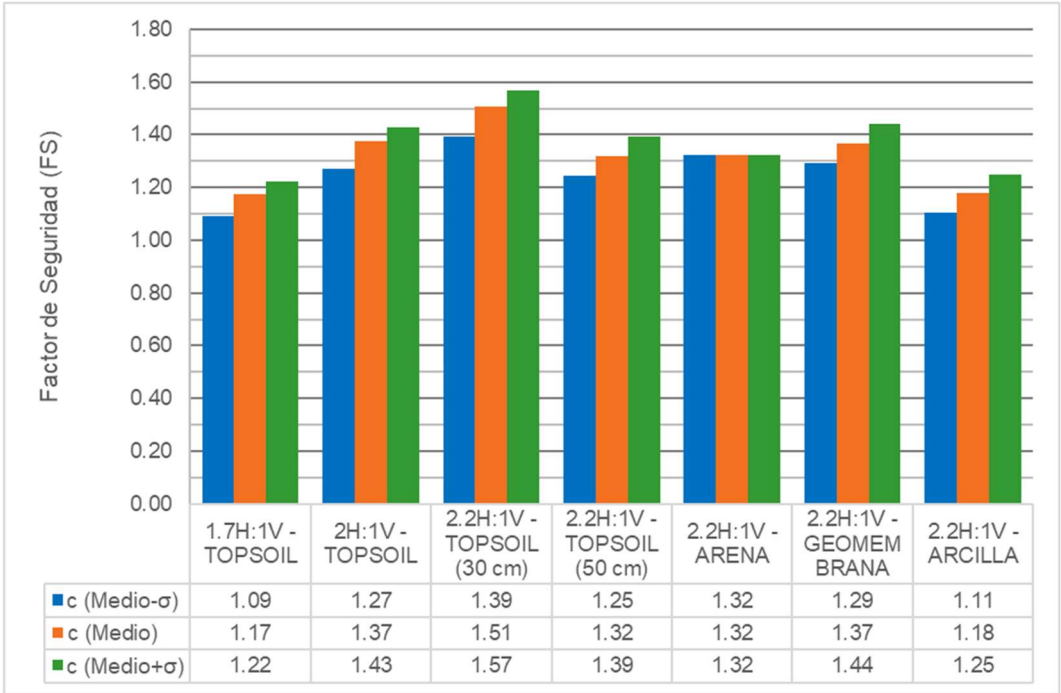


Figura 3-2: Factores de seguridad calculados para distintos valores de cohesión (c).

En cuanto a la evaluación probabilística de la estabilidad, en la mayoría de las configuraciones los resultados obtenidos muestran valores de PoF menores al 1%, lo que representa una muy baja probabilidad de falla bajo la variabilidad considerada para los parámetros resistentes. Las únicas excepciones se registraron en dos situaciones puntuales:

- Para el suelo orgánico (topsoil) en la capa superficial de taludes con pendiente 1.7:1 (Secciones 1, 3, 4, 5 y 6 – Cobertura tipo A),
- Y para la arcilla utilizada en taludes de pendiente 2.2:1 (Sección 3 – Cobertura tipo B).

Incluso en estos casos, los valores de PoF se mantuvieron en niveles aceptablemente bajos, con probabilidades de falla entre el 5% y el 10%.

3.2 Estabilidad global de taludes

Como aproximación, la verificación de estabilidad global del talud se verificó para la pendiente máxima de 1.7:1 y una altura de 50 m considerando un único material de relleno (*waste rock*).

Mediante los métodos de equilibrio límite de Morgenstern-Price y Spencer se analizaron fallas circulares y poligonales y se determinó un coeficiente de seguridad mínimo de 1.60, el cual satisface los valores indicados en la Tabla 2-2.

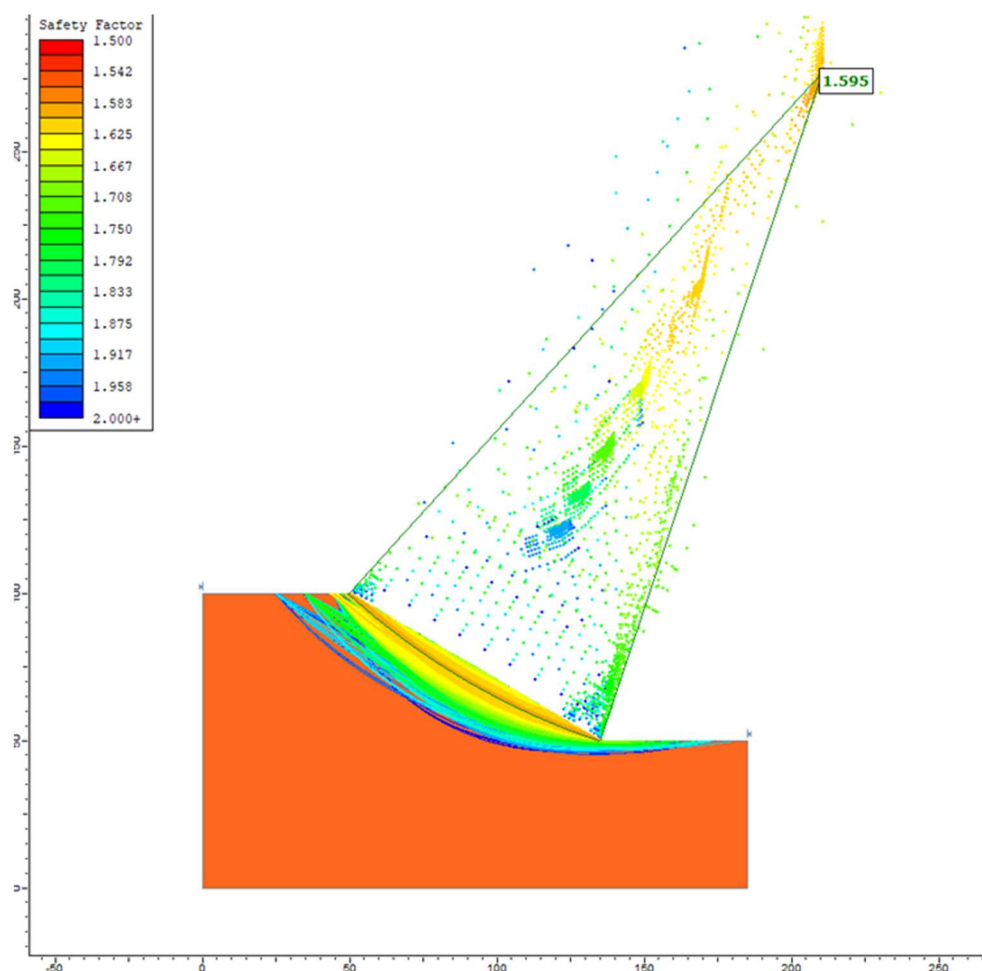


Figura 3-3: Superficies de falla y FS mínimo. Caso estático.

4 Recomendaciones

Las recomendaciones presentadas a continuación se fundamentan tanto en los resultados del análisis determinístico y de sensibilidad como en los hallazgos derivados de la evaluación probabilística de estabilidad.

El análisis desarrollado sobre las alternativas de coberturas y sus respectivas condiciones de estabilidad ha permitido identificar que la mayoría de las alternativas evaluadas cumplen adecuadamente con los criterios mínimos de seguridad determinísticos, salvo en ciertos casos donde la configuración de material y pendiente resulta más exigente: el suelo orgánico en taludes más inclinados y los suelos finos en pendientes intermedias.

A partir de ello, se profundizó el estudio incorporando un enfoque probabilístico, que permitió evaluar la influencia de la variabilidad de los parámetros geotécnicos. El análisis probabilístico permitió estimar la probabilidad de falla (PoF) de cada alternativa, aportando una visión más realista del desempeño esperado bajo condiciones de incertidumbre.

En la mayoría de las configuraciones evaluadas, la PoF resultó menor al 1%, confirmando un nivel de seguridad elevado. Las únicas excepciones se observaron en coincidencia con los casos en donde análisis determinístico determinó FS menores a los requeridos en la Tabla 2-2. En estos casos, la PoF se encuentra entre el 5 y el 10%. Estas probabilidades pueden considerarse aceptables dentro del criterio de diseño adoptado para consecuencias de falla moderadas, conforme a lo recomendado por guías internacionales (por ejemplo, Hawley et al. [5]). La definición final del nivel de consecuencia y, por ende, la probabilidad de falla admisible debe ser determinada y asumida en conjunto con Compañía Minera Antamina de acuerdo con sus estándares internos, su nivel de tolerancia al riesgo y los objetivos de manejo ambiental y operacional del sitio.

En función de los resultados integrados de los distintos enfoques de análisis, se establece el siguiente ranking de desempeño para las alternativas de cobertura, ordenado según los criterios de estabilidad superficial alcanzados en los distintos escenarios evaluados:

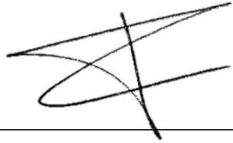
1. Coberturas multicapas con materiales compuestos (arenas limpias, mezclas de relaves, desmonte, geomembranas y Trisoplast): muestran el mayor margen de seguridad y respuesta estable ante sollicitaciones estáticas.
2. Coberturas con arenas: mantienen valores de seguridad satisfactorios y presentan baja sensibilidad ante variaciones en la geometría del talud.
3. Coberturas con suelos finos o arcillas: el desempeño es adecuado solo cuando se emplean materiales seleccionados y pendientes moderadas.
4. Coberturas con suelo orgánico en pendientes pronunciadas: muestran los menores factores de seguridad y probabilidades de falla más altas, requiriendo optimización en su diseño y control en su ejecución. El nivel de riesgo se encuadra dentro de los márgenes definidos por las guías y criterios adoptados, pero debe confirmarse según la gestión de riesgo interna.

En el caso particular de la arcilla, se recomienda su uso primordialmente en aquellas situaciones donde las condiciones de impermeabilidad lo demanden expresamente, dado que sus propiedades pueden variar considerablemente con el tiempo y las condiciones de humedad. Para maximizar el desempeño de las arcillas (y materiales similares), se sugiere realizar ensayos de Casagrande para determinar su índice de plasticidad. De este modo, podrá seleccionarse preferentemente para los taludes expuestos el material con menor plasticidad (idealmente índice de plasticidad por debajo de 20), reservando los suelos de mayor plasticidad para zonas de bermas donde sea posible aplicar una compactación controlada.


Finalmente, se recomienda contar con una caracterización de los volúmenes de cada uno de los materiales de cobertura, lo cual permitirá una planificación de la ejecución y una optimización de recursos en función de la seguridad requerida. Considerando que estos taludes piloto permitirán observar y medir el desempeño real de las alternativas, sumado a los factores de seguridad reducidos y la amplia variabilidad de los materiales empleados, se recomienda su ejecución acompañada por un riguroso monitoreo en campo. Esto permitirá recolectar información clave para

futuras etapas de diseño y realizar ajustes en caso de desviaciones respecto a los objetivos previstos.

SRK Consulting (Argentina) S.A.



Facundo A. Nicuesa
Consultor



Juan Mussat
Consultor Senior

Adjunto 1

Esquemas de secciones y coberturas

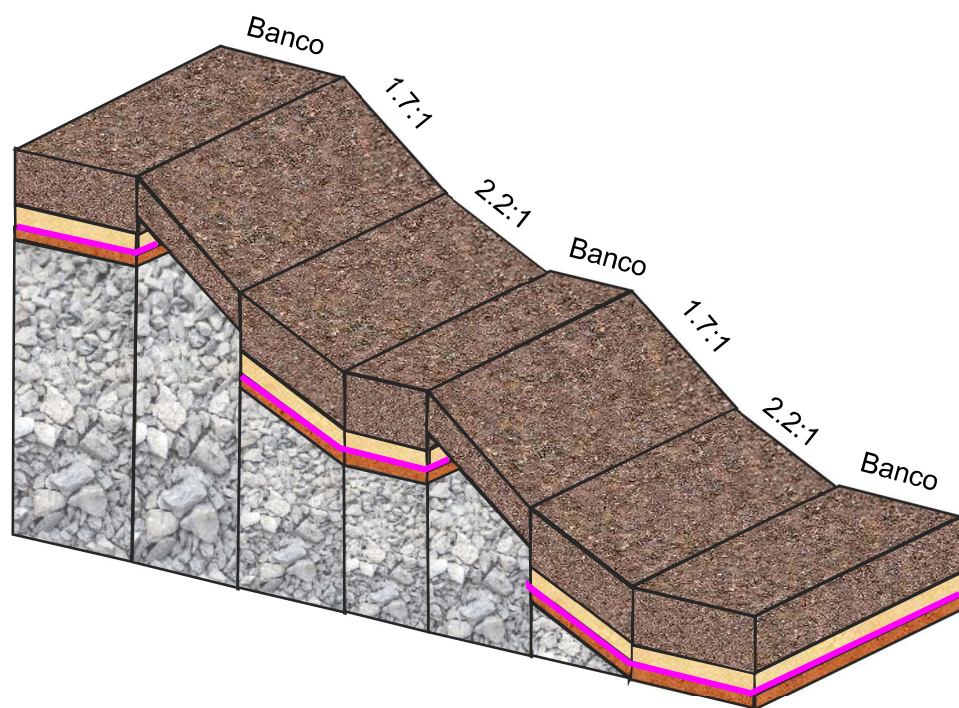


Figura A. 1: Esquema de coberturas y pendientes de sección 1

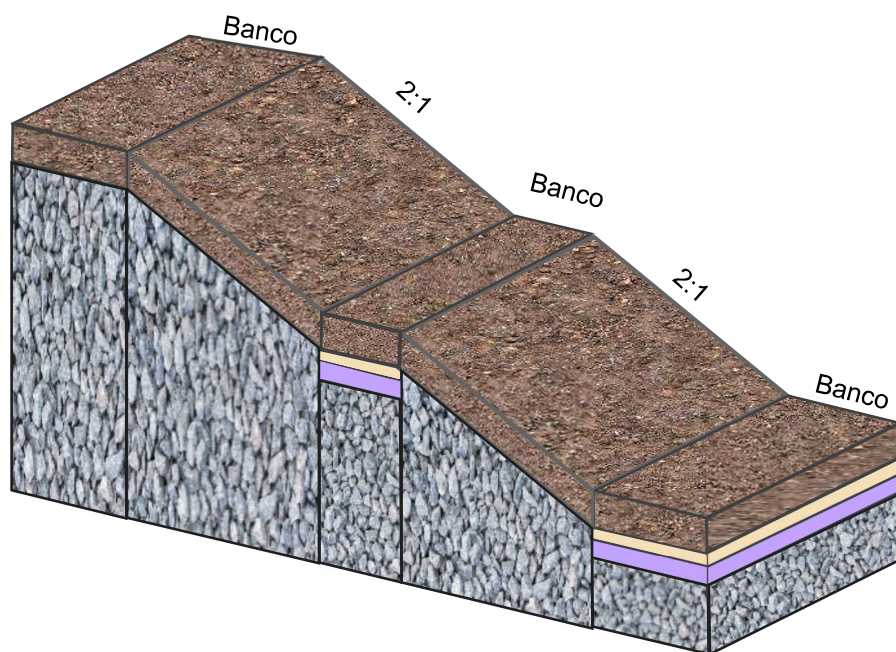


Figura A. 2: Esquema de coberturas y pendientes de sección 2

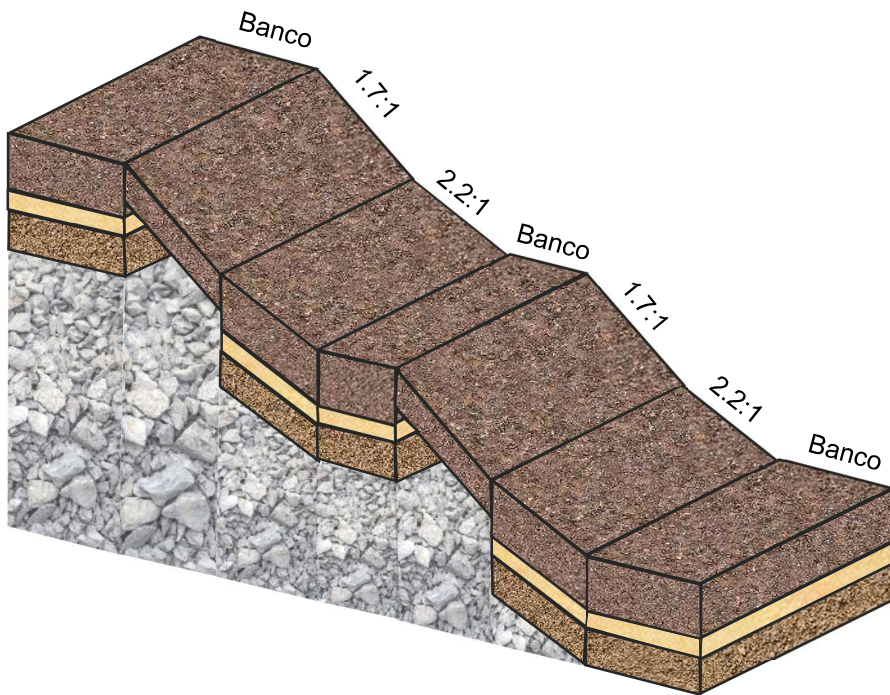


Figura A. 3: Esquema de coberturas y pendientes de sección 3

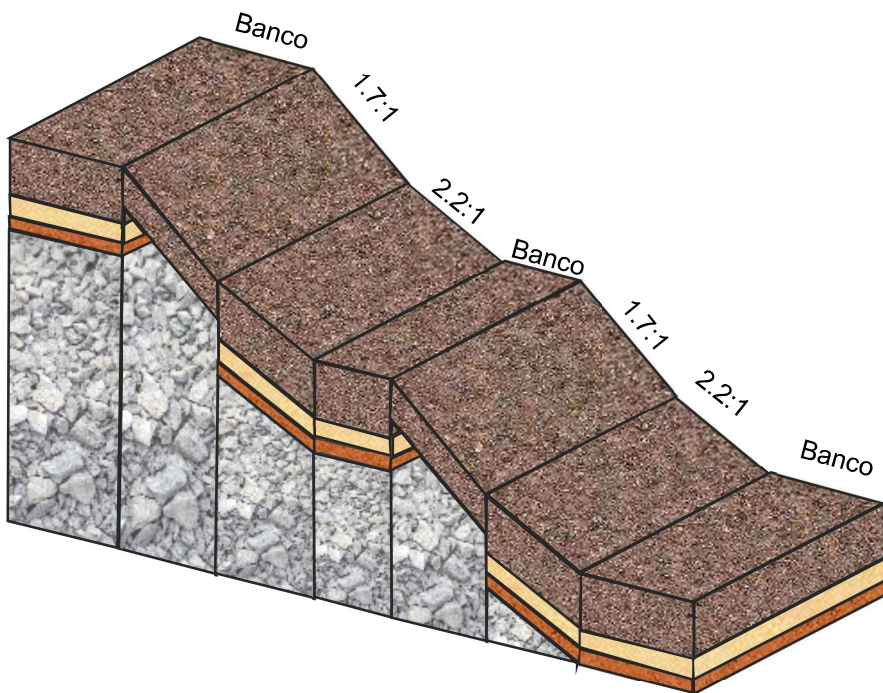


Figura A. 4: Esquema de coberturas y pendientes de sección 4

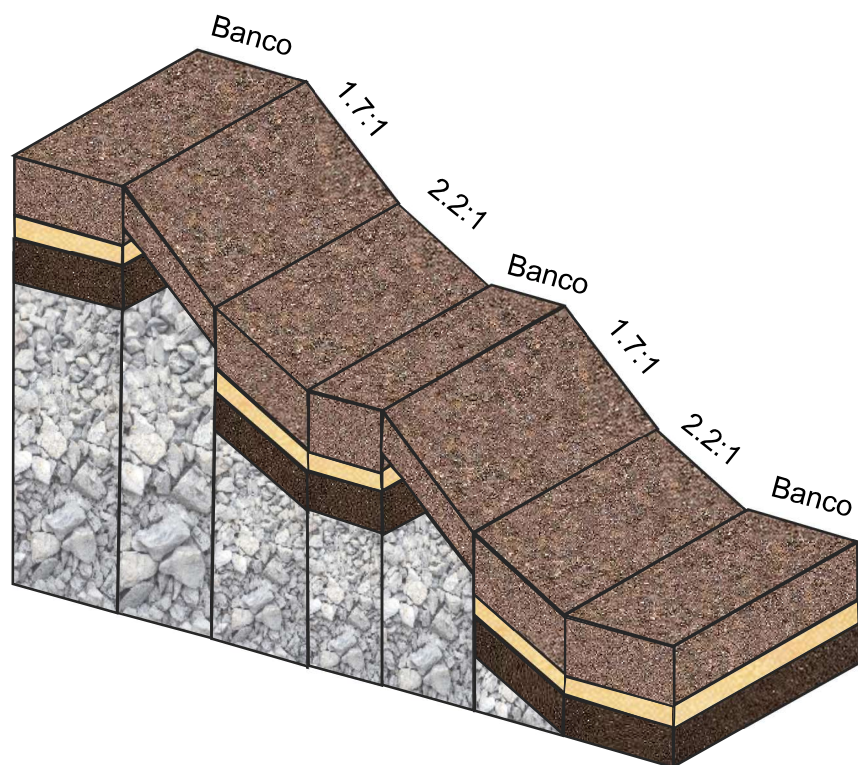


Figura A. 5: Esquema de coberturas y pendientes de sección 5

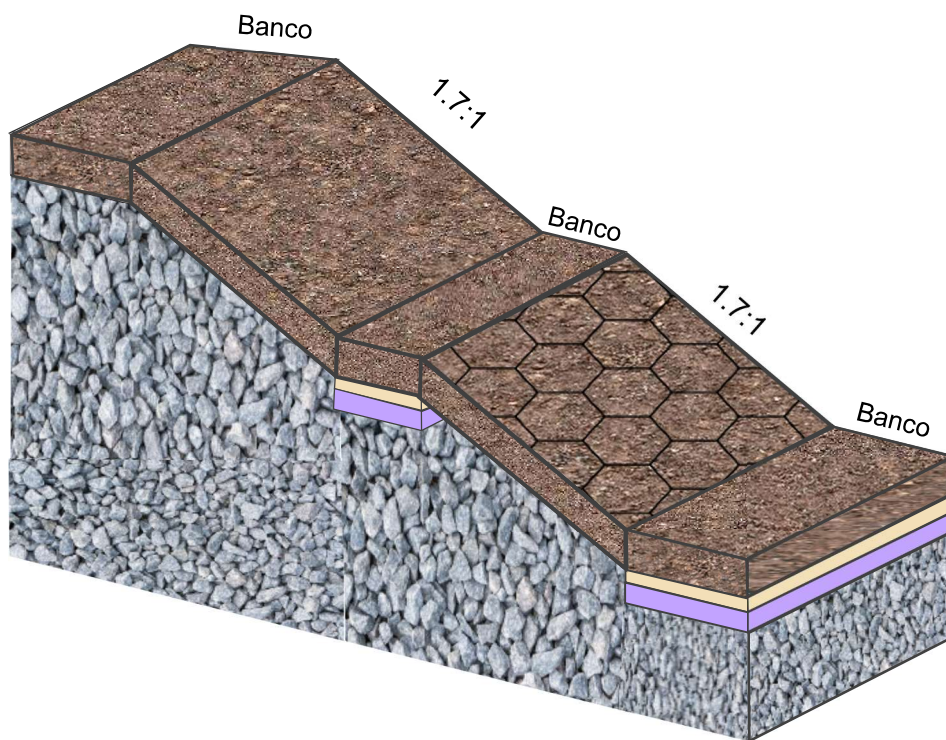
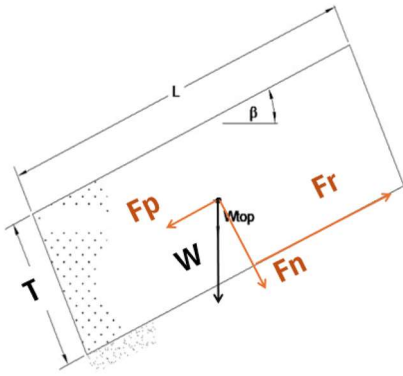


Figura A. 6: Esquema de coberturas y pendientes de sección 6

Adjunto 2

Estabilidad de coberturas

En este apartado se detallan los cálculos para la determinación de los factores de seguridad del mecanismo de falla plana infinita de las coberturas. Dado que la altura de la pendiente es mayor a 30 veces el espesor de la capa de cobertura, no resulta conservador considerar un mecanismo de falla plana infinita. De acuerdo con esto, se realiza la verificación de estabilidad de un bloque de cobertura de 1 m de longitud. Cuando existe más de una capa de material, el peso de las capas superiores se suma al de la inferior en la verificación de cada una de las capas.



Siendo:

- Longitud del bloque de suelo: $L = 1 \text{ m}$
- Espesor de la capa: T
- Peso específico suelo: ρ_s
- Peso del bloque de suelo: $W = \rho_s \cdot L \cdot T \cdot 1 \text{ m}$
- Ángulo del talud: β
- Fuerza paralela a la superficie de falla: $F_p = W \cdot \sin(\beta)$
- Fuerza normal a la superficie de falla: $F_n = W \cdot \cos(\beta)$
- Fuerza de rozamiento: $F_r = F_n \cdot \tan(\varphi) + c$
- Factor de seguridad: $FS = \frac{F_r}{F_p}$

De acuerdo con lo expuesto en la tabla de parámetros materiales, se consideraron diferentes valores característicos como se detalla a continuación:

Suelo orgánico (*topsoil*):

1. Suelo orgánico con alto contenido de finos
2. Suelo orgánico con bajo contenido de finos

Arena:

1. Húmeda
2. Saturada

Arcilla

1. Cohesión pico
2. Cohesión residual

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD PARA FALLA PLANA. VALORES MEDIOS.

Sección	Cobertura	Material	T (m)	Pendiente (1V:xH)	Pendiente (deg)	Peso unitario (kN/m³)		Ángulo de fricción (°)		Cohesión o Adhesión (kPa)		Peso del bloque W (kN/m)		Fp (kN/m)		Fn (kN/m)		Fr (kN/m)		FS	
Parámetros						1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.99	3.04	1.19	1.17
	D	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	3.10	3.18	1.51	1.51
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.23	4.50	1.32	1.32
		GEOMEMB	0	2.2	24.44	0	0	31	26	1	1	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	5.23	4.65	1.63	1.37
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0	10.50	11.34	4.34	4.69	9.56	10.32	5.74	6.20	1.32	1.32
2	A	TOPSOIL	0.3	2	26.57	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.21	2.28	4.43	4.56	3.06	3.13	1.38	1.37
3	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.99	3.04	1.19	1.17
	B	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1	0.5	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.50	4.97	1.32	1.41
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.03	6.36	1.32	1.32
		ARCILLA	0.3	2.2	24.44	17	17	22	22	5	2	16.13	16.72	6.67	6.92	14.68	15.22	10.93	8.15	1.64	1.18
4	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.99	3.04	1.19	1.17
	I	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1	0.5	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.50	4.97	1.32	1.41
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.03	6.36	1.32	1.32
		TRISOPL	0.07	2.2	24.44	16.6	16.6	30	30	10	10	12.19	12.78	5.04	5.29	11.09	11.64	16.41	16.72	3.25	3.16
5	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.99	3.04	1.19	1.17
	J	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	3.10	3.18	1.51	1.51
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.23	4.50	1.32	1.32
		RELAVES	0.3	2.2	24.44	20.6	20.6	42	42	0	0	13.91	14.40	5.75	5.96	12.66	13.11	11.40	11.80	1.98	1.98
6	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.99	3.04	1.19	1.17

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD PARA FALLA PLANA. ÁNGULO DE FRICCIÓN MÍNIMO.

Sección	Cobertura	Material	T (m)	Pendiente (1V:xH)	Pendiente (deg)	Peso unitario (kN/m³)		Ángulo de fricción (°)		Cohesión o Adhesión (kPa)		Peso del bloque W (kN/m)		Fp (kN/m)		Fn (kN/m)		Fr (kN/m)		FS	
Parámetros						1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.77	2.74	1.10	1.06
	D	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	2.87	2.87	1.40	1.36
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	27.9	27.9	0	0	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	3.72	3.96	1.16	1.16
		GEOMEMB	0	2.2	24.44	0	0	27.9	23.4	1	1	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.72	4.24	1.48	1.25
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	27.9	27.9	0	0	10.50	11.34	4.34	4.69	9.56	10.32	5.06	5.47	1.16	1.16
2	A	TOPSOIL	0.3	2	26.57	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.21	2.28	4.43	4.56	2.83	2.82	1.28	1.24
3	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.77	2.74	1.10	1.06
	B	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	22.5	27	1	0.5	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.11	4.44	1.20	1.26
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	27.9	27.9	0	0	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	5.31	5.60	1.16	1.16
		ARCILLA	0.3	2.2	24.44	17	17	19.8	19.8	5	2	16.13	16.72	6.67	6.92	14.68	15.22	10.29	7.48	1.54	1.08
4	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.77	2.74	1.10	1.06
	I	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	22.5	27	1	0.5	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.11	4.44	1.20	1.26
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	27.9	27.9	0	0	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	5.31	5.60	1.16	1.16
		TRISOPL	0.07	2.2	24.44	16.6	16.6	27	27	10	10	12.19	12.78	5.04	5.29	11.09	11.64	15.65	15.93	3.10	3.01
5	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.77	2.74	1.10	1.06
	J	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	2.87	2.87	1.40	1.36
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	27.9	27.9	0	0	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	3.72	3.96	1.16	1.16
		RELAVES	0.3	2.2	24.44	20.6	20.6	37.8	37.8	0	0	13.91	14.40	5.75	5.96	12.66	13.11	9.82	10.17	1.71	1.71
6	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	22.5	27	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.77	2.74	1.10	1.06

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD PARA FALLA PLANA. ÁNGULO DE FRICCIÓN MÁXIMO.

Sección	Cobertura	Material	T (m)	Pendiente (1V:xH)	Pendiente (deg)	Peso unitario (kN/m³)		Ángulo de fricción (°)		Cohesión o Adhesión (kPa)		Peso del bloque W (kN/m)		Fp (kN/m)		Fn (kN/m)		Fr (kN/m)		FS	
Parámetros						1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.22	3.35	1.28	1.30
	D	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	3.35	3.52	1.63	1.67
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	34.1	34.1	0	0	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.76	5.07	1.49	1.49
		GEOMEMB	0	2.2	24.44	0	0	34.1	28.6	1	1	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	5.76	5.08	1.80	1.49
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	34.1	34.1	0	0	10.50	11.34	4.34	4.69	9.56	10.32	6.47	6.99	1.49	1.49
2	A	TOPSOIL	0.3	2	26.57	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.21	2.28	4.43	4.56	3.30	3.46	1.49	1.52
3	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.22	3.35	1.28	1.30
	B	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	27.5	33	1	0.5	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.91	5.53	1.44	1.57
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	34.1	34.1	0	0	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.80	7.16	1.49	1.49
		ARCILLA	0.3	2.2	24.44	17	17	24.2	24.2	5	2	16.13	16.72	6.67	6.92	14.68	15.22	11.60	8.84	1.74	1.28
4	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.22	3.35	1.28	1.30
	I	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	27.5	33	1	0.5	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.91	5.53	1.44	1.57
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	34.1	34.1	0	0	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.80	7.16	1.49	1.49
		TRISOPL	0.07	2.2	24.44	16.6	16.6	33	33	10	10	12.19	12.78	5.04	5.29	11.09	11.64	17.20	17.56	3.41	3.32
5	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.22	3.35	1.28	1.30
	J	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	3.35	3.52	1.63	1.67
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	34.1	34.1	0	0	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.76	5.07	1.49	1.49
		RELAVES	0.3	2.2	24.44	20.6	20.6	46.2	46.2	0	0	13.91	14.40	5.75	5.96	12.66	13.11	13.20	13.67	2.29	2.29
6	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	27.5	33	1	0.5	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.22	3.35	1.28	1.30

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD PARA FALLA PLANA. COHESIÓN MÍNIMA.

Sección	Cobertura	Material	T (m)	Pendiente (1V:xH)	Pendiente (deg)	Peso unitario (kN/m³)		Ángulo de fricción (°)		Cohesión o Adhesión (kPa)		Peso del bloque W (kN/m)		Fp (kN/m)		Fn (kN/m)		Fr (kN/m)		FS	
Parámetros						1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.74	2.91	1.09	1.13
	D	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	2.85	3.06	1.39	1.45
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.23	4.50	1.32	1.32
		GEOMEMB	0	2.2	24.44	0	0	31	26	0.75	0.75	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.98	4.40	1.56	1.29
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	10.50	11.34	4.34	4.69	9.56	10.32	5.74	6.20	1.32	1.32
2	A	TOPSOIL	0.3	2	26.57	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.21	2.28	4.43	4.56	2.81	3.01	1.27	1.32
3	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.74	2.91	1.09	1.13
	B	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	25	30	0.75	0.38	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.25	4.84	1.25	1.38
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.03	6.36	1.32	1.32
		ARCILLA	0.3	2.2	24.44	17	17	22	22	3.75	1.50	16.13	16.72	6.67	6.92	14.68	15.22	9.68	7.65	1.45	1.11
4	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.74	2.91	1.09	1.13
	I	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	25	30	0.75	0.38	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.25	4.84	1.25	1.38
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.03	6.36	1.32	1.32
		TRISOPL	0.07	2.2	24.44	16.6	16.6	30	30	7.5	7.50	12.19	12.78	5.04	5.29	11.09	11.64	13.91	14.22	2.76	2.69
5	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.74	2.91	1.09	1.13
	J	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	2.85	3.06	1.39	1.45
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.23	4.50	1.32	1.32
		RELAVES	0.3	2.2	24.44	20.6	20.6	42	42	0	0.00	13.91	14.40	5.75	5.96	12.66	13.11	11.40	11.80	1.98	1.98
6	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	0.75	0.38	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	2.74	2.91	1.09	1.13

DETERMINACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD PARA FALLA PLANA. COHESIÓN MÁXIMA.

Sección	Cobertura	Material	T (m)	Pendiente (1V:xH)	Pendiente (deg)	Peso unitario (kN/m³)		Ángulo de fricción (°)		Cohesión o Adhesión (kPa)		Peso del bloque W (kN/m)		Fp (kN/m)		Fn (kN/m)		Fr (kN/m)		FS	
Parámetros						1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.24	3.16	1.29	1.22
	D	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	3.35	3.31	1.64	1.57
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.23	4.50	1.32	1.32
		GEOMEMB	0	2.2	24.44	0	0	31	26	1.25	1.25	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	5.48	4.90	1.71	1.44
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	10.50	11.34	4.34	4.69	9.56	10.32	5.74	6.20	1.32	1.32
2	A	TOPSOIL	0.3	2	26.57	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.21	2.28	4.43	4.56	3.31	3.26	1.50	1.43
3	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.24	3.16	1.29	1.22
	B	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1.25	0.63	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.75	5.09	1.39	1.45
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.03	6.36	1.32	1.32
		ARCILLA	0.3	2.2	24.44	17	17	22	22	6.25	2.50	16.13	16.72	6.67	6.92	14.68	15.22	12.18	8.65	1.83	1.25
4	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.24	3.16	1.29	1.22
	I	TOPSOIL	0.5	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1.25	0.63	8.25	8.50	3.41	3.52	7.51	7.74	4.75	5.09	1.39	1.45
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	11.03	11.62	4.56	4.81	10.04	10.58	6.03	6.36	1.32	1.32
		TRISOPL	0.07	2.2	24.44	16.6	16.6	30	30	12.5	12.5	12.19	12.78	5.04	5.29	11.09	11.64	18.91	19.22	3.75	3.63
5	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.24	3.16	1.29	1.22
	J	TOPSOIL	0.3	2.2	24.44	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.05	2.11	4.51	4.64	3.35	3.31	1.64	1.57
		ARENA	0.15	2.2	24.44	18.5	20.8	31	31	0	0.00	7.73	8.22	3.20	3.40	7.03	7.48	4.23	4.50	1.32	1.32
		RELAVES	0.3	2.2	24.44	20.6	20.6	42	42	0	0.00	13.91	14.40	5.75	5.96	12.66	13.11	11.40	11.80	1.98	1.98
6	A	TOPSOIL	0.3	1.7	30.47	16.5	17	25	30	1.25	0.63	4.95	5.10	2.51	2.59	4.27	4.40	3.24	3.16	1.29	1.22

Adjunto 3

Estabilidad de coberturas - Análisis probabilístico

Se realizó una evaluación probabilística de la estabilidad de las coberturas considerando la variabilidad de los parámetros resistentes de los materiales constituyentes. Para ello, se llevaron a cabo simulaciones Monte Carlo con un total de 10.000 muestras, en las cuales se variaron el ángulo de fricción interna y la cohesión de los distintos suelos presentes en las capas.

Los parámetros de fricción y cohesión fueron simulados según una distribución normal truncada, con las siguientes características:

- valores medios iguales a los obtenidos de la caracterización mecánica de los materiales,
- desvío estándar como fracciones del valor medio: un 10% para el ángulo de fricción y un 25% para la cohesión,
- se definieron límites mínimos y máximos razonables para acotar los valores simulados conforme al comportamiento esperado para cada tipo de suelo.

Se analizaron de manera diferenciada dos tipos de suelo orgánico (topsoil), en función del contenido de finos, evaluando su comportamiento en distintas secciones y coberturas.

La probabilidad de falla (PoF) fue calculada para cada caso, obteniendo valores menores al 1% en la mayoría de las configuraciones. Las excepciones correspondieron a los siguientes casos particulares:

- topsoil (capa superficial) en taludes de 1.7:1 (Secciones 1, 3, 4, 5 y 6 – Cobertura A),
- arcilla en taludes de 2.2:1 (Sección 3 – Cobertura B).

Aún en estos casos, el valor de PoF se sitúa en el rango del 5% al 10%. Estas situaciones fueron analizadas con mayor detalle en el desarrollo del estudio.

Materiales

Propiedades materiales utilizadas en el análisis probabilístico

Material	Peso unitario (kN/m3)	Ángulo de fricción (°) (mín)	Ángulo de fricción (°) (medio)	Ángulo de fricción (°) (máx)	Ángulo de fricción (°) (desvío)	Cohesión (kPa) (medio)	Cohesión (kPa) (desvío)
TOPSOIL-F	16.5	20	25	27	2.5	1	0.250
TOPSOIL-G	17.0	25	30	32	3.0	0	0.125
ARENA	20.8	28	31	34	3.1	0	0.000
ARCILLA	17.0	18	22	26	2.2	2	0.500
GEOMEMBRANA	0.0	21	26	31	2.6	1	0.250
TRISOPLAST	16.6	24	30	36	3.0	10	2.500
RELAVES	20.6	37	42	47	4.2	0	0.000

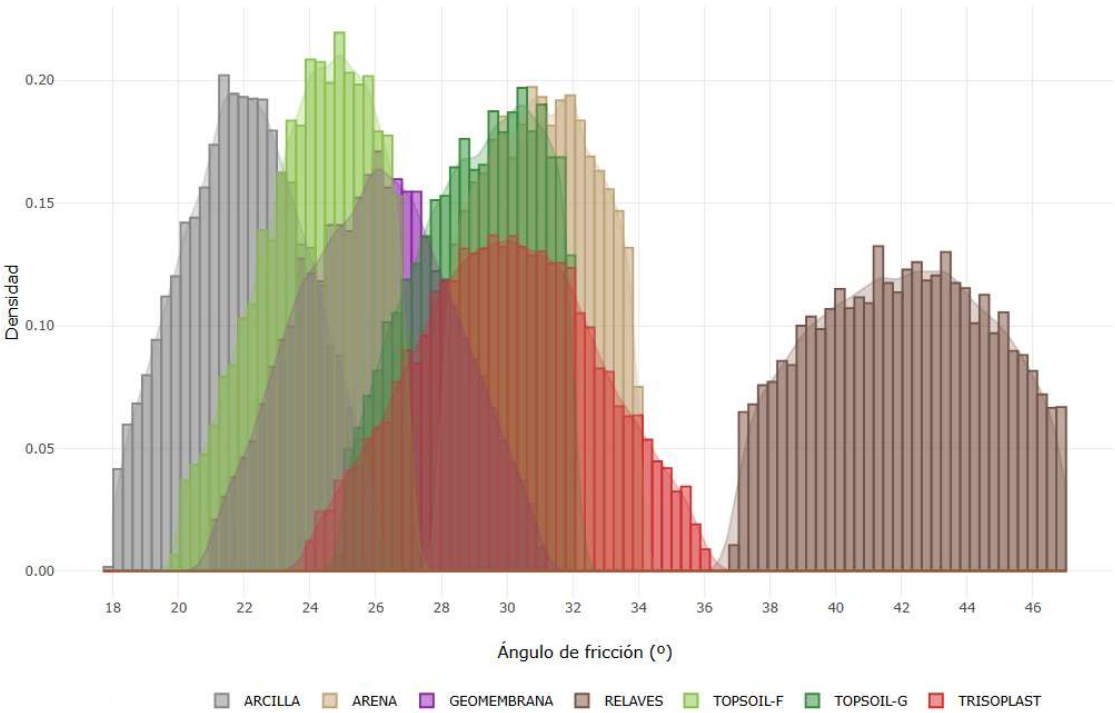


Figura A. 7: Distribución de densidad del ángulo de fricción considerado.

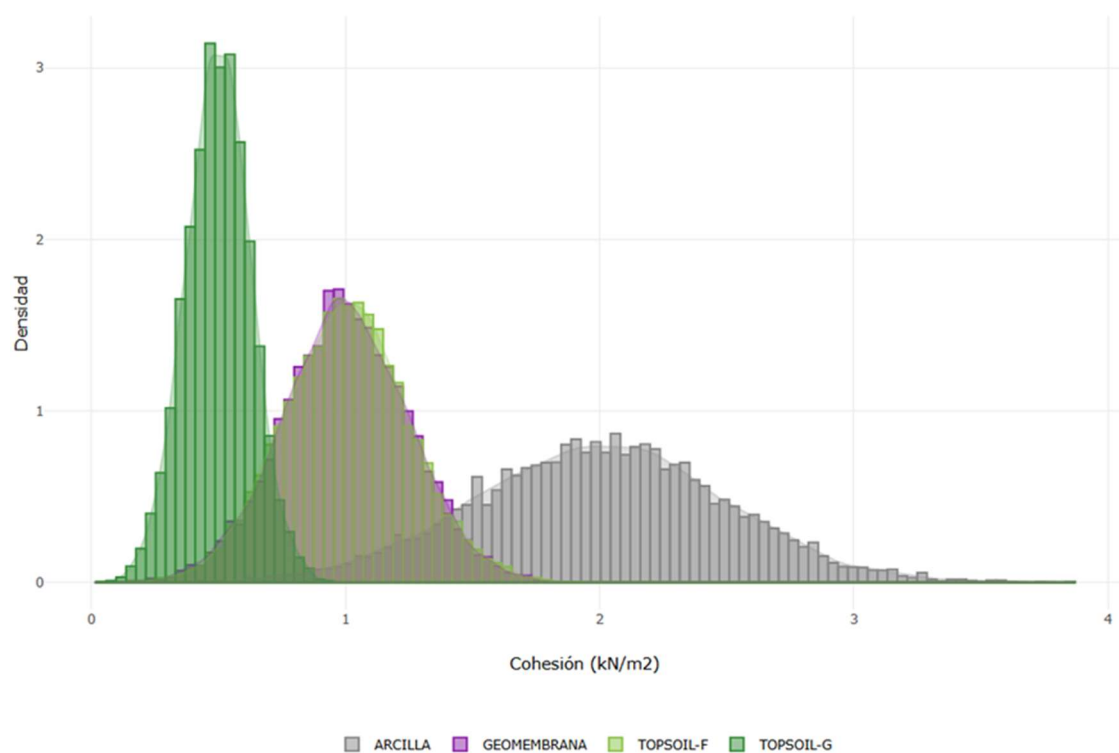


Figura A. 8: Distribución de densidad de cohesión. Se excluyen materiales friccionales ($c = 0$) y Trisoplast.

Resultados

Determinación de probabilidad de falla de coberturas. Suelo orgánico con alto contenido de finos.

Sección	Cobertura	Capa	Material	Espesor (m)	Pendiente 1V:xH	Pendiente (°)	FS (determinístico)	FS (medio)	PoF
1	A	1	TOPSOIL-F	0.30	1.7	30.47	1.19	1.164	8.1 %
1	D	1	TOPSOIL-F	0.30	2.2	24.44	1.51	1.479	0.03 %
1	D	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
1	D	3	GEOMEMBRANA	0.00	2.2	24.44	1.37	1.375	0.05 %
1	D	4	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
2	A	1	TOPSOIL-F	0.30	2.0	26.57	1.38	1.353	0.4 %
3	A	1	TOPSOIL-F	0.30	1.7	30.47	1.19	1.164	8.1 %
3	B	1	TOPSOIL-F	0.50	2.2	24.44	1.32	1.283	0.35 %
3	B	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
3	B	3	ARCILLA	0.30	2.2	24.44	1.18	1.183	4.81 %
4	A	1	TOPSOIL-F	0.30	1.7	30.47	1.19	1.164	8.1 %
4	I	1	TOPSOIL-F	0.50	2.2	24.44	1.32	1.283	0.35 %
4	I	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
4	I	3	TRISOPLAST	0.07	2.2	24.44	3.20	3.202	0 %
5	A	1	TOPSOIL-F	0.30	1.7	30.47	1.19	1.164	8.1 %
5	J	1	TOPSOIL-F	0.30	2.2	24.44	1.51	1.479	0.03 %
5	J	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
5	J	3	RELAVES	0.30	2.2	24.44	1.98	1.992	0 %
6	A	1	TOPSOIL-F	0.30	1.7	30.47	1.164	1.164	8.1 %

Determinación de probabilidad de falla de coberturas. Suelo orgánico con bajo contenido de finos.

Sección	Cobertura	Capa	Material	Espesor (m)	Pendiente 1V:xH	Pendiente (°)	FS (determinístico)	FS (medio)	PoF
1	A	1	TOPSOIL-G	0.30	1.7	30.47	1.17	1.139	5.77 %
1	D	1	TOPSOIL-G	0.30	2.2	24.44	1.51	1.461	0 %
1	D	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
1	D	3	GEOMEMBRANA	0.00	2.2	24.44	1.37	1.370	0.06 %
1	D	4	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
2	A	1	TOPSOIL-G	0.30	2.0	26.57	1.37	1.332	0 %
3	A	1	TOPSOIL-G	0.30	1.7	30.47	1.17	1.139	5.77 %
3	B	1	TOPSOIL-G	0.50	2.2	24.44	1.41	1.366	0 %
3	B	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
3	B	3	ARCILLA	0.30	2.2	24.44	1.18	1.179	5.13 %
4	A	1	TOPSOIL-G	0.30	1.7	30.47	1.17	1.139	5.77 %
4	I	1	TOPSOIL-G	0.50	2.2	24.44	1.41	1.366	0 %
4	I	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
4	I	3	TRISOPLAST	0.07	2.2	24.44	3.16	3.164	0 %
5	A	1	TOPSOIL-G	0.30	1.7	30.47	1.17	1.139	5.77 %
5	J	1	TOPSOIL-G	0.30	2.2	24.44	1.51	1.461	0 %
5	J	2	ARENA	0.15	2.2	24.44	1.32	1.324	0 %
5	J	3	RELAVES	0.30	2.2	24.44	1.98	1.992	0 %
6	A	1	TOPSOIL-G	0.30	1.7	30.47	1.17	1.139	5.77 %

Sección 1,3,4,5,6 - Cobertura A - Fine Topsoil

Capa	Material	Espesor (m)	Pendiente 1V:xH	Pendiente (°)	Peso Unitario (kN/m3)	Ángulo de fricción (°) (medio)	Cohesión (kN/m2) (medio)	FS_mu	PoF
1	TOPSOIL-F	0.3	1.7	30.47	16.5	24.2	1	1.16	8.1 %

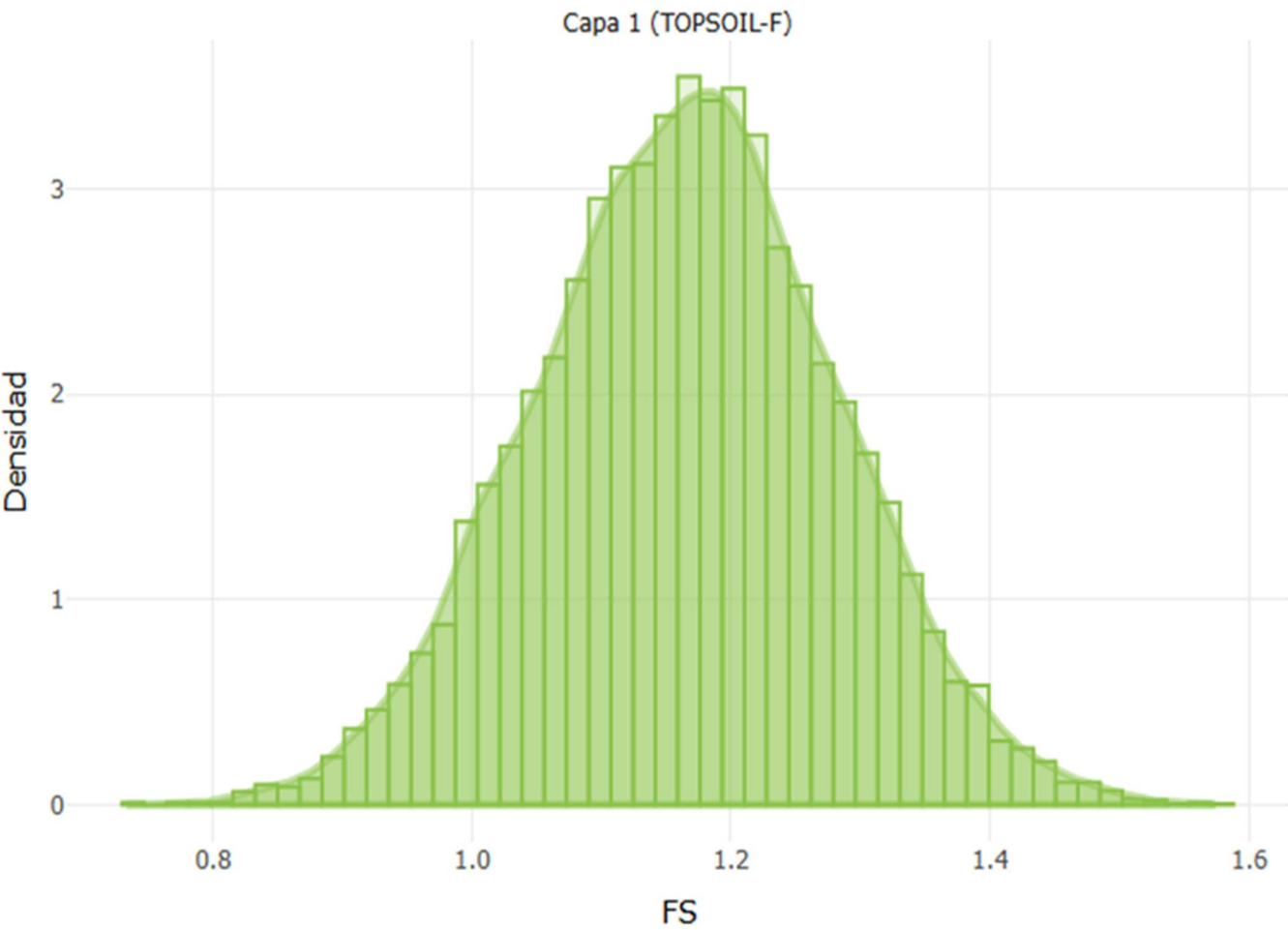


Figura A. 9: Histograma y densidad de probabilidad de FS. Sec. 1,3,4,5,6 - Cob. A - Fine Topsoil

Sección 1,3,4,5,6 - Cobertura A - Coarse Topsoil

Capa	Material	Espesor (m)	Pendiente 1V:xH	Pendiente (°)	Peso Unitario (kN/m3)	Ángulo de fricción (°) (medio)	Cohesión (kN/m2) (medio)	FS_mu	PoF
1	TOPSOIL-G	0.3	1.7	30.47	17	29.1	0.5	1.14	5.77 %

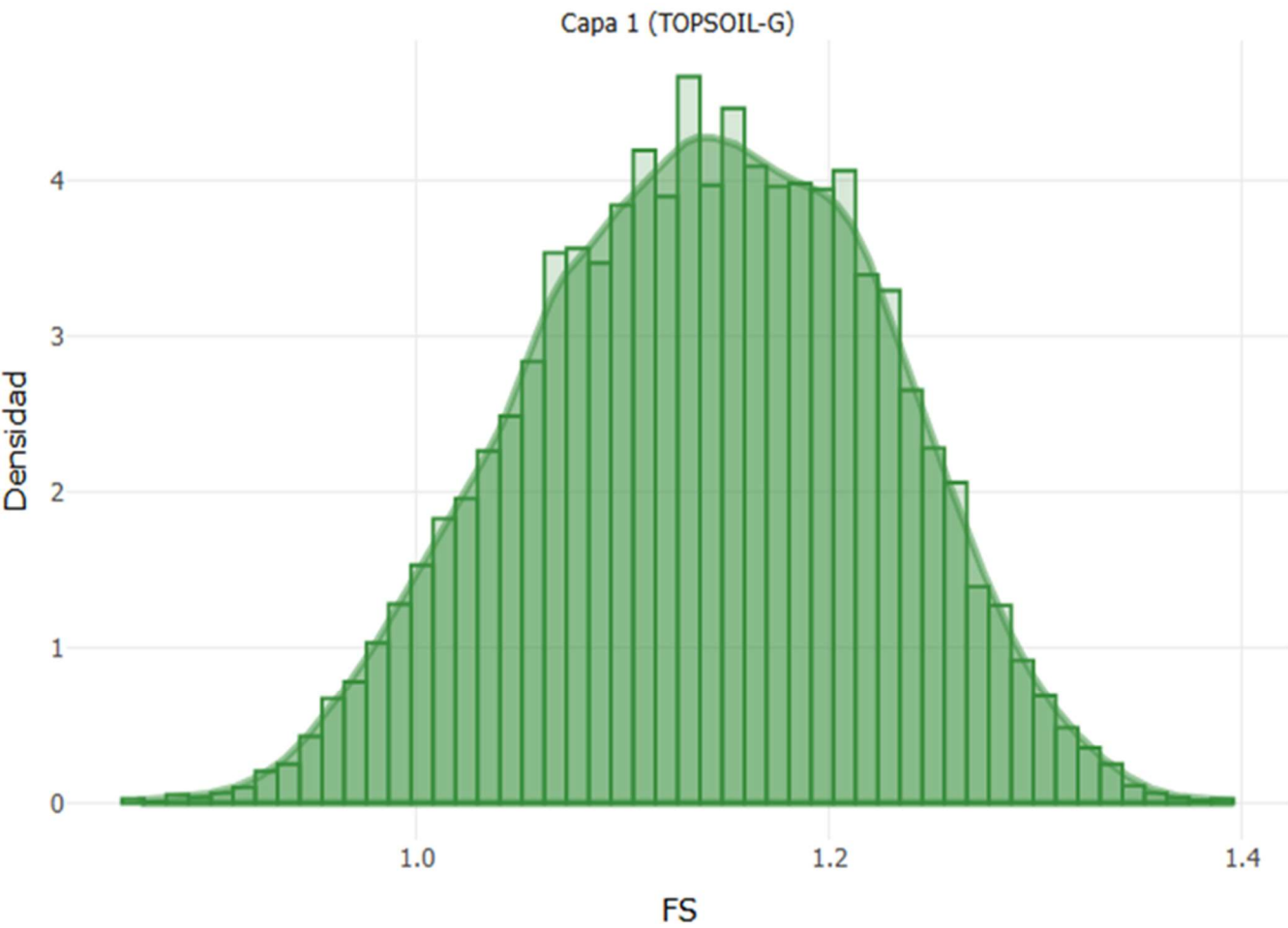


Figura A. 10: Histograma y densidad de probabilidad de FS. Sec. 1,3,4,5,6 - Cob. A - Coarse Topsoil

Sección 3 - Cobertura B - Fine Topsoil

Capa	Material	Espesor (m)	Pendiente 1V:xH	Pendiente (°)	Peso Unitario (kN/m3)	Ángulo de fricción (°) (medio)	Cohesión (kN/m2) (medio)	FS_mu	PoF
1	TOPSOIL-F	0.50	2.2	24.44	16.5	24.2	1	1.28	0.35 %
2	ARENA	0.15	2.2	24.44	20.8	31.0	0	1.32	0 %
3	ARCILLA	0.30	2.2	24.44	17.0	22.0	2	1.18	4.81 %

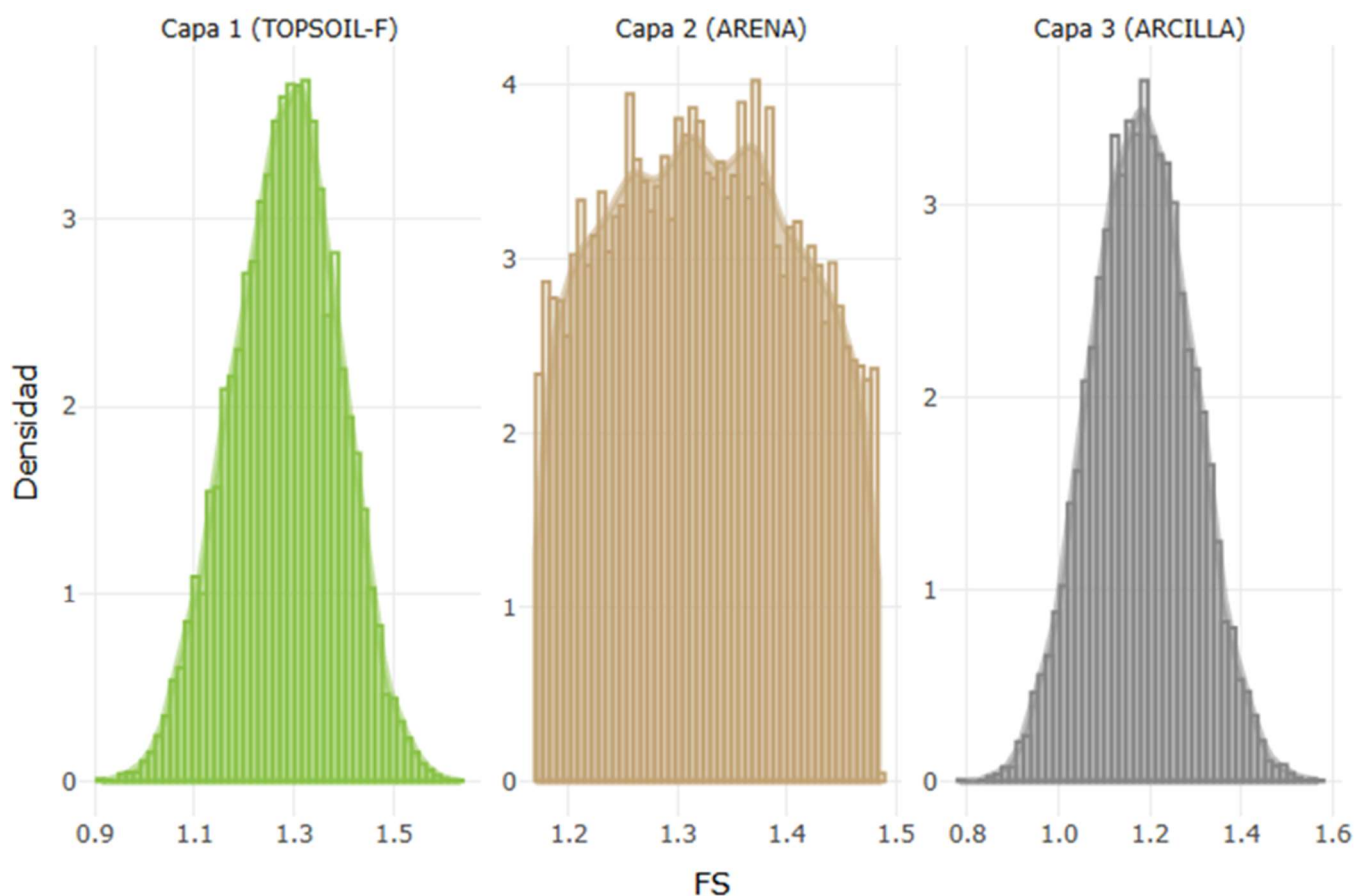


Figura A. 11: Histograma y densidad de probabilidad de FS. Sec. 3 - Cob. B - Fine Topsoil

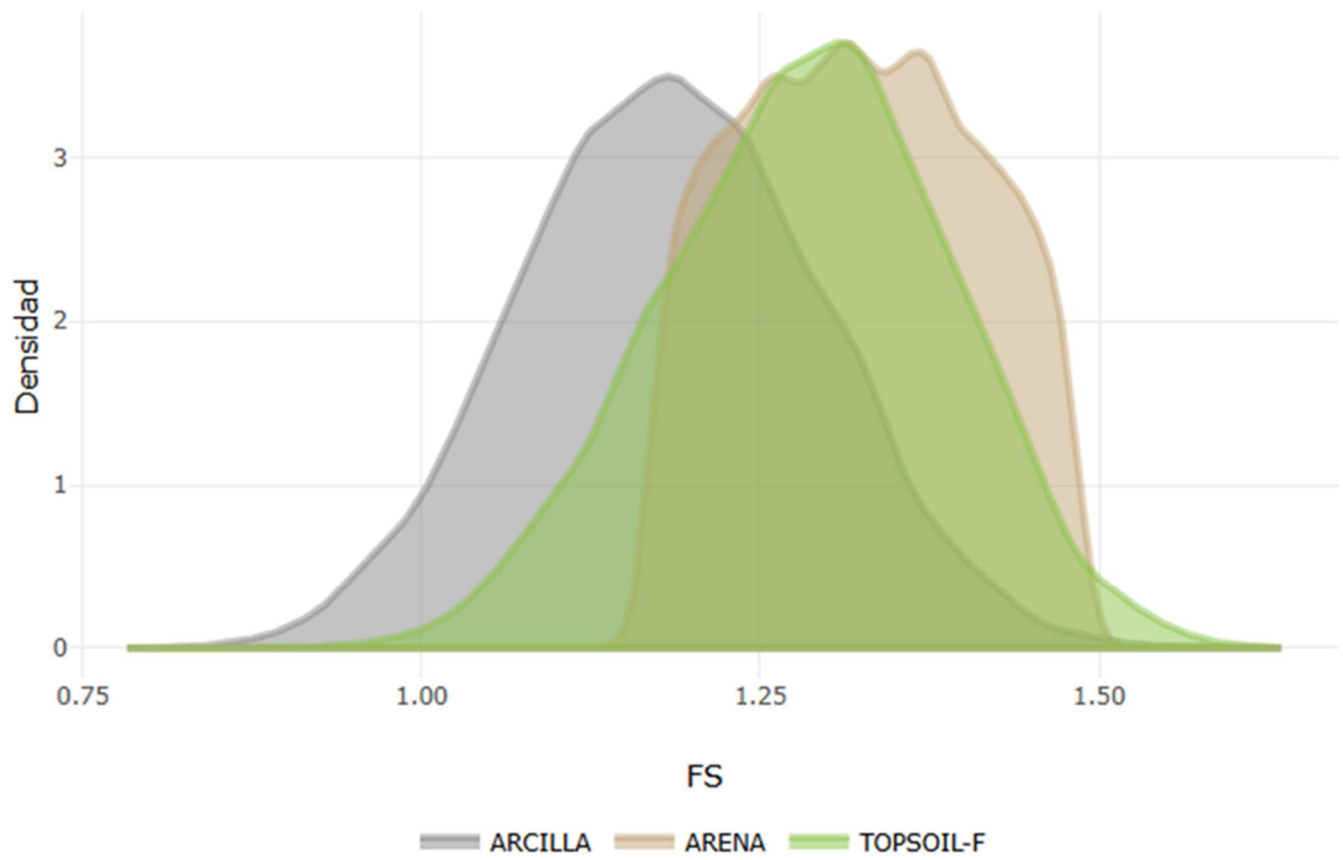


Figura A. 12: Densidad de probabilidad de FS. Sec. 3 - Cob. B - Fine Topsoil

Sección 3 - Cobertura B - Coarse Topsoil

Capa	Material	Espesor (m)	Pendiente 1V:xH	Pendiente (°)	Peso Unitario (kN/m3)	Ángulo de fricción (°) (medio)	Cohesión (kN/m2) (medio)	FS_mu	PoF
1	TOPSOIL-G	0.50	2.2	24.44	17.0	29.1	0.5	1.37	0 %
2	ARENA	0.15	2.2	24.44	20.8	31.0	0.0	1.32	0 %
3	ARCILLA	0.30	2.2	24.44	17.0	22.0	2.0	1.18	5.13 %

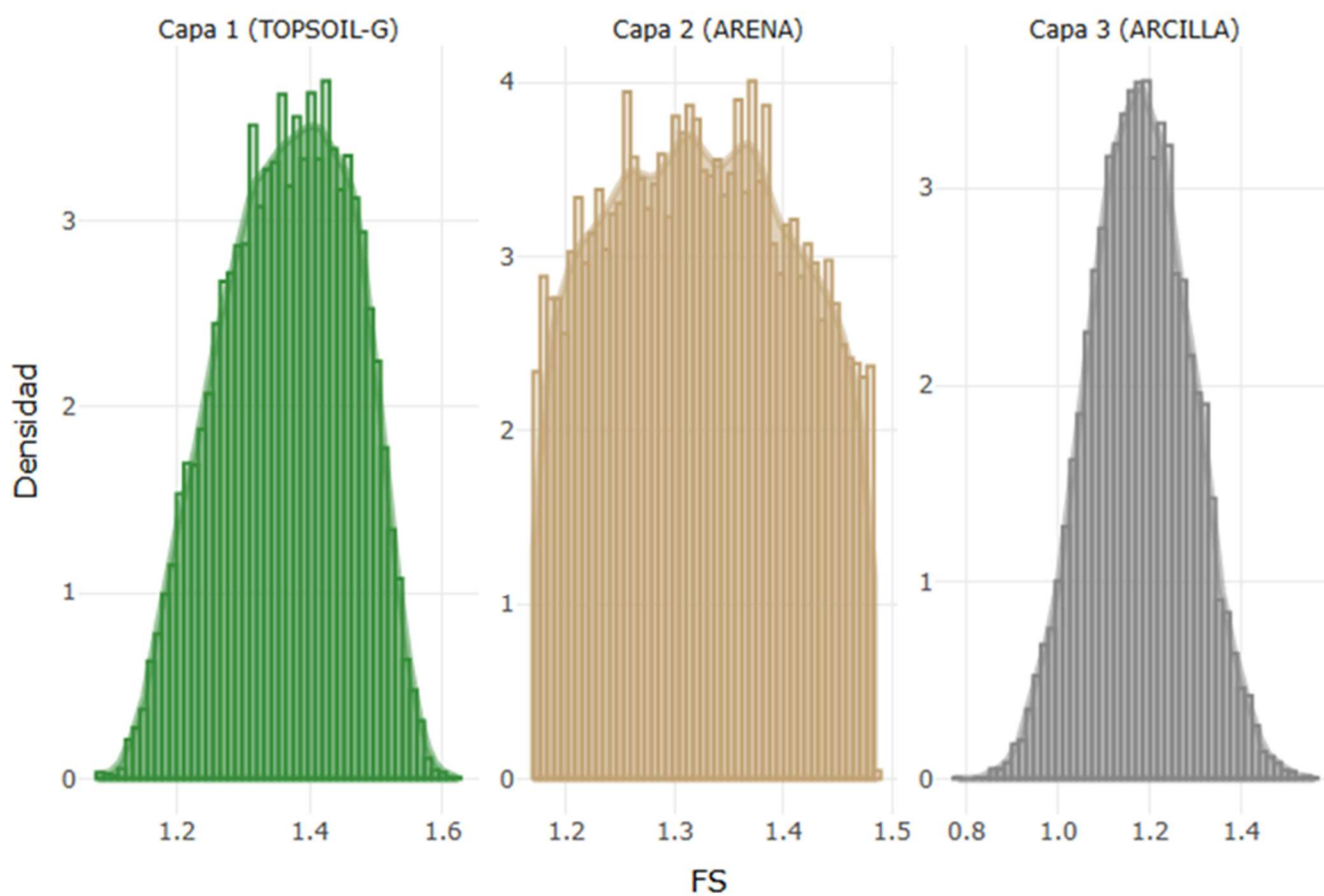


Figura A. 13: Histograma y densidad de probabilidad de FS. Sec. 3 - Cob. B - Coarse Topsoil

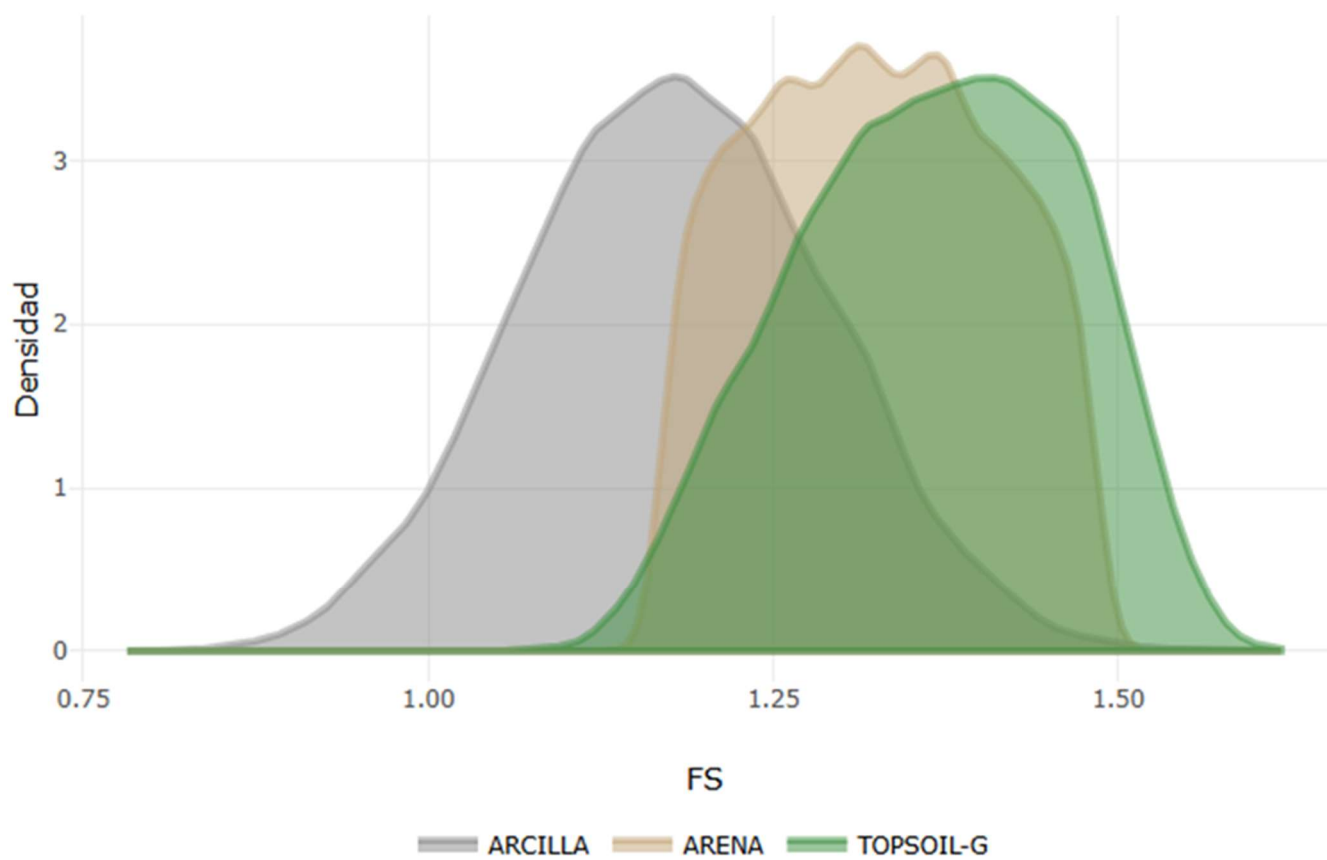


Figura A. 14: Densidad de probabilidad de FS. Sec. 3 - Cob. B - Coarse Topsoil

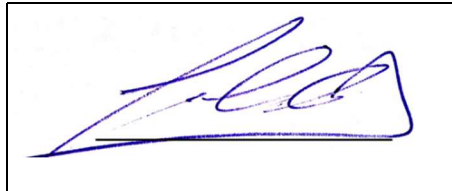
Registro de distribución de SRK

Numero de informe: M-A8Z0-ME02
Numero de revisión: 0
Fecha: 22/08/2025

Detalles de la distribución del documento

Nombre/Título	Empresa	Autorizado por
Iozsef Miskolczi	GeoSysytems Analysis	Juan Mussat
Jaime Banuelos	GeoSysytems Analysis	Juan Mussat

Firma de aprobación:



Detalles de la revisión del documento

Revisión	Fecha	Revisado por	Cambios
0	22/8/25	Juan Mussat	Emisión para comentarios

Este documento está protegido por los derechos de autor de SRK Consulting (Argentina) S.A. No puede ser reproducido ni transmitido de ninguna forma ni por ningún medio a ninguna persona sin el permiso escrito del titular de los derechos de autor, SRK.