



**ESTABILIDAD DE RELLENOS SANITARIOS EN LADERA MEDIANTE
MÉTODOS PROBABILÍSTICOS: ESTUDIO DE CASO**

Trabajo Dirigido de Grado – Programa de Ingeniería Civil

Presentado por:

Luis Diego Bañol Trejos

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Octubre de 2021

RESUMEN

En diferentes países del mundo se han presentado movimientos en masa sobre rellenos sanitarios en ladera, Colombia no es ajena a este tipo de desastres. Tanto el Vertedero de Navarro en Santiago de Cali, como el Relleno Sanitario de Doña Juana en Bogotá D.C. han presentado deslizamientos que avanzaron hasta fuentes hídricas. En la actualidad en el Departamento del Valle del Cauca la disposición final de residuos sólidos domiciliarios se está haciendo en dos rellenos sanitarios regionales “Presidente” y “Colomba-El Guabal”, ambos en ladera. El diseño y operación de estos rellenos se viene haciendo con base en experiencias previas, sin embargo, los análisis no incorporan la incertidumbre en las propiedades mecánicas de los residuos sólidos ni en los agentes detonantes de inestabilidad. En la presente propuesta se explora el uso de tres métodos probabilísticos para evaluar la estabilidad de rellenos sanitarios con el método de equilibrio límite en dos dimensiones en un estudio de caso, en el Vaso 3 Oeste del Relleno de Presidente en el Valle del Cauca. Como resultado final se logró determinar el número de iteraciones necesarias para llegar a una convergencia en la media y la desviación estándar del factor de seguridad por el método MonteCarlo en 100,000 iteraciones en lugar de 21 millones, siendo esto una herramienta para disminuir el consumo de cómputo en términos de tiempo. Al emplear el método de primer orden segundo momento se logró identificar que el parámetro que tiene la mayor influencia en el cálculo del factor de seguridad del vaso es el coeficiente de presión de poros R_u . Y finalmente, se identifica la influencia de la longitud de correlación en el impacto del factor de seguridad, la cual puede generar un incremento o reducción del mismo en función de la geometría final del relleno.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Identificación del problema.....	1
1.2.	Objetivos	3
1.1.1.	General	3
1.1.2.	Específicos.....	3
1.3.	Contenido del documento escrito	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	Métodos probabilísticos empleados en el análisis de estabilidad de taludes	5
2.1.1.	Método de Monte Carlo (MCM)	5
2.1.2.	Método de primer orden y segundo momento (FOSM)	6
2.1.3.	Método de estimativas puntuales (PEM).....	7
2.1.4.	Método simplificado de Duncan	7
2.1.5.	Campos aleatorios con elementos finitos (RFEM).....	9
2.2.	Aplicación de métodos probabilísticos en el análisis de estabilidad de taludes..	10
2.2.1.	Análisis de estabilidad probabilístico mediante equilibrio límite	11
2.2.2.	Análisis de estabilidad probabilístico mediante elementos finitos.....	15
2.3.	Estabilidad de rellenos sanitarios	17
2.3.1.	Deslizamientos históricos en rellenos sanitarios	17
2.3.2.	Propiedades mecánicas de los residuos sólidos.....	23
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.1.	Descripción del estudio de caso	27
3.1.1.	Caracterización geotécnica del subsuelo	30
3.1.2.	Instrumentación	33
3.2.	Escenarios para la modelación de la estabilidad	37

3.2.1.	Selección del perfil para el análisis de estabilidad	37
3.2.2.	Escenarios para el análisis de estabilidad.....	38
3.3.	Estrategia para el análisis probabilístico	40
3.3.1.	Detalles del análisis probabilístico con el método de MonteCarlo (MCM).	44
3.3.2.	Detalles del análisis por el método de primer orden segundo momento (FOSM)	45
3.2.3.	Detalles para el análisis con campos aleatorios (RLEM).....	47
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	49
4.1.	Definición de la variabilidad para el análisis probabilístico	49
4.2.	Análisis de estabilidad.....	55
4.2.1.	Análisis probabilístico con el método de MonteCarlo (MCM).....	59
4.2.2.	Análisis aproximado por el método de primer orden segundo momento (FOSM)	65
4.2.3.	Análisis por campos aleatorios considerando la variabilidad espacial (RLEM) 67	
4.3.	Comparación de los diferentes métodos.....	80
5.	CONCLUSIONES	82
5.1.	Conclusiones	82
5.2.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	83
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

Lista de Figuras

Figura 1. Malla de elementos finitos para un talud homogéneo y elementos mal formados en la pendiente del talud (Griffiths & Fenton, 2004).....	9
Figura 2. Efecto de la correlación espacial (Griffiths & Fenton, 2004).....	10
Figura 3. Contribución de cada variable en la varianza del factor de seguridad (Alonso, 1976).	11
Figura 4. Influencia de la correlación espacial en la probabilidad de falla (Cho, 2007). .	12
Figura 5. Probabilidad de falla en función del número de iteraciones (Cho, 2010).	13
Figura 6. Contribución de los parámetros en la varianza del FS (Otálvaro & Cordão-Neto, 2013).	13
Figura 7. Localización de las pantallas de pilotes (Chen et al., 2020).....	14
Figura 8. Comparación de la probabilidad de falla entre (a) suelo espacialmente constante, (b) suelo de variabilidad espacial (Chen et al., 2020).....	14
Figura 9. Efecto del coeficiente de variación muestral en la desviación estándar del factor de seguridad (Dyson & Tolooiyan, 2020).....	15
Figura 10. Convergencia del FS para los métodos (Dyson & Tolooiyan, 2020).....	16
Figura 11. (a) Factor de seguridad (F s) a partir de análisis deterministas, y (b) probabilidad de falla (PAGS F) versus ángulo de fricción medio para pendientes de suelo reforzado y no reforzado y diferentes COV para el ángulo de fricción del suelo (COV c = 0)(Luo et al., 2016).	17
Figura 12. Vista aérea del deslizamiento en el relleno de Cincinnati Ohio (Stark et al., 2000).	18
Figura 13. Vista aérea del deslizamiento de Doña Juana en Bogotá Colombia (Caicedo et al., 2002).	19
Figura 14. Vista aérea del movimiento en masa en el relleno de Payatas Filipinas (Merry et al., 2005).	20
Figura 15. Efecto del deslizamiento de Navarro (Ramírez, 2008 tomado de IGEEI, 2015).	21

Figura 16. Vista aérea del movimiento en masa en el relleno de Bandung Indonesia (Lavigne et al., 2014).....	21
Figura 17. Vistas tomadas con vehículos aéreos no tripulados en el deslizamiento de Shenzhen China (Yin et al., 2016).....	22
Figura 18. Análisis con sensores remotos de los efectos del deslizamiento en el relleno de Al-Qurain Kuwait (Savchyn & Lozynskyi, 2019).....	23
Figura 19. Vista aérea del relleno sanitario de Presidente (tomado de GoogleMaps).	28
Figura 20. Configuración general del relleno sanitario de Presidente (C&C Ingeología y Geotécnia S.A.S, 2020).....	28
Figura 21. Distribución de la precipitación en el año de estaciones próximas al relleno (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).....	30
Figura 22. Perfiles de velocidad de onda de corte obtenidos por ReMi (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).....	32
Figura 23. Localización de los puntos de control topográfico en el Vaso 3 Oeste (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).....	34
Figura 24. Asentamientos acumulados entre noviembre de 2019 y septiembre de 2020 (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).	34
Figura 25. Localización de instrumentación piezométrica y perfiles disponibles para análisis en el Vaso 3 Oeste del relleno sanitario de Presidente, sin escala (C&C Ingeología y Geotécnia S.A.S, 2020).....	36
Figura 26. Evolución de la presión de poros en función del parámetro R_u (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).....	37
Figura 27. Secciones transversales con disponibilidad de información (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).....	38
Figura 28. Perfil 1, seleccionado para el análisis de estabilidad.....	38
Figura 29. Perfil típico en dirección SE a NW PE-07 Vaso 3 Oeste con ampliación del relleno (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).....	39

Figura 30. Perfil típico SUR Fase W Vaso 3 Oeste en condiciones a noviembre de 2020 (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).	39
Figura 31. Método gráfico para aplicar la regla 3σ , ejemplo de estimación de la desviación estándar en una envolvente de resistencia (Duncan, 2000, tomado de Hoyos y Otálvaro, 2007).	41
Figura 32. Distribución normal. (Recuperado: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_normal#/media/Archivo:Normal_distribution_pdf.png).	44
Figura 33. Distribución triangular. (Recuperado: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_triangular#/media/Archivo:Triangular_distribution_PMF.png).	45
Figura 34. Definición gráfica de la longitud de correlación (Phoon & Kulhawy, 1999).	48
Figura 35. Vista en sección de los piezómetros más cercanos al perfil de análisis.	51
Figura 36. Lecturas del piezómetro 03 en el tiempo.	52
Figura 37. Lecturas del piezómetro 08 en el tiempo.	52
Figura 38. Lecturas del piezómetro 02 en el tiempo.	53
Figura 39. Lectura del piezómetro 04 en el tiempo.	53
Figura 40. Lecturas del piezómetro 05 en el tiempo.	54
Figura 41. Lecturas del piezómetro 07 en el tiempo.	54
Figura 42. Escenario P1Act-E1, parámetros geotécnicos y R_u empleados en la modelación.	56
Figura 43. Escenario P2Ret-E1, parámetros geotécnicos y R_u empleados en la modelación.	56
Figura 44. Factor de seguridad determinístico para el escenario P1Act-E1.	57
Figura 45. Factor de seguridad determinístico para el escenario P1Act-E2.	57
Figura 46. Factor de seguridad determinístico para el escenario P2Ret-E1.	58
Figura 47. Factor de seguridad determinístico para el escenario P2Ret-E1.	58

Figura 48. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E1.	60
Figura 49. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E1.	61
Figura 50. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E2.	61
Figura 51. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E2.	61
Figura 52. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E1.....	62
Figura 53. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E1.	62
Figura 54. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E2.....	63
Figura 55. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E2.	63
Figura 56. Efecto del número de iteraciones en la desviación estándar en el MCM para la condición actual.	64
Figura 57. Efecto del número de iteraciones en la desviación estándar en el MCM para la condición de retoma.	65
Figura 58. Variación del peso unitario en un relleno sanitario en función de la profundidad (Zekkos et al., 2006).	67
Figura 59. Variabilidad espacial del parámetro cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	68
Figura 60. Variabilidad espacial del parámetro Angulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9M.....	69
Figura 61. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	70
Figura 62. Variabilidad espacial del parámetro de cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	71

Figura 63. Variabilidad espacial del parámetro Angulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.	72
Figura 64. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	73
Figura 65. Variabilidad espacial del parámetro cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	74
Figura 66. Variabilidad espacial del parámetro Angulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.	75
Figura 67. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	76
Figura 68. Variabilidad espacial del parámetro cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	77
Figura 69. Variabilidad espacial del parámetro ángulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.	78
Figura 70. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.....	79

Lista de tablas

Tabla 1. Efectos de desastres asociados con deslizamientos en rellenos sanitarios (modificado Nikulishyn et al., 2020).	2
Tabla 2. Probabilidades de que el factor de seguridad sea menor que 1.0, basado en la distribución logarítmica normal del factor de seguridad (Duncan, 2000b).	8
Tabla 3. Tiempo computacional de los diferentes métodos (Dyson & Tolooiyan, 2020). 16	
Tabla 4. Propiedades típicas de residuos sólidos domiciliarios en rellenos sanitarios.	24
Tabla 5. Parámetros de resistencia al corte (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).	31
Tabla 6. Perfil de velocidad de onda de corte obtenido por refracción sísmica para los 30 m superiores en el Vaso 3 del relleno de Presidente (Grupo Ingex S.A.S, 2021).	32
Tabla 7. Escenarios seleccionados para la modelación con el perfil 1.	40
Tabla 8. Coeficiente de variación, COV, para los parámetros de resistencia al corte en algunos suelos residuales tropicales (Hoyos y Otálvaro, 2007).	42
Tabla 9. Resumen de las variaciones de los parámetros analizados para su utilización en las modelaciones por métodos probabilísticos.	50
Tabla 10. Resumen de los parámetros de resistencia al corte y propiedades de los RSU para la modelación de la estabilidad.	51
Tabla 11. Valores típicos del parámetro de presión de poros R_u	55
Tabla 12. Resumen de los factores de seguridad determinísticos,	59
Tabla 13. Índices de confiabilidad. Modificado de(.....	60
Tabla 14. Efecto del número de iteraciones en la esperanza y la desviación estándar con el MCM.	64
Tabla 15. Resultados del método FOSM para el escenario P1Act-E1.	66
Tabla 16. Resultados del método FOSM para el escenario P1Act-E2.	66
Tabla 17. Resultados del método FOSM para el escenario P2Ret-E1.	67

Tabla 18. Resultados del método FOSM para el escenario P2Ret-E2.....	67
Tabla 19. Efecto de la longitud de correlación en el factor de seguridad para los escenarios analizados.....	80
Tabla 20. Comparación de los resultados obtenidos con los tres métodos.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

a, b y c:	parámetros de la función de distribución triangular
AEV:	valor de entrada de aire de la curve de retención de agua del suelo
ASCE:	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles
bpf:	golpes por pie para el ensayo de penetración estándar
c':	cohesión efectiva para el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb
COV:	coeficiente de variación muestral
CVC:	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
d:	número de desviaciones estándar en función de la confiabilidad
DS-CD:	prueba de corte directo consolidada drenada
E[x _i]:	esperanza de la variable aleatoria i
F:	función a la que se le desea calcular la variabilidad
F ¹ :	función evaluada en el valor medio o central
F ² :	función evaluada en el valor medio más un incremento de una variable
FORM:	método de primer orden de confiabilidad
FOSM:	Método de primer orden segundo momento
FS:	factor de seguridad
HCV:	valor máximo concebible para una variable aleatoria
k:	permeabilidad saturada del suelo
km:	kilómetros
kN/m ³ :	kilo Newton por metro cúbico
kN:	kilo Newton 10 ³ N
kPa:	kilo Pascales 10 ³ Pa

LCV:	valor mínimo concebible para una variable aleatoria
LEM:	método de equilibrio límite
m:	metros
M-C:	criterio de resistencia de Mohr-Coulomb
MCM:	Método de Monte Carlo
mm:	milímetros
msnm:	metros sobre el nivel del mar
n:	número de variables aleatorias involucradas en el análisis
N_{MCM} :	Número de iteraciones en el método de Monte Carlo
PEM:	Método de estimativas puntuales
pf :	probabilidad de falla
RFEM:	Elementos finitos aleatorios
RLEM:	Equilibrio límite aleatorio
RSU:	residuos sólidos urbanos
ton:	toneladas fuerza
v_p :	velocidad de propagación de ondas compresivas
v_s :	velocidad de propagación de ondas de cortante
v_{S30} :	velocidad promedio de ondas de cortante para los 30m superiores
ΔF :	cambio en una función cuando hay cambios en una variable aleatoria
Δx_i :	incremento de una variable aleatoria, igual al 10% de la desviación
Θ_{LnC} :	longitud de correlación para una función de distribución log-normal
δv :	distancia o longitud de correlación para una variación unidimensional
ε :	intervalo de confiabilidad en la definición del número de iteraciones
ϕ' :	ángulo de fricción efectiva para el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb

γ :	peso unitario del suelo
θ_c :	longitud de correlación para una función de distribución normal
σ_i^2 :	varianza de la variable aleatoria i
σ_{xi} :	desviación estándar de la variable aleatoria i

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad una especialidad de la mecánica de suelos es la mecánica de residuos sólidos (*Waste Mechanics*), desde 2008 a partir de la iniciativa de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés), ha venido recogiendo información acerca de la temática específica, de acuerdo con Zekkos (2008), el trabajo se ha concentrado en:

- Desarrollo de consenso en los procedimientos y guías para la caracterización de residuos sólidos en campo y laboratorio;
- Recopilación del estado del conocimiento de los residuos sólidos y propiedades encontradas en diferentes investigaciones para su uso en la ingeniería práctica;
- Identificar las necesidades en la mecánica de residuos sólidos.

Por motivos ambientales, sociales y políticos, entre otros, en el Valle del Cauca se encuentran sólo dos rellenos sanitarios habilitados, el de Presidente (San Pedro) y el de Colomba El Guabal (Yotoco), rellenos que reciben residuos de la ciudad de Santiago de Cali después del cierre del “Basuro de Navarro” el cual operaba desde 1969 que fue diagnosticado en 1999 por la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC), como inadecuado y en 2001 se le negó la solicitud de operar como relleno sanitario, en 2001 el vertedero de Navarro presentó un deslizamiento que involucró al menos 350,000 ton de residuos taponando el canal CVC sur a lo largo de 150 m, y finalmente en 2008 CVC ordenó el cierre del mismo (Campo et al., 2019).

1.1. Identificación del problema

De acuerdo con Nikulishyn et al. (2020), los deslizamientos en rellenos sanitarios se producen con cierta frecuencia a nivel mundial (ver Tabla 1) , estos generan efector o pérdidas, de vidas, de viviendas y efectos ambientales. Esto sumado al crecimiento de la población mundial y al incremento que trae consigo en el desecho de residuos y necesidad de almacenamiento en rellenos sanitarios, requiere de forma constante trabajo al respecto.

Tabla 1. Efectos de desastres asociados con deslizamientos en rellenos sanitarios (modificado Nikulishyn et al., 2020).

Ciudad o relleno (País)	Año	Pérdidas	Referencia
Estambul (Turquía)	1993	11 viviendas destruidas	(Kocasoy and Curi, 1995)
Bogotá (Colombia)	1997	Desastre ambiental, flujo hacia una fuente hídrica	(Caicedo et al., 2002)
Manila (Filipinas)	2000	278 víctimas fatales	(Nikulishyn et al., 2020)
Bandung (Indonesia)	2005	143 víctimas fatales 71 viviendas destruidas	(Lavigne et al., 2014; Xu et al., 2016)
Shenzhen (China)	2015	77 víctimas fatales 33 viviendas destruidas	(Yin et al., 2016; Ouyang et al., 2016)
Al-Qurain (Kuwait)	2016	Afectación de 17600 m ² de bosques	(Lozynskyi et al., 2016).

Por un lado, en la Tabla 1, se evidencia como los movimientos en masa sobre rellenos sanitarios de ladera pueden traer consigo pérdidas desde ambientales, de infraestructura y finalmente de vidas humanas. Por tanto, es necesario avanzar en el conocimiento de su comportamiento desde la reciente área de geotecnia denominada mecánica de residuos sólidos.

Por otro lado, en los últimos años se han realizado avances significativos en las metodologías para evaluar los diferentes escenarios geotécnicos que se presentan en la práctica, métodos como los deterministas que son de menor complejidad de cálculo pueden ser demasiado conservadores, es por esto que se propone la introducción de métodos probabilísticos para definir la variabilidad de los parámetros introducidos en los modelos geotécnicos. Y si algún geomaterial presenta variabilidad son los residuos sólidos domiciliarios, desde su composición, esta depende de las características culturales de consumo de bienes y alimentos entre otros, sumado también a una incertidumbre derivada del poco conocimiento que tenemos del comportamiento del material.

Finalmente, en el presente trabajo de grado se abordó desde los métodos probabilísticos la identificación de las variables de mayor incidencia en la estabilidad de un

relleno sanitario en ladera, empleando para ello una geometría de un caso real, seleccionando por disponibilidad de información el Vaso 3 Oeste del Relleno Sanitario de Presidente en el Valle del Cauca.

1.2.Objetivos

A continuación, se describen los objetivos que pretende cumplir la presente propuesta de trabajo de grado.

1.1.1. General

Estudiar la estabilidad de un relleno sanitario en ladera empleando métodos probabilísticos: estudio de caso Vaso 3 Oeste del Relleno Sanitario de Presidente en el Valle del Cauca, Colombia.

1.1.2. Específicos

- Recopilar información geotécnica de caracterización de rellenos sanitarios.
- Definir la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y del peso unitario para el análisis probabilístico.
- Comparar los resultados obtenidos por diferentes métodos probabilísticos para el estudio de caso.

1.3.Contenido del documento escrito

En el Capítulo 1 está contenida la identificación del problema, lo objetivos y el alcance de la investigación.

El Capítulo 2 presenta la revisión bibliográfica, se presentan inicialmente los métodos probabilísticos, seguido de algunos ejemplos de uso en la evaluación de estabilidad de taludes, se hace una revisión histórica de deslizamientos en rellenos sanitarios, y finalmente se recopilan propiedades geotécnicas de rellenos sanitarios.

Dentro del Capítulo 3 se describe el caso de estudio y se define la metodología adoptada para los análisis probabilísticos.

El Capítulo 4 se incluye el análisis de los resultados de las modelaciones con los escenarios propuestos para cada uno de los métodos probabilísticos empleados.

Finalmente, en el Capítulo 5 son incluidas las conclusiones y sugerencias para trabajos futuros.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente capítulo recoge el marco teórico y la revisión bibliográfica que dan soporte a la presente propuesta de trabajo de grado. En la primera parte se exponen los métodos más usuales empleados en el análisis probabilístico para estabilidad de taludes. Mientras que la segunda parte incluye algunos resultados prácticos y formas de aplicación de estos métodos en los análisis de estabilidad de taludes. Finalmente, la tercera parte hace una breve revisión de la estabilidad de rellenos sanitarios.

2.1. Métodos probabilísticos empleados en el análisis de estabilidad de taludes

De acuerdo con Otálvaro & Cordão-Neto (2013), la incertidumbre siempre está presente en todo análisis geotécnico. Debido a la variabilidad natural del suelo o por el escaso conocimiento del comportamiento del suelo, comúnmente reflejado en los modelos constitutivos para los que representan. Según Christian (2004), los ingenieros geotécnicos han desarrollado varias estrategias para hacer frente a la incertidumbre, entre ellas: ignorarla, ser conservador, utilizar el método de observación y cuantificar la incertidumbre. En la actualidad disponemos de diferentes métodos probabilísticos para evaluar los efectos de la variabilidad en el desempeño de estructuras geotécnicas, los cuales se pueden clasificar en los que consideran o ignoran la variabilidad espacial de las propiedades de los materiales. Tres métodos que ignoran la variabilidad espacial se han vuelto populares entre los ingenieros geotécnicos, el método de Monte Carlo (MCM), el método de primer orden y segundo momento (FOSM) y el método de estimación puntual (PEM). Entretanto, dentro de los métodos que incorporan la variabilidad espacial se destaca el método de campos aleatorios mediante elementos finitos (RFEM).

2.1.1. Método de Monte Carlo (MCM)

Según Otálvaro et al. (2011), la simulación por el método de Monte Carlo puede resolver problemas generando números aleatorios adecuados y evaluando la variable dependiente para un gran número de posibilidades. El MCM involucra la definición de variables que generan incertidumbre y función de distribución probabilística, “el número de ensayos de Monte Carlo necesarios depende del nivel de confianza deseado en la solución,

asi como el número de variables que se están considerando” (Harr,1987) y puede estimarse a partir de:

$$N_{MCM} = \left(\frac{d^2}{4(1 - \varepsilon)^2} \right)^n \quad (1)$$

donde:

N_{MCM} : Numero de iteraciones de Monte Carlo.

d: Desviación normal estándar correspondiente al nivel de confianza.

ε : Nivel de confianza deseado (0 a 100%) expresado de norma decimal

n: Numero de variables

2.1.2. Método de primer orden y segundo momento (FOSM)

Basado en la expansión en serie de Taylor de la función $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ en el que la función g de varias variables de entrada x_n que representa la incertidumbre de los parámetros. Para las variables de entrada no correlacionadas, la media y la varianza de la función están dados por las ecuaciones 2 y 3 respectivamente.

$$E[F] \cong g(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n]) \quad (2)$$

$$\sigma^2[F] \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2 \sigma^2[x_i] \quad (3)$$

donde:

E: Esperanza o media

σ^2 : Varianza

Christian y Col (1992), proponen calcular la derivada de la ecuación (3) con la aproximación en diferencias finitas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial g}{\partial x_i} \cong \frac{F^1 - F^2}{x_i^1 - x_i^2} = \frac{\Delta F}{\Delta x_i} \quad (4)$$

donde:

F^1 es la función calculada en el valor x^1 y F^2 es la función calculada en el valor x^2

2.1.3. Método de estimativas puntuales (PEM)

Rosenblueth (1975, 1981), propuso el método PEM que proporciona una aproximación de los momentos de orden inferior para la variable dependiente a partir de los momentos de orden inferior de la variable independiente x . En el método PEM, todas las combinaciones posibles se tienen en cuenta para la estimación de dos puntos para cada variable independiente. Si el pdf se considera simétrico, los puntos estimados se separan una vez que la desviación estándar está por debajo y por encima del promedio, la media y la varianza se pueden calcular como:

$$E[F] \cong \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^n} g[x_j] \quad (5)$$

$$\sigma^2[F] = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^n} (g[x_j] - E[F])^2 \quad (6)$$

donde:

$g[x_j]$ = obtenido con la función que definimos la dependencia de $g[x_j]$ y las variables independientes, sustituyendo alternativamente los valores de estas variables $E[x_i] \pm \sigma$, $j = 1, 2, \dots, n$, obteniendo valores 2^n de $g[x_j]$.

2.1.4. Método simplificado de Duncan

Según Duncan (2000), los análisis de confiabilidad simples, que no involucran teorías complejas ni términos desconocidos, pueden usarse en la práctica rutinaria de la ingeniería geotécnica. Estos análisis requieren poco esfuerzo más allá del involucrado en los análisis geotécnicos convencionales. Proporcionan un medio para evaluar los efectos combinados de las incertidumbres en los parámetros involucrados en los cálculos y ofrecen un complemento útil para los análisis convencionales. Los parámetros adicionales necesarios para los análisis de confiabilidad: desviaciones estándar de los parámetros.

Utilizan la técnica de la serie de Taylor (Wolff 1994; US Army Corps of Engineers 1997, 1998), para estimar las desviaciones estándar y el coeficiente de variación del factor de seguridad. A continuación, está la siguiente tabla donde se resume el resultado de los cálculos de la variación del factor de seguridad al deslizamiento de un muro de retención.

$$\sigma_F = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_4}{2}\right)^2}$$

$$V_F = \frac{\sigma_F}{F_{MLV}}$$

(7)

(8)

Donde, F_{MLV} es el valor más probable del factor de seguridad, calculado utilizando los mejores valores estimados para todos los parámetros.

Tabla 2. Probabilidades de que el factor de seguridad sea menor que 1.0, basado en la distribución logarítmica normal del factor de seguridad (Duncan, 2000b).

F_{MLV}	Coeficiente de variación del factor de seguridad (V_F)															
	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	80%
1.05	0.8%	12%	22%	28%	33%	36%	39%	41%	44%	47%	49%	53%	55%	58%	60%	63%
1.10	0.00%	0.9%	6%	12%	18%	23%	27%	30%	35%	40%	43%	48%	51%	54%	59%	63%
1.15	0.00%	0.03%	1.1%	4%	9%	13%	16%	21%	27%	33%	37%	43%	48%	51%	56%	60%
1.16	0.00%	0.01%	0.7%	3%	8%	12%	15%	20%	26%	32%	36%	42%	47%	50%	56%	60%
1.18	0.00%	0.00%	0.3%	2%	5%	9%	13%	17%	23%	29%	34%	41%	45%	49%	55%	60%
1.20	0.00%	0.00%	0.13%	1.2%	4%	7%	11%	14%	21%	27%	32%	39%	44%	48%	54%	60%
1.25	0.00%	0.00%	0.01%	0.3%	1.4%	4%	6%	9%	15%	22%	27%	35%	41%	45%	51%	58%
1.30	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.5%	1.6%	3%	6%	11%	17%	23%	31%	37%	42%	49%	57%
1.35	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.2%	0.7%	1.9%	4%	8%	14%	19%	28%	34%	40%	47%	55%
1.40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.5%	1.0%	2%	5%	11%	16%	25%	32%	37%	45%	53%
1.50	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.2%	0.7%	3%	6%	11%	19%	27%	32%	41%	49%
1.60	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.09%	0.2%	1.1%	4%	7%	15%	22%	28%	38%	46%
1.70	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.08%	0.5%	2%	5%	12%	19%	25%	34%	42%
1.80	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.2%	1.2%	3%	9%	15%	22%	31%	39%
1.90	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.08%	0.65%	3%	7%	13%	19%	29%	37%
2.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.05%	0.36%	1.3%	5%	11%	17%	26%
2.20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.10%	0.56%	1.3%	8%	13%	22%	31%
2.40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.23%	1.9%	5%	10%	19%	28%
2.60	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.09%	1.1%	4%	7%	13%	20%
2.80	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.66%	3%	6%	13%	21%
3.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.59%	1.8%	4%	11%	19%

Nota: F_{MLV} = factor de seguridad calculado utilizando los valores más probables de los parámetros.

La teoría de la confiabilidad se puede aplicar a la ingeniería geotécnica mediante procedimientos simples y no es necesario que requiera más datos de los que se requieren para los análisis deterministas convencionales. Con un esfuerzo adicional relativamente pequeño para realizar análisis de confiabilidad, el valor de los análisis se puede aumentar considerablemente. Se propone que la probabilidad de falla no debe verse como un reemplazo del factor de seguridad, sino como un complemento. Calcular tanto el factor de seguridad como la probabilidad de falla es mejor que calcular uno solo (Duncan, 2000b).

2.1.5. Campos aleatorios con elementos finitos (RFEM)

De acuerdo con Griffiths & Fenton (2004), el método de campos aleatorios por elementos finitos es un poderoso método para incluir el efecto de la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte espacialmente aleatorios y la correlación espacial de los mismos. El RFEM combina el análisis por el método de los elementos finitos con la teoría de campos aleatorios. A continuación, se presenta una breve descripción del método:

1. De forma similar al método de los elementos finitos tradicional, el método requiere la discretización del contorno en elementos individuales. Dentro de la propuesta de Griffiths & Fenton (2004), los problemas de elementos finitos mal formados, como los que se producen en el talud homogéneo de la Figura 1 son corregidos en el mapeo de los mismos.
2. En un campo aleatorio, el valor asignado a cada celda o elemento finito en este caso es en sí mismo una variable aleatoria, mientras que la malla de la Figura 1, que tiene 910 elementos finitos, en este caso contiene 910 variables aleatorias.

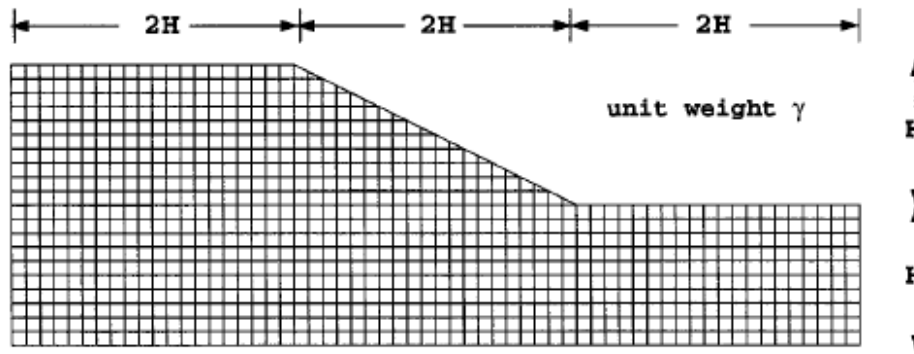


Figura 1. Malla de elementos finitos para un talud homogéneo y elementos mal formados en la pendiente del talud (Griffiths & Fenton, 2004).

3. Las variables aleatorias se pueden correlacionar con una otra controlando la longitud de correlación espacial (θ_{LNC}). En la Figura 2 se presentan mallas con dos correlaciones espaciales diferentes, una de nivel bajo (0.2) y otra de nivel alto (2.0). Los colores más oscuros representan un material con resistencia alta, mientras que los claros con resistencia baja.

4. Definido el campo aleatorio la técnica involucra un análisis esfuerzo deformación a partir de la aplicación del campo gravitacional, empleando un modelo elástico perfectamente plástico atendiendo el criterio de rotura de Tresca para el caso del análisis no drenado, y un algoritmo que permite la redistribución de los esfuerzos a los vecinos cuando algún elemento finito falla, proceso que se hace de forma iterativa.
5. Finalmente, se considera que el talud falla cuando la malla de elementos finitos no logra converger en 500 iteraciones.

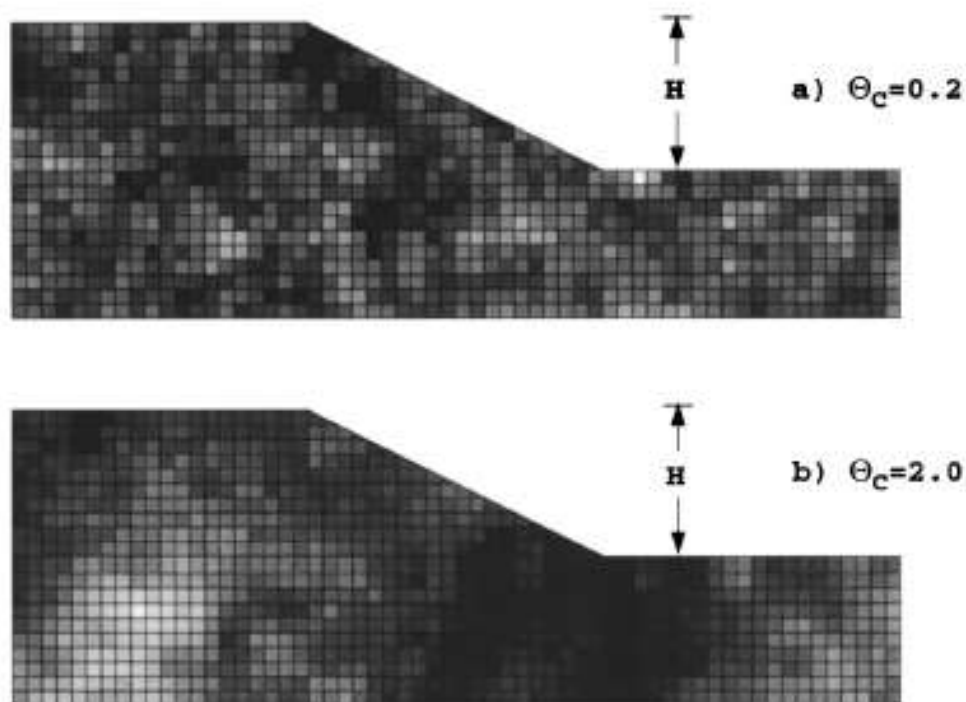


Figura 2. Efecto de la correlación espacial (Griffiths & Fenton, 2004).

2.2. Aplicación de métodos probabilísticos en el análisis de estabilidad de taludes

En esta sección se da cuenta de una revisión bibliográfica general de la incorporación de métodos que consideren la incertidumbre en el análisis de estabilidad de taludes, usualmente en el cálculo del índice conocido como factor de seguridad (FS), bien sea empleando el método de equilibrio límite o métodos numéricos como el método de los elementos finitos.

2.2.1. Análisis de estabilidad probabilístico mediante equilibrio límite

Es posible que la primera publicación formal de análisis probabilístico de estabilidad de taludes sea de Alonso (1976), empleando a partir del método de las fajas o método de equilibrio límite para cuantificar la incertidumbre en el factor de seguridad. Mediante la implementación del método de Bishop y primer orden segundo momento define la incertidumbre del factor de seguridad a partir de la variabilidad de los parámetros involucrados en función de la profundidad de la superficie de rotura. El autor encontró que la mayor contribución a la varianza del factor de seguridad fue la presión del agua en los poros seguida por la cohesión (ver Figura 3).

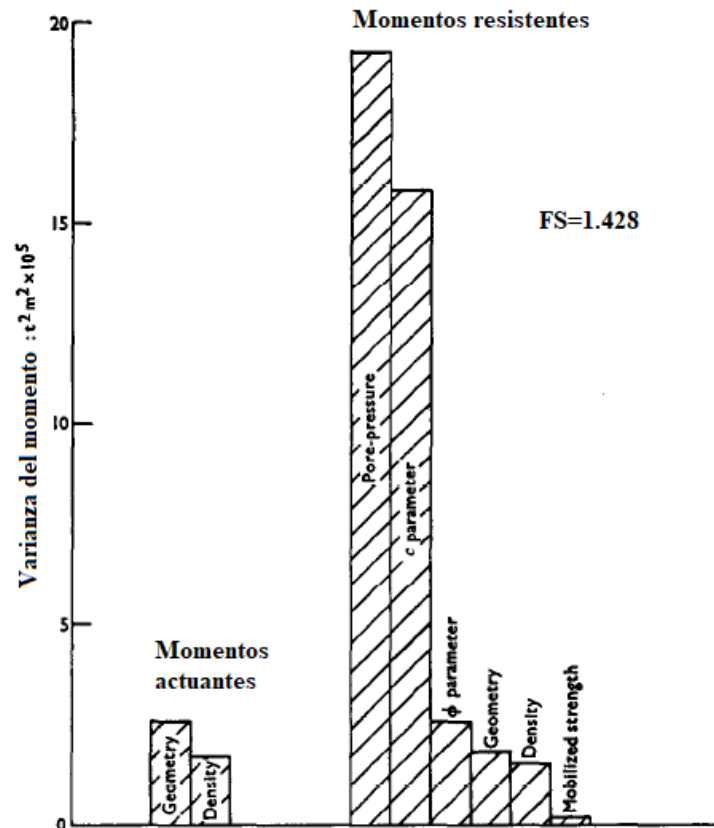


Figura 3. Contribución de cada variable en la varianza del factor de seguridad (Alonso, 1976).

Babu & Murthy (2005), utilizando el método de equilibrio límite para un talud infinito analizan el efecto de la variabilidad de los parámetros de suelos no saturados en la estabilidad, identifican que las zonas de falla son mejor capturadas por el índice de confiabilidad que el factor de seguridad convencional. El estudio también muestra que la variación de la conductividad hidráulica saturada influye significativamente en la confiabilidad del talud.

Cho (2007), estudia un caso hipotético de un talud con dos tipos de materiales y la estabilidad de un terraplén “Sugar Creek embankment” por medio de equilibrio límite con el método de Spencer, empleando primer orden de confiabilidad (FORM) y MCM asumiendo correlación espacial de las propiedades de los geomateriales, a manera de campos aleatorios. El autor encontró una alta influencia del cálculo de la probabilidad de falla con la correlación espacial (ver Figura 4).

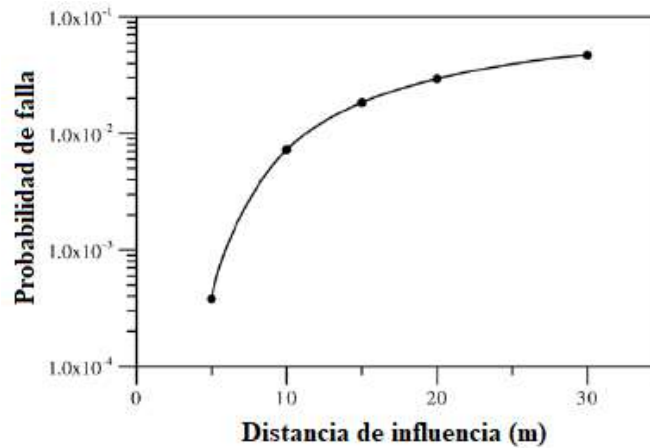


Figura 4. Influencia de la correlación espacial en la probabilidad de falla (Cho, 2007).

Cho (2010), extiende el método tradicional de equilibrio límite de cortes a un enfoque probabilístico que da cuenta de las incertidumbres y la variación espacial de los parámetros de resistencia del suelo. En este estudio, se generaron campos aleatorios bidimensionales basados en una expansión de Karhunen-Loève de una manera consistente con una función de distribución marginal específica y una función de auto correlación. Luego se utilizó una simulación de Monte Carlo para determinar la respuesta estadística basada en los campos aleatorios generados. Este enfoque no hace ninguna suposición sobre la superficie de falla crítica, por el contrario, durante el proceso de análisis se busca la superficie crítica de falla correspondiente a los campos aleatorios de entrada de las propiedades del suelo. Para el ejemplo de análisis el autor encontró que a partir de 1000 iteraciones con MCM se estabiliza la probabilidad de falla (ver Figura 5).

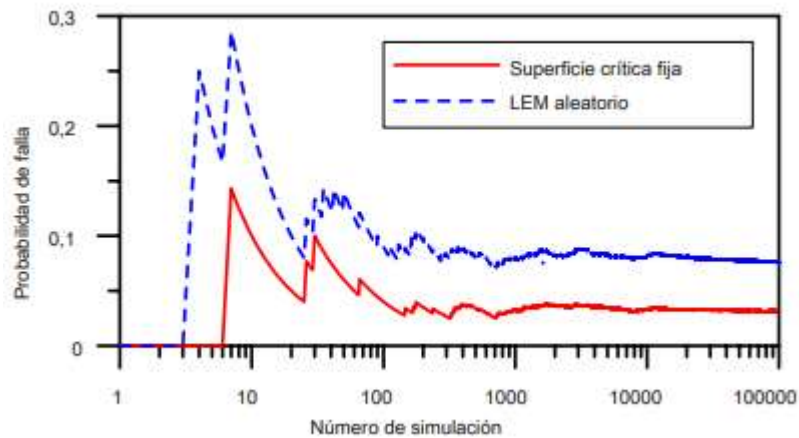


Figura 5. Probabilidad de falla en función del número de iteraciones (Cho, 2010).

Otálvaro & Cordão-Neto (2013), combinando un análisis de flujo transiente por la infiltración de agua lluvia con el método de equilibrio limite emplearon el FOSM para definir la contribución de cada parámetro a la estabilidad. La contribución fue calculada para diferentes estados de tiempo con una lluvia de 48 horas de duración. En la Figura 6 se muestra el análisis de contribución a la varianza del factor de seguridad de cada parámetro aleatorio, en la condición inicial el problema está controlado por la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ), mientras cuando pasa más tiempo de lluvia constante parámetros como el valor de entrada de aire (AEV) y la permeabilidad saturada (k), mostrando que cuando el agente detonante de inestabilidad es la lluvia los parámetros que controlan el flujo de agua del suelo dominan la variabilidad del factor de seguridad y por ende la probabilidad de falla.

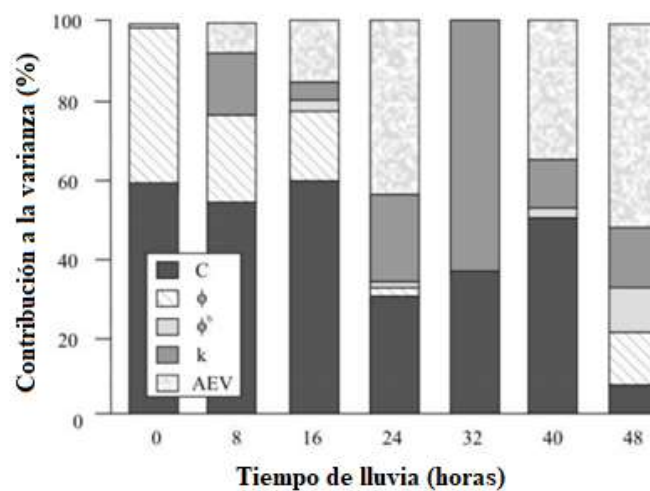


Figura 6. Contribución de los parámetros en la varianza del FS (Otálvaro & Cordão-Neto, 2013).

Chen et al. (2020), llevaron a cabo un análisis probabilístico con y sin el uso de campos aleatorios estudiando la influencia de una pantalla de pilotes en un talud homogéneo. En la Figura 7 se muestra la ubicación de las pantallas de pilotes, los autores variaron a su vez la longitud de las pantallas, al final encontraron un cambio sensible en la localización de la superficie de rotura crítica (o de menor factor de seguridad). En su análisis, debido a la influencia de la posición y longitud de las pantallas el cálculo de la probabilidad de falla es sensible al uso o no de campos aleatorios en el método probabilístico (ver Figura 8). Este análisis probabilístico puede convertirse en un insumo adecuado para tomar decisiones de diseño.

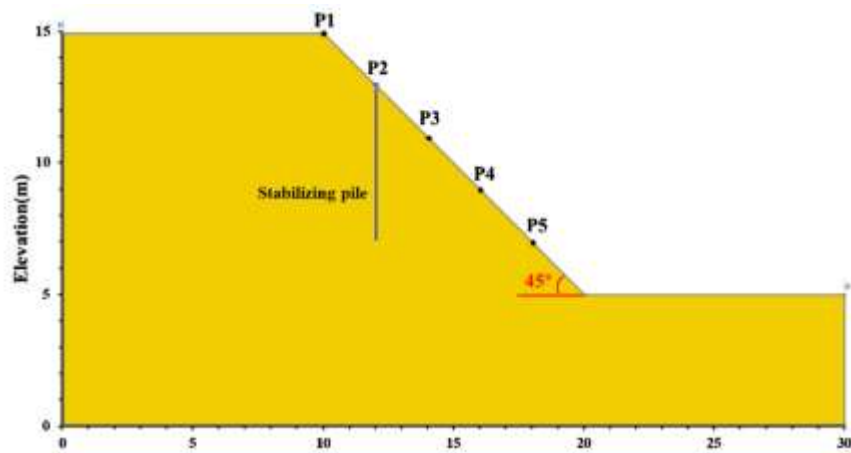


Figura 7. Localización de las pantallas de pilotes (Chen et al., 2020).

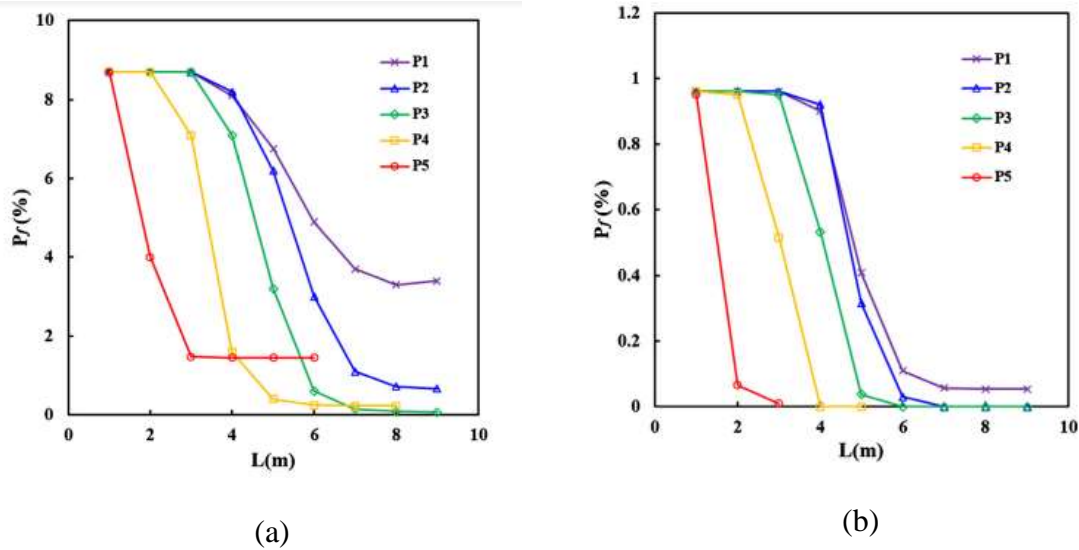


Figura 8. Comparación de la probabilidad de falla entre (a) suelo espacialmente constante, (b) suelo de variabilidad espacial (Chen et al., 2020).

2.2.2. Análisis de estabilidad probabilístico mediante elementos finitos

Suchomel & Mašín (2010), comparan tres métodos probabilísticos en el análisis de estabilidad de un talud que falló en Lodalen-Noruega empleando el método de los elementos finitos. Comparan FOSM con RFEM y a su vez con un método híbrido que denominan FOSM extendido, el cual tiene en cuenta la correlación espacial de las propiedades de resistencia en la variabilidad a lo largo de la superficie de rotura, la cual se controla a partir de un factor de longitud denominado θ , de manera similar a lo considerado en RFEM. Empleando RFEM con un valor θ de 10 m obtuvieron una probabilidad de rotura de 55.7%, valor similar al obtenido por El-Ramly et al. (2006), en el mismo deslizamiento mediante MCM y el uso de equilibrio limite que fue de 69.4% de probabilidad de falla, lo que quiere decir, que con ambas aproximaciones los análisis conducen a una condición inminente de falla. Si bien el FOSM extendido incorpora un efecto de la variabilidad espacial y además tiene un costo computacional bajo, la precisión del método se reduce cuando se reduce el valor de θ o cuando se incrementa la variabilidad de las propiedades de los materiales.

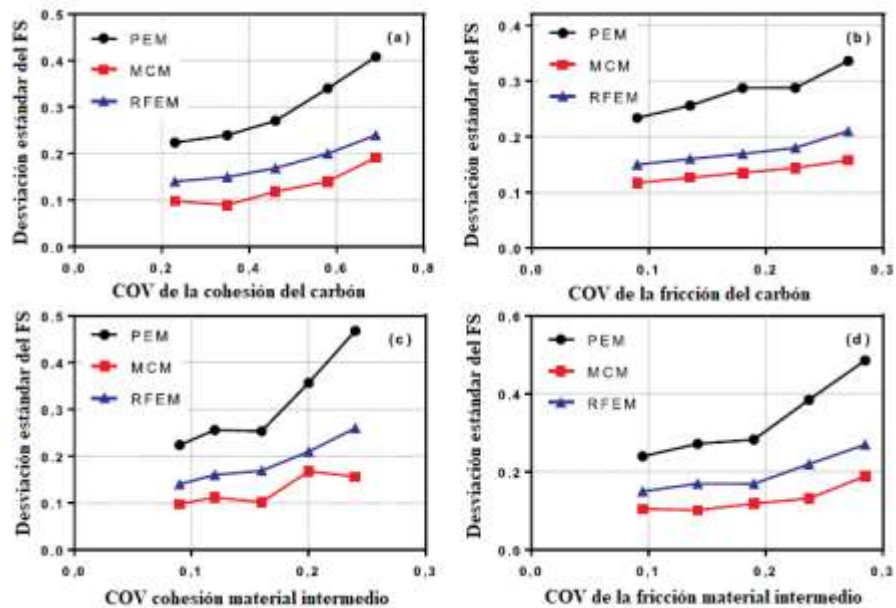


Figura 9. Efecto del coeficiente de variación muestral en la desviación estándar del factor de seguridad (Dyson & Tolooiyan, 2020).

Dyson & Tolooiyan (2020), analizaron comparativamente los factores de seguridad probabilísticos obtenidos por varios métodos para la modelación de la excavación de una mina de carbón a cielo abierto. Encontraron que a medida que se incrementa el coeficiente

de variación maestra de referencia en las propiedades de resistencia al corte de los materiales crece la desviación estándar del factor de seguridad (FS), este incremento es mayor cuando se usó el PEM (ver Figura 9).

De acuerdo con Dyson & Tolooiyan (2020) al comparar el desempeño de los métodos empleando FEM tal vez, la mayor diferencia sea el costo computacional, ya que con RFEM el tiempo medio por análisis es aproximadamente tres veces el de los demás métodos (ver Tabla 3). Se destaca el tiempo de MCM en función del número de simulaciones. Por otro lado, dado el método, PEM requiere 16 simulaciones mientras que RFEM y MCM necesitan más de 50 simulaciones para converger (ver Figura 10).

Tabla 3. Tiempo computacional de los diferentes métodos (Dyson & Tolooiyan, 2020).

Método probabilístico	Número de simulaciones necesarias	Tiempo medio por simulación (min)	Tiempo total de todas las simulaciones (horas)
PEM	16	12.0	3.2
MCM	100	12.0	20.0
RFEM	100	36.5	60.8

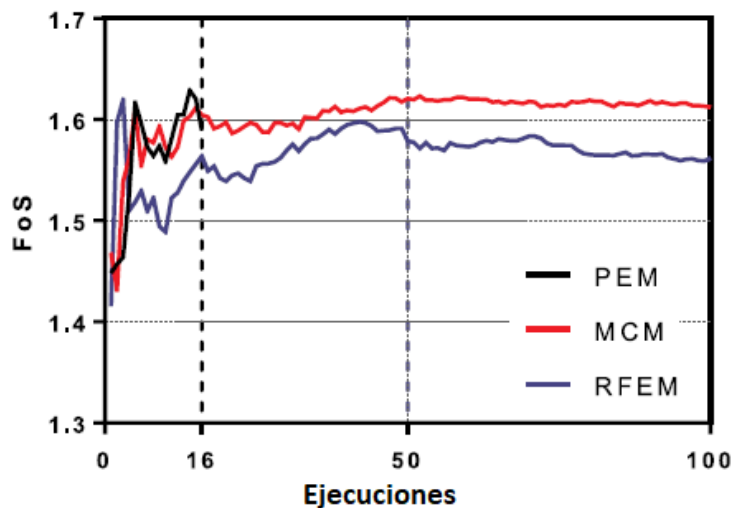


Figura 10. Convergencia del FS para los métodos (Dyson & Tolooiyan, 2020).

Luo et al. (2016), efectuaron análisis del efecto de refuerzo del suelo con geosintéticos en combinación con el método de elementos finitos. Se modificó un código abierto de FEM

para incluir elementos tipo barra que permitieron modelar capas horizontales de refuerzo geosintético. Los resultados del análisis que utilizan el código modificado (mFEM) demuestran que se pueden lograr grandes reducciones en la probabilidad de falla agregando capas de refuerzo geosintético a los taludes construidos. El código modificado también se usó para investigar el efecto de la variabilidad del ángulo de fricción del suelo sobre los resultados probabilísticos para taludes de suelo construidos no reforzados y reforzados puramente por fricción. En la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos para la probabilidad de falla con el suelo reforzado.

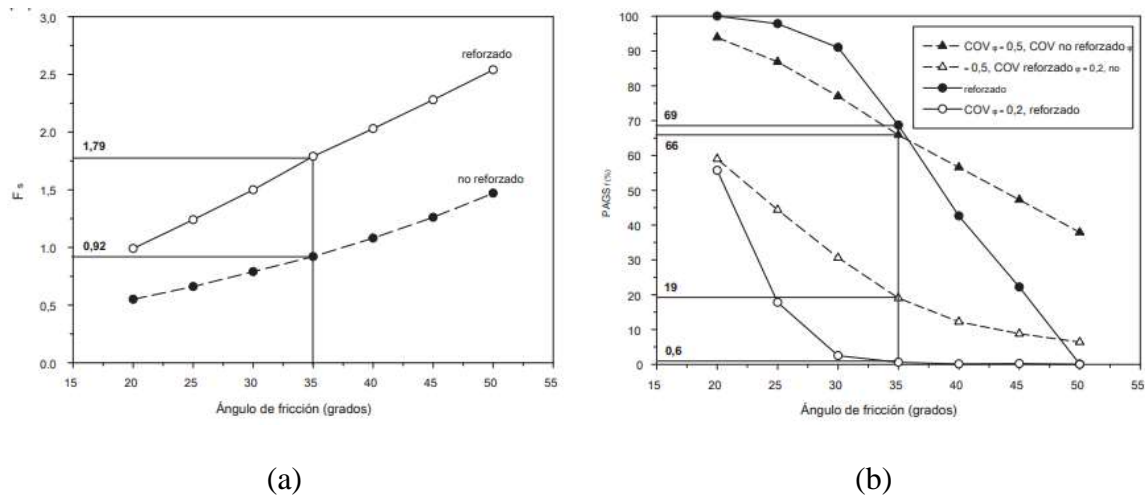


Figura 11. (a) Factor de seguridad (F_s) a partir de análisis deterministas, y (b) probabilidad de falla (PAGS F) versus ángulo de fricción medio para pendientes de suelo reforzado y no reforzado y diferentes COV para el ángulo de fricción del suelo ($COV_c = 0$) (Luo et al., 2016).

2.3. Estabilidad de rellenos sanitarios

En este numeral se va a revisar algunos deslizamientos en rellenos sanitarios para dimensionar sus efectos, así como algunas de las propiedades geotécnicas empleadas en los análisis, derivadas de ensayos de campo y laboratorio a diferentes escalas.

2.3.1. Deslizamientos históricos en rellenos sanitarios

Kokasoy & Curi (1995), estudiaron el deslizamiento de abril de 1993 en el vertedero a cielo abierto de Ümraniye-Hekimbaşı, el cual fue el principal vertedero de sólidos del lado asiático de Estambul. En este sitio, que estuvo en funcionamiento desde 1976, se eliminaron diariamente entre 1,500 y 2,000 ton de residuos sólidos. Se consideran como agentes detonantes la sobrecarga con residuos de construcción y demolición además de las

características de vertimiento, en la cuales no se realizaron actividades de compactación, sumado a los taludes formados residuos sólidos domiciliarios presentaban una pendiente elevada (3V:1H).

Stark et al. (2000), analizaron las causas que detonaron el deslizamiento del relleno sanitario de Cincinnati Ohio que se presentó el 9 de marzo de 1996, las características de resistencia movilizadas por el material que soportaba el relleno provocó el deslizamiento planar (ver Figura 12).

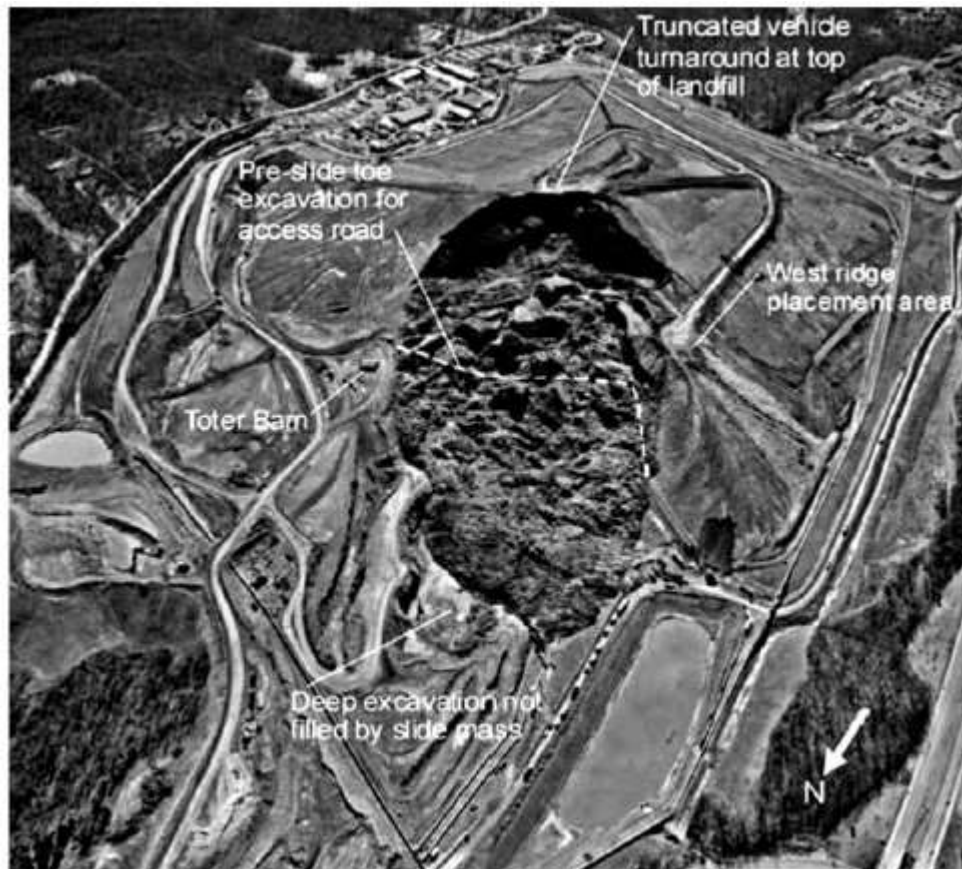


Figura 12. Vista aérea del deslizamiento en el relleno de Cincinnati Ohio (Stark et al., 2000).

Caicedo et al. (2002), analizaron el deslizamiento de residuos sólidos domiciliarios ocurrido en septiembre de 1997 en la zona II del relleno de Doña Juana al sur de Bogotá. Este relleno sanitario recibe del orden de 5,000 ton por día de una mezcla de residuos sólidos. El movimiento involucró del orden de 800,000 ton de residuos (ver Figura 13). De acuerdo con los autores, el efecto de la presión de poros es la responsable de la inestabilidad del

relleno, a continuación, se listan algunas causas que pudieron contribuir al incremento de la presión de poros:

- Reducción de la capacidad de recolección de lixiviado, y por ende incremento de la humedad en la masa del relleno y reducción de la permeabilidad de los gases.
- Baja permeabilidad a los gases y alta tasa de generación de gases trayendo consigo una alta presión de gas al interior de los poros.
- Rápida construcción del relleno y reducción de la posibilidad de disipación de presión al interior de los poros de la masa de residuos.
- Presencia de lixiviados en la cara de los taludes y dentro de las tuberías verticales de drenaje de gas dificultando la salida del mismo.
- Recirculación de lixiviados invadiendo las tuberías verticales de drenaje de gas incrementando la presión de gas al interior de los poros.
- Reinyección de lixiviados a través de celdas horizontales incrementando el contenido de humedad de los residuos y reduciendo la permeabilidad de los gases.



Figura 13. Vista aérea del deslizamiento de Doña Juana en Bogotá Colombia (Caicedo et al., 2002).

Merry et al. (2005), estudiaron el movimiento en masa del relleno sanitario de Payatas en Quezon Filipinas, el flujo de detritos cobró la vida de 330 personas de las cuales pudieron recuperar después de semanas de trabajo 278 cuerpos. El 10 de julio del año 2000 a primeras horas de la mañana se sintió un fuerte sonido en el costado norte del relleno sanitario de Payatas seguido del movimiento de una masa de residuos entre 15,800 y 9,400 ton (ver Figura 14), los autores determinaron que el agente detonante fue un ciclón tropical.



Figura 14. Vista aérea del movimiento en masa en el relleno de Payatas Filipinas (Merry et al., 2005).

Ramírez (2008 tomado de IGEEI, 2015), afirma que el deslizamiento del vertedero de Navarro ocurrido en septiembre de 2001 movilizó aproximadamente 350,000 m³ de desechos hacia el canal CVC (Interceptor) - Sur, obstruyendo el canal en una longitud aproximada de 150 m (ver Figura 15).



Vertedero de Navarron en 1995

Vertedero de Navarro después del deslizamiento de 2001

Figura 15. Efecto del deslizamiento de Navarro (Ramírez, 2008 tomado de IGEl, 2015).

Lavigne et al. (2014), estudiaron el deslizamiento del 21 de febrero de 2005 en el vertedero de Leuwigajah, Bandung (Java, Indonesia), el cual fue detonado por lluvias intensas. El movimiento involucró 2.7 Mm^3 de residuos sólidos domiciliarios que recorrieron alrededor de 1,000 m con un espesor de 10 m (ver Figura 16), causando la muerte de 143 personas y la pérdida de 71 viviendas. De acuerdo con los autores el movimiento se inició por la lluvia intensa seguida de dos explosiones de gas, la reducción de la resistencia al corte que originó el movimiento se dio por diferentes factores, tales como la alta cantidad acumulada biogás y agua acumulada en la masa, sumada a un bajo peso unitario.

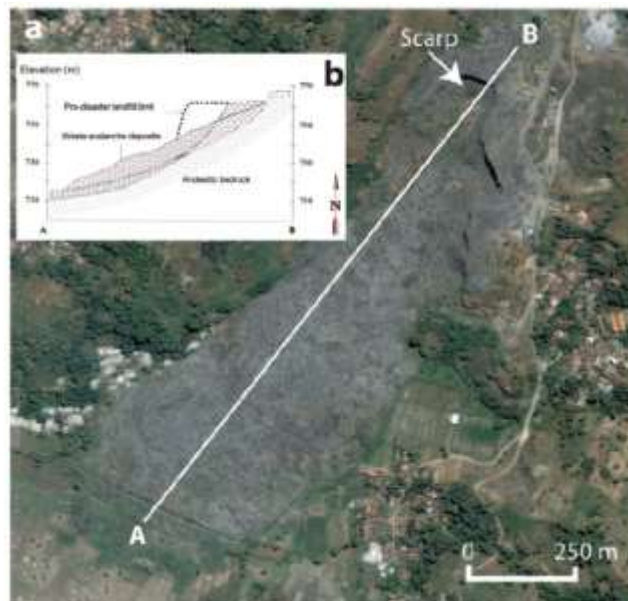


Figura 16. Vista aérea del movimiento en masa en el relleno de Bandung Indonesia (Lavigne et al., 2014).

Yin et al. (2016), estudiaron el deslizamiento ocurrido en el relleno de residuos de construcción y demolición de Shenzhen China cobró la vida de 77 personas y destruyó 33 viviendas, afectando un área de 1,100 m de longitud y 630 m de ancho en su parte mayor (ver Figura 17). De acuerdo con su investigación el relleno podía dividirse en dos unidades, la frontal conformada por residuos relativamente secos y la posterior con residuos más húmedos, que en el proceso de consolidación formaron un avance de frente de infiltración hacia la unidad frontal que detonó el deslizamiento.



Figura 17. Vistas tomadas con vehículos aéreos no tripulados en el deslizamiento de Shenzhen China (Yin et al., 2016).

Nikulishyn et al. (2020), describen que después de múltiples problemas en el relleno sanitario de Al-Qurain en Kuwait, y como producto de un deslizamiento deflagrado en mayo de 2016 que cobró la vida de 3 socorristas este relleno fue clausurado, en la Figura 18 se presenta una vista aérea de la zona afectada. Desde ese evento el cambio en la instrumentación del relleno, así como las estrategias de análisis con vehículos aéreos no

tripulados y escaneo con un taquímetro robótico permitió definir que los máximos desplazamientos duraron hasta un mes después de ocurrido el desastre y arrojaron información rápida para la toma de decisiones que finalizó con la clausura del relleno.

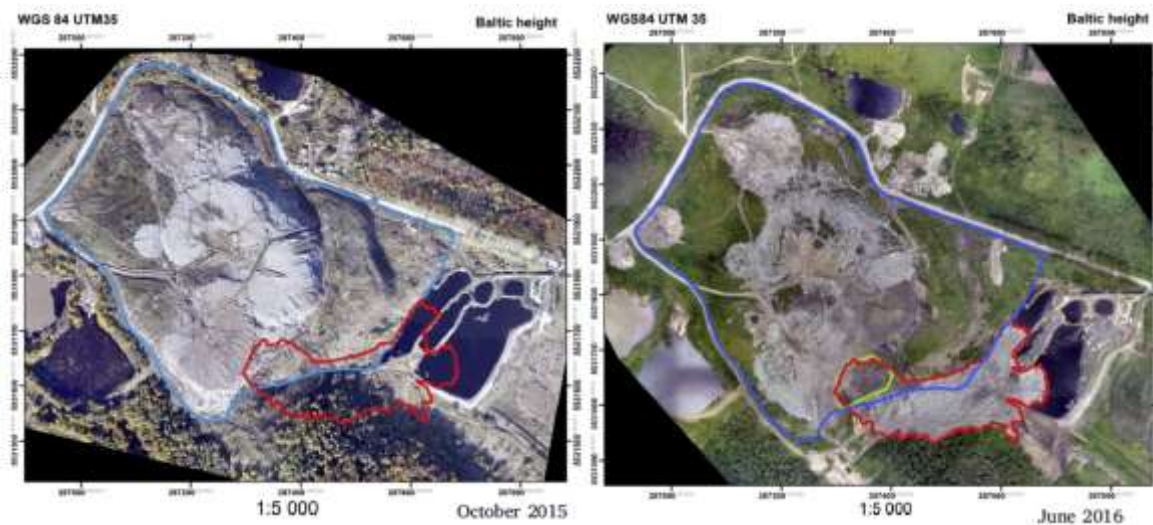


Figura 18. Análisis con sensores remotos de los efectos del deslizamiento en el relleno de Al-Qurain Kuwait (Savchyn & Lozynskyi, 2019).

2.3.2. Propiedades mecánicas de los residuos sólidos

La mayor inquietud al diseñar, revisar y elaborar la instrumentación y el seguimiento a la operación y cierre o abandono de rellenos sanitarios está alrededor de las propiedades mecánicas a emplear. En la Tabla 4 se presenta una recopilación de información que servirá más adelante en el proyecto para el análisis de estabilidad. En general, son diversos los factores que afectan los parámetros de resistencia de los residuos sólidos urbanos, dentro de los que se destacan la edad de los residuos, el contenido de humedad, el contenido y orientación de las fibras, el peso unitario de los residuos dentro de los más relevantes. Los métodos más comunes para obtener los parámetros de resistencia son el corte directo, la compresión triaxial y los análisis retrogresivos a partir de fenómenos de inestabilidad.

Tabla 4. Propiedades típicas de residuos sólidos domiciliarios en rellenos sanitarios.

Referencia	Peso unitario (kN/m ³)	Modelo	Parámetros de resistencia	Método de determinación
Gabr & Valero (1995)	9.3	M-C	$c'=16.8$ kPa $\phi'=34^\circ$	Laboratorio, compresión triaxial
Gabr & Valero (1995)	9,3	M-C	$c'=0$ a 27.5 kPa $\phi'=20.5$ a 39°	Laboratorio, corte directo
Stark et al. (2000)	10.2 a 11.8	M-C	$c'=40$ kPa $\phi'=35^\circ$	Análisis retrogresivo del deslizamiento planar el relleno de Cincinnati Ohio
Caicedo et al. (2002)	9.1	M-C	$c'=67$ kPa $\phi'=23^\circ$	Presuroméetro modificado Laboratorio corte directo a gran escala
Villarraga & García-García, (2003)	11.0	M-C	$c'=30$ a 49 kPa $\phi'=14.6$ a 18.2°	Laboratorio, ensayos triaxiales de gran escala
Villarraga & García-García, (2003)	11.0	M-C	$c'=20$ kPa $\phi'=25^\circ$	Laboratorio, ensayos de corte directo de gran escala en Curva de Rodas
González & Espinosa-Silva (2003)	10.2 a 11.8	M-C	$c'=4.1$ a 9.8 kPa $\phi'=20$ a 34°	Ensayos de campo de Presioficómetro y Piezocono en Doña Juana
Vilar & Carvalho (2004)	8.0 a 14.3	M-C	$c'=20.1$ a 86.3kPa $\phi'=21.0$ a 30.6°	Ensayos de laboratorio, corte directo y compresión triaxial
Merry et al. (2005)	10.2 a 13.9	M-C	$c'=19$ kPa $\phi'=28^\circ$	Combinación de resultados de Kavazanjian (2001) y Caicedo et al. (2002) y análisis retrogresivo
Harris et al. (2006)	15.4	M-C	$c'=9$ a 13 kPa $\phi'=23$ a 29°	Laboratorio, corte simple drenado
Chugh et al. (2007)	10.4	M-C	$c'=40$ kPa $\phi'=35^\circ$	Análisis de resultados del deslizamiento en el relleno de Cincinnati Ohio
Salazar Ferro Ingenieros S.A. (2008)	11.0	M-C	$c'=22$ kPa $\phi'=25^\circ$	Valores promedio de los residuos de la ciudad de Medellín para largo plazo
Singh et al., (2009)	11.3 a 15.9	M-C	$c'=0$ a 8.4 kPa $\phi'=35$ a 47°	Laboratorio, compresión triaxial
Singh et al., (2009)	8.8 a 10.1	M-C	$c'=14$ kPa $\phi'=36^\circ$	Laboratorio, corte directo a gran escala

Referencia	Peso unitario (kN/m ³)	Modelo	Parámetros de resistencia	Método de determinación
Wong (2009)	--	M-C	$c'=0$ kPa $\phi'=30.4$ a 39.7°	Laboratorio, corte directo de gran escala, criterio lineal con un único punto o ángulo secante
Bray et al. (2009)	7.3 a 13.2	M-C-D	$c'=15$ kPa $\phi_\sigma=41^\circ$ $\Delta\phi=12^\circ$	Laboratorio, corte directo de gran escala y compresión triaxial anisotrópica
Reddy et al., (2009)	6.0 a 10.2	M-C	$c'=31$ a 64 kPa $\phi'=26$ a 30°	Laboratorio, corte directo y compresión triaxial consolidada no drenada
Machado et al., (2010)	12.5 a 17.5	--	--	Ensayos de campo y laboratorio
Sivakumar Babu et al. (2010)	7.4 a 11	MCC	$M = 0.38$ a 0.90 ($\phi=10.3$ a 23°) OCR=1.0	Laboratorio, compresión triaxial consolidado drenado
Karimpour-Fard et al. (2011)	10 a 14	M-C	$c'=8$ a 10 kPa $\phi'=27$ a 40°	Laboratorio, triaxial de gran escala consolidado drenado
Bareither et al., (2012)	9.2 a 14.7	M-C	$c'=6.8$ a 25.7 kPa $\phi'=31.5$ a 43.9°	Laboratorio, corte directo de gran escala
Rakic et al., (2013)	10 a 17.5	M-C	$c'=17$ a 22 kPa $\phi'=35$ a 40°	Laboratorio, ensayo de corte directo
Castelli & Maugeri (2014)	10.1 a 15.9	M-C	$c'=0$ kPa $\phi'=25$ a 39°	Campo, SDMT, criterio del ángulo secante
Sandoval Vallejo et al. (2015)	8 a 14	M-C	$c'=24.7$ a 31.5 kPa $\phi'=29.1$ a 31.6°	Laboratorio, corte directo de gran escala. Material fresco del relleno de Presidente.
Sandoval Vallejo et al. (2015)	8 a 14	M-C	$c'=9.1$ a 21.7 kPa $\phi'=29.2$ a 34.7°	Laboratorio, corte directo de gran escala. Material maduro del relleno de Presidente.
IGEI (2015)	18	M-C	$c'=22$ kPa $\phi'=22^\circ$	Análisis de ensayos de campo piezocono sísmico y valores de retroanálisis
Silva (2017)	16.3 a 16.6	M-C	$c'=13.3$ a 20.5 kPa $\phi'=33.1$ a 40.6°	Ensayo de laboratorio cprte directo de gran escala.
Chen et al. (2017)	7 a 9	M-C	$c'=19$ a 24 kPa $\phi'=16.4$ a 28.6°	Ensayos de laboratorio sobre residuos elaborados sintéticamente

Referencia	Peso unitario (kN/m ³)	Modelo	Parámetros de resistencia	Método de determinación
Keramati et al. (2019)	11.8 a 13.7	M-C	$c'=13$ a 14.7 kPa $\phi'=27.5$ a 35.0°	Laboratorio, corte directo de gran escala, residuos frescos
Keramati et al. (2019)	11.9 a 14.1	M-C	$c'=15$ a 18.8 kPa $\phi'=29.4$ a 34.5°	Laboratorio, corte directo de gran escala, residuos de 6 meses
Keramati et al. (2020)	9.7 a 11.4	M-C	$c'=1.2$ a 2.2 kPa $\phi'=21.5$ a 31.5°	Ensayo de corte directo de gran escala en campo

M-C = Mohr-Coulomb o lineal; BL = Mohr-Coulomb bilineal; M-C-D = Modelo propuesto por Duncan donde se reduce de forma no lineal la fricción en función del esfuerzo de confinamiento; MCC = CamClay Modificado.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describe la metodología seguida para desarrollar el trabajo de grado, la cual se compone de tres partes fundamentales: i) descripción del caso de estudio, incluyendo los aspectos geológico-geotécnicos; ii) los escenarios para la modelación de la estabilidad; y iii) la estrategia para el abordaje probabilístico en el análisis de estabilidad mediante la técnica de equilibrio límite.

3.1. Descripción del estudio de caso

El Relleno Sanitario Presidente se encuentra en el municipio de San Pedro del departamento del Valle del Cauca, El municipio está localizado en la Zona Centro del Valle del cauca - La cabecera municipal de este Municipio se localiza a los 3°59'50" de latitud norte y a los 76°13'50" de longitud al oeste de Greenwich y a una altitud de 980 msnm (Alcaldía de San Pedro, 2020). De acuerdo con la Alcaldía de San Pedro (2020), el municipio tiene una extensión de 240 km², una temperatura media anual de 24°C, una precipitación anual media de 1350mm y una evaporación media de 1565 mm, y su población según el censo del año 2005 es de 15,450 personas, está aproximadamente a 88 km de Cali, la capital departamental.

El Relleno Sanitario Presidente, está ubicado en las coordenadas Este: 1092324.309 y Norte: 930629.824 a una altura de 1.062 msnm, entre las vías que conducen desde Guadalajara de Buga al municipio de San Pedro, en el costado derecho a 150 m de distancia de la vía principal (ver Figura 19). La operación de este relleno está a cargo de la empresa Veolia Aseo Buga S.A. E.S.P.

En la Figura 20 se presenta la configuración actual del relleno de Presidente, el vaso en funcionamiento es la parte Este del vaso 3, debido a la disponibilidad de información, en este trabajo se empleará la parte Oeste del Vaso 3, de acuerdo con C&C Ingeología y Geotécnia S.A.S (2020), durante los primeros meses de 2020 se llevó a cabo la instalación de piezómetros de cuerda vibrante en el vaso en mención, así que la información disponible del seguimiento de piezómetros va desde el 11 de abril hasta el 9 de noviembre de 2020.



Figura 19. Vista aérea del relleno sanitario de Presidente (tomado de GoogleMaps).



Figura 20. Configuración general del relleno sanitario de Presidente (C&C Ingeología y Geotécnia S.A.S, 2020).

Desde el punto de vista geológico, el Relleno Sanitario de Presidente se localiza dentro de la unidad geológica conocida como formación la Paila (Tmp), la cual corresponde

a rocas sedimentarias continentales, areniscas, conglomerados y unidades de tobas dacíticas (Nivia, 2001). Según C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S (2020), a nivel local las tobas afloran como capas gruesas de Lodolitas macizas, con laminación plana, paralela, estratos métricos de depósitos volcánicas, tobas dacíticas y estratos de lodolitas y arcillolitas de potencia variable, en la zona presenta un bajo peso específico; mientras que los conglomerados presentes son matriz soportados con estratificación inclinada planar en estratos métricos con lentes de arenitas macizas que presentan la misma disposición de estratificación, con clastos de gravas, guijos y gujarros, mal calibrado, mediana esfericidad, subredondeados, cuenta con una matriz areno limosa de mediana compacidad. Este material eleva su resistencia a los 4 m de profundidad a tal punto que la excavadora no lograba extraerlo. Además esta unidad es la más prevaleciente debajo de los llenos de residuos de los Vasos 1 y 3 (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).

Con relación al comportamiento de la precipitación, C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S (2020b), las precipitaciones medias mensuales multianuales del período 1971-2019 en las estaciones pluviográficas representativas La Primavera, Angosturas y El Caney de la CVC, presentan una distribución durante el año de tipo bimodal (ver Figura 21), de forma similar a gran parte del territorio nacional, con máximos en los meses de Marzo, Abril y Mayo en el primer semestre y Octubre a Noviembre para el segundo, mientras que las precipitaciones menores ocurren entre Junio a Agosto en el período de verano a mediados del año, siendo el comportamiento de las tres estaciones localizados alrededor del relleno sanitario Presidente muy coherente entre sí. Con relación al número de lluvias promedio mensuales el comportamiento mostrado por las estaciones es entre 136 y 184 días de lluvia al año, siendo la estación La Primavera la de mayor número de días lluviosos y a la vez la de mayor precipitación media.

Adicionalmente, C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S (2020b), el comportamiento temporal de las precipitaciones máximas en 24 horas mensuales multianuales a lo largo del año, presenta los valores máximos en el mes de abril, en las estaciones La Primavera y Angosturas siendo el valor máximo de 147 mm y el menor de 65 mm, lo que ratifica a la lluvia como un potencial agente detonante de inestabilidad en función de la infiltración de agua a través del relleno.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
La Primavera	110.1	118.5	203.1	221.4	179.9	97.5	65.0	81.0	113.3	218.4	212.2	143.9	1764.3
Angosturas	107.1	114.8	169.4	193.0	142.2	67.9	54.5	58.1	107.4	184.7	174.3	117.5	1490.9
El Caney	83.4	108.9	152.3	187.8	153.5	89.3	78.5	81.7	132.7	204	199.9	138.7	1610.7

Distribución de las Precipitaciones Medias Mensuales Multianuales en las estaciones pluviográficas representativas de la CVC. Período 1971-2019

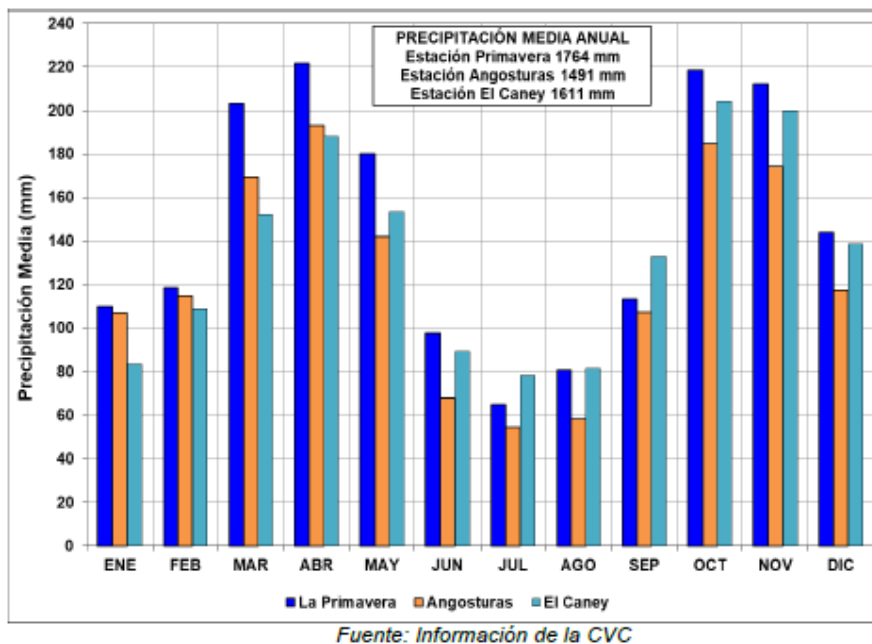


Figura 21. Distribución de la precipitación en el año de estaciones próximas al relleno (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).

3.1.1. Caracterización geotécnica del subsuelo

Múltiples campañas de exploración de campo se han adelantado en el diseño y ampliación del relleno sanitario de Presidente, llevando a cabo principalmente sondeos directos como apiques y perforaciones por percusión con la ejecución del ensayo de SPT, ensayos de infiltración y exploración geofísica con líneas de refracción sísmica y geofísica de ondas superficiales como ReMi (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020; Grupo Ingex S.A.S, 2021). En la exploración se han identificado los siguientes materiales:

- Rellenos antrópicos con profundidades hasta 3.6 m, una resistencia a la penetración NSPT de 13 bpf, una humedad de 25%, un peso unitario húmedo de 17 kN/m³;
- Suelo residual de la formación La Paila con profundidades desde 3.6 a 7.2 m, una resistencia a la penetración NSPT de 21 bpf, una humedad de 22%, un peso unitario húmedo de 16.5 kN/m³;

- Suelo residual a saprolito de la formación La Paila con profundidades desde 4.9 a 7.6 m hasta 7.2 a 9.0 m, una resistencia a la penetración NSPT de 29 bpf, una humedad de 21%, un peso unitario húmedo de 18.3 kN/m³;
- Transición suelo roca de la formación La Paila con profundidades desde 7.6 a 10.3 m hasta 10.3 a 12.5 m, una resistencia a la penetración NSPT de 45 bpf, una humedad de 19%, un peso unitario húmedo de 18.0 kN/m³.

C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S (2020), empleando el método de González (1999), a partir de ensayos de laboratorio y mediante revisión bibliográfica, obtuvo los valores de los parámetros de resistencia al corte y el peso unitario que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de resistencia al corte (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).

Tipo de material	Peso unitario húmedo (kN/m³)	Cohesión efectiva (kPa)	Ángulo de fricción efectivo (°)	Modo de obtención
Residuos sólidos recientes	11.0	24.7	29.1	Empleado
Residuos sólidos antiguos	11.0	17.6	29.1	Empleado
Mezcla de suelo con residuos	13.0	5.0	29.0	Empleado
Dique compactado	18.9	9.0	27.7	DS-CD
Relleno antrópico	17.0	22.0	8.3	DS-CD
		0.0	29.0	SPT
Suelo residual	16.5	10.8	9.0	DS-CD
	--	0.0	30.4	SPT
	17.0	10.0	28.0	Empleado
Suelo residual a saprolito	18.3	0.0	31.3	SPT
	18.0	10.0	33.0	Empleado
Transición suelo roca (Formación La Paila)	18.0	0.0	33.7	SPT
	18.0	11.0	32.0	Empleado

DS-CD = Corte directo consolidado drenado; SPT = obtenido a partir del ensayo de penetración estándar con el método de González (1999).

La definición del perfil de suelo para el diseño sísmico ha incluido la ejecución de una serie de ensayos geofísicos sobre los carretables del relleno. c, llevó a cabo ensayos geofísicos de ondas superficiales tipo ReMi, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 22, al analizar los resultados y usando la metodología de cálculo de la velocidad de onda de corte promedio para los 30 m superiores de suelo según la NSR-10, las velocidades promedio

oscilan entre 295 y 316 m/s para los ReMi mostrados en la Figura 22, lo que permite clasificar el perfil de suelo sin incluir el efecto de los RSU en la categoría D según el Título A de la NSR-10, que corresponde a perfiles de suelo con valores de velocidad de onda de corte entre 180 y 360 m/s.

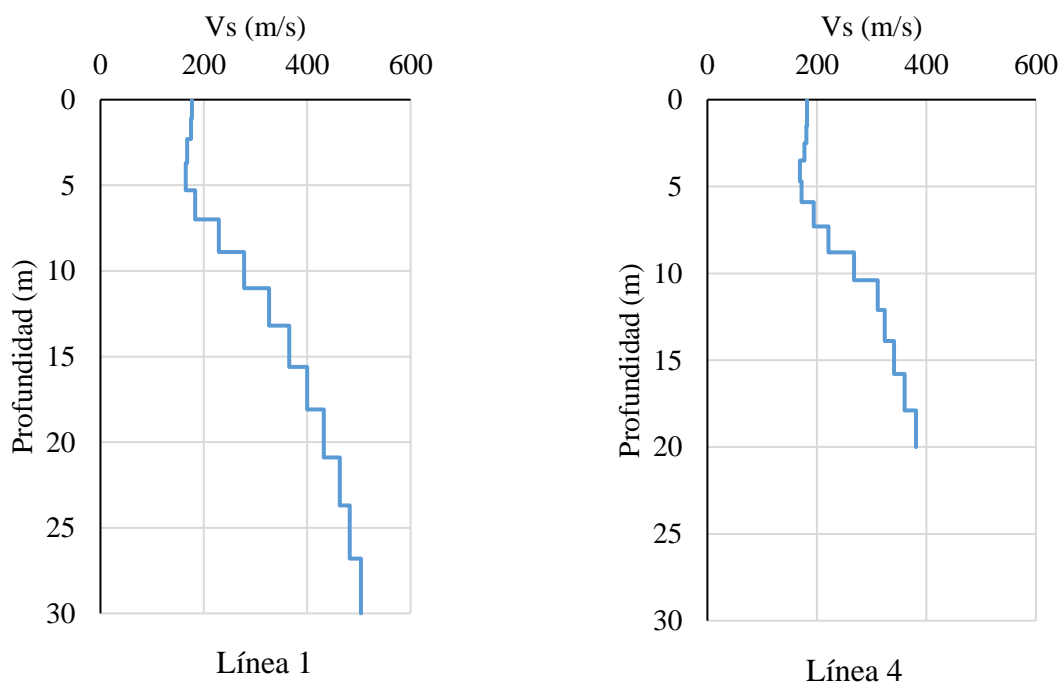


Figura 22. Perfiles de velocidad de onda de corte obtenidos por ReMi (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).

El Grupo Inge S.A.S (2021), mediante líneas de refracción sísmica LRS (ver Tabla 6), clasifica el perfil como tipo C según el Título A de la NSR-10, con una velocidad media para los 30 m superiores de 357 m/s, siendo más rígido de lo encontrado mediante ReMi (entre 295 y 316 m/s).

Tabla 6. Perfil de velocidad de onda de corte obtenido por refracción sísmica para los 30 m superiores en el Vaso 3 del relleno de Presidente (Grupo Inge S.A.S, 2021).

z inicial (m)	z final (m)	Espesor d (m)	Relación de Poisson	Vp (m/s)	Vs (m/s)	d/Vs (m/m/s)	
0.0	4.3	4.3	0.4	320	131	0.0328	
4.3	10.7	6.4	0.35	560	269	0.0238	
10.7	15.4	4.7	0.3	950	508	0.0092	
15.4	30	14.6	0.15	1265	812	0.0179	
						$\Sigma d/Vs$	0.0838
						V _{S30} (m/s)	357

La diferencia de la velocidad de onda de corte para los 30 m superiores de suelo reportadas para la cimentación del relleno oscila entre el 11 al 17%, sin embargo, genera un cambio en la clasificación del perfil, pasando el suelo de tipo D a C. Esta diferencia debe de ser revisada a fondo, ya que puede estar asociada por un lado a los sitios donde se efectuó la medición, o a la interpretación de los ensayos, donde por ejemplo en la LRS es necesario incluir la relación de Poisson para transformar la velocidad de ondas compresivas en la velocidad de ondas de corte. Debido a estos resultados contradictorios y a la complejidad de la modelación de los efectos dinámicos de sitio, así como el alcance del presente trabajo de grado no se incluyó el análisis de estabilidad con el sismo de diseño.

3.1.2. Instrumentación

La instrumentación del relleno está compuesta por múltiples sistemas, para el monitoreo del caudal de los lixiviados, la temperatura de los residuos, y una estación hidrometeorológica, ente otros sistemas; con relación al seguimiento de variables geotécnicas representativas, el monitoreo se concentra en el seguimiento de puntos de control superficial mediante análisis topográfico y piezómetros de cuerda vibrante.

Por un lado, el control topográfico sirve dentro del monitoreo para evaluar los desplazamientos del relleno, tanto ladera abajo, como indicador de estabilidad, como verticales para estimar los efectos de consolidación del relleno. En el Vaso 3 se tienen 15 puntos de control topográfico con la distribución que se muestra en la Figura 23, en alrededor de 10 meses de seguimiento los asentamientos acumulados del sector Oeste varían entre 8 a 49 cm, los registros de mayor magnitud se localizan en el sector de mayor espesor de RSU (ver Figura 24).

Por otro lado, el monitoreo mediante piezómetros tiene como propósito la evaluación de la presión de los fluidos al interior de los RSU, que tienen incidencia tanto en la velocidad de los asentamientos como en la estabilidad, ya que su incremento reduce la resistencia al corte. Dentro de las tecnologías disponibles de piezómetros lo de mayor uso actual corresponden a los de cuerda vibrante, los cuales vienen en un contenedor de acero inoxidable que garantiza su longevidad.

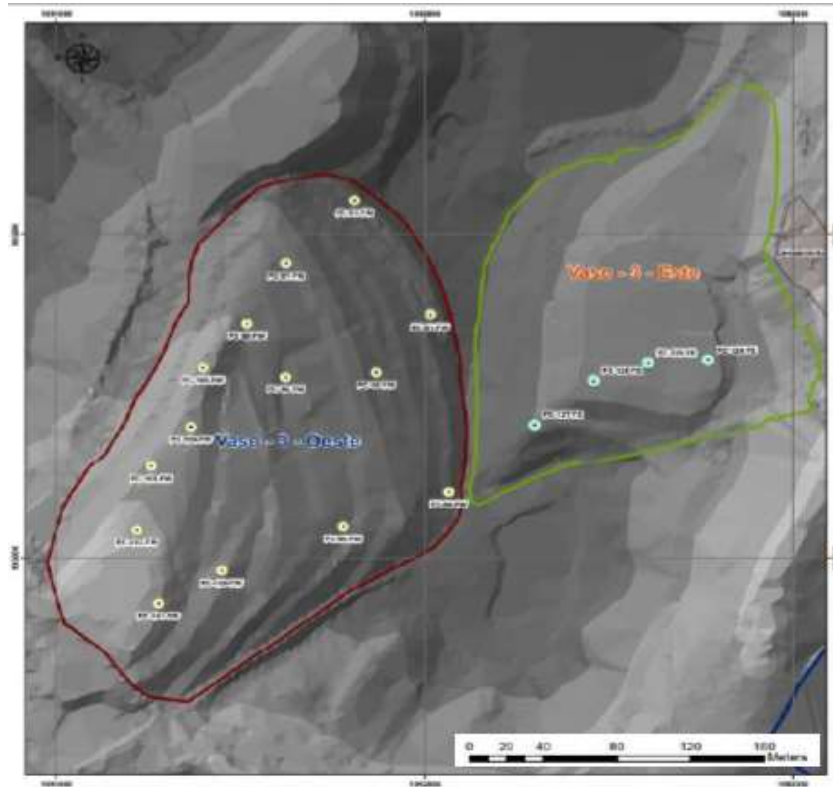


Figura 23. Localización de los puntos de control topográfico en el Vaso 3 Oeste (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).

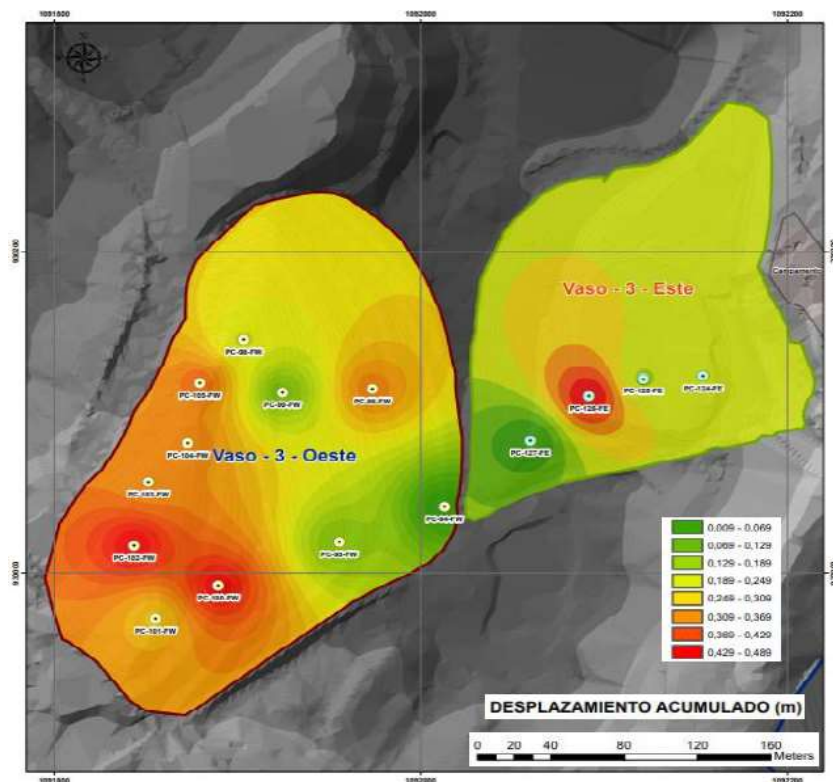
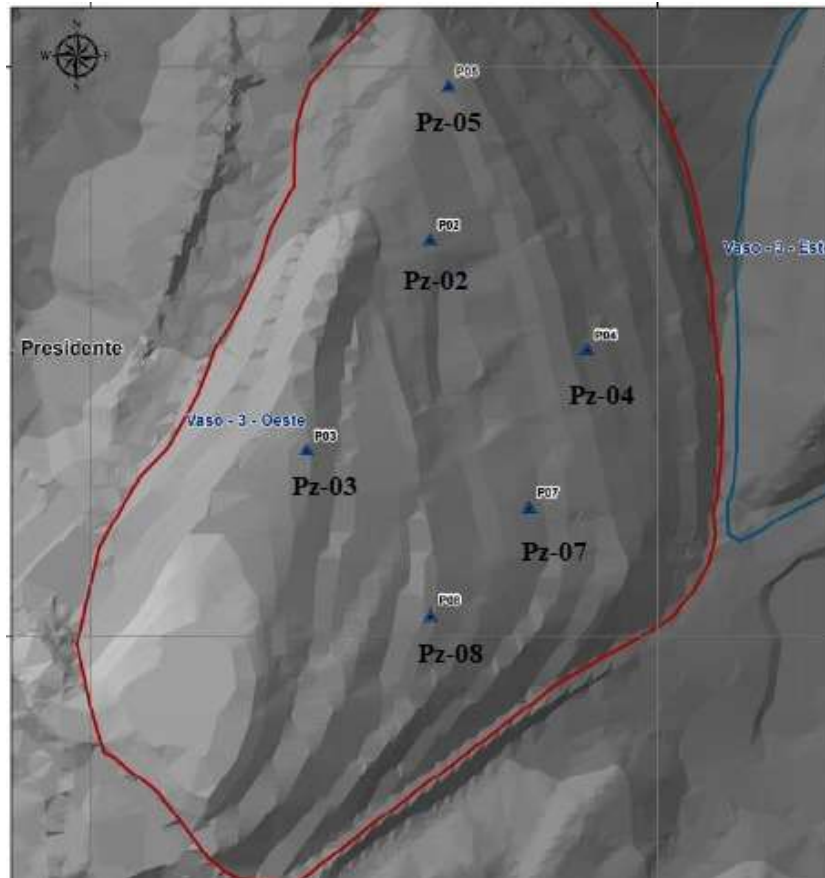


Figura 24. Asentamientos acumulados entre noviembre de 2019 y septiembre de 2020 (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).

Estos piezómetros están formados por un diafragma, una cuerda de acero tensionado y una bobina electromagnética, cuando se producen cambios de la presión en el diafragma, la tensión en la cuerda de acero cambia igualmente, la bobina produce un pulso de voltaje provocando que la cuerda vibre, esta frecuencia de vibración varía según la tensión de la cuerda y es idéntica a la frecuencia de voltaje de salida que se transmite hasta un dispositivo de medición a través de un cable, de esta manera se puede medir la variación de presión de



poros. En la

Figura 25 se muestra la localización de los piezómetros de cuerda vibrante, los cuales fueron instalados en el primer trimestre de 2020. En el Anexo 2 se presentan los registros completos recopilados para los piezómetros del vaso objeto de análisis, es importante mencionar que dicha instrumentación fue instalada de forma posterior al primer cierre, y después se retomó, o reinició la actividad de disposición en este vaso.

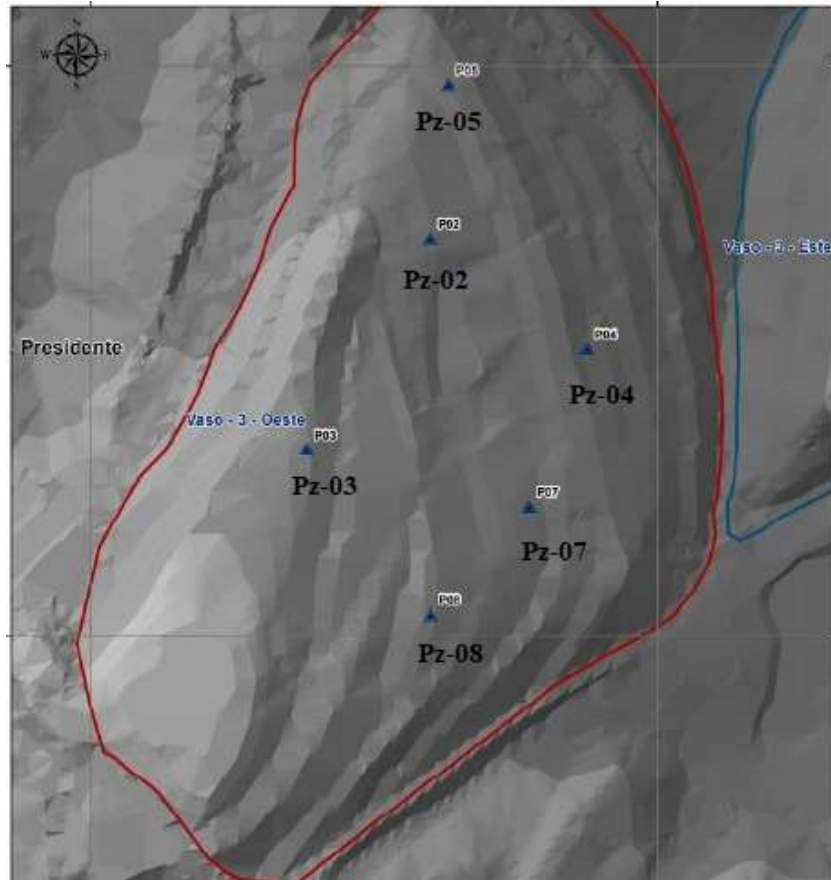


Figura 25. Localización de instrumentación piezométrica y perfiles disponibles para análisis en el Vaso 3 Oeste del relleno sanitario de Presidente, sin escala (C&C Ingeología y Geotécnia S.A.S, 2020).

Es común que para modelar algunos problemas geotécnicos se empleen algunas estrategias para definir la presión del agua en los poros, las más comunes son la definición del nivel freático (línea con presión del agua nula), la estimación a través de la modelación del problema de flujo de agua cuando se conocen algunas condiciones de contorno, o la evaluación mediante el parámetro de presión de poros R_u , el cual se emplea cuando se tienen pocas medidas y permite extrapolar las presiones en el agua en función del esfuerzo vertical, así entonces, el parámetro R_u es el cociente entre la presión en el agua y el esfuerzo vertical, conocido el R_u se usa el mismo a partir de los esfuerzos verticales para estimar la presión del agua en el análisis de estabilidad para cada base de las dovelas en el caso del método de equilibrio límite. En la Figura 26 se presenta el registro de las presiones de poros entre noviembre de 2019 y septiembre de 2020. El parámetro R_u oscila entre 0.15 y 0.68, y en algunos de los instrumentos se observa que tiene una tendencia a incrementarse.

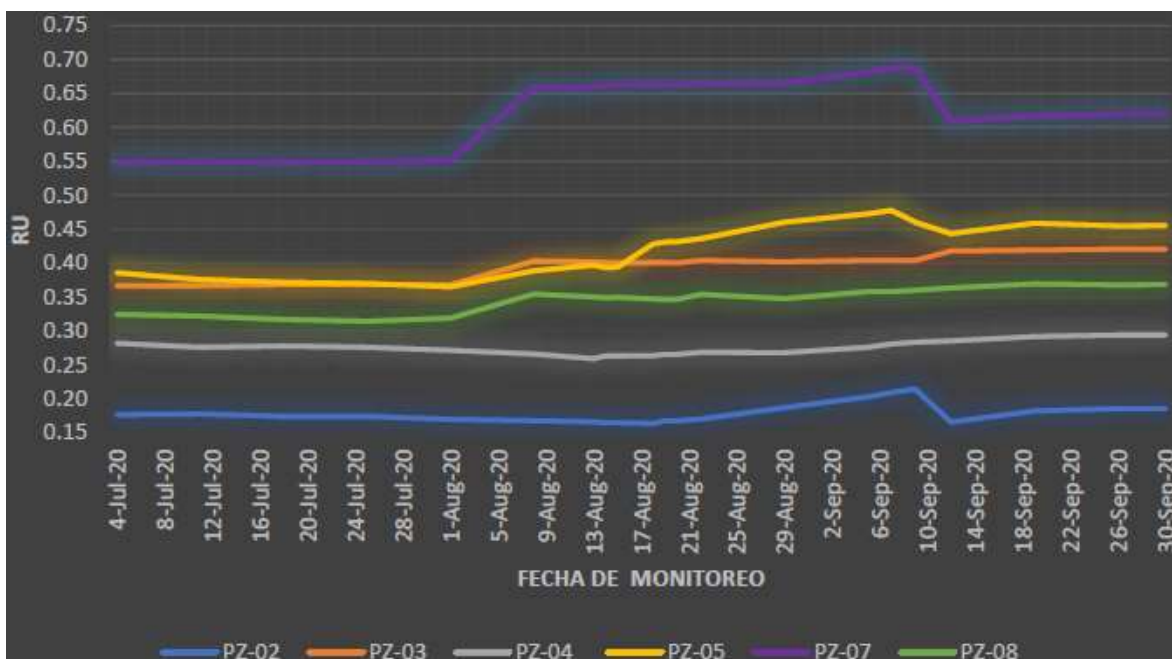


Figura 26. Evolución de la presión de poros en función del parámetro R_u (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).

3.2. Escenarios para la modelación de la estabilidad

En los problemas típicos de vías, terraplenes y taludes, es simple modelar la estabilidad dada la poca variabilidad longitudinal de la geometría, por el contrario, en esta condición de relleno en forma de domo o vaso es clave la selección de los perfiles de análisis, así como los escenarios de los mismos.

3.2.1. Selección del perfil para el análisis de estabilidad

Cuando se evalúa la estabilidad de taludes mediante análisis bidimensionales es necesario seleccionar el perfil más crítico para el análisis, el cual suele ser aquella línea que presenta mayor inclinación teórica. Considerando la disponibilidad de información de instrumentación geotécnica, a partir de la localización de los piezómetros se definieron como secciones de análisis los perfiles 1 y 2 mostrados en la Figura 27, después de la revisión previa de los informes de estabilidad desarrollados por los diferentes consultores, se tomó el Perfil 1 como sección crítica para el análisis de estabilidad, debido, a que representa la línea de máxima pendiente en los dos costados de mayor altura del Vaso 3 Oeste (ver Figura 28).

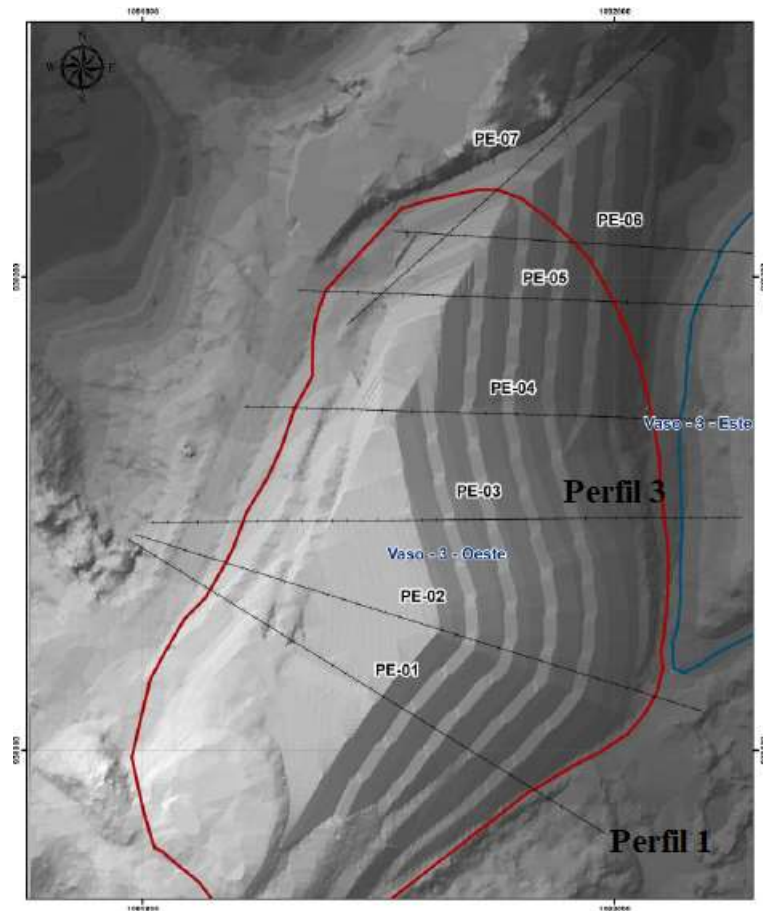


Figura 27. Secciones transversales con disponibilidad de información (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).

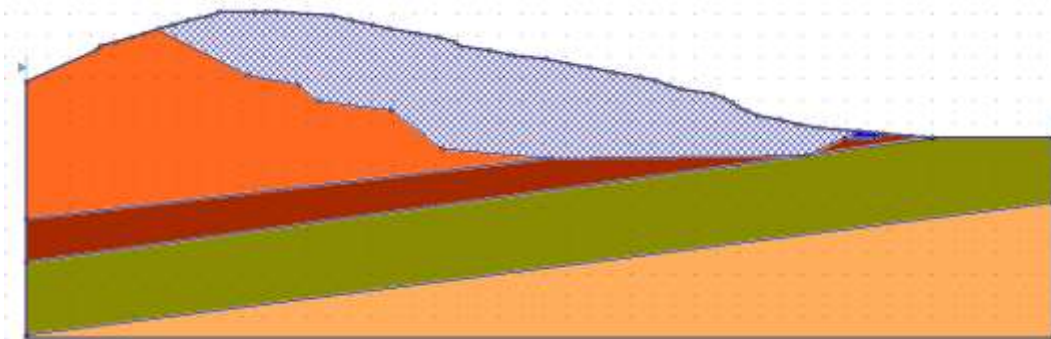


Figura 28. Perfil 1, seleccionado para el análisis de estabilidad.

3.2.2. Escenarios para el análisis de estabilidad

Cuando se evalúa la estabilidad de taludes es necesario definir por un lado el perfil geotécnico representativo además de las propiedades de cada uno de los materiales, usualmente en función de los parámetros de resistencia al corte. En el vaso objeto de estudio

se han empleado dos formas de modelación; la primera sin discretización o diferenciación de materiales de cimentación y con la separación de dos materiales para los RSU en función de su edad (ver Figura 29); y la segunda con la inclusión de la secuencia sedimentaria típica en el sitio de la formación La Paila, incluyendo su buzamiento y sin diferenciación de la edad de los RSU (ver Figura 30).

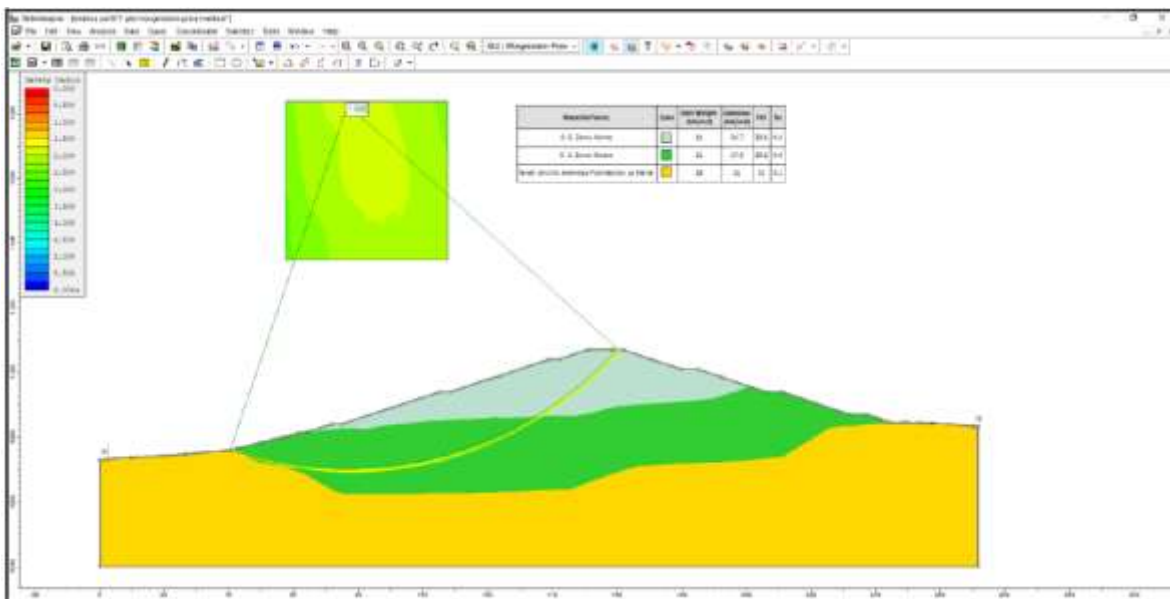


Figura 29. Perfil típico en dirección SE a NW PE-07 Vaso 3 Oeste con ampliación del relleno (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020b).

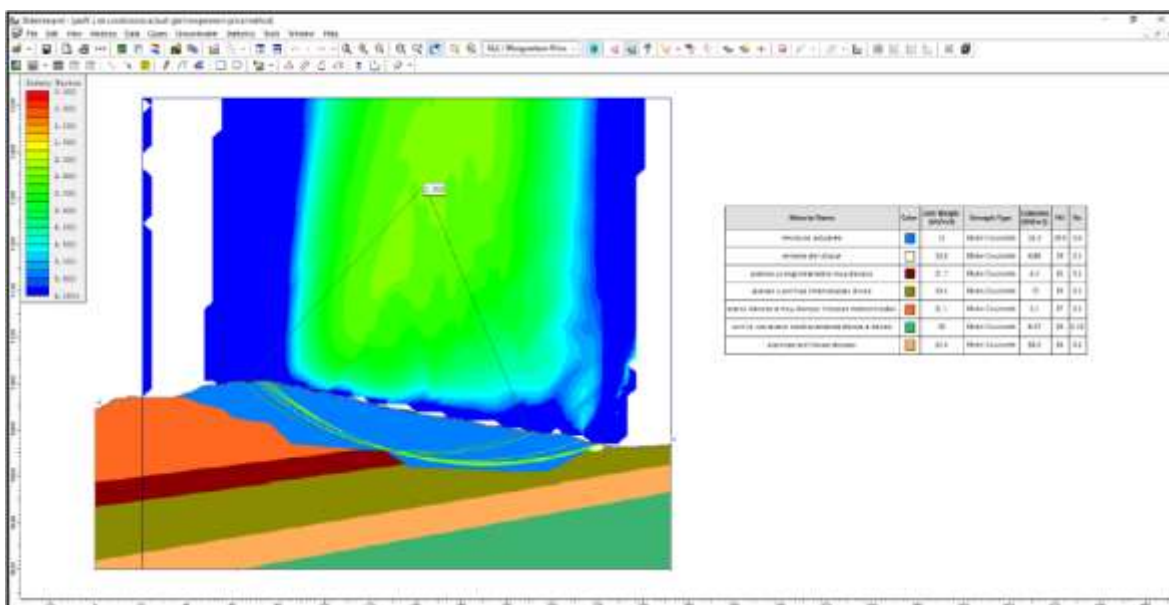


Figura 30. Perfil típico SUR Fase W Vaso 3 Oeste en condiciones a noviembre de 2020 (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a).

Para el presente trabajo se analizarán cuatro escenarios, variando la geometría final del vaso y el parámetro de presión de poros R_u , tal como se describe en la Tabla 7. Todos estos escenarios son estáticos, dada la complejidad de asignación del perfil de diseño sísmico. A partir del análisis preliminar de la distribución de presión de poros se incluyen dos límites de variación, uno bajo y uno alto como se indica en la tabla. La condición de cobertura actual de RSU corresponde a la geometría mostrada en la Figura 30, mientras que la condición de ampliación corresponde a la geometría mostrada en la Figura 29.

Tabla 7. Escenarios seleccionados para la modelación con el perfil 1.

Nomenclatura	Geometría final	Condición de presión de poros
P1Act-E1	Cobertura actual de RSU	Ru bajo
P1Act-E2	Cobertura actual de RSU	Ru alto
P2Ret-E1	Ampliación propuesta en la retoma	Ru bajo
P2Ret-E2	Ampliación propuesta en la retoma	Ru alto

3.3.Estrategia para el análisis probabilístico

A partir del análisis del inventario de propiedades de residuos sólidos, de la revisión de los informes del operador y sus consultores (C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S, 2020a; Grupo Ingex S.A.S, 2021), y por recomendación del director del trabajo de grado, el Doctor Iván F. Otálvaro, se acogió el siguiente procedimiento para la definición de los valores medios y la desviación estándar de los parámetros y variables externas:

- 1) Definición de los parámetros a considerar en el análisis: se definieron como variables aleatorias el peso unitario y los parámetros de resistencia al corte de los residuos sólidos;
- 2) Identificación de las variables externas: el efecto del agua, en función de la variabilidad de la presión de agua al interior de los poros en función de las medidas de los piezómetros;
- 3) Definición de los valores medios de las variables: construcción y análisis detallado de los resultados de ensayos y estimaciones de campo y laboratorio;

- 4) Definición de la variabilidad: análisis en función del coeficiente de variación muestral (COV), ver ecuación (9) cuando se tenga información disponible como la mostrada en la Tabla 8. Como método alternativo se empleará la metodología “*Graphical Three-Sigma Rule*” propuesta por Duncan (2000), la cual consiste en asumir una función de distribución estándar y definir los valores máximos y mínimos creíbles (HCV y LCV) para estimar la desviación estándar la ecuación (10) mediante el uso del procedimiento gráfico de la Figura 31:

$$COV = \frac{\sigma_i}{E[x_i]} \times 100\% \quad (9)$$

$$\sigma_i = \frac{(HCV - LCV)}{6} \quad (10)$$

donde, COV = es el coeficiente de variación muestral; σ_i = es la desviación estándar de la variable i ; $E[x_i]$ = es la esperanza o valor medio de la variable i ; HCV = es el valor concebible de la variable i ; y LCV = es el valor mínimo concebible de la variable i .

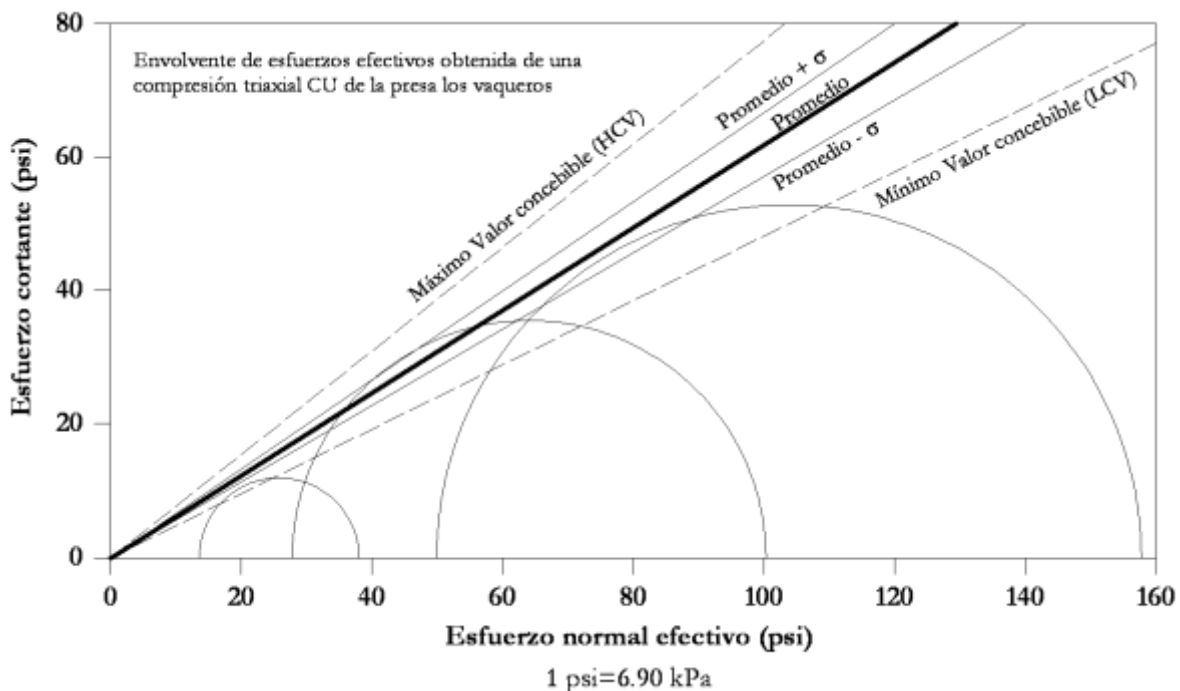


Figura 31. Método gráfico para aplicar la regla 3σ , ejemplo de estimación de la desviación estándar en una envolvente de resistencia (Duncan, 2000, tomado de Hoyos y Otálvaro, 2007).

Tabla 8. Coeficiente de variación, COV, para los parámetros de resistencia al corte en algunos suelos residuales tropicales (Hoyos y Otálvaro, 2007).

Material parental	Grado de met.	COV (%)			Fuente
		c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	
Esquistos moscovíticos	VI	16	13	3	Universidad Nacional de Colombia (2006)
Esquistos moscovíticos	V	53	21	5	Universidad Nacional de Colombia (2006)
Esquistos moscovíticos	IV	14	28	5	Universidad Nacional de Colombia (2006)
Ortoneis	VI	28	18	3	Universidad Nacional de Colombia (2006)
Ortoneis	V	50	19	6	Universidad Nacional de Colombia (2006)
Ortoneis	IV	14	28	5	Universidad Nacional de Colombia (2006)
Flujos de lodos	(1)	24	21	4	Universidad Nacional de Colombia (2001)
Flujos de lodos	(3)	24	14	4	Universidad Nacional de Colombia (2001)
Batolito Antioqueño	VI	52	13	3	Universidad Nacional de Colombia (2004)
Batolito Antioqueño	V	55	14	2	Universidad Nacional de Colombia (2004)
Granodiorita	VI	37	0	3	Universidad Nacional de Colombia (2005)
Granodiorita	V	60	7	3	Universidad Nacional de Colombia (2005)
Granodiorita	IV	49	22	10	Universidad Nacional de Colombia (2005)
Gabro	VI	60	20	10	Cano et al. (2001b)
Gabro	V	36	20	11	Cano et al. (2001b)
Sedimentos recientes	--	--	2 13	3 7	Duncan & Wrigth (2005)

5) Definición de aspectos particulares de cada método:

- a. Análisis probabilístico con el método de MonteCarlo (MCM): definición de las funciones de distribución de probabilidad normales o triangulares,

en función de la metodología para definir la variabilidad, y definición del número de iteraciones según para el 90% de confiabilidad según la ecuación propuesta por Harr (1987);

$$N_{MCM} = \left[\frac{d^2}{4(1 - \varepsilon)^2} \right]^n \quad (11)$$

donde NMCM = número de iteraciones Monte Carlo, d = Desviación estándar normalizada según el nivel de confianza, ε = Nivel de confianza expresado en forma decimal (0 a 100; y n = Numero de variables. Si el problema tiene n variables, el número de iteraciones aumenta geométricamente de acuerdo con la potencia n.

- b. Análisis aproximado por el método de primer orden segundo momento (FOSM): análisis si incluir la correlación entre parámetros, truncamiento de la serie de Taylor en el primer término, y cálculo de las derivadas mediante una aproximación hacia adelante empleando un Δx_i igual al 10% de la desviación estándar;
- c. Análisis por campos aleatorios considerando la variabilidad espacial (RLEM), análisis a partir de la variación de las longitudes de correlación.

La definición de los valores medios y la desviación estándar de los parámetros, haciendo énfasis en el análisis de estabilidad a partir del método de equilibrio límite los parámetros geomecánicos que influyen en el cálculo del factor de seguridad son el peso unitario y los parámetros de resistencia al cortante, los cuales para el caso del modelo de Mohr-Coulomb son la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Una vez definidos los parámetros y su variabilidad para el análisis se seleccionarán una serie de secciones transversales para trabajar con análisis bidimensionales, calculando el factor de seguridad y su variabilidad a partir de por lo menos los siguientes métodos:

3.3.1. Detalles del análisis probabilístico con el método de MonteCarlo (MCM)

De acuerdo con la cantidad de información para los diferentes parámetros que entran en los análisis probabilísticos, se utilizara una distribución normal para los casos donde la cantidad de información sea la suficiente, de no ser así se aplicara una distribución triangular.

La distribución normal fue reconocida por primera vez por el francés Abraham de Moivre (1667-1754). Posteriormente, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) elaboró desarrollos más profundos y formuló la ecuación de la curva; de ahí que también se la conozca, más comúnmente, como la "campana de Gauss". La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por μ y σ . Con esta notación, la densidad de la normal viene dada por la ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}; \quad -\infty < x < \infty \quad (12)$$

Esta función de probabilidad se grafica de la siguiente forma:

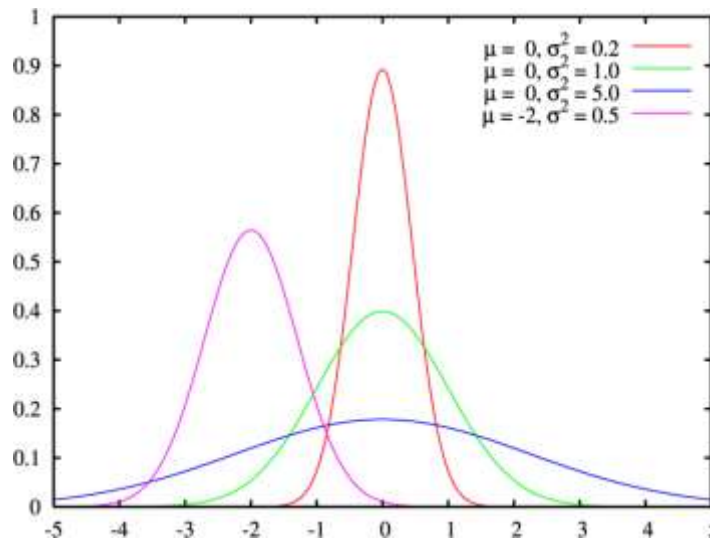


Figura 32. Distribución normal. (Recuperado: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_normal#/media/Archivo:Normal_distribution_pdf.png).

La distribución triangular es la distribución de probabilidades continua que tiene un valor mínimo a , un valor máximo b y una moda c .

La distribución triangular es empleada normalmente como una descripción subjetiva de una población para la que solo se cuenta con una cantidad limitada de datos muestrales, especialmente en casos en que la relación entre variables es conocida pero los datos son escasas, está basada en un conocimiento del mínimo, máximo y un valor modal.

De las características que son de utilidad para el estudio se encuentran:

$$\text{Media: } \frac{a+b+c}{3} \quad (13)$$

$$\text{Varianza: } \frac{a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc}{18} \quad (14)$$

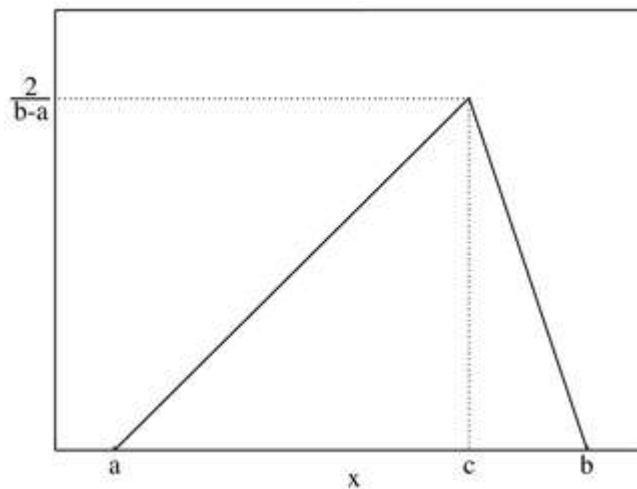


Figura 33. Distribución triangular. (Recuperado: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_triangular#/media/Archivo:Triangular_distribucion_PMF.png).

3.3.2. Detalles del análisis por el método de primer orden segundo momento (FOSM)

El método de primer orden segundo momento, es un método probabilístico que nos permite evaluar de diferentes maneras las diferentes variables que constituyen el cálculo de un factor. En el presente trabajo se aplica enfocado en el análisis del porcentaje de participación de cada variable en el cálculo del factor de seguridad de

la estabilidad del talud, adicional a esto por medio del método podemos calcular la desviación estándar del resultado.

A continuación, se muestra el cálculo paso a paso para una variable en el cálculo de su participación frente a las demás variables.

$$E(FS) = FS(\phi, c, \gamma, Ru) \quad (15)$$

$E(FS)$ = Factor de seguridad promedio o esperanza del FS

Varianza = σ^2

$$Var(FS) = \sum \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot Var(x_i) \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (17)$$

A continuación, se ilustra la forma de cálculo de la derivada de la ecuación (16) aplicando la aproximación de la ecuación (17), en este caso a partir de la superficie con el mínimo factor de seguridad para la variación del parámetro de resistencia al corte del ángulo de fricción interna (ϕ):

$$\frac{\partial FS}{\partial \phi} = \frac{FS(\phi + \Delta\phi) - FS(\phi)}{\Delta\phi} \quad (18)$$

$$\Delta\phi \cong 0.1\sigma_\phi$$

$$\Delta\phi \cong 0.1 * 1.6$$

$$\Delta\phi \cong 0.16$$

$$\frac{\partial FS}{\partial \phi} = \frac{1.920 - 1.912}{0.16}$$

$$\frac{\partial FS}{\partial \phi} = 0.05$$

3.2.3. Detalles para el análisis con campos aleatorios (RLEM)

El análisis probabilístico con campos aleatorios puede ser una herramienta poderosa para la estabilidad de taludes para tener en cuenta la variabilidad espacial en el subsuelo, esto puede ser aún más efectivo cuando se tratan de suelos con propiedades desafiantes, en este caso hablamos de un relleno sanitario, una total masa de residuos que generan variabilidad espacial en el material por lo que utilizar esta metodología es una forma de explorar métodos que ayuden a entender mejor la estabilidad de este tipo de rellenos.

Como paso fundamental se debe calcular la longitud de correlación que se va a utilizar en el programa para realizar en método, esta longitud describe el rango entre cual los parámetros geotécnicos presentan una variabilidad mínima, es decir entre mayor sea esta longitud, el suelo puede calificarse como más homogéneo en términos del parámetro seleccionado.

Graficando la información recopilada en Zekkos et al. (2006) se analizan los datos a diferentes profundidades para calcular la longitud espacial utilizando la ecuación encontrada en Phoon & Kulhawy (1999):

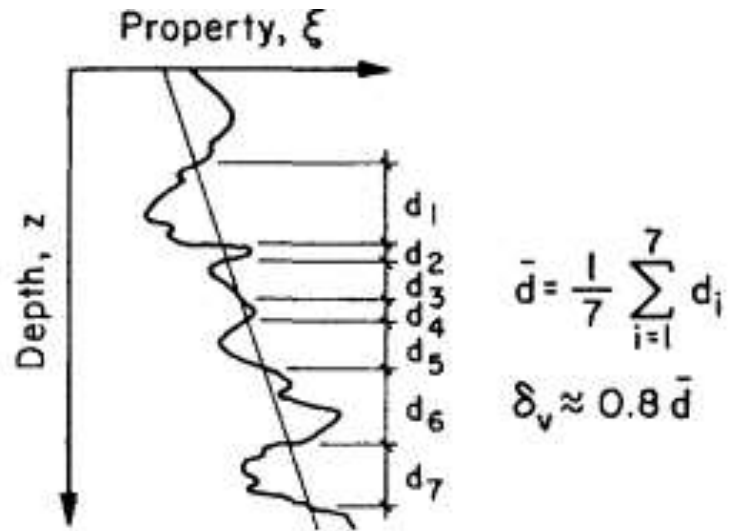


Figura 34. Definición gráfica de la longitud de correlación (Phoon & Kulhawy, 1999).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos para los diferentes métodos probabilísticos analizados de acuerdo con los escenarios propuestos y sus variaciones en el parámetro de presión de poros R_u .

4.1. Definición de la variabilidad para el análisis probabilístico

A partir de la recopilación de resultados de ensayos sobre residuos sólidos urbanos, efectuados en campo y laboratorio, y de su análisis e interpretación con las reglas mencionadas en el Capítulo 3, en la Figura 35, en este caso la línea punteada superior corresponde al HCV y ya inferior al LVC. En la Tabla 9 se presentan los resultados analizados para los ensayos recopilados, y en el Anexo 3 son presentados todos los datos.

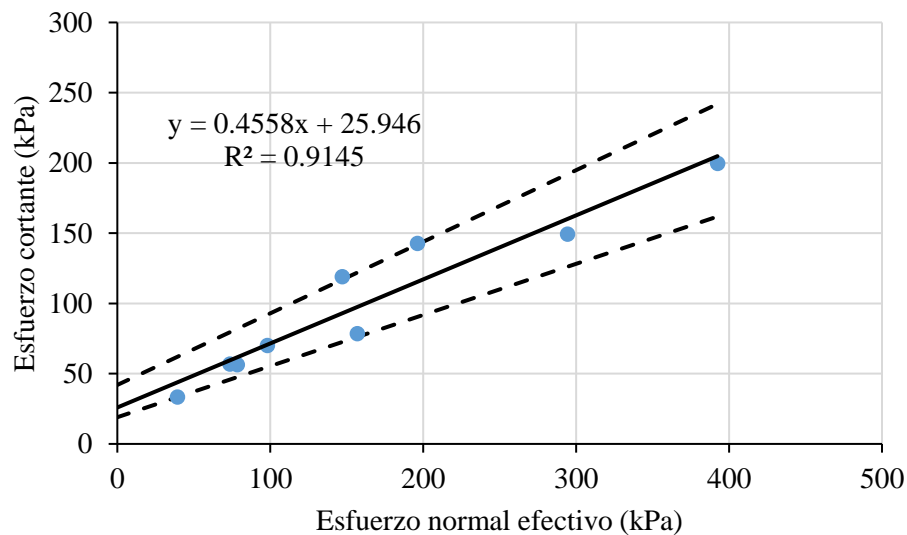


Figura 35. Aplicación de la regla 3σ para la definición de los momentos estadísticos en los parámetros de resistencia al corte, caso del relleno de Curva de Rodas.

Tabla 9. Resumen de las variaciones de los parámetros analizados para su utilización en las modelaciones por métodos probabilísticos.

Referencia	Peso unitario (kN/m ³)	Cohesión (kPa)		Ángulo de fricción (°)		Método de determinación
		E[x]	COV[x]	E[x]	COV[x]	
Reddy et al. (2009)	--	17	14.6	28	1.8	Corte directo
Reddy et al. (2016)	--	96	6.1	27	3.1	Corte directo 80-100 % humedad
Reddy et al. (2016)	--	51	8.2	28	4.2	Corte directo 44-60 % humedad
Rakic et al. (2013)	11.18	16	14.8	36	3.7	Corte directo "Material suelto"
Rakic et al. (2013)	15.05	24	17.8	39	2.1	Corte directo "Material compactado"
Singh et al.(2009)	13.9	22	8.3	36	5.6	Corte directo
Caicedo et al. (2002)	--	78	3.4	23	2.2	Corte directo
Caicedo et al. (2002)	--	43	3.1	12	1.4	Ensayo de campo
Caicedo et al. (2002)	--	76	1.3	14	3.5	Ensayo de campo
Sandoval et al. (2014)	--	26	11	31	1.1	Corte directo residuos 8 meses
Sandoval et al. (2014)	--	16	9.5	32	0.5	Corte directo residuos 60 meses
Integral Curva de Rodas. (2003)	--	26	14.8	25	4.8	Corte directo
Villarraga y Garcia (2007)	--	34	36%	19	24%	Corte directo

De la tabla anterior se puede concluir, que el peso unitario de los RSU de la información recopilada oscila entre 11 y 15 kN/m³, que la cohesión varía entre 16 y 96 kPa con coeficientes de variación muestral entre el 0.5 a 18%, mientras que el ángulo de fricción interna presenta valores promedio entre 12 y 39° y un coeficiente de variación muestral entre 0.3 a 6% aproximadamente. A partir de este análisis y tomando como referencia las propiedades reportadas por Sandoval et al. (2015), se tomaron las propiedades consignadas en la Tabla 10 para modelar la estabilidad. En ella se resalta que a la cohesión se le asignó la

mayor variabilidad, mientras que la menor le fue asignada al ángulo de fricción interna tal como lo sugiere el análisis de los resultados de la mayoría de los autores.

Tabla 10. Resumen de los parámetros de resistencia al corte y propiedades de los RSU para la modelación de la estabilidad.

Parámetro	σ	COV (%)	E(x)
Peso unitario (kN/m ³)	0.763	7.0	10.9
Cohesión (kPa)	2.800	17.5	16.0
Ángulo de fricción interna (°)	1.600	5.0	32.0

El análisis de estabilidad, comprende por un lado, la selección de los parámetros de resistencia al cortante del suelo en términos del modelo de Mohr-Coulomb (M-C), que corresponden a la cohesión efectiva y al ángulo de fricción interna, así como al peso unitario para el análisis, el cual va acompañado de la acción de la presión del fluido al interior de los poros como agente detonante de inestabilidad R_u , debido a ello, a continuación, se muestran los gráficos de los valores obtenidos de cada piezómetro a lo largo del periodo comprendido entre 2019 y 2020 con miras de la obtención del parámetro de presión de poros R_u , seleccionado para el cálculo del factor de seguridad.

En primera instancia se proyectan los piezómetros más cercanos al perfil de análisis (ver Figura 36). Para esta sección se cuentan con tres piezómetros próximos, Pz-03, Pz-08 y Pz-07, localizados cerca del fondo del relleno y pendiente abajo en el mismo.

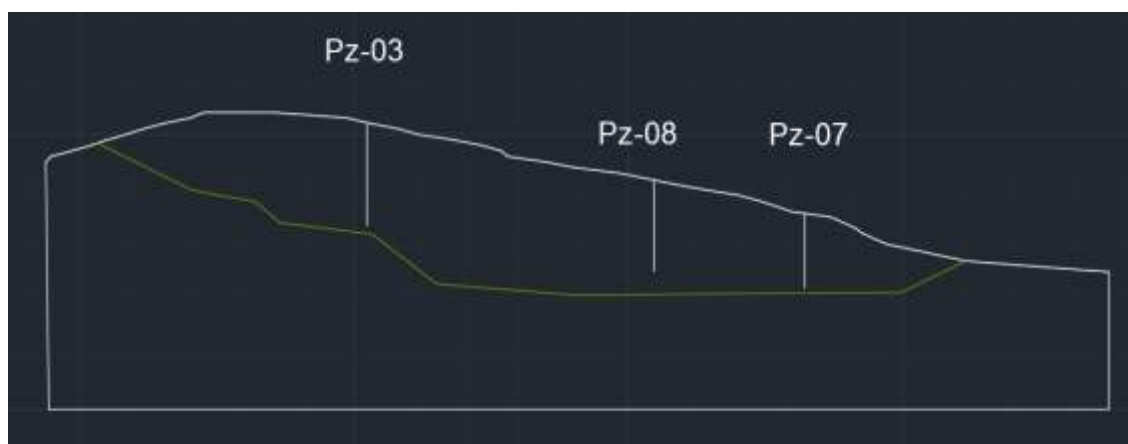


Figura 36. Vista en sección de los piezómetros más cercanos al perfil de análisis.

El piezómetro Pz-3 ubicado en la zona de mayor cobertura del vaso hacia el oeste (ver también Figura 36), es el que presenta mayores presiones, el mismo comenzó desde 87 kPa

y se fue reduciendo hasta estabilizarse de forma aparente alrededor de los 82 kPa, esta reducción podría estar asociada con un efecto de manipulación en la instalación que generó un exceso de presión, el cual se disipó en el tiempo (ver Figura 37).

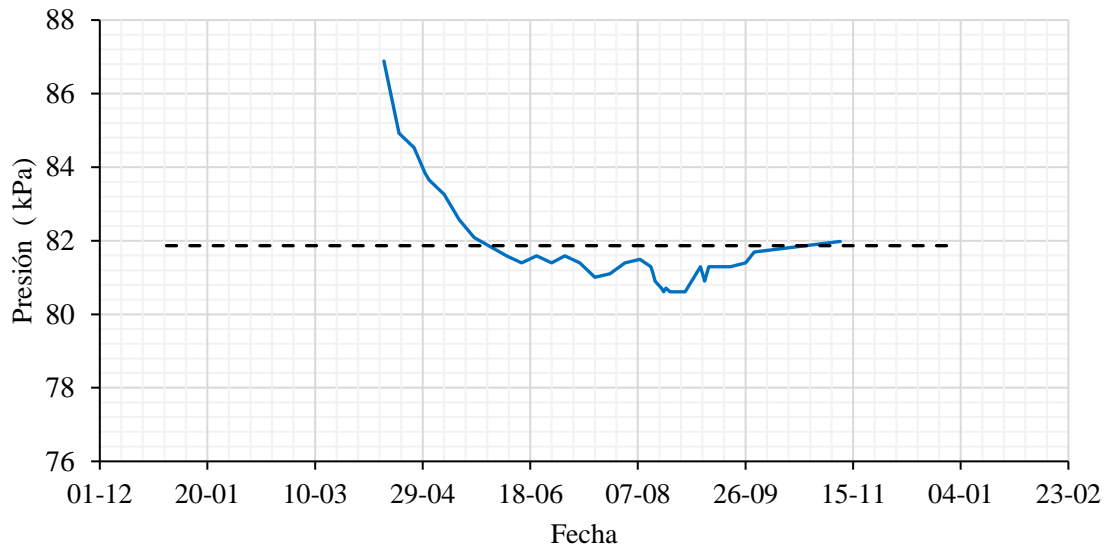


Figura 37. Lecturas del piezómetro 03 en el tiempo.

El piezómetro Pz-8 ubicado hacia el sur en la zona de menor cobertura presenta en general una mayor estabilidad oscilando alrededor de 51 a 52 kPa en función del tiempo

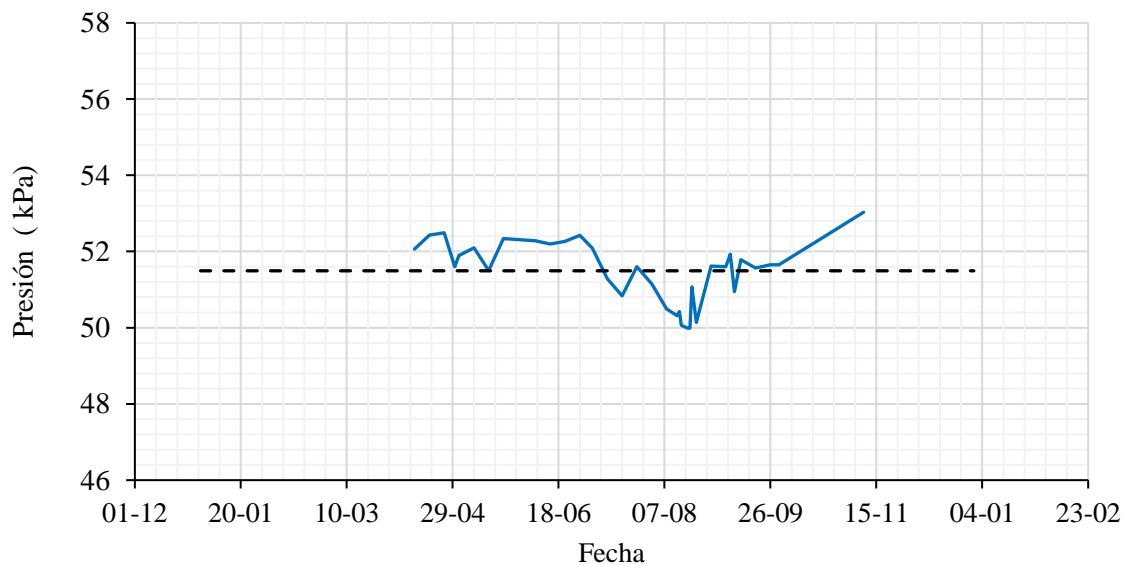


Figura 38. Lecturas del piezómetro 08 en el tiempo.

De acuerdo con el comportamiento general de los piezómetros, se pueden concluir dos cosas:

- La tendencia de la presión de fluido en los poros de los RSU presenta una tendencia creciente en el último semestre;
- Los valores medios de presión registrados se pueden agrupar en dos intervalos, el primero de 40 a 50 kPa, que se denominará como presiones bajas, y el segundo entre 80 a 90 kPa, que se denominará presiones altas. El coeficiente de presión de poros R_u derivados de estas dos agrupaciones, será el que controla el agente detonante de inestabilidad en la modelación, es importante aclarar que este rango resulta de menor variación cuando se calcula en función del R_u y no de la presión, debido al incremento de la columna de RSU para los valores altos de presión.

Debido a que la disponibilidad de datos asociados a diferentes instrumentos es limitada, se revisó la variabilidad en función del tiempo de cada instrumento, definiendo unos rangos donde se tuviese poca variación o tendencia (también, podría entenderse como aquellos datos repetidos con bajo coeficiente de correlación lineal en función del tiempo), de dicha variación se calcularon los parámetros que se presentan en la Tabla 11. Cabe anotar, que para los análisis probabilísticos en este caso se empleará una función de distribución de triangular, donde se busca una relación inferior, superior y una moda.

Tabla 11. Valores típicos del parámetro de presión de poros R_u .

Rango	Promedio	Valor relativo superior	Valor relativo inferior	Moda
Ru (1) bajo	0.490	0.420	0.330	0.40
Ru (2) alto	0.573	0.413	0.413	0.66

4.2. Análisis de estabilidad

En el análisis de estabilidad para cada método probabilístico se presentará de acuerdo con los escenarios definidos en el Capítulo 3, los cuales se diferencian en el valor de la media del coeficiente de presión R_u y de la geometría final de conformación del relleno, considerando la topografía a final de 2020 y la retoma del vaso. En la Figura 43 se presenta

la topografía a 2020 y la secuencia sedimentaria en el suelo de cimentación empleada en la modelación de los escenarios P1Act-E1 y P1Act-E2.

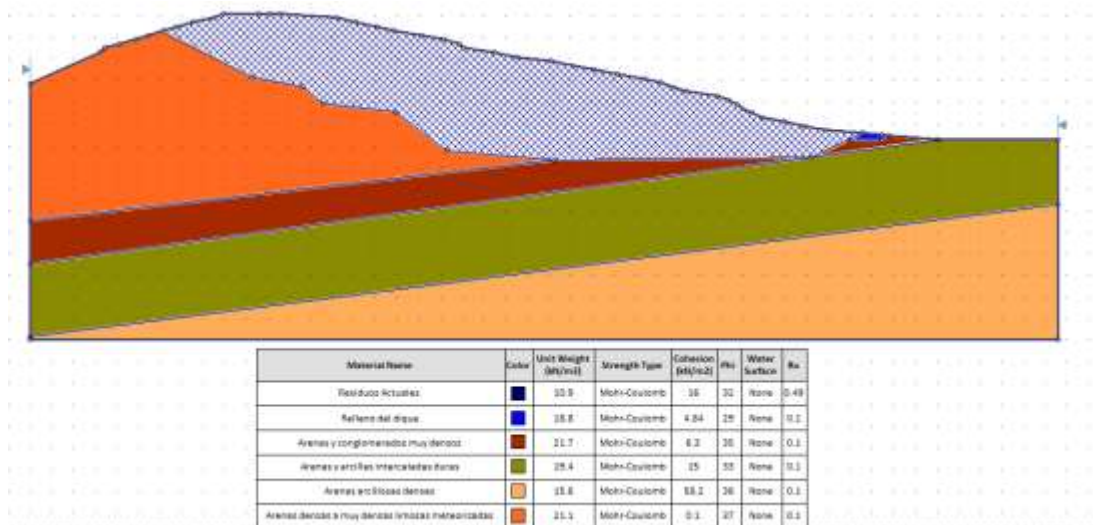


Figura 43. Escenario P1Act-E1, parámetros geotécnicos y R_u empleados en la modelación.

En la Figura 44 se presenta la geometría empleada en los escenarios que incluyen la retoma, o reinicio de las actividades de disposición final de RSU en el vaso, correspondientes a los escenarios P2Ret-E1 y P2Ret-E2.

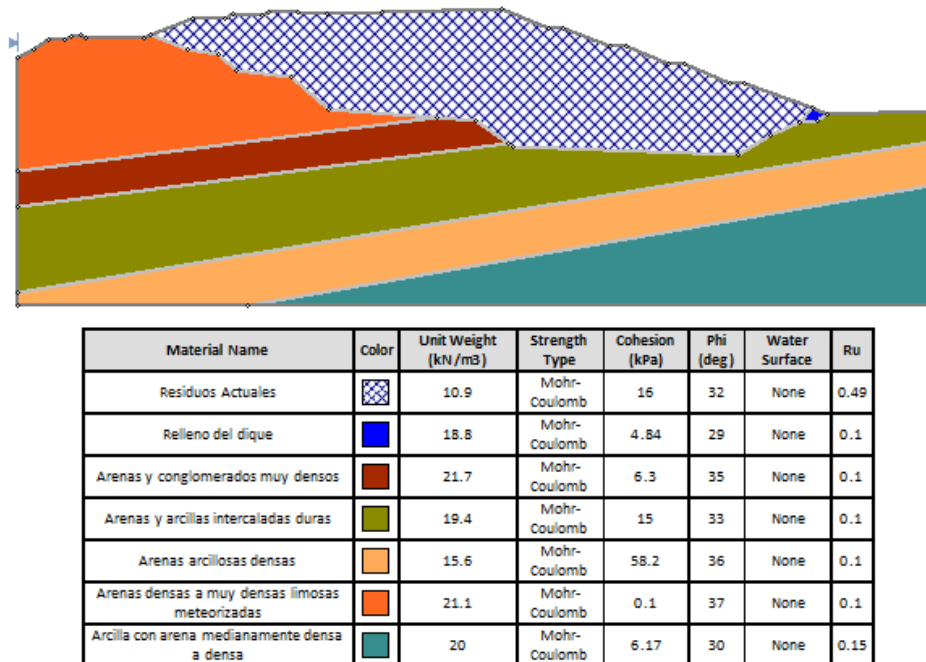


Figura 44. Escenario P2Ret-E1, parámetros geotécnicos y R_u empleados en la modelación.

Como referencia, antes de la modelación con los métodos probabilísticos se evaluaron los cuatro escenarios mencionados de forma determinística, análisis de estabilidad convencional por equilibrio límite con el método de Morgenstern & Price. En las Figura 45 a Figura 48, se presentan los resultados obtenidos con cada una de las superficies de rotura críticas, en general a mayor valor del parámetro R_u se observó un menor factor de seguridad, esto debido a que es el único agente detonante incluido en la modelación de la estabilidad.

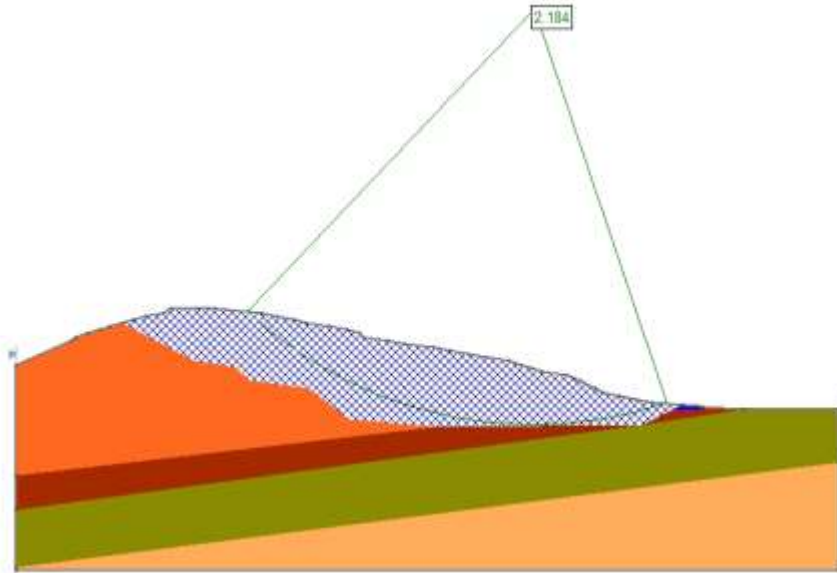


Figura 45. Factor de seguridad determinístico para el escenario PIAct-E1.

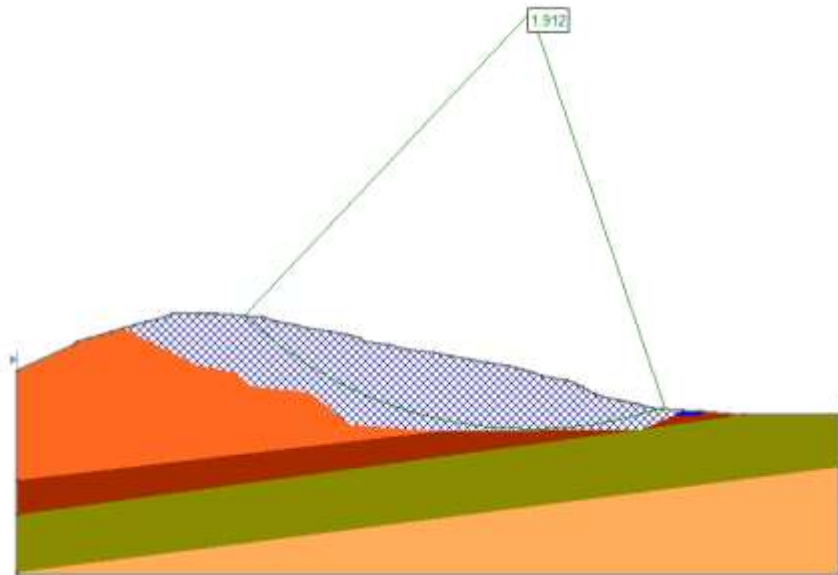


Figura 46. Factor de seguridad determinístico para el escenario PIAct-E2.

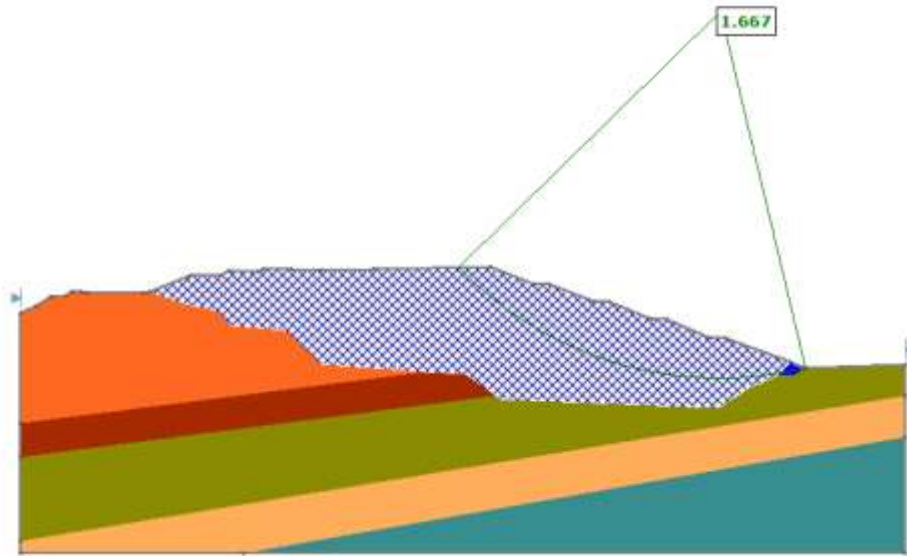


Figura 47. Factor de seguridad determinístico para el escenario P2Ret-E1.

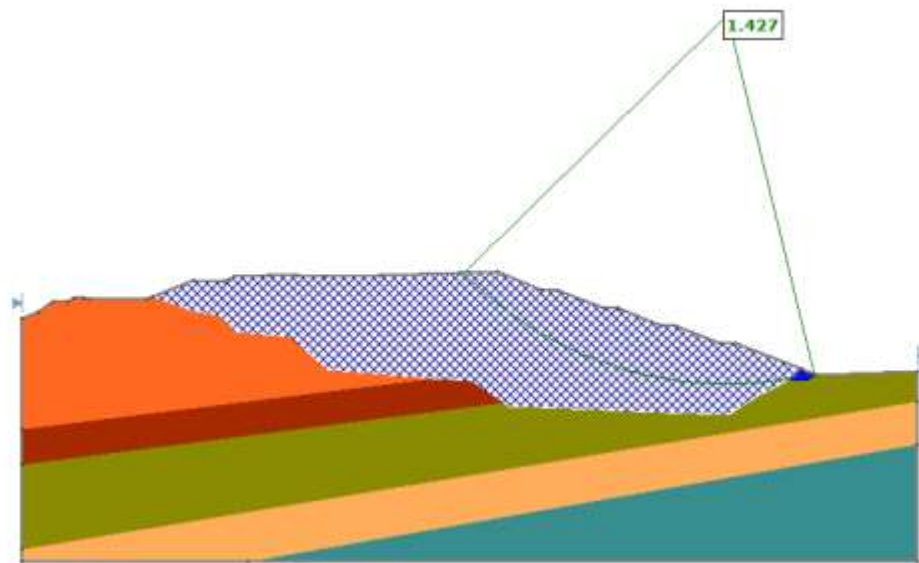


Figura 48. Factor de seguridad determinístico para el escenario P2Ret-E1.

En la Tabla 12 se resumen los resultados de los análisis determinísticos mostrados en las figuras anteriores. En los valores del factor de seguridad, se observa que a medida que crece el valor de R_u decrece el factor de seguridad, con un coeficiente de correlación lineal de -0.84 aproximadamente, de forma análoga, cuando se incrementa la altura de disposición final de RSU en la retoma, se reduce el factor de seguridad. La pregunta acá sería entonces en que momento estas reducciones podrían afectar la estabilidad del relleno analizado, pregunta que puede ser respondida en los análisis probabilísticos.

Tabla 12. Resumen de los factores de seguridad determinísticos,

Escenario de análisis	Factor de seguridad	Parámetro de presión de poros Ru
P1Act-E1	2.184	0.490
P1Act-E2	1.912	0.573
P2Ret-E1	1.667	0.490
P2Ret-E2	1.427	0.573

A continuación, se presentan entonces los resultados de los análisis probabilísticos, por los métodos mencionados en el Capítulo 3.

4.2.1. Análisis probabilístico con el método de MonteCarlo (MCM)

De acuerdo con la literatura, el método de MonteCarlo puede ser exacto en función del número de iteraciones, para el caso particular analizado, si empleamos la ecuación (11) con un nivel de confianza del 90% y cuatro variables aleatorias (peso unitario, cohesión, ángulo de fricción y coeficiente de presión de poros Ru), obtenemos el siguiente resultado:

$$N_{MCM} = \left[\frac{1.65^2}{4(1 - 0.90)^2} \right]^4$$

$$N_{MCM} = 21'460.092 \text{ iteraciones}$$

De acuerdo con lo anterior, con el MCM vamos a requerir más de 21 millones de iteraciones, lo que resultaría inviable en la modelación por apropiados prácticos, por este motivo se analizaron la media y la desviación estándar al variar el número iteraciones desde diez hasta un millón cambiando un orden de magnitud.

En las Figura 49 a Figura 56 se muestran los resultados de las modelaciones para los cuatro un millón de iteraciones. En general, se aprecia una diferencia pequeña, apenas en décimas del factor de seguridad determinístico y el probabilístico, y probabilidades de falla del 1 al 2% para la condición actual, y del 5 al 11% para la retoma del relleno. En general, la condición de retoma incrementa la incertidumbre en la respuesta del vaso, aumentando hasta 5 veces la probabilidad de desempeño de pobre a no satisfactoria (ver clasificación de la

Tabla 13), lo que permitiría establecer que esta geometría de retoma puede no ser la más adecuada, y por tanto responder la pregunta que queda después del análisis determinístico.

Tabla 13. Índices de confiabilidad sugeridos para obras geotécnicas por el U.S. Army Corps of Engineers (1997).

Nivel de desempeño esperado	Beta	Probabilidad de desempeño insatisfactorio
Alto	5	0.0000003
Bueno	4	0.00003
Por encima del promedio	3	0.001
Debajo del promedio	2.5	0.006
Pobre	2	0.023
No satisfactoria	1.5	0.07
Peligroso	1	0.16

Nota: La probabilidad de desempeño insatisfactorio es la probabilidad en la cual el valor de la función del desempeño se acercará al estado límite, o en la cual un evento insatisfactorio ocurrirá. Por ejemplo, si la función de desempeño es definida en términos de la inestabilidad de ladera, y la probabilidad de desempeño insatisfactorio es de 0.023, entonces 23 de cada 1000 inestabilidades resultaran en un daño el cual causa una amenaza.

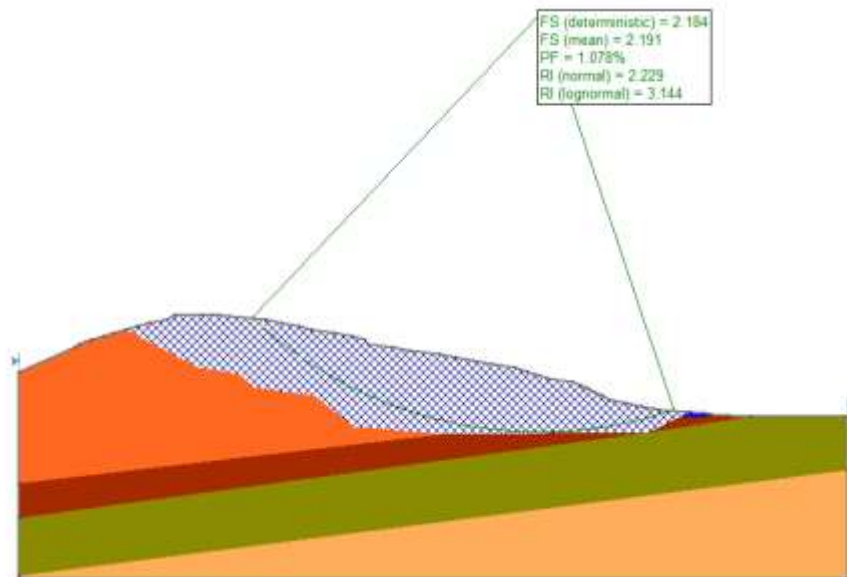


Figura 49. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E1.

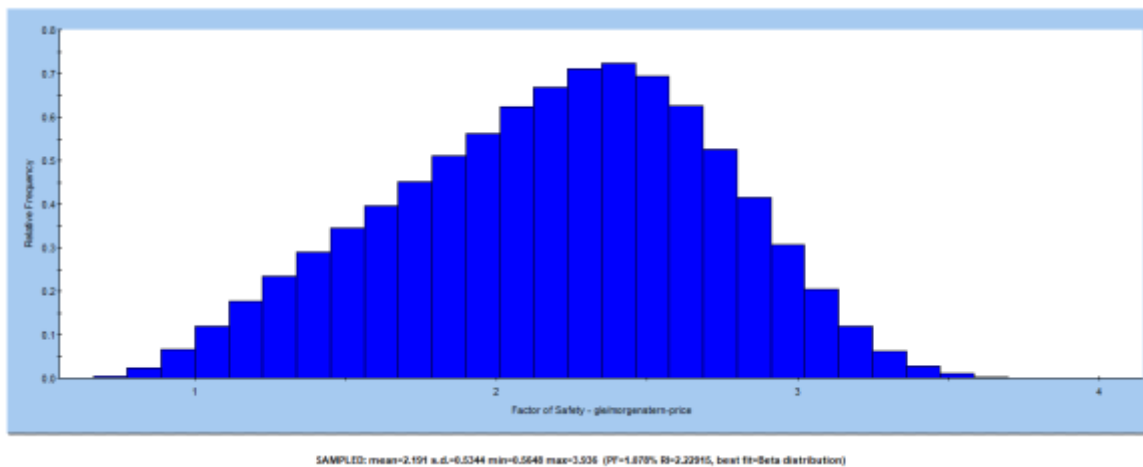


Figura 50. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E1.

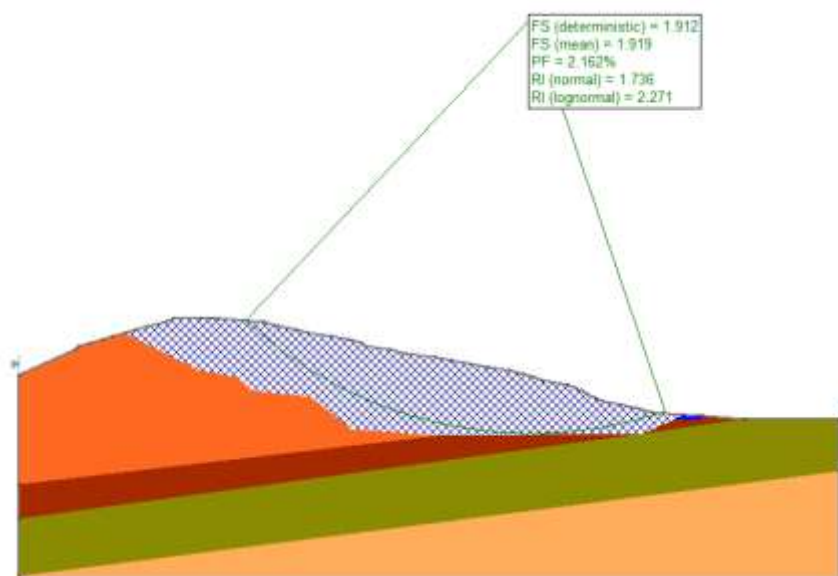


Figura 51. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E2.

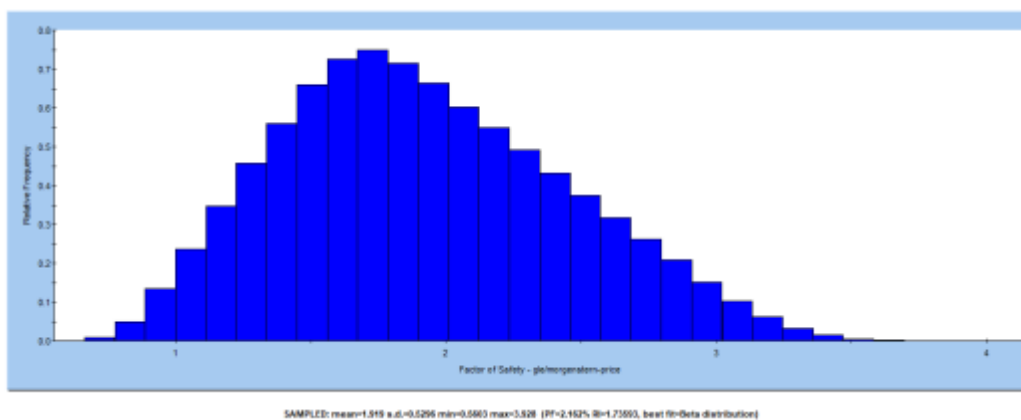


Figura 52. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P1Act-E2.

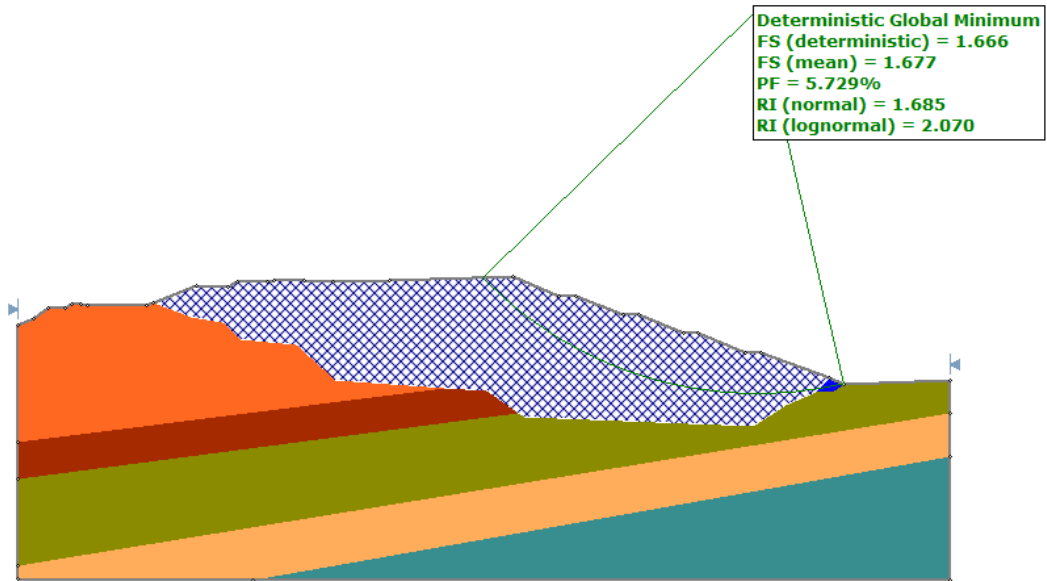


Figura 53. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E1.

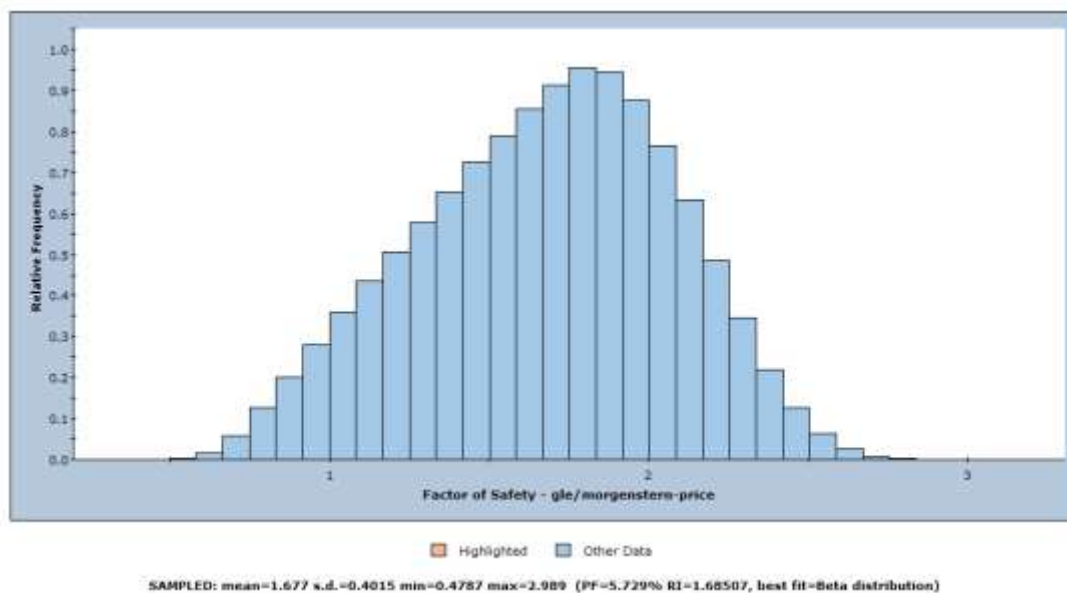


Figura 54. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E1.

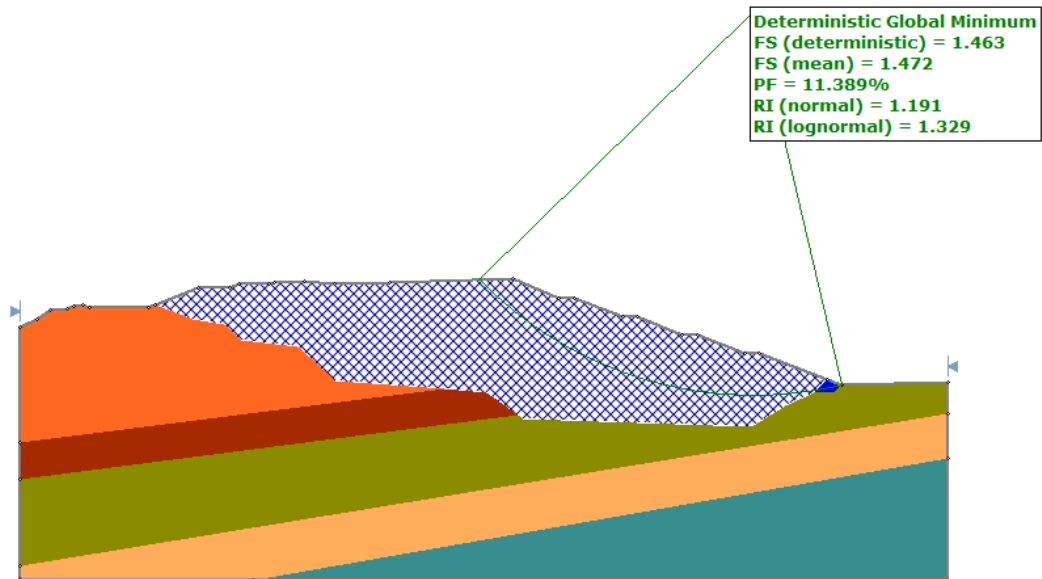


Figura 55. Factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E2

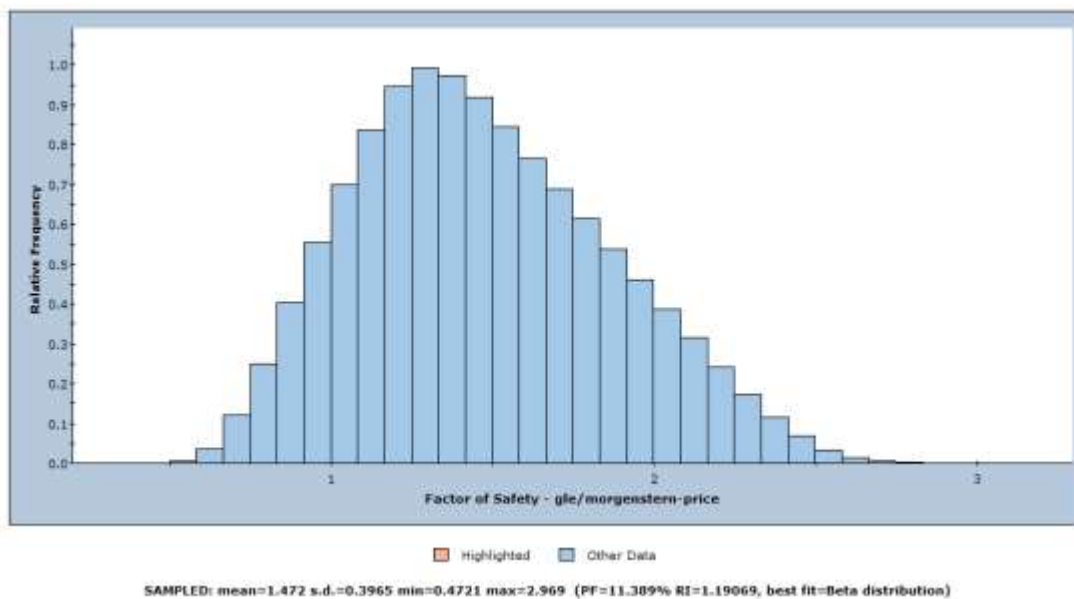


Figura 56. Histograma del factor de seguridad, 1 millón de iteraciones escenario P2Ret-E2.

Todas las salidas de las modelaciones se presentan en el Anexo 1. En la Tabla 14 se resumen los resultados de la variación del número de iteraciones en los momentos estadísticos objeto de análisis, los cuales corresponden a la media y a la desviación estándar.

En los resultados se observa que a medida que se incrementa el número de iteraciones se reduce la diferencia relativa entre el factor de seguridad determinístico y probabilístico, para la condición actual (P1Act-E1 y E2) se reduce a cero después de las 100,000 iteraciones. Para el caso de la propuesta de retoma (P2Ret-E1 y E2) se estabiliza en el mismo número de

iteraciones, pero se mantiene entre el 1 al 3%. Por tanto, en función del valor medio del factor de seguridad para el caso de estudio es suficiente hacer 100,000 iteraciones en lugar de 21 millones.

Tabla 14. Efecto del número de iteraciones en la esperanza y la desviación estándar con el MCM.

# Iteraciones	P1Act-E1		P1Act-E1		P2Ret-E1		P2Ret-E2	
	FS	σ	FS	σ	FS	σ	FS	σ
Determinístico	2.184	--	1.192	--	1.667	--	1.427	--
10	2.053	0.650	1.799	0.595	1.666	0.422	1.469	0.444
100	2.273	0.545	2.003	0.539	1.708	0.382	1.498	0.376
1,000	2.167	0.536	1.896	0.527	1.681	0.396	1.475	0.392
10,000	2.200	0.533	1.927	0.529	1.685	0.401	1.480	0.397
100,000	2.191	0.533	1.919	0.528	1.678	0.402	1.473	0.397
1'000,000	2.191	0.534	1.919	0.530	1.677	0.402	1.472	0.397

En las Figura 57 y Figura 58 se presenta el efecto del número de iteraciones en la desviación estándar para las condiciones de geometría actual y con retoma, a partir del análisis se observa que la oscilación en el segundo momento estadístico se estabiliza a partir de las 10,000 iteraciones, un orden de magnitud menos que el valor medio.

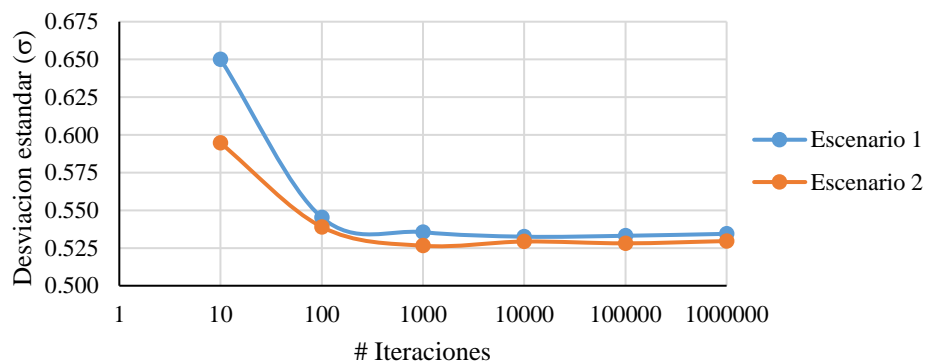


Figura 57. Efecto del número de iteraciones en la desviación estándar en el MCM para la condición actual.

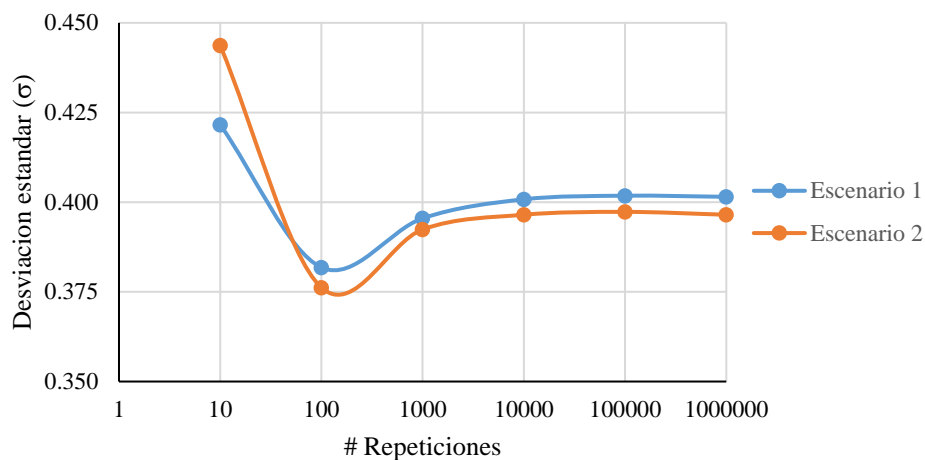


Figura 58. Efecto del número de iteraciones en la desviación estándar en el MCM para la condición de retoma.

4.2.2. Análisis aproximado por el método de primer orden segundo momento (FOSM)

Tal como se mencionó en el Capítulo 3, el análisis de estabilidad con el método FOSM se hizo sobre las mismas variables aleatorias del MCM, considerando como aproximación en el cálculo de la derivada un delta igual al 10% de la desviación estándar, e ignorando la correlación que pueda existir entre el ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso unitario. Es importante aclarar que en este caso los valores del FS medios y el determinístico son iguales debido a la definición misma de las iteraciones descritas en el Capítulo 3, es decir el medio se calcula con los valores medios de cada variable que resultan iguales a los empleados en el análisis determinístico.

Cada escenario fue analizado aparte dejando que el método de optimización encontrara la superficie con menor factor de seguridad. Para los escenarios con la geometría a final de 2020 (ver Tabla 15 y Tabla 16) la contribución del Ru es prácticamente igual de 93.3% a la varianza, mientras que la contribución en el peso unitario es inferior al 1% y el ángulo de fricción interna y la cohesión oscilan entre el 2 al 4%, y por tanto en esta configuración geométrica las variables de mayor contribución son entonces el coeficiente Ru y la cohesión c' . En las Tablas 15 a 18 se resumen los resultados del método. En las dos

últimas columnas se presentan los términos correspondientes a la sumatoria que conforma la varianza del FS (ecuación 16), y el último término sería entonces la contribución.

En general, la variable que más contribuye a la varianza del factor de seguridad es el coeficiente de presión de poros Ru, arrojando valores superiores al 90%.

Para los escenarios con la geometría a final de 2020 (ver Tabla 15 y Tabla 16) la contribución del Ru es prácticamente igual de 93.3% a la varianza, mientras que la contribución en el peso unitario es inferior al 1% y el ángulo de fricción interna y la cohesión oscilan entre el 2 al 4%, y por tanto en esta configuración geométrica las variables de mayor contribución son entonces el coeficiente Ru y la cohesión c' .

Tabla 15. Resultados del método FOSM para el escenario PIAct-E1.

Variable	E (x)	σ	$\partial FS/\partial x_i$	$(\partial FS/\partial x_i)^2 \cdot \sigma_{xi}^2$	Contribución
Ángulo de fricción interna	32	1.6	0.05	0.00640	2.29%
Cohesión	16	2.8	0.0357	0.00999	3.58%
Peso Unitario	10.9	0.763	-0.0655	0.00250	0.90%
Ru	0.573	0.155	-3.29	0.26005	93.23%
			<i>Var[FS]</i>	0.27894	
			σ_{FS}	0.5281	

Tabla 16. Resultados del método FOSM para el escenario PIAct-E2.

Variable	E (x)	σ	$\partial FS/\partial x_i$	$(\partial FS/\partial x_i)^2 \cdot \sigma_{xi}^2$	Contribución
Ángulo de fricción interna	32	1.6	0.0625	0.01000	3.59%
Cohesión	16	2.8	0.0393	0.01211	4.34%
Peso Unitario	10.9	0.763	-0.0524	0.00160	0.57%
Ru	0.49	0.1564	-3.261	0.26012	93.25%
			<i>Var[FS]</i>	0.28383	
			σ_{FS}	0.5328	

En el caso de la configuración propuesta para la retoma del vaso del relleno (ver Tablas 17 y 18), el coeficiente Ru contribuye alrededor del 91% a la variabilidad mientras que la cohesión sube al 5%, la fricción oscila alrededor del 3% y la variable de menor efecto es el peso unitario.

Tabla 17. Resultados del método FOSM para el escenario P2Ret-E1.

Variable	E (x)	σ	$\partial FS/\partial x_i$	$(\partial FS/\partial x_i)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2$	Contribución
Ángulo de fricción interna	32	1.6	0.04375	0.00490	3.13%
Cohesión	16	2.8	0.0321	0.00808	5.16%
Peso Unitario	10.9	0.763	-0.0524	0.00160	1.02%
Ru	0.573	0.155	-2.43	0.14187	90.68%
			$Var[FS]$	0.15644	
			σ_{FS}	0.3955	

Tabla 18. Resultados del método FOSM para el escenario P2Ret-E2.

Variable	E (x)	σ	$\partial FS/\partial x_i$	$(\partial FS/\partial x_i)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2$	Contribución
Ángulo de fricción interna	32	1.6	0.0375	0.00360	2.28%
Cohesión	16	2.8	0.0321	0.00808	5.12%
Peso Unitario	10.9	0.763	-0.0524	0.00160	1.01%
Ru	0.49	0.1564	-2.43	0.14444	91.58%
			$Var[FS]$	0.15772	
			σ_{FS}	0.3971	

4.2.3. Análisis por campos aleatorios considerando la variabilidad espacial (RLEM)

De forma inicial, para tener un orden de magnitud de la longitud de correlación, empleando los datos de la Figura 59 se obtiene una longitud de correlación $\delta v = 4.9$ m. En función de la escasez de información se realizarán para todos los escenarios un análisis variando la longitud de correlación de 1.25, 2.5, 4.9, 10 y 20 m (ver Anexo 2).

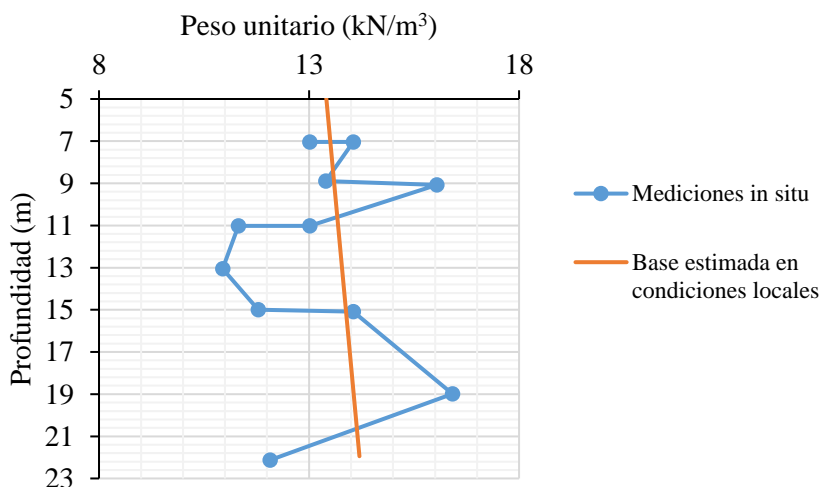
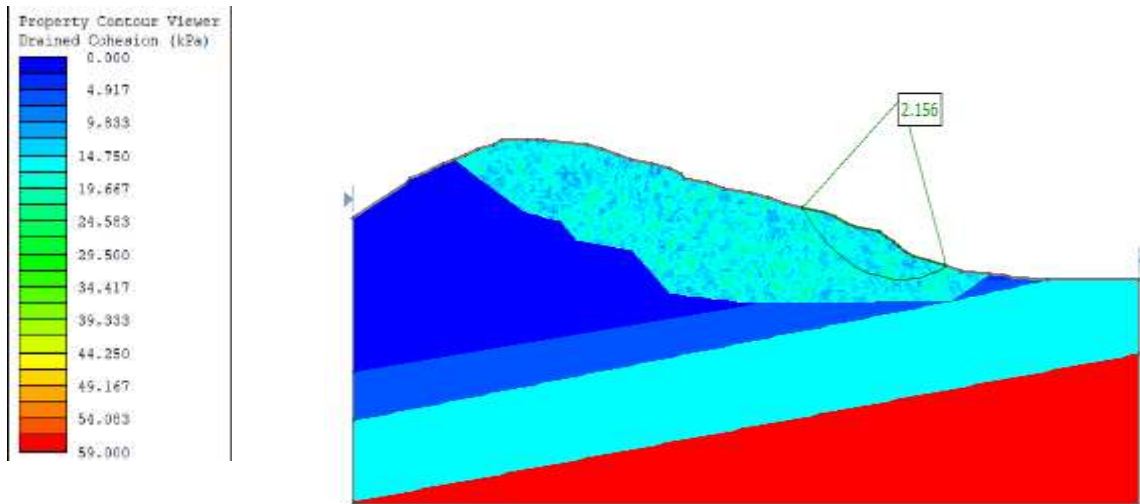
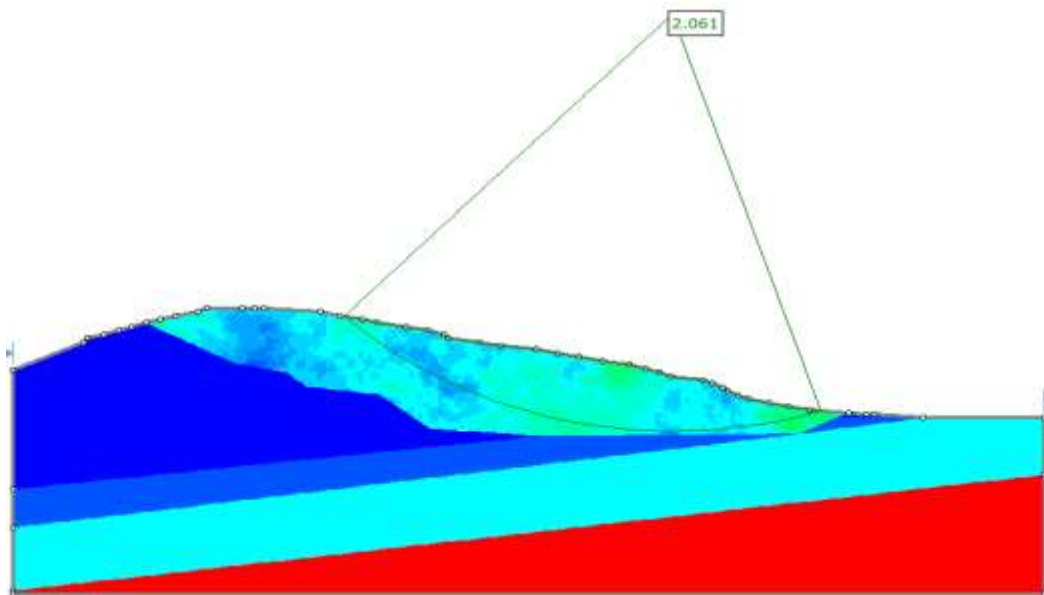


Figura 59. Variación del peso unitario en un relleno sanitario en función de la profundidad (Zekkos et al., 2006).

En las Figura 60 a Figura 71 se presenta como el programa asigna de manera aleatoria las variables aleatorias seleccionadas, que corresponden a los parámetros de resistencia al corte y el peso unitario. Es importante aclarar que no se cuenta con esta posibilidad en el análisis para modificar el valor del coeficiente de presión de poros R_u .



(a)



(b)

Figura 60. Variabilidad espacial del parámetro cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m

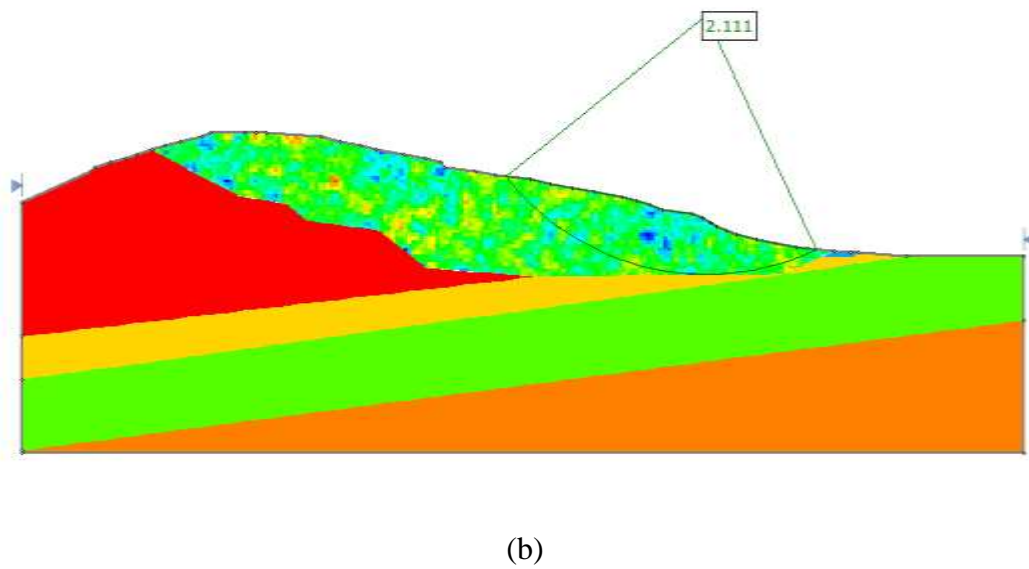
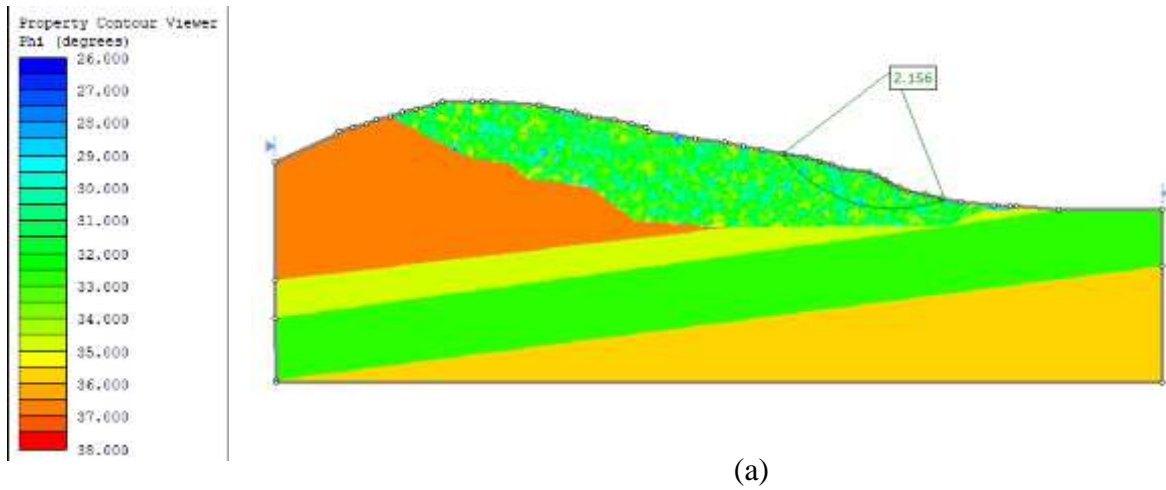
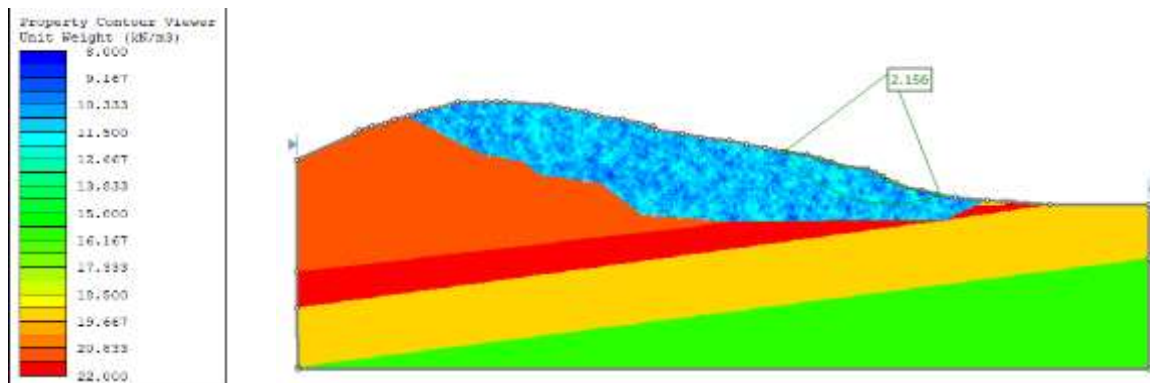


Figura 61. Variabilidad espacial del parámetro Angulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9M.



(a)

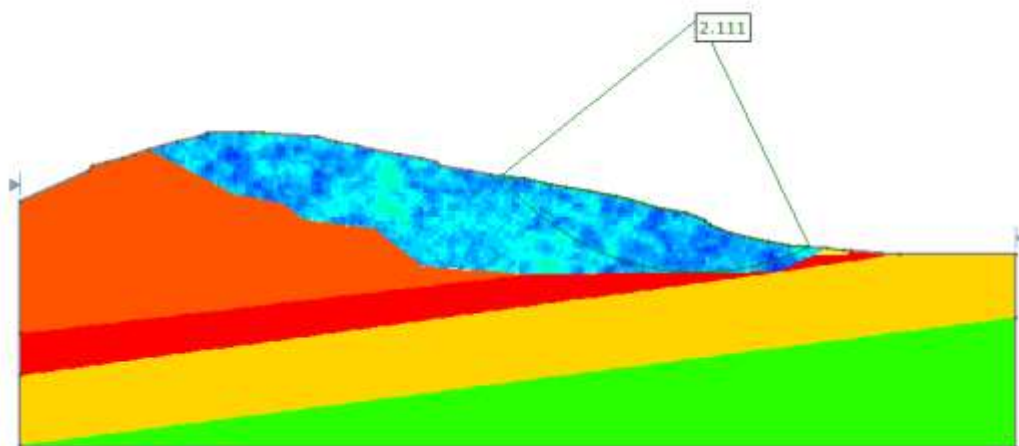
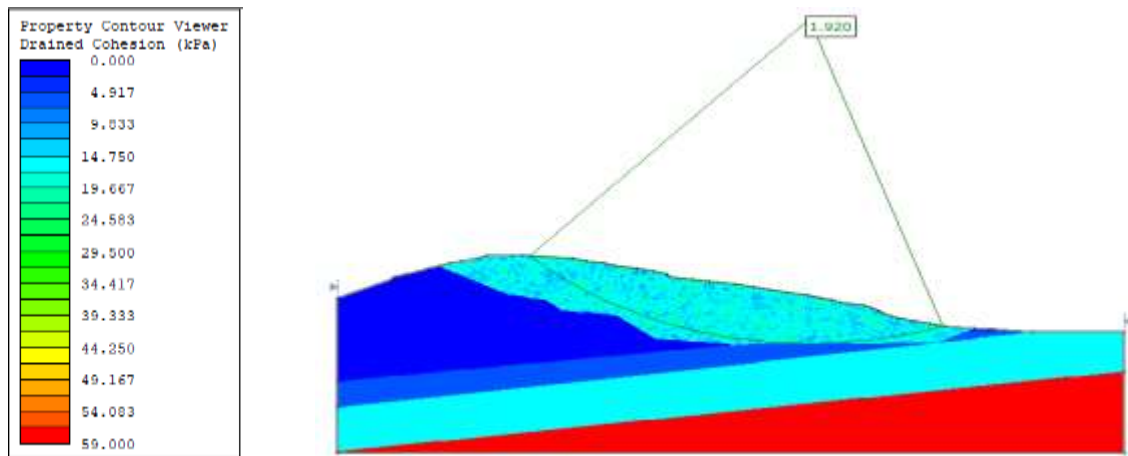
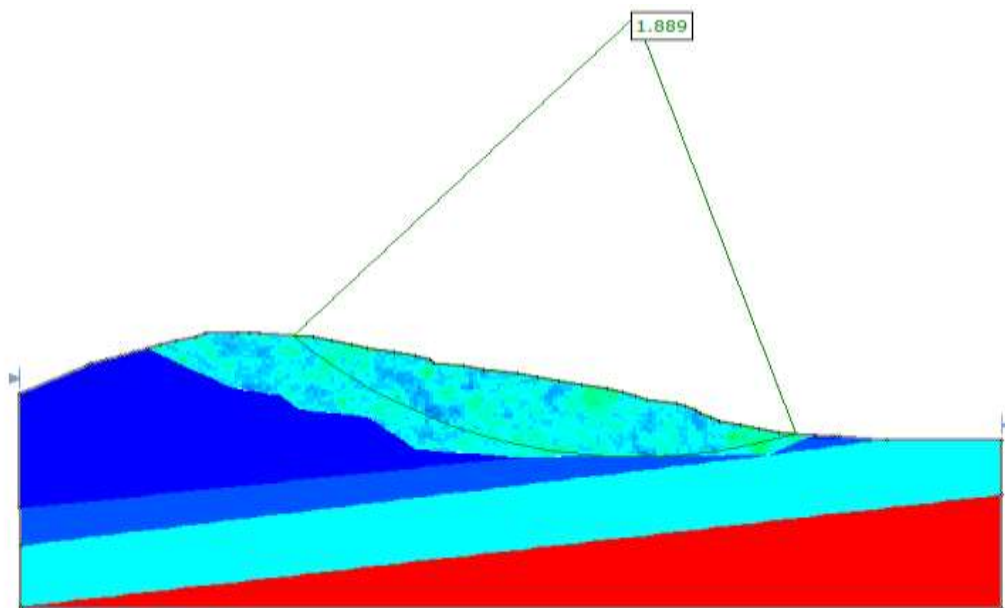


Figura 62. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.



(a)



(b)

Figura 63. Variabilidad espacial del parámetro de cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.

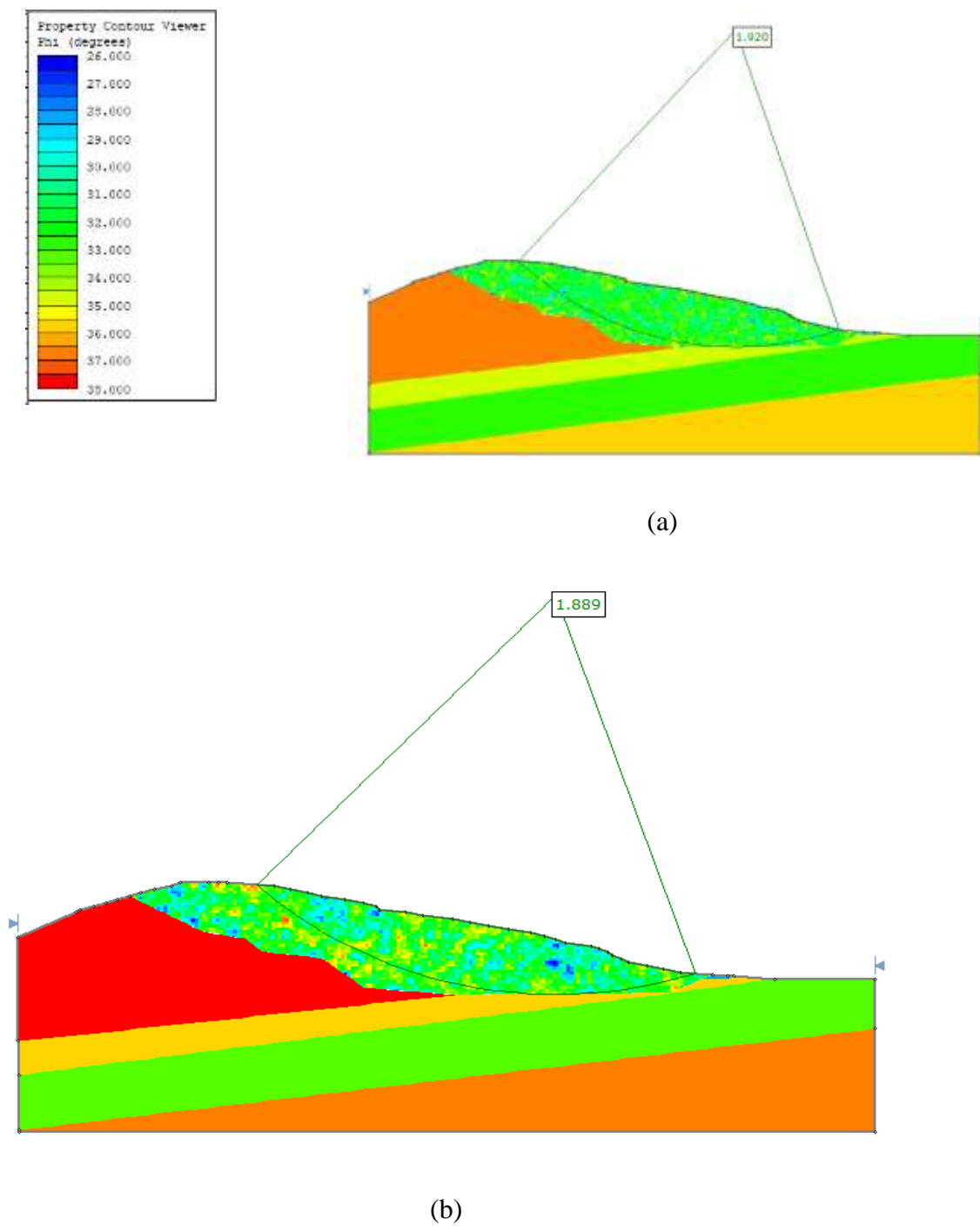


Figura 64. Variabilidad espacial del parámetro Angulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.

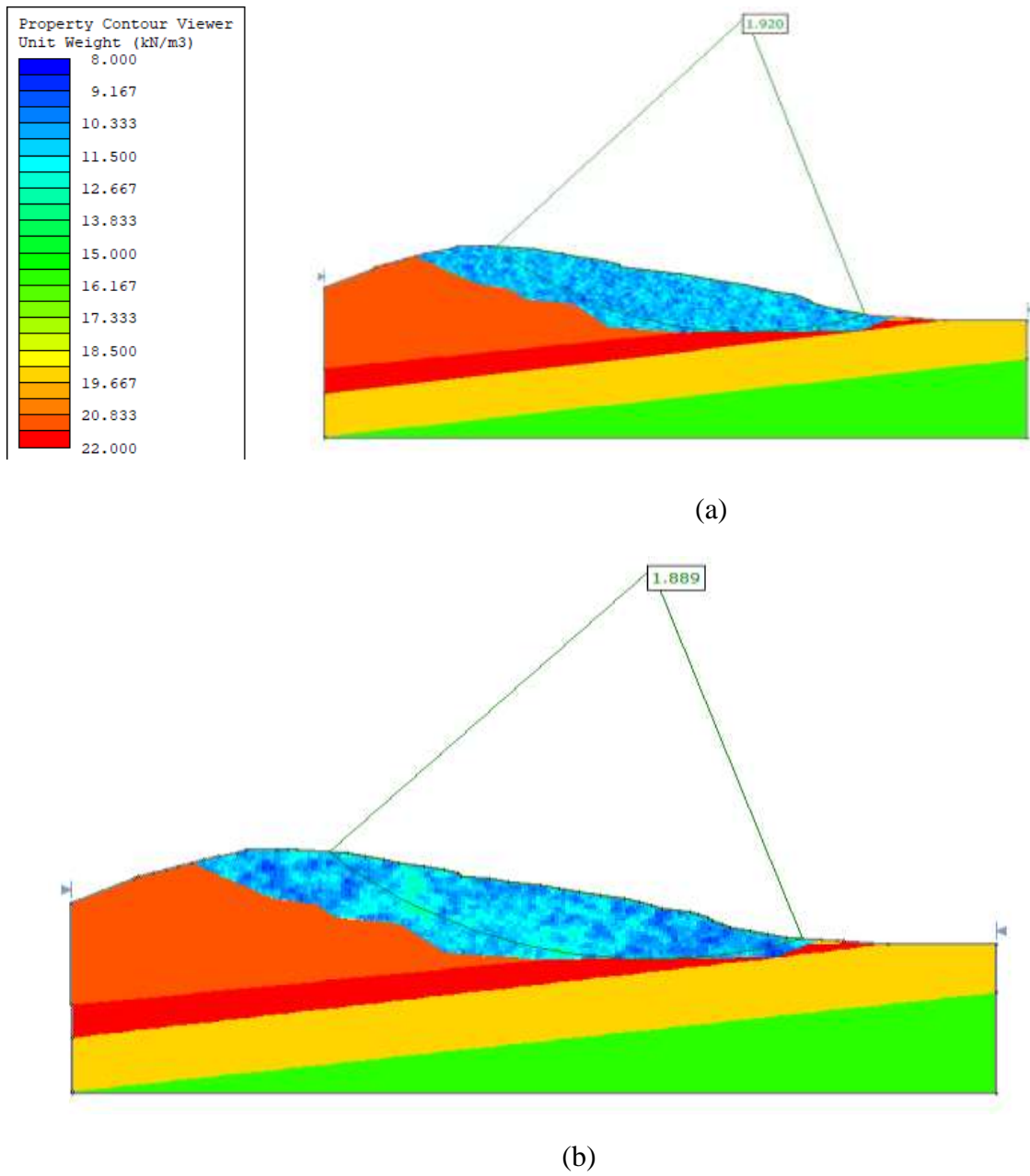
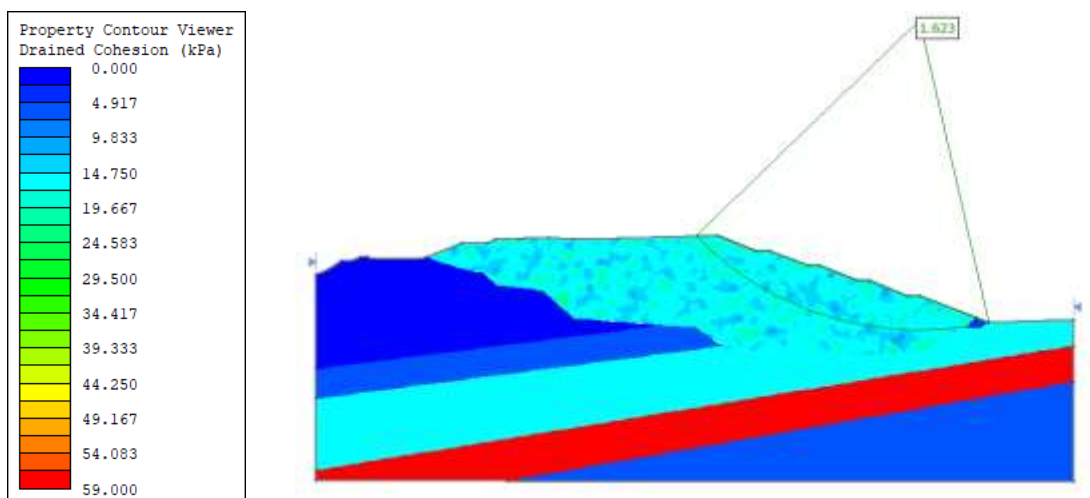
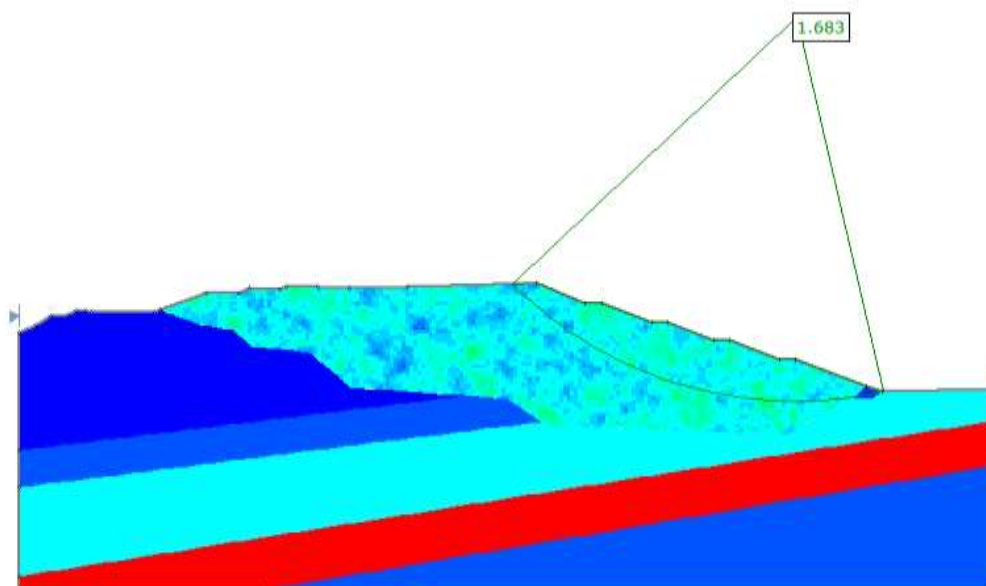


Figura 65. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.

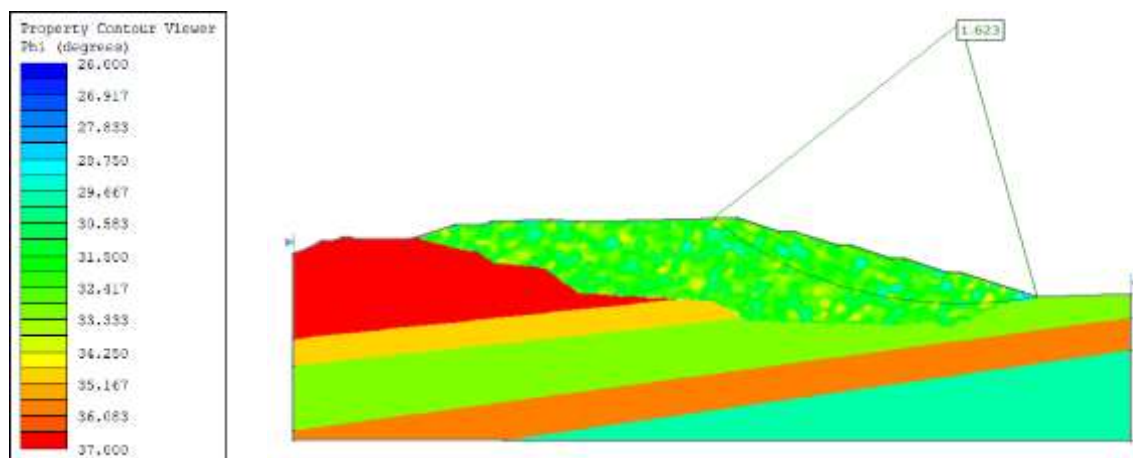


(a)

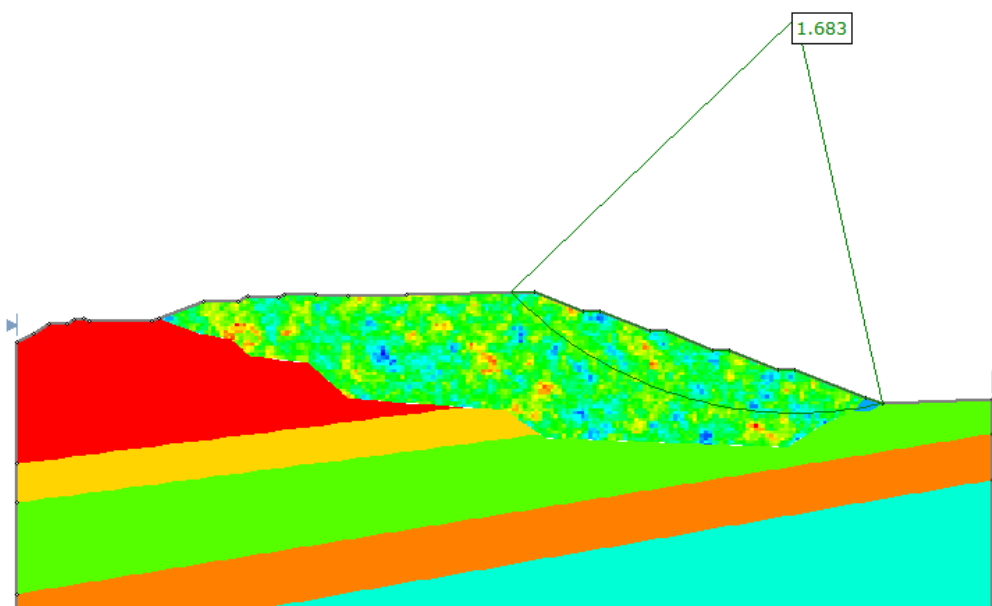


(b)

Figura 66. Variabilidad espacial del parámetro cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m

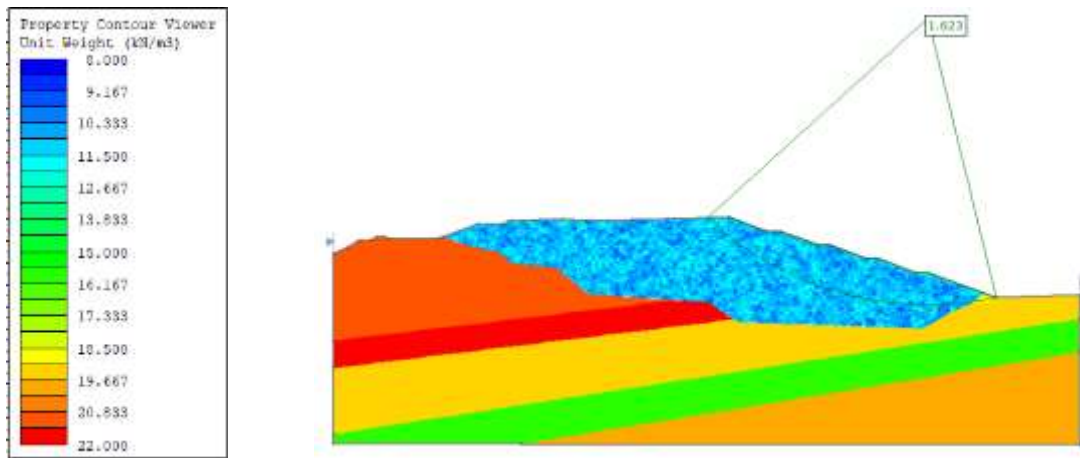


(a)

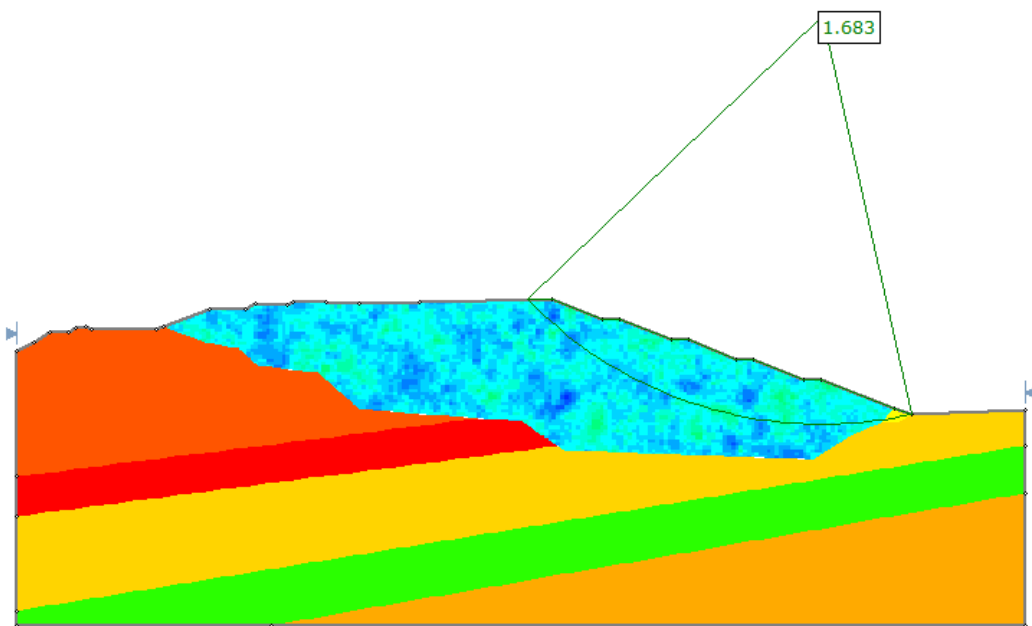


(b)

Figura 67. Variabilidad espacial del parámetro Angulo de fricción, longitud de correlación:
(a) 1.25 m, (b) 4.9m.



(a)



(b)

Figura 68. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.

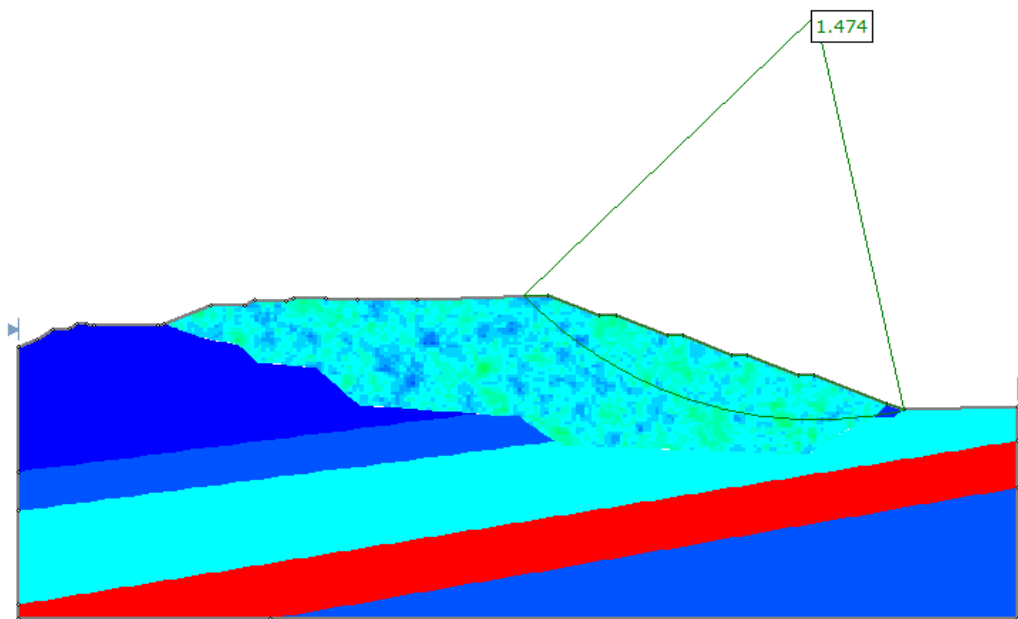
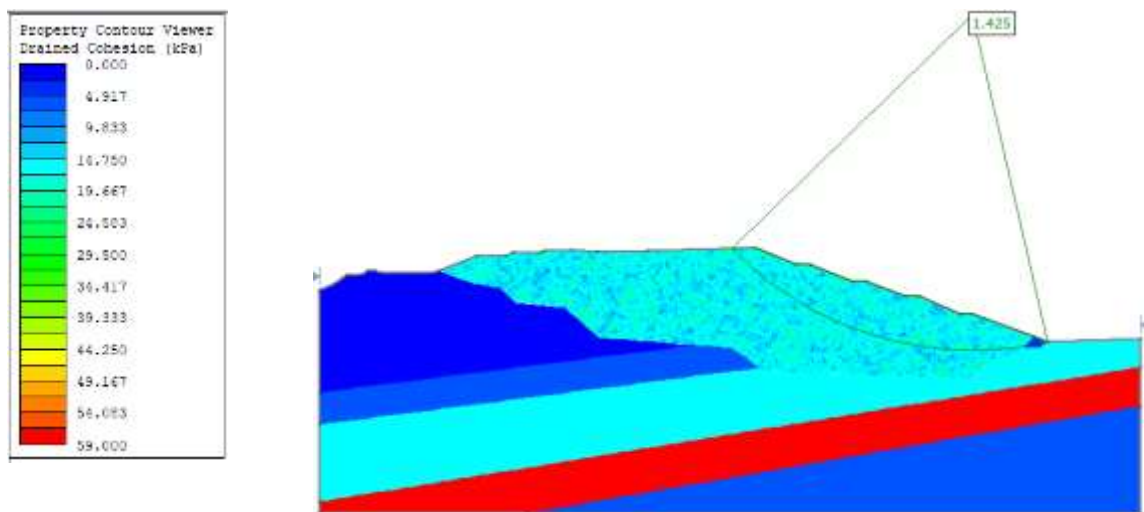
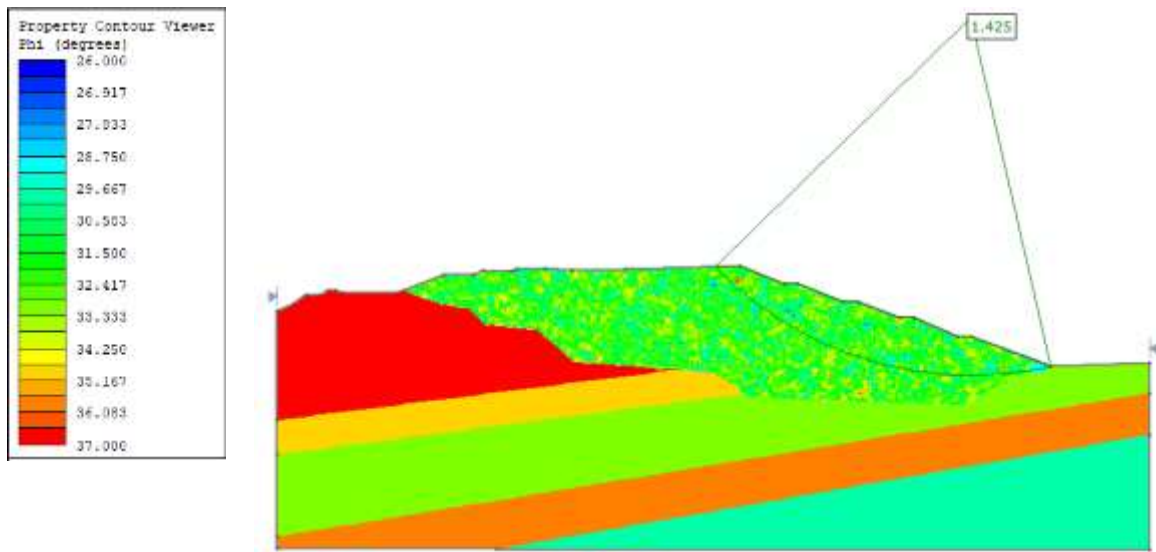
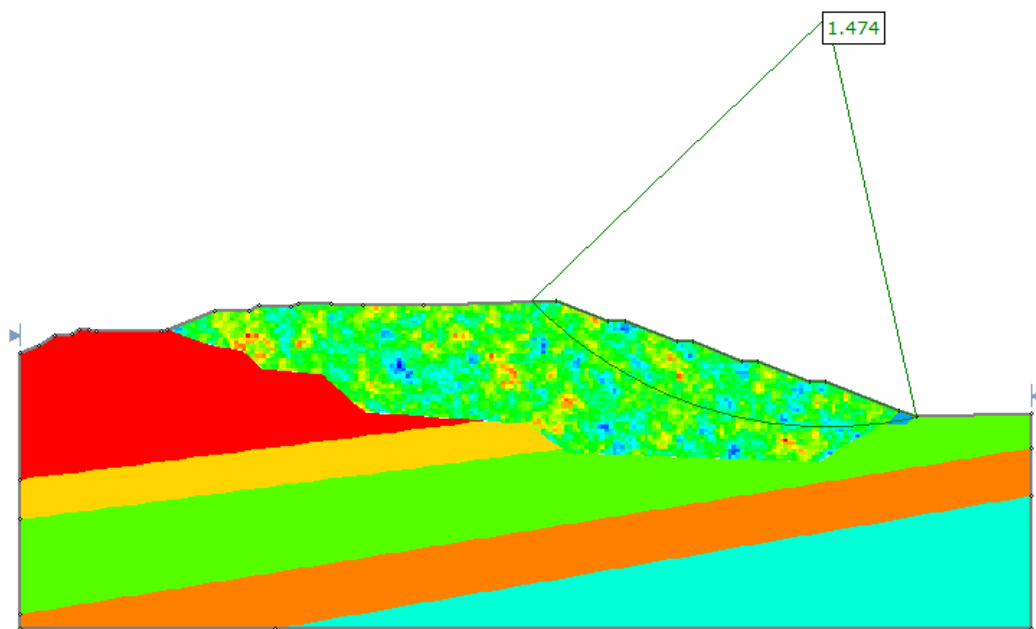


Figura 69. Variabilidad espacial del parámetro cohesión, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.



(a)



(b)

Figura 70. Variabilidad espacial del parámetro ángulo de fricción, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.

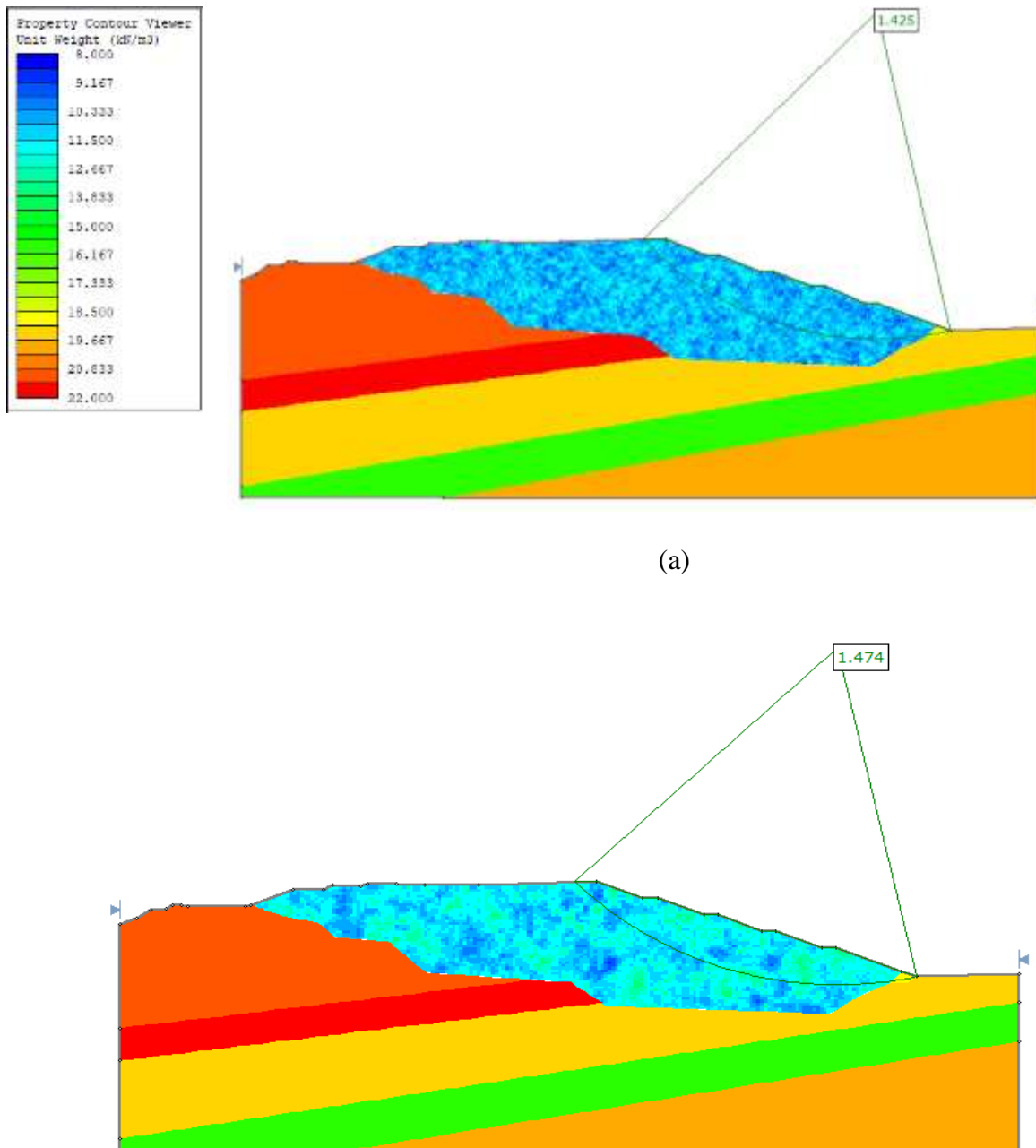


Figura 71. Variabilidad espacial del parámetro Peso unitario, longitud de correlación: (a) 1.25 m, (b) 4.9m.

En la Tabla 19 se resumen los resultados obtenidos en función de la variación de la longitud de correlación para los escenarios estudiados, en general el valor del FS cambia de

forma con la longitud de correlación. Para los escenarios con la geometría actual el factor de seguridad se reduce conforme la longitud de correlación aumenta, mientras que para los escenarios con la geometría modificada el factor de seguridad se incrementa conforme la longitud de correlación se incrementa. En el primer caso al analizar los resultados de FOSM la influencia de la variabilidad del ángulo de fricción y la cohesión son más próximos, mientras que en la retoma la cohesión tiene mayor influencia que el ángulo de fricción, y por tanto, una longitud de correlación mayor genera más estabilidad o menor variación en la cohesión para el análisis de variabilidad espacial.

Tabla 19. Efecto de la longitud de correlación en el factor de seguridad para los escenarios analizados.

Longitud de correlación (m)	Factor de seguridad			
	P1Act-E1	P1Act-E2	P2Ret-E1	P2Ret-E2
1.25	2.156	1.920	1.623	1.425
2.5	2.109	1.867	1.670	1.459
4.9	2.111	1.889	1.683	1.474
10	2.098	1.843	1.707	1.504
20	2.061	1.817	1.730	1.526

4.3.Comparación de los diferentes métodos

En la Tabla 20 se presentan algunos de los resultados de los tres métodos, en general la diferencia en el factor de seguridad medio es baja. Entre los métodos MCM y FOSM la proximidad de los resultados es cercana, y la mayor diferencia está en el tiempo de análisis, además que el método FOSM permite obtener la contribución de cada variable en la varianza del factor de seguridad, y por ende la variable que mayor influencia tendría en el comportamiento no satisfactorio o la probabilidad de falla.

Tabla 20. Comparación de los resultados obtenidos con los tres métodos.

Escenario	MCM (N _{MCM} =100,00)			FOSM			RLEM (θ=4.19m)		
	FS	σ _{FS}	t (min)	FS	σ _{FS}	t (min)	FS	σ _{FS}	t (min)
P1Act-E1	2.191	0.534	45	2.184	0.528	25	2.111	0.041	110
P1Act-E2	1.919	0.530	46	1.912	0.533	25	1.889	0.036	112
P2Ret-E1	1.677	0.402	46	1.667	0.396	25	1.683	0.031	115
P2Ret-E2	1.472	0.397	47	1.427	0.397	25	1.474	0.029	112

Con relación a la desviación estándar del FS no es posible comparar los tres métodos, ya que en el RLEM sólo se pueden incluir en el software tres de las cuatro variables, y finalmente se excluye la que tiene mayor importancia que es el coeficiente de presión de poros R_u . No obstante, mediante FOSM es posible aislar las tres variables estudiadas con RLEM, obteniendo valores de 0.137, 0.154, 0.121 y 0.115 en la desviación estándar para cada uno de los escenarios analizados, en general estos valores superan a los obtenidos por RLEM para la condición de 4.19 m en la longitud de correlación.

La diferencia más significativa entre los métodos empleados es la duración del proceso, esto puede variar claramente según la capacidad del equipo, en este caso se utilizó los computadores virtuales de la pontificia universidad javeriana Cali arrojándonos unos tiempos promedio de cálculo de unos 45 minutos para el método MCM y de 112 minutos para el método RLEM, probablemente este aumento en la duración puede estar justificado en la menor desviación estándar del método, dado a que este tiene una mayor cantidad de procesos para llegar al resultado.

5. CONCLUSIONES

El presente capítulo se definen unas conclusiones sobre los resultados obtenidos del trabajo de investigación de la estabilidad del talud del Vaso 3 oeste del relleno sanitario en el Valle del Cauca.

5.1. Conclusiones

A continuación, se enumeran las conclusiones generales obtenidas al final del desarrollo del trabajo de grado:

- Fueron recopilados resultados de parámetros de resistencia al corte de rellenos sanitarios, obtenidos mediante ensayos de campo y laboratorio, los cuales permiten entender la variabilidad presente en los parámetros de resistencia al corte en función del modelo empleado y de las técnicas de determinación de los mismos.
- Empleando el método o regla 3σ fue posible definir el primer y segundo momento estadístico de los parámetros de resistencia al corte de los residuos sólidos urbanos y del peso unitario para los resultados reportados donde se tenían las parejas de datos esfuerzo cortante vs esfuerzo normal.
- En el análisis de la instrumentación más importante en la estabilidad correspondiente a los piezómetros, fue posible definir la variabilidad del cociente de presión de poros R_u en función de los datos repetidos cuando la correlación lineal en función del tiempo era próxima de cero.
- Finalmente, fueron empleados tres métodos probabilísticos para evaluar la estabilidad, dos que no incorporan los efectos de la variabilidad espacial y uno que si lo hace. Para los métodos que no incorporan la variabilidad espacial se evaluó el efecto de cuatro variables aleatorias obteniendo resultados muy similares. Mientras que para el método que incorpora la variabilidad espacial no fue posible considerar el efecto del coeficiente de presión de poros, es decir no se puede incorporar el efecto de un agente detonante.

5.2.Recomendaciones para trabajos futuros

En el análisis de la información generada en el sitio del relleno se detectó una diferencia significativa entre las velocidades de propagación de ondas de corte para los 30 m superiores del perfil, ya que cambia la clasificación del tipo de suelo para considerar los efectos sísmicos. Por tanto, se recomienda profundizar en este aspecto, para reducir la incertidumbre en el análisis bajo el sismo de diseño, esto se puede hacer a partir de la caracterización con otro método geofísico de ondas superficiales como el MASW y la modelación de los efectos de sitio incluyendo los RSU. Dando posibilidad al desarrollo de otro trabajo de grado.

Incrementar el número de piezómetros para verificar las condiciones de desempeño de la estabilidad del relleno. Mejorando la localización de los piezómetros, baterías con elementos en al vertical y alineados en la sección crítica de análisis. Además de incluir diferentes tipos de piezómetros para verificar las lecturas, como tubo abierto o Casagrande.

Análisis y muestreo para definir la variación de los parámetros de resistencia al corte con la profundidad, ya que puede afectar el análisis de variabilidad espacial.

Analizar el escenario de la retoma del Vaso 3 oeste desde el punto de vista probabilístico como se realizó en el presente trabajo, enfatizando en los cálculos de la probabilidad de falla.

Se recomienda un cambio en la propuesta de la retoma del vaso 3 oeste argumentado por los resultados obtenidos a partir de los análisis probabilísticos junto a una solución para los valores en el coeficiente de presión de poros RU, dado a que este es el parámetro con mayor incidencia en la estabilidad del talud.

Para futuros trabajos, se podría explorar opciones de levantamiento topográfico con utilización de drones y posterior monitoreo con herramientas gráficas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de San Pedro. (2020). *Plan de desarrollo del municipio de San Pedro Valle del Cauca 2020-2023*.
- Alonso, E. E. (1976). Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays. *Géotechniqueotechnique*, 26(3), 453–472.
- Babu, G. L. S., & Murthy, D. S. N. (2005). Reliability Analysis of Unsaturated Soil Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1423–1429.
- Bareither, C. A., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2012). Effects of Waste Composition and Decomposition on the Shear Strength of Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(10), 1161–1174.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000702](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000702)
- Bray, J. D., Zekkos, D., Kavazanjian, E., Athanasopoulos, G. A., & Riemer, M. F. (2009). Shear Strength of Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), 709–722.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000063](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000063)
- C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S. (2020a). *Análisis de instrumentación geotécnica del relleno sanitario de Presidente*.
- C&C Ingeología y Geotecnia S.A.S. (2020b). *Estudio geotécnico para la estabilidad de obras de drenaje y fase norte del Vaso 3 del relleno sanitario Presidente*.
- Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L., & Soler, N. (2002). The landslide of Dona Juana landfill in Bogota a case study. In L. G. de Mello & M. A. A. Almeida (Eds.), *Environmental Geotechnics (4th ICEG)* (pp. 171–175). Balkema.
- Campo, A. R., Vásquez, S. G., Parra, A. M. A., Botero, K. E. C., & Toro, L. S. G. (2019). Rellenos sanitarios, una lucha contra la contaminación. *Realidad 360 Multimedia*, S.N.
www.realidad360.com
- Castelli, F., & Maugeri, M. (2014). Mechanical properties of Municipal Solid Waste by SDMT. *Waste Management*, 34(2), 256–265.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.026>

- Chen, F., Zhang, R., Wang, Y., Liu, H., Böhlke, T., & Zhang, W. (2020). Probabilistic stability analyses of slope reinforced with piles in spatially variable soils. *International Journal of Approximate Reasoning*, 122, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2020.04.006>
- Chen, Y., Li, J., Yang, C., Zhu, B., & Zhan, L. (2017). Centrifuge modeling of municipal solid waste landfill failures induced by rising water levels. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(12), 1739–1751. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0046>
- Cho, S. E. (2007). Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. *Engineering Geology*, 92(3–4), 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.03.006>
- Cho, S. E. (2010). Probabilistic Assessment of Slope Stability That Considers the Spatial Variability of Soil Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 975–984. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000309](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000309)
- Chugh, A. K., Stark, T. D., & DeJong, K. A. (2007). Reanalysis of a municipal landfill slope failure near Cincinnati, Ohio, USA. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1), 33–53. <https://doi.org/10.1139/t06-089>
- Duncan, J. Michael. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2000\)126:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:4(307))
- Duncan, J.M., & Wrigth, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Duncan, J Michael. (2000). Factors of Safety and Reliability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000249269.11074.CA>
- Dyson, A. P., & Tolooiyan, A. (2020). Comparative Approaches to Probabilistic Finite Element Methods for Slope Stability Analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 100(October 2019), 102061. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102061>
- El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2006). Lodalen slide: a probabilistic assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(9), 956–968. <https://doi.org/10.1139/t06-050>

- Gabr, M. A., & Valero, S. N. (1995). Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, 18(2), 241–251.
- González, A. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. In Sociedad Colombiana de Ingenieros (Ed.), *X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana* (pp. 1–12).
- González, A. J., & Espinosa-Silva, A. (2003). Presión de Poros y Resistencia al Cortante en el Relleno Sanitario Doña Juana- Bogotá –Colombia. *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1345–1352.
- Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2004). Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(5), 507–518. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:5\(507\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:5(507))
- Grupo Inge S.A.S. (2021). *Estabilidad de talud celda oriental Vaso 3 relleno sanitario Presidente, San Pedro, Valle del Cauca*.
- Harr, M. E. (1987). *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. McGraw Hill Book Company.
- Harris, J. M., Shafer, A. L., DeGroff, W., Hater, G. R., Gabr, M., & Barlaz, M. A. (2006). Shear Strength of Degraded Reconstituted Municipal Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 141–148.
- Hoyos, F; Otálvaro, I. F. (2007). *Y sin embargo se mueve ... Elementos de análisis de taludes y laderas Y sin embargo se mueve ... Elementos de análisis de taludes y laderas*.
- IGEI. (2015). *Estudios y diseños de obras de protección y reforzamiento del dique de contención sobre el canal sur frente al antiguo basurero de Navarro*.
- Karimpour-Fard, M., Machado, S. L., Shariatmadari, N., & Noorzad, A. (2011). A laboratory study on the MSW mechanical behavior in triaxial apparatus. *Waste Management*, 31(8), 1807–1819. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.011>
- Keramati, M., Goodarzi, S., Moradi Moghadam, H., & Ramesh, A. (2019). Evaluating the stress–strain behavior of MSW with landfill aging. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(11), 6885–6894.

<https://doi.org/10.1007/s13762-018-2106-z>

- Keramati, Mohsen, Shahedifar, M., Aminfar, M. H., & Alagipuor, H. (2020). Evaluation the Shear Strength Behavior of aged MSW using Large Scale In Situ Direct Shear Test, a case of Tabriz Landfill. *International Journal of Civil Engineering*, *18*(7), 717–733. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00499-3>
- Kokasoy, G., & Curi, K. (1995). The Ümraniye-Hekimbai open dump accident. *Waste Management & Research*, *13*(4), 305–314. [https://doi.org/10.1016/S0734-242X\(95\)90080-2](https://doi.org/10.1016/S0734-242X(95)90080-2)
- Lavigne, F., Wassmer, P., Gomez, C., Davies, T. A., Hadmoko, D. S., Iskandarsyah, T. Y. W. M., Gaillard, J., Fort, M., Texier, P., Heng, M. B., & Pratomo, I. (2014). The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, *1*(10), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0010-5>
- Luo, N., Bathurst, R. J., & Javankhoshdel, S. (2016). Probabilistic stability analysis of simple reinforced slopes by finite element method. *Computers and Geotechnics*, *77*, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.04.001>
- Machado, S. L., Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Carvalho, M. F., & Nascimento, J. C. F. do. (2010). Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. *Waste Management*, *30*(12), 2579–2591. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.019>
- Merry, S. M., Kavazanjian, E., & Fritz, W. U. (2005). Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas Landfill Failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *19*(2), 100–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2005\)19:2\(100\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(100))
- Nikulishyn, V., Savchyn, I., Lompas, O., & Lozynskyi, V. (2020). Applying of geodetic methods for monitoring the effects of waste-slide at Lviv municipal solid waste landfill. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *13*, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100291>
- Nivia, A. (2001). *Mapa geológico del departamento del Valle del Cauca : escala 1:250,000 : memoria explicativa.*

- Otálvaro Calle, I., Cordão-Neto, M. P., & Medero, G. M. (2011). Assessment of volumetric collapse using probabilistic approach. *Unsaturated Soils - Proceedings of the 5th International Conference on Unsaturated Soils*, 2, 907–912. <https://doi.org/10.1201/b10526-140>
- Otálvaro, I. F., & Cordão-Neto, M. P. (2013). Probabilistic analyses of slope stability under infiltration conditions. *Advances in Unsaturated Soils - Proceedings of the 1st Pan-American Conference on Unsaturated Soils, PanAmUNSAT 2013*, 539–543.
- Rakic, D., Čaki, L., & Ćorić, S. (2013). Shear strength of municipal waste materials from two landfills in Serbia. *Conference: Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG) – from Theoretical and Experimental Research to Practical Applications*, 1–9.
- Reddy, K. R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N. S., Gangathulasi, J., & Bogner, J. E. (2009). Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. *Waste Management*, 29(2), 952–959. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.011>
- Salazar Ferro Ingenieros S.A. (2008). *Estudios y diseños correspondientes al vaso Altair, localizado en el extremo norte del Relleno Sanitario la Pradera*.
- Sandoval Vallejo, E., Ramírez Tazcón, A., & Cuarán, D. (2015). Shear strength of landfills. *DYNA*, 82(193), 83–92. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.46046>
- Savchyn, I., & Lozynskyi, V. (2019). Analysis of consequences of waste-slide at Lviv Municipal Solid Waste Landfill on May 30, 2016. *First EAGE Workshop on Assessment of Landslide and Debris Flows Hazards in the Carpathians*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902166>
- Silva, R. A. C. (2017). *Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo*. Universidade Federal Do Ceará.
- Singh, M. K., Sharma, J. S., & Fleming, I. R. (2009). Shear strength testing of intact and recompacted samples of municipal solid waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10), 1133–1145. <https://doi.org/10.1139/T09-052>
- Sivakumar Babu, G. L., Reddy, K. R., & Chouksey, S. K. (2010). Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced

- compression. *Waste Management*, 30(1), 11–22.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.005>
- Stark, T. D., Eid, H. T., Evans, W. D., & Sherry, P. E. (2000). Municipal Solid Waste Slope Failure. II: Stability Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 408–419. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(408))
- Suchomel, R., & Mašín, D. (2010). Comparison of different probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable c - ϕ soil. *Computers and Geotechnics*, 37(1–2), 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.08.005>
- U.S. Army Corps of Engineers. (1997). *Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*.
- Universidad Nacional de Colombia. (2001). *Banco de datos geotécnicos*.
- Universidad Nacional de Colombia. (2004). *Evaluación geológica - geotécnica en la zona de influencia de las quebradas la Honda y el Chocho en la vereda el Porvenir, Municipio de Marinilla*.
- Universidad Nacional de Colombia. (2005). *Estudio de impacto en el corredor de vía sector entre el puente sobre la quebrada La Iguaná y el puente La Basura km 4+100 a km 6+000, Conexión Vial Aburrá Río Cauca*.
- Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Estudios y diseños definitivos de la Doble Calzada de Caldas, Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Volumen V*.
- Vilar, O. M., & Carvalho, M. de F. (2004). Mechanical Properties of Municipal Solid Waste. *Journal of Testing and Evaluation*, 32(6), 1–12.
- Villarraga, M., & García-García, H. A. (2003). Consideraciones Geotécnicas para Evaluar la Estabilidad en Rellenos Sanitarios. *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1361–1368.
- Wong, W. W. Y. (2009). *Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions*. California Polytechnic State University.
- Yin, Y., Li, B., Wang, W., Zhan, L., Xue, Q., Gao, Y., Zhang, N., Chen, H., Liu, T., & Li,

A. (2016). Mechanism of the December 2015 Catastrophic Landslide at the Shenzhen Landfill and Controlling Geotechnical Risks of Urbanization. *Engineering*, 2(2), 230–249. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.02.005>

Zekkos, D. (2008). *Geotechnical characterization, field measurement, and laboratory testing of municipal solid waste*. Published by the American Society of Civil Engineers.