



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ANÁLISIS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTO EN EL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ

Juan Diego Lozano López

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería, Maestría en Geotecnia
Bogotá, Colombia
2024

ANÁLISIS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTO EN EL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ

Juan Diego Lozano López

Trabajo de final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Geotecnia

Director (a):

Guillermo Eduardo Ávila Álvarez, PhD

Línea de Investigación:

Análisis de confiabilidad y riesgos asociados al entorno geotécnico

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Maestría en Geotecnia
Bogotá, Colombia
2024

Dedicado a mi familia por su apoyo incondicional, por el amor y la compañía durante todo este proceso.

Declaración de obra original

Yo Juan Diego Lozano declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: Juan Diego Lozano López

Fecha: 15/05/2024

Agradecimientos

A mis padres por el apoyo incondicional a lo largo de esta maestría, esto es gracias a ellos.

A mi director, el Ingeniero Guillermo Ávila por la paciencia y guía en el presente trabajo.

A la UAESP, entidad que compartió los datos e información para el desarrollo del presente trabajo.

Resumen

ANÁLISIS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTO EN EL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ

En el presente trabajo, se llevó a cabo un análisis de los riesgos asociados a posibles deslizamientos de residuos sólidos en el relleno sanitario Doña Juana, Bogotá. Las emergencias ocurridas de los movimientos de remoción en masa han sido críticas para la operación del relleno sanitario, afectando la prestación del servicio público de aseo e incluso comprometiendo el recurso hídrico, como sucedió en el deslizamiento de 1997 con el represamiento y contaminación del Río Tunjuelo. Dada la ocurrencia de estos eventos adversos, surge la necesidad de llevar a cabo una evaluación de los riesgos asociados a un posible deslizamiento por la operación del relleno sanitario.

Para la evaluación de los riesgos se emplearon los lineamientos de la Guía Metodológica del SGC-UNAL (Ávila et al. 2016) para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa. Los análisis de amenaza se realizan utilizando una metodología cuantitativa en la que se calculan los factores de seguridad en diferentes perfiles del relleno. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de probabilidad de falla utilizando el método Montecarlo, lo que posibilitó la zonificación de la amenaza. Este análisis reveló una amenaza media en el talud norte del área evaluada y en la zona actual de operación, mientras que se identificó una amenaza baja para el resto del área. Es importante destacar que no se encentraron zonas de amenaza alta.

Para el análisis de vulnerabilidad se evaluó la exposición de los barrios y del río Tunjuelo y se pudo concluir que, dadas las posibles distancias de viaje, no resultarían directamente afectados, pero las estructuras existentes en Doña Juana para la operación, como son la

Planta de Tratamiento de Biogás, las vías de acceso, las chimeneas y la instrumentación, son altamente vulnerables a un posible evento de remoción en masa.

La determinación del nivel de Riesgo se realizó mediante un proceso semicuantitativo, usando la matriz de riesgo que relaciona los niveles de amenaza y vulnerabilidad. Se encontró que tanto el talud norte como la zona actual de operación presentan niveles de riesgo alto, mientras el resto del área se sitúa en un riesgo medio.

Palabras clave: Riesgo, Amenaza, Vulnerabilidad, Residuos Sólidos, Deslizamiento.

Abstract

SLIDE RISK ANALYSIS IN THE DOÑA JUANA SANITARY LANDFILL IN BOGOTÁ

In the present work, an analysis of the risks associated with possible landslides of solid waste in the Doña Juana landfill in Bogotá, was carried out. The emergencies that have occurred due to landslides have been critical for the operation of the landfill, affecting the public sanitation service and even compromising the water resource, as happened in the 1997 landslide with the damming and contamination of the Tunjuelo River. Given the occurrence of these adverse events, the need of an evaluation of the associated risks due to a possible landslide with the operation of the landfill arises.

For risk assessment, the guidelines of the SGC-UNAL Methodological Guide (Ávila et al. 2016) for studies of hazard, vulnerability and risk due to mass removal were used. Hazard analyzes are carried out using a quantitative methodology in which safety factors are calculated in different profiles of the landfill. Additionally, a failure probability analysis was carried out using the Monte Carlo method, which made it possible to zone the hazard. This analysis revealed a medium hazard on the northern slope of the evaluated area and in the current area of operation, while a low hazard was identified for the rest of the area. It is important to highlight that no high hazard areas were found.

For the vulnerability analysis, the exposure of the neighborhoods and the Tunjuelo River was evaluated, and it was concluded that, given the possible travel distances, they would not be directly affected, but the existing structures in Doña Juana for the operation, such as the Biogas Treatment plant, access roads, chimneys and instrumentation are highly vulnerable to a possible mass removal event.

The determination of the Risk level was carried out through a semiquantitative process, using the risk matrix that relates the hazard and vulnerability levels. It was found that both the northern slope and the current area of operation present high-risk levels, while the rest of the area is at medium risk.

Keywords: Risk, Hazard, Vulnerability, Solid Waste, Landslide.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XVI
Lista de tablas	XIX
Introducción	21
1. Objetivos	25
1.1 Objetivo General	25
1.1.1 Objetivos Específicos.....	25
2. Caso de estudio	26
2.1 Reseña histórica	26
2.1.1 Reseña histórica del manejo de Residuos en Bogotá	26
2.1.2 Reseña Histórica del relleno sanitario de Doña Juana	27
2.2 Ubicación zona de estudio	31
2.3 Deslizamientos de residuos ocurridos en Doña Juana	33
2.3.1 Deslizamiento de septiembre de 1997	33
2.3.2 Deslizamiento de octubre de 2015.....	35
2.3.3 Deslizamiento de abril de 2020.....	37
3. Marco Teórico	39
3.1 Operación del Relleno Sanitario	39
3.1.1 Secuencia de llenado de residuos	39
3.1.2 Evolución de los Residuos Sólidos	42
3.1.3 Generación de lixiviados y gases.....	44
3.1.4 Composición de los Residuos Sólidos	44
3.1.5 Fallas históricas en rellenos sanitarios o vertederos	45
3.2 Ensayos de campo piezocono (CPTu)	46
3.3 Métodos de estabilidad por equilibrio límite	48
3.3.1 Método de las dovelas	49
3.4 Estudios de riesgo por deslizamiento en residuos sólidos	50
3.5 Simulaciones Monte Carlo en análisis de estabilidad	51
4. Metodología	54
4.1 Actividades desarrolladas.....	56
4.1.1 Caracterización de mecánica de los residuos y evaluación de la presión de poros	56
4.1.2 Análisis de Amenaza	57

4.1.3	Análisis de Vulnerabilidad	58
4.1.4	Evaluación de Riesgo.....	58
5.	Sistema de instrumentación en Doña Juana y metodología de seguimiento de estabilidad del operador.....	59
5.1	Sistema de instrumentación de Doña Juana	59
5.1.1	Piezómetros de hilo vibrátil.....	59
5.1.2	Inclinómetros.....	61
5.1.3	Estación meteorológica	62
5.2	Análisis de presiones de poros	63
5.3	Metodología de seguimiento de la estabilidad del geotécnica en Doña Juana ..	67
6.	Caracterización geotécnica de los residuos sólidos en Doña Juana.....	72
6.1	Estimación de parámetros de resistencia.....	72
6.1	Evaluación de presión de poros con la profundidad	82
7.	Modelo geotécnico y análisis de estabilidad	86
7.1	Modelo geotécnico.....	86
7.2	Modelo en tres dimensiones	87
7.3	Análisis de estabilidad de los modelos en dos dimensiones	90
7.4	Parámetros críticos para generación de deslizamientos en Doña Juana	95
8.	Caracterización y análisis de la amenaza	97
8.1	Caracterización del proceso.....	97
8.2	Probabilidad de falla	101
8.3	Zonificación de la Amenaza	105
9.	Caracterización y análisis de la vulnerabilidad	107
9.1	Identificación, localización y caracterización de elementos expuestos	107
9.1.1	Barrios aledaños & Recurso Hídrico en Doña Juana.....	107
9.1.2	Elementos expuestos.	110
9.2	Cálculo y zonificación de la vulnerabilidad	114
9.2.1	Exposición y Fragilidad.....	115
9.2.2	Intensidad.....	118
9.2.3	Daños esperados sobre los Elementos Expuestos.....	121
9.2.4	Zonificación de vulnerabilidad	122
10.	Evaluación y Cálculo del Riesgo.	125
10.1	Evaluación y zonificación del riesgo.....	125
10.2	Alternativas para la Disminución de las Condiciones de Riesgo.	126
11.	Conclusiones	129
12.	Recomendaciones	131
	Bibliografía	133
	ANEXOS.....	139
	ANEXO A. REGISTRO Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE PIEZOCONO CPTu.....	141
	ANEXO B. GRÁFICAS DE SENSIBILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD.....	142

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Ubicación histórica de los botaderos de la ciudad de Bogotá.....	27
Figura 2-2. Ubicación de las celdas de residuos sólidos en Doña Juana.	28
Figura 2-3. Diseño inicial de manejo de lixiviados, incluido el drenaje por gravedad y el proceso de reinyección.	29
Figura 2-4. Diseño actual general de las celdas de residuos.....	30
Figura 2-5. Ubicación general de Doña Juana.	32
Figura 2-6. Zona de estudio del proyecto.	33
Figura 2-7. Vista general del deslizamiento de septiembre de 1997.....	34
Figura 2-8. Fotointerpretación del flujo de residuos del deslizamiento de 1997.....	35
Figura 2-9. Fotografía aérea del movimiento de remoción en masa del 02 de octubre de 2015.....	35
Figura 2-10. Perfil del deslizamiento del 02 de octubre de 2015.	36
Figura 2-11. Fotografía aérea del movimiento de remoción en masa del 28 de abril de 2020.....	37
Figura 2-12. Sección transversal del deslizamiento de abril de 2020.	38
Figura 3-1. Esquema general de un Relleno Sanitario típico.....	39
Figura 3-2. Ubicación de las terrazas de disposición actuales en Doña Juana.....	40
Figura 3-3. Divisiones de la Terraza 4 de la zona actual de Operación en Doña Juana. .	41
Figura 3-4. Plataformas de llenado de la zona actual de operación en Doña Juana.	41
Figura 3-5. Evolución de los parámetros de resistencia en el Relleno sanitario Doña Juana.....	43
Figura 3-6. Diagrama de fases de un suelo natural comparado con los residuos sólidos.	43
Figura 3-7. Comparación de la Composición de los RSU de Doña Juana con Rellenos de Doña Juana. Tomado de (González & Espinosa (a), 2003).....	45
Figura 3-8. Representación gráfica de un ensayo CPT.....	47
Figura 3-9. a) Fotografía de la sonda utilizada. b) Fotografía del equipo utilizado.	48
Figura 3-10. Masa deslizante dividida en dovelas verticales y fuerzas interdovelas.	49
Figura 4-1. Esquema Metodológico del presente trabajo.	55
Figura 5-1. Piezómetro de cuerda vibrante.	59
Figura 5-2. Esquema general de los Piezómetros en Doña Juana.	60
Figura 5-3. Mapa con la ubicación de los piezómetros en la zona de estudio.	61
Figura 5-4. Inclínómetro IT-4 en la zona actual de operación.	62
Figura 5-5. Precipitación mensual reportada en Doña Juana 2013-2023.	63

Figura 5-6. Comportamiento de la presión de poro registrada en el piezómetro PZ-29(ABC). Fuente: Propia 64

Figura 5-7. Mapa de isopresiones del mes de abril de 2022..... 64

Figura 5-8. Esquema del método IDW..... 65

Figura 5-9. Áreas de alta presión de poros (m2) vs precipitación mensual (mm)..... 66

Figura 5-10. Áreas de altas presiones comparadas con las horas de bombeo mensual en Doña Juana..... 67

Figura 5-11. Variación de la resistencia de Residuos en Función de la Edad de Disposición. Fuente: tomado de (UT INTER DJ, 2021)..... 68

Figura 5-12. Sección de análisis de estabilidad del mes de marzo realizadas por el operador actual de Doña Juana. Fuente: Tomado de (CGR et al., 2023) 69

Figura 5-13. Espectro en roca con diferentes amortiguamientos. Aceleración espectral promedio. Fuente: Tomado de (CGR et al., 2023)..... 70

Figura 6-1. Ubicación de los ensayos de Piezocono. 73

Figura 6-2. a) Clasificaciones presentadas en otros rellenos del mundo. Tomado de (Ramaiah et al., 2017) b) Clasificación Doña Juana 74

Figura 6-3. Resistencia de rellenos sanitarios. 76

Figura 6-4. Ilustración del método empleado para estimación de 76

Figura 6-5. Relación entre la cohesión y la fricción en los residuos de Doña Juana. 77

Figura 6-6. Comportamiento del ángulo de fricción con la profundidad. 78

Figura 6-7. Comportamiento de la cohesión y el ángulo de fricción de los residuos sólidos en Doña Juana. Fuente: Propia..... 78

Figura 6-8. Comportamiento general de los parámetros de resistencia al corte de RSU en cada clase propuesta. A) Dispersión en clase A; b) Dispersión en clase B; c) Dispersión en clase C; d) Boxplot de las diferentes clases (70% de los datos en los cuadros). 80

Figura 6-9. El comportamiento de los RSU de Doña Juana dentro del grupo de parámetros clase A propuesto por Daciolo (2020)..... 80

Figura 6-10. Histogramas de parámetros de resistencia de RSU de Doña Juana comparados con parámetros de resistencia de RSU similares 81

Figura 6-11. Registro de la Presión de poros (u) contra la profundidad en el polígono de análisis (Zona actual de operación y zonas adyacentes)..... 83

Figura 6-12. Comportamiento del parámetro R_u contra la profundidad en el polígono de análisis (Zona actual de operación y zonas adyacentes)..... 83

Figura 6-13. Histograma del valor de R_u para las zonas de estudio. 84

Figura 7-1. Modelo Geotécnico de la zona de estudio. 87

Figura 7-2. Ubicación de la sección del modelo 3D en la zona de estudio..... 88

Figura 7-3. Modelo en tres dimensiones de Doña Juana..... 89

Figura 7-4. Perfiles de análisis en la zona de estudio. 90

Figura 7-5. Curva de Sensibilidad del Factor de Seguridad y la Cohesión del perfil 2 92

Figura 7-6. Curva de Sensibilidad del Factor de Seguridad y el 93

Figura 7-7. Curva de Sensibilidad del Factor de Seguridad y el parámetro R_u del perfil 2 94

Figura 7-8. Comportamiento del Factor de Seguridad con el..... 95

Figura 8-1. Determinación del volumen de un deslizamiento..... 98

Figura 8-2. Determinación de distancia de viaje.....	99
Figura 8-3. Cálculo de Pi mediante el método de Monte Carlo.....	102
Figura 8-4. Esquema del Perfil 2.	104
Figura 8-5. Esquema del perfil 4.	105
Figura 8-6. Zonificación de la Amenaza por Procesos de Remoción en.....	106
Figura 9-1. Ubicación de los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo respecto a Doña Juana. Fuente: propia	108
Figura 9-2. Ubicación del Rio Tunjuelo respecto a la zona de análisis.	109
Figura 9-3. Chimeneas en la zona de estudio.	111
Figura 9-4. a) Chimeneas en Doña Juana. b) Diseño inicial de las chimeneas.	111
Figura 9-5. Plano de la Planta de Tratamiento de Biogás.	112
Figura 9-6. Fotografías de la Planta de Biogás. a) Antorchas quemadoras de Biogás, b) Sopladores de biogás, c) motogeneradores de energía, d) filtros de carbón activado. Fuente: tomado de (UT INTER DJ, 2023)	113
Figura 9-7. Vías en la zona de estudio en Doña Juana	114
Figura 9-8. Mapa de Vulnerabilidad de la zona de estudio.	123
Figura 9-9. Vulnerabilidad por deslizamiento en la Planta de Biogás en Doña Juana ...	124
Figura 10-1. Zonificación del Riesgo por procesos de remoción en masa.....	125
Figura 10-2. Chimenea con tubería de concreto.	127
Figura 10-3. Esquema de chimenea con una mayor protección hacia la base.	128

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1. Deslizamientos históricos en Rellenos sanitarios.....	45
Tabla 6-1. Cálculo del estadístico de prueba para el valor de Ru en Fase II.	85
Tabla 6-2. Cálculo del estadístico de prueba para el valor de Ru en zonas contiguas a Fase II	85
Tabla 7-1. Resumen del comportamiento del Ru contra la profundidad. A) Zona actual de operación (Fase II) y B) Zonas contiguas a Fase II.	86
Tabla 7-2. Factores de seguridad determinísticos en los perfiles de análisis.	91
Tabla 7-3. Rango de valores asignados a los parámetros en Slide	91
Tabla 8-1. Parámetros utilizados para el cálculo de los volúmenes potencialmente inestables.	98
Tabla 8-2. Ecuaciones para el cálculo de distancia de viaje - Hong Kong (Promedio). Para el deslizamiento de 2015. Con $H = 53,51$ m, $\delta = 14^\circ$, $V = 343.800$ m ³ y $W = 395.300$ t..	99
Tabla 8-3. Ecuaciones para el cálculo de distancia de viaje - Hong Kong (Promedio). Para el deslizamiento de 2020. Con $H = 64,75$ m, $\delta = 12^\circ$, $V = 69.000$ m ³ y $W = 79.350$ t.....	100
Tabla 8-4. Distancias de viaje obtenidas	100
Tabla 8-5. Velocidades de cada uno de los posibles escenarios.	101
Tabla 8-6. Resultados de distinto número de simulaciones Montecarlo en tres perfiles.	103
Tabla 8-7. Resultados del Factor de Seguridad Probabilístico y de la Probabilidad de falla.	104
Tabla 8-8. Clasificación de la amenaza en función de la probabilidad de falla.....	105
Tabla 9-1. Factor de fragilidad por tipología de la estructura.	116
Tabla 9-2. Factor de fragilidad por altura de la edificación.....	116
Tabla 9-3. Factor de conservación de las estructuras.....	116
Tabla 9-4. Factor de fragilidad edad de la edificación.....	117
Tabla 9-5. Vida útil en función del tipo de edificación.	117
Tabla 9-6. Cálculo de la fragilidad de los elementos expuestos.....	118
Tabla 9-7. Parámetro de intensidad por presión de impacto.....	119
Tabla 9-8. Presión de falla según tipología de estructura.	119
Tabla 9-9. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura.....	120
Tabla 9-10. Resumen resultados evaluación de vulnerabilidad.	121
Tabla 9-11. Clasificación de la vulnerabilidad para edificaciones y líneas vitales.	121
Tabla 9-12. Daños esperados para edificaciones y líneas vitales.....	122
Tabla 10-1. Criterio de evaluación de riesgo.	125

Tabla 10-2. Categorización del Riesgo de Bienes Físicos.....	126
--------------------------------------------------------------	-----

Introducción

El relleno sanitario Doña Juana está ubicado en el sur de la capital de Colombia, más exactamente en la localidad de Ciudad Bolívar, sobre la margen izquierda de la cuenca del río Tunjuelo, y su entrada se ubica en el costado derecho de la Autopista Villavicencio. Este es el Relleno Sanitario más grande de Colombia con un promedio de residuos dispuestos de más de 6000 toneladas diarias para lo corrido del año 2023. Sus inicios datan del siglo pasado, siendo el 1 de noviembre de 1988 como el día donde se dispuso la primera tonelada de basura en la Zona 1. Actualmente, se dispone en un sector denominado Optimización Fase II y como su nombre lo indica, se trata de un área que optimiza el espacio entre celdas antiguas de residuos conocidas como Zona VII y Zona VIII. De acuerdo con el estudio de identificación de áreas potenciales para la Disposición Final de residuos en el Distrito Capital y de municipios aledaños, realizado por la Universidad Nacional de Colombia, en la sabana de Bogotá y alrededores no existe otra área capaz de recibir tal cantidad de residuos diarios¹. Sin embargo, los mismos predios que conforman el ahora denominado Parque de Innovación Doña Juana, parecen no ser suficientes, razón por la cual se han creado celdas de residuos sobre áreas antiguas de disposición.

Un relleno sanitario nace de la necesidad del manejo de los desechos que producen las ciudades, estos son directamente proporcionales al tamaño de su población y estos materiales deben ser entendidos como parte integral de la sociedad. Esta es la tecnología de tratamiento de residuos más común en países en desarrollo, y se basa en la disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en celdas, su compactación y captación de gases y lixiviados. Este método es el más usado en Colombia por su relativo bajo costo de

¹ Universidad Nacional de Colombia. (2016). *INFORME FINAL DE IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES EN EL DISTRITO CAPITAL Y MUNICIPIOS ALEDAÑOS, PARA LA DISPOSICIÓN FINAL, CON ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE APROVECHAMIENTO Y/O TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Contrato interadministrativo 203 de 2016.

operación y mantenimiento. No obstante, el concepto de relleno sanitario es relativamente nuevo. De acuerdo con Garrick (2004) los ingenieros del ejército de los Estados Unidos extendieron el uso de una estructura denominada relleno sanitario debido a los desechos de la segunda guerra mundial en los años 40s. Esta metodología se convirtió rápidamente en la más utilizada por los centros urbanos en Estados Unidos. Posteriormente, Bonaparte (2020) relata que desde la ocurrencia de eventos de remoción en masa en la década de los 80, se empezó a estudiar estas estructuras desde un enfoque geotécnico.

Particularmente, a partir del deslizamiento de septiembre de 1997 en el Relleno Sanitario Doña Juana, se empezó a entender a los residuos como un material geotécnico y cambiante con el tiempo.(González & Espinosa (a), 2003). Si bien, a partir de esta fecha se moldeó la metodología de control y seguimiento geotécnico de las celdas de disposición, Doña Juana ha padecido de otros dos grandes deslizamientos, en octubre de 2015 y abril de 2020. Dichos movimientos de remoción en masa han afectado la operación y han generado serios problemas ambientales como la contaminación del río Tunjuelo, malos olores, proliferación de moscas y en general, perjuicio a las comunidades aledañas. Los Residuos Sólidos Urbanos deben entenderse como un material que está en constante cambio, cuyas propiedades y parámetros varían considerablemente en tiempos relativamente cortos; es aquí donde radica la importancia del correcto entendimiento y evaluación de las variables implicadas en estos eventos y así realizar el adecuado monitoreo y seguimiento de los variables que pueden controlar los deslizamientos.

Esta necesidad de evaluación de los parámetros y variables geotécnicas, se suma a la necesidad de la valoración del entorno para la determinación del riesgo geotécnico asociado a la operación del relleno sanitario Doña Juana. En primer lugar, la metodología utilizada para la determinación de la amenaza se basó en la que se establece en la Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano. (Ávila et al., 2016).

La valoración de los parámetros y modelamientos de estabilidad en dos dimensiones tuvieron como insumo principal los registros de la instrumentación instalada en Doña Juana, en especial los piezómetros con registros de presión de poros; Adicionalmente, se contó con la información y metodología de interpretación de cerca de 325 metros lineales de exploración mediante piezocono con medición de presión de poros (CPTu) en residuos.

Lo anterior permitió determinar el comportamiento de los parámetros de resistencia de los residuos sólidos y construir el modelo geotécnico

El primer capítulo se trazan unos objetivos y se da paso a la descripción de la problemática de la investigación en el capítulo 2. Los conceptos necesarios para entender la presente investigación se detallan en el capítulo 3 con el marco teórico. A continuación, en el capítulo 4 se relata la metodología utilizada.

El seguimiento actual de la estabilidad geotécnica de los taludes de residuos en Doña Juana se explica en el capítulo 5. Se especifica el sistema de instrumentación geotécnica compuesto principalmente por piezómetros de hilo vibrátil, los cuales son la base principal, junto con la topografía, para los modelos de estabilidad utilizados por el operador del relleno. Adicionalmente, se especifica la metodología de evaluación sísmica de los residuos que consiste en la evaluación de los desplazamientos potenciales.

En el capítulo 6 se describe la caracterización geotécnica de los residuos sólidos de Doña Juana a partir de las interpretaciones de los ensayos de CPTu, y la evaluación de los resultados obtenidos con lo reportado en la literatura internacional y el comportamiento de la presión de poros. En el capítulo 7 se detalla el comportamiento espacial de los materiales en profundidad. Consecuentemente se desarrolló el modelo en tres dimensiones, así como los análisis de estabilidad de los perfiles de análisis evaluando la sensibilidad de los factores de seguridad respecto a los parámetros mecánicos.

La zonificación de la amenaza se detalla en el capítulo 8, en este se describe el proceso de cómo se obtuvieron dos zonas importantes donde con una amenaza media por un posible evento amenazante. La primera se encuentra en la parte más norte de la zona evaluada y afecta a la planta de tratamiento de biogás, mientras la segunda se trata de la zona actual de disposición de residuos sólidos.

En el capítulo 9 se describe el procedimiento para la obtención de los valores de la fragilidad de la planta de tratamiento de biogás, de las chimeneas y de las vías operativas, así como de la intensidad del posible evento amenazante. Como resultado, se obtuvo que todos los bienes físicos evaluados se encuentran en una vulnerabilidad alta, debido al alto valor del factor de intensidad.

Las zonificaciones de la amenaza y la vulnerabilidad permitieron calcular el valor del riesgo del área estudiada. El capítulo 10 contiene el mapa de riesgo resultante, en donde se encuentran zonas de riesgo medio y alto. En esta misma sección del documento, se presentan las recomendaciones para la disminución de los niveles de riesgo. Finalmente se termina con las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar el estudio de riesgo por remoción en masa del Relleno Sanitario Doña Juana a partir de la información disponible.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Generar un modelo en 3 dimensiones con las unidades geotécnicas de los Residuos Sólidos Urbanos en el Relleno Sanitario Doña Juana.
- Determinar los parámetros críticos para la generación de deslizamientos en el Relleno Sanitario Doña Juana.
- Construir curvas del comportamiento del factor de seguridad en función de la edad, geometría y presión de poros.
- Presentar recomendaciones que permitan reducir las condiciones de riesgo.

2. Caso de estudio

2.1 Reseña histórica

2.1.1 Reseña histórica del manejo de Residuos en Bogotá

Anterior al inicio de la operación en Doña Juana, Bogotá contaba con botaderos de basura a cielo abierto. Estos sitios difieren de un relleno sanitario, en que este último implementa procesos de ingeniería de adecuación de la zona, instalación de equipos para control de gases y lixiviados, maquinaria para compactación, procesos de cierre y clausura, entre otros; mientras que un botadero no aplica ningún proceso técnico.

Para el siglo XIX existían 3 botaderos a cielo abierto, Las Cruces, San Diego y San Victorino y los desechos eran recolectados por carros de bueyes y mulas. Posteriormente, la expansión de la ciudad a principios del siglo XX obligó a reubicar los botaderos para zonas aún más alejadas del casco urbano, resultando en cuatro botaderos, Cementerio Central, Quiroga, Cama Vieja y Las Cruces. A mediados del siglo XX, el distrito creó la Empresa Distrital de Aseo la cual dirigió los residuos a zonas periféricas, más exactamente a USME, AMERICAS Y ENTRE RIOS (Caicedo., 2021) , dada la expansión de la construcción de vivienda.

Para 1960 se transformó la Empresa Pública de Aseo por la Empresa Distrital de Servicios Públicos (EDIS) encargándola de la recolección y disposición de basuras. En los años 80s se implementó una zonificación que dividió la ciudad en tres zonas (norte, centro y sur) para la recolección de basuras. Siguiendo esta división, la disposición de los desechos se dio en tres predios oficiales: el botadero Cortijo recibió las basuras de la zona norte; el botadero Protecho recibió las basuras de la zona centro; y el botadero Gibraltar recibió las

basuras de la zona sur de la ciudad. Finalmente, con la apertura de la Zona 1 en noviembre de 1988 en Doña Juana, los botaderos mencionados anteriormente fueron clausurados (Caicedo., 2021). La figura 2-1 presenta la ubicación de todos los botaderos históricos de la ciudad respecto al relleno sanitario Doña Juana.

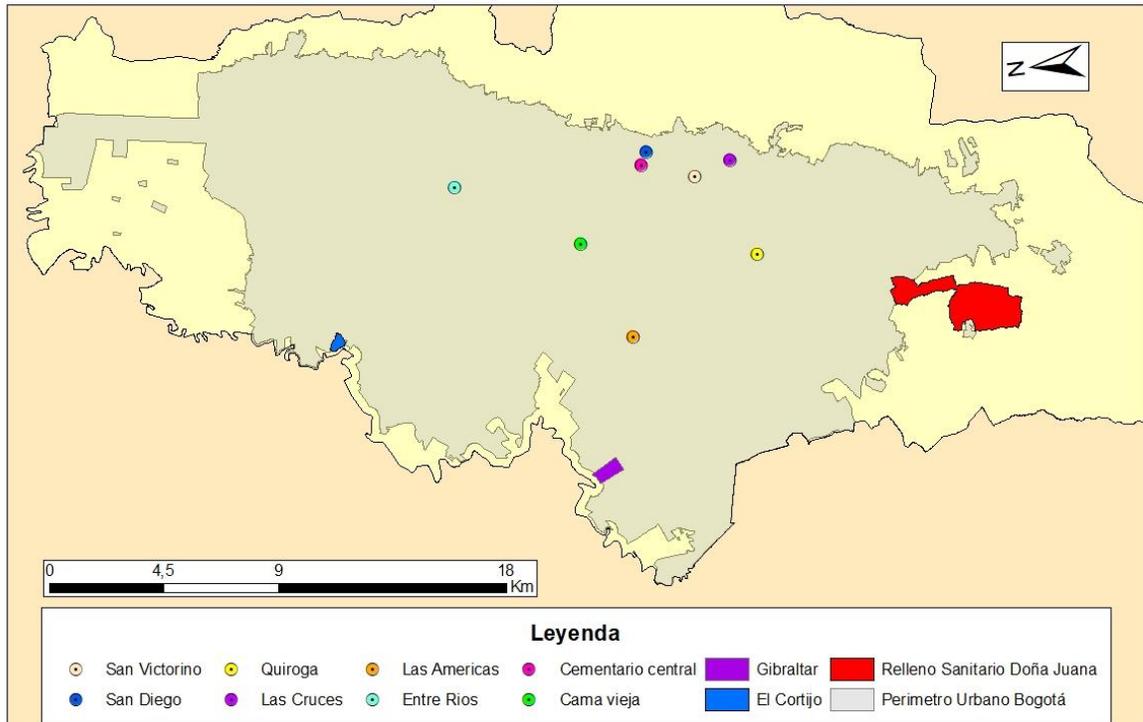


Figura 2-1. Ubicación histórica de los botaderos de la ciudad de Bogotá.
Fuente: A partir de Caicedo (2021)

2.1.2 Reseña Histórica del relleno sanitario de Doña Juana

La historia del relleno sanitario Doña Juana (RSDJ) podría resumirse en las distintas zonas de operación que han funcionado a lo largo de los años. La Zona I dio apertura a la operación en Doña Juana en noviembre de 1988, contando con una extensión aproximada de 29,75 ha, y funcionando hasta febrero de 1995. La zona denominada Mansión se desarrolló a continuación de la Zona I, al costado noreste, y tiene una extensión aproximada de 13,65 ha, siendo clausurada en octubre de 1995 (ver figura 2-2).

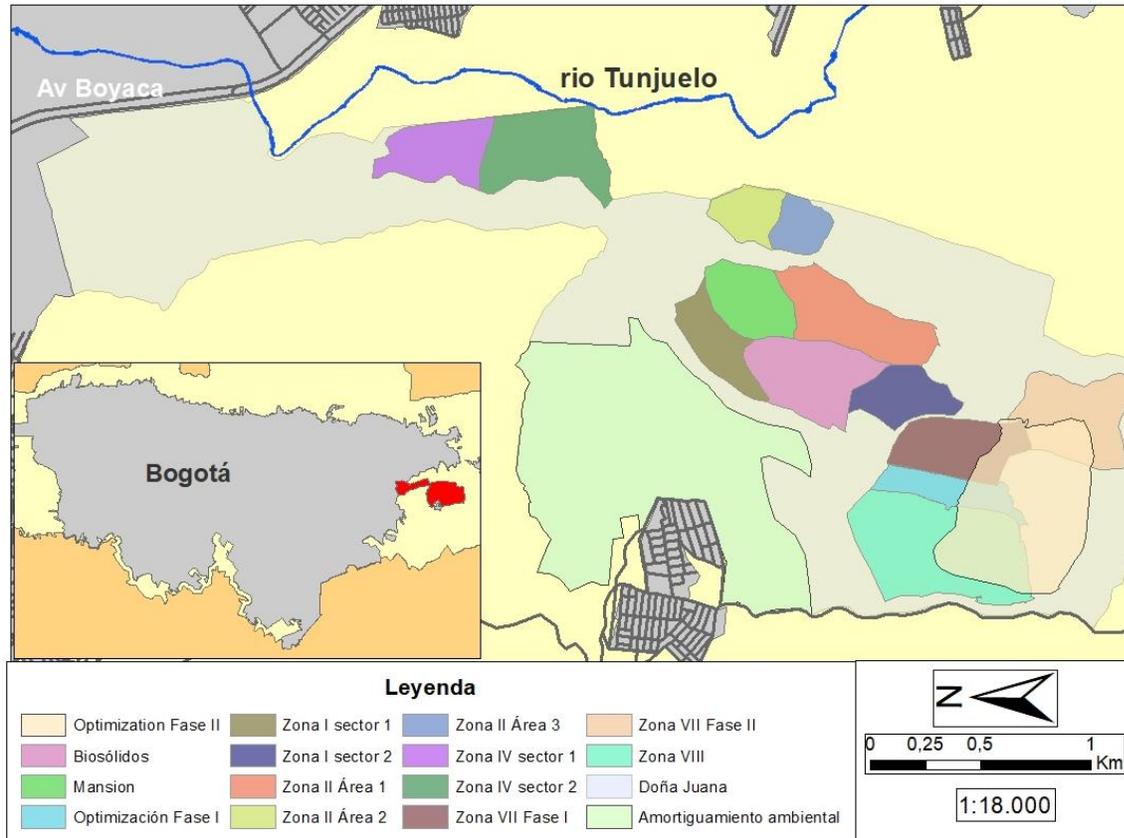


Figura 2-2. Ubicación de las celdas de residuos sólidos en Doña Juana.

Fuente: Propia

Posteriormente, inicio la disposición de desechos en la Zona II con un área aproximada de 41,69 ha y su capacidad estaba calculada para recibir residuos entre 4 y 5 años aproximadamente, pero solamente estuvo en operación 2 años, debido al deslizamiento de residuos en septiembre de 1997, el cual removió cerca de un millón de metros cúbicos de desechos. Producto de esta emergencia, se dio apertura apresuradamente a la Zona IV como zona de contingencia, que funcionó hasta enero de 1999. Estas zonas tenían un diseño que se muestra de manera esquemática en la figura 2-3.

El sistema de tratamiento de lixiviados consistía en una recirculación de los líquidos, debido a que este proceso depuraba en buena medida la carga contaminante para su posterior vertimiento en el Río Tunjuelo. Se extraían mediante una casa de bombas y se volvían a reinyectar en distintos puntos. Sin embargo, en varios estudios de las causas del deslizamiento de 1997 se determinó que el motivo principal del siniestro fue ese sistema de tratamiento, obligando al distrito capital a construir una planta de tratamiento de lixiviados (Collazos, 1998).

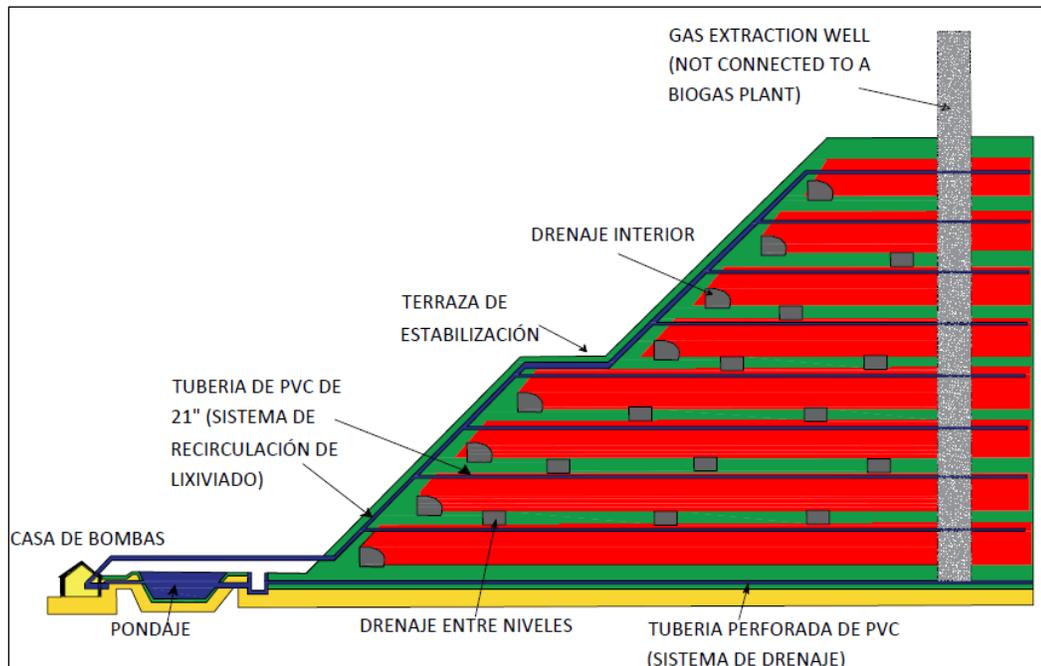


Figura 2-3. Diseño inicial de manejo de lixiviados, incluido el drenaje por gravedad y el proceso de reinyección.

Fuente: Adaptado de Collazos (1998)

Consecutivamente, la zona VII se adecuó en enero de 1999 y se colmó a mediados del año 2002, depositándose allí 5,8 millones de toneladas. Si bien la resolución CAR 2133 del 20 de diciembre de 2000 otorgó una licencia ambiental única para el RSDJ, esta fue para la Zona VIII la cual operó a la par de la Zona VII desde marzo de 2000 hasta septiembre de 2010. Las zonas VII y VIII fueron las primeras que estuvieron conectadas a la planta de tratamiento de biogás, la cual inició su construcción en el año 2007 e inició su operación en el año 2009.

A partir de esta fecha, en el RSDJ se empezó a desarrollar la práctica de disposición de residuos sobre residuos más viejos. Esta particularidad inició con la zona de Biosólidos, la cual era la antigua etapa 1 de la Zona 1 acondicionada como una zona de contingencia para recibir residuos ante los retrasos en la zona prevista de disposición; tuvo un periodo de operación hasta agosto de 2011. Sin embargo, la zona de Optimización Fase I inició su operación a la par en abril de 2011, y tuvo como objetivo rellenar el espacio en la parte norte que existía entre la Zona VIII y Zona VII, operando hasta mayo de 2015 (UT INTER DJ, 2018).

La Autoridad Ambiental CAR otorgó la modificación de la licencia única mediante la resolución 1351 de 2014, permitiendo la construcción y adecuación de la zona actual de Operación denominada Optimización Fase II, con un área de cerca de 41 ha. No obstante, dicha área apenas contaba con 5 meses de operación cuando ocurrió el segundo gran deslizamiento en octubre de 2015 en la terraza 1, con cerca de 600.000 m³ de residuos removidos.

La emergencia supuso disponer temporalmente en la Zona II Área 3 (no confundir con la zona del deslizamiento de 1997) desde octubre de 2015 hasta enero de 2016, retornando a Fase II hasta abril de 2018, cuando ante el súbito aumento de los registros de presión en la zona de terraza 1, la autoridad ambiental expidió la Resolución ANLA 763 del 2018, la cual restringió la disposición en la terraza 1 de Fase II hasta tanto no se redujeran las presiones (UT INTER DJ, 2018, 2021).

Estas medidas por parte de la Autoridad Ambiental sumado a que el deslizamiento del año 2015 taponó las tuberías de adecuación de fondo las cuales eran fundamentales para la evacuación de lixiviados, provocó que el operador implementara un sistema de extracción forzada de lixiviados mediante puntos de bombeo que consiste en tuberías de PVC de entre 8 y 16 pulgadas. Estas mismas tuberías son implementadas para la extracción del biogás. No obstante, como se observa en la figura 2-4, estas se rompen con relativa frecuencia debido a las presiones internas de los mismos gases, las continuas cargas por la disposición constante de más residuos y la maquinaria como bulldozers y compactadoras.

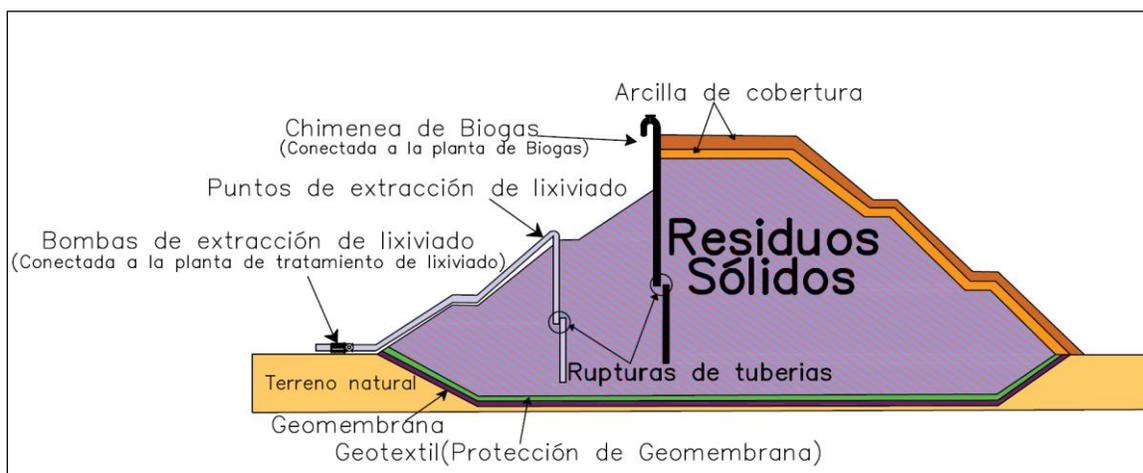


Figura 2-4. Diseño actual general de las celdas de residuos.

Fuente: propia

Así las cosas, el operador se vio obligado a retornar al sector norte de Optimización Fase I hasta julio de 2018, toda vez que, según lo reportado por la interventoría, se registraron grandes desplazamientos en el sector, atribuyéndolos a las falencias operativas por parte del contratista, razón por la cual se decidió suspender la operación desplazándose nuevamente a Biosólidos (UT INTER DJ, 2018).

La nueva disposición en Biosólidos duró casi un año culminando en mayo de 2019, cuando se retornó a la terraza 2 de Fase II. Sin embargo, ante los retrasos en la adecuación de fondo de la terraza 3, se trasladó la operación al talud norte de la Zona VII en enero de 2020. Es allí donde producto de la no remoción de la arcilla de cobertura previo a la disposición y un sobrellenado de residuos sobre el talud, se generó un deslizamiento en abril de 2020 con cerca de 70.000 m³ de residuos. A pesar del siniestro, al momento del acontecimiento ya se contaba con la debida adecuación de fondo de las terrazas en Fase II, por lo que se retornó a la zona actual y la disposición se ha realizado de forma ininterrumpida desde abril de 2020 a septiembre de 2023.

2.2 Ubicación zona de estudio

El Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) se ubica al sur de la ciudad de Bogotá, sobre la margen izquierda del río Tunjuelo, en la localidad de Ciudad Bolívar, con la entrada principal sobre la avenida Boyacá, marcando el límite con la localidad de Usme (ver figura 2-5).

Ahora bien, el área denominada Doña Juana no es completamente utilizada para disposición de residuos, existen distintos usos de suelo. Doña Juana cuenta con cerca de 698 ha de las cuales solamente 189 han sido o son utilizadas para la disposición final de residuos, repartiéndose entre zonas de amortiguamiento ambiental (107 ha), planta de tratamiento de Biogás (3 ha), planta de tratamiento de lixiviados (2 ha), y áreas complementarias para la operación (acopios, vías, pondajes de lodos, patio taller de maquinaria, diques ambientales, entre otros).

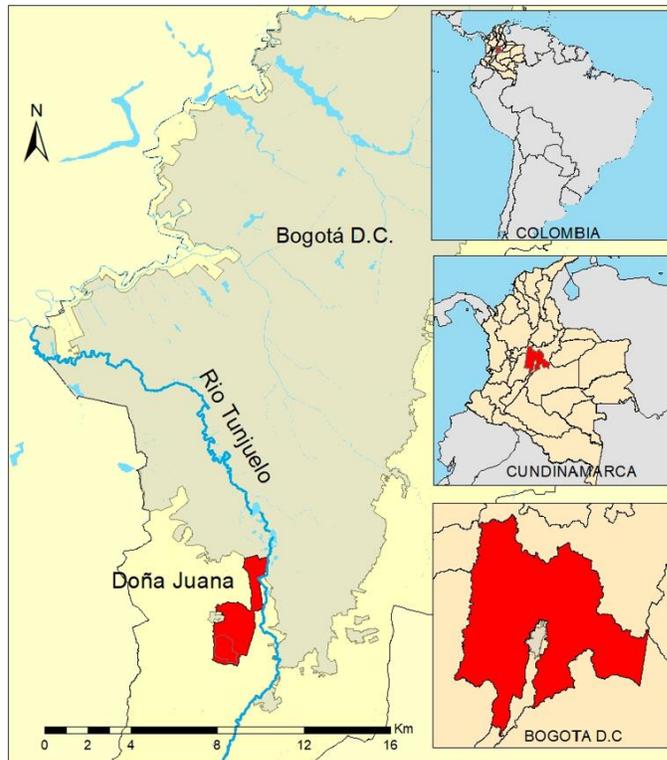


Figura 2-5. Ubicación general de Doña Juana.
Fuente: Propia

La zona de estudio del presente proyecto se concentra en la zona actual de operación, denominada Optimización Fase II y las zonas de disposición colindantes como se observa en la figura 2-6. En la imagen referenciada, se aprecia cómo el polígono de operación actual se superpone sobre los de las celdas de residuos anteriores, esto porque de acuerdo con la licencia ambiental de operación, Optimización Fase II tiene por objeto unir las zonas en un gran domo de residuos optimizando el espacio entre las celdas antiguas.



Figura 2-6. Zona de estudio del proyecto.
Fuente: Propia

2.3 Deslizamientos de residuos ocurridos en Doña Juana

2.3.1 Deslizamiento de septiembre de 1997

La Zona II llevaba casi dos años de llenado, a partir de junio de 1997 se iniciaron las labores de reinyección de lixiviados, los cuales consistían en tuberías de impulsión sobre el terreno natural conectadas a tuberías embebidas dentro de los niveles de llenado. En total se reinyectaron 49,915 m³ de lixiviados. El 26 de septiembre de 1997 se presentó una grieta de 5 m de longitud por 25 cm de ancho. Al intentar reinyectarse el lixiviado, este brotó por las grietas indicando interconexión de los niveles inyectados con las grietas, además de una saturación de los niveles inferiores. El día siguiente, las grietas aumentaron de tamaño junto con los brotes, y ocurrió una rotura en los ductos del sistema de recirculación. Siendo

el medio día se decidió interrumpir la operación y ordenar la evacuación del personal. En 40 minutos desde las 4:00 pm hasta las 4:40 pm, se movieron más de 800.000 m³ de residuos sólidos de la Zona II y una vez removidos, el deslizamiento avanzó retrogresivamente de 150 a 200 m, hasta su estabilización. (González & Espinosa (c), 2003)

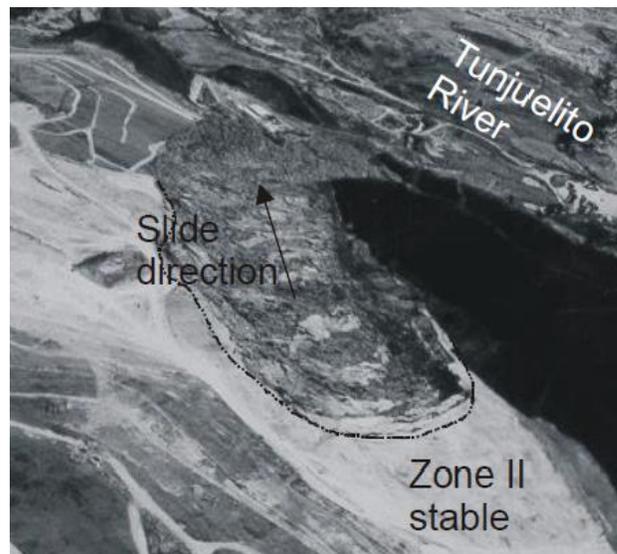


Figura 2-7. Vista general del deslizamiento de septiembre de 1997.
Fuente: Tomado de Caicedo Et al (2002)

Como se observa en la figura 2-7, la masa deslizada se comportó como un fluido que se precipitó colina abajo, con tanta energía que sobrepasó las estribaciones de la Formación Regadera sobre los cerros El Campanario y El Moral que servían de contrafuerte para la Zona II, el desplazamiento fue de aproximadamente un kilómetro, llegando inclusive más allá del Río Tunjuelo represándolo. Razón por la cual, se construyó un dique de contención de forma rápida y un canal para la desviación del río Tunjuelo en su ladera derecha para evitar posibles avalanchas. (González & Espinosa (c), 2003)

Se instaló instrumentación sobre la masa fallada, estableciendo, que la superficie de falla era aproximadamente paralela al terreno natural, pero 5 m por encima de este. Adicionalmente, se atribuyó como causa principal del siniestro el sistema de tratamiento de lixiviado basado en la recirculación, esto dado que, al reinyectar fluidos, las presiones intersticiales aumentaron considerablemente, lo que generó el comportamiento de un líquido viscoso que tuvieron los residuos al momento de la falla.

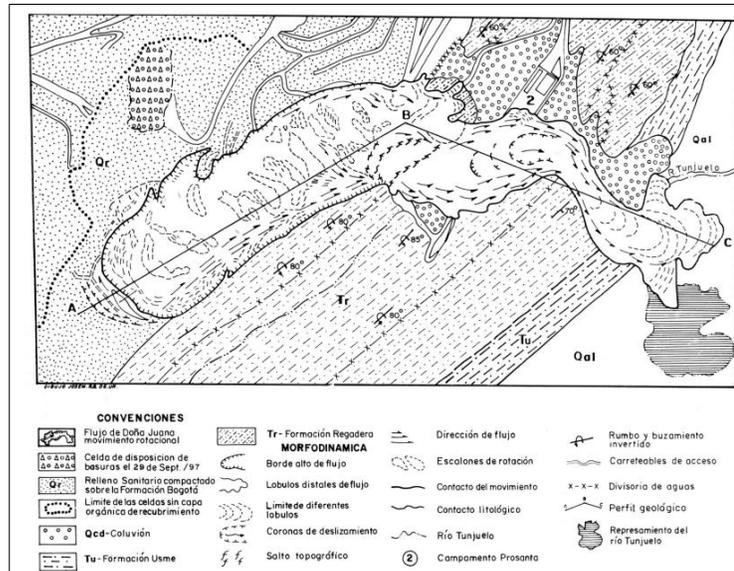


Figura 2-8. Fotointerpretación del flujo de residuos del deslizamiento de 1997.
Fuente: Tomado de Moreno (2001)

2.3.2 Deslizamiento de octubre de 2015

De acuerdo con CGR (2015) a la 1:20 am del 2 de octubre de 2015, se registró un proceso de desplazamiento masivo de residuos domiciliarios en la zona de operación conocida como Optimización Fase II. Se determinó que se movieron aproximadamente 343,800 m³ de material, con una distancia máxima de desplazamiento de 74 m y una profundidad máxima de la superficie de falla estimada en 23 m. Afortunadamente, no se reportaron daños a árboles, carreteras o viviendas, ya que el material desplazado permaneció dentro del polígono autorizado para su disposición. La figura 2-9 muestra una fotografía aérea tomada horas después del incidente.



Figura 2-9. Fotografía aérea del movimiento de remoción en masa del 02 de octubre de 2015.

Fuente: Tomado de CGR (2015)

Si bien el operador tenía la obligación de instalación de los instrumentos para el seguimiento de la estabilidad y el valor real y continuo de la presión, en la zona fallada solo se contaba con un piezómetro, el cual se encontraba a solo 7 m de profundidad y arrojó un valor de $R_u = 0,48$ en su última lectura previamente al evento.

El profesor Álvaro González (2016) desarrolló el primer informe post-falla para evaluar las posibles causas del deslizamiento, encontrando que la pata del talud fallado contaba con una geometría 2H:1V y con aproximadamente 12 m. de altura. Adicionalmente, se modeló un R_u crítico para falla circular y compuesta en el orden de 0,7. No obstante, este dato es netamente teórico y no se pudo comprobar por la precaria instrumentación. De acuerdo con González (2016), la causa detonante del evento fue la muy alta presión de poros generada por el gas atrapado por las altas tasas de colocación de residuos en la zona del deslizamiento.

En la figura 2-10 se observa la geometría del deslizamiento, con un desplazamiento máximo desde la pata de 74 m, y un escarpe de 26 m. La distancia total desde la parte superior hasta la base del movimiento fue de 291 metros, con una profundidad estimada de la superficie de falla de 23 metros. Aunque no hubo testigos debido a la hora del evento, la primera inspección sugirió que se trató de un deslizamiento muy rápido. Además, el movimiento ocurrió de manera instantánea y en un solo proceso; no se observó ningún avance adicional en las horas posteriores (CGR, 2015).

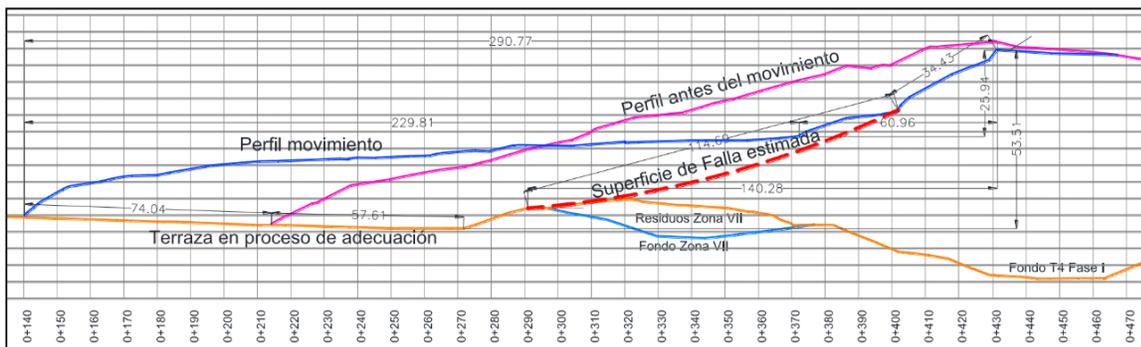


Figura 2-10. Perfil del deslizamiento del 02 de octubre de 2015.
Fuente: Tomado de CGR (2015)

2.3.3 Deslizamiento de abril de 2020

En la mañana del 28 de abril de 2020, se informó sobre la presencia de grietas notables en la parte superior del domo de la Zona VII Área 2 Costado Norte. Durante la tarde, se notó un progreso en la expansión de estas grietas, y a las 7:40 pm del mismo día, ocurrió un suceso de desplazamiento masivo de residuos. La figura 2-11 exhibe una fotografía aérea tomada en la mañana del 29 de abril, revelando la verdadera magnitud del evento (CGR, 2020).



Figura 2-11. Fotografía aérea del movimiento de remoción en masa del 28 de abril de 2020.

Fuente: Tomado de CGR (2020)

La figura 2-12 muestra la geometría del deslizamiento. Se dio un desplazamiento máximo desde la pata de 98 m. y una longitud total desde la corona a la pata del movimiento de 272 m y una longitud del escarpe principal de 28 m. El volumen total removido de residuos se estimó en 69.000 m³ aproximadamente (CGR, 2020).

De acuerdo con lo reportado por la interventoría, la masa se movió como bloque rígido a lo largo de una superficie de falla perfectamente definida y completamente plana, delimitada por la existencia de una capa de arcilla que era consistente y continuaba en

toda la zona deslizada. El área fallada presentaba estrías de movimiento y espejos de falla, y en múltiples puntos, brotes de lixiviados. En contraste en términos de presiones, no había ningún indicativo que pudiera alertar sobre la ocurrencia de algún movimiento en masa, si bien se habían reportado subidas de presión, estas son comunes al disponer residuos sobre el sitio en medición. El valor de R_u más alto reportado sobre el deslizamiento fue de 0,32 de un total de 8 instrumentos instalados.

Estos acontecimientos ocurrieron por los retrasos del operador en la adecuación de la zona que tenía que recibir residuos según lo establecido en los planes de trabajo de la operación. Razón por la cual, se realizó disposición en la zona VII llamada también zona de contingencia. Esta zona ya había sido operada hasta el año 2003 y tenía una cobertura de arcilla, que no fue removida para la reapertura de disposición. De acuerdo con lo reportado por la interventoría, esta capa de arcilla se comportó como una superficie de falla plana.

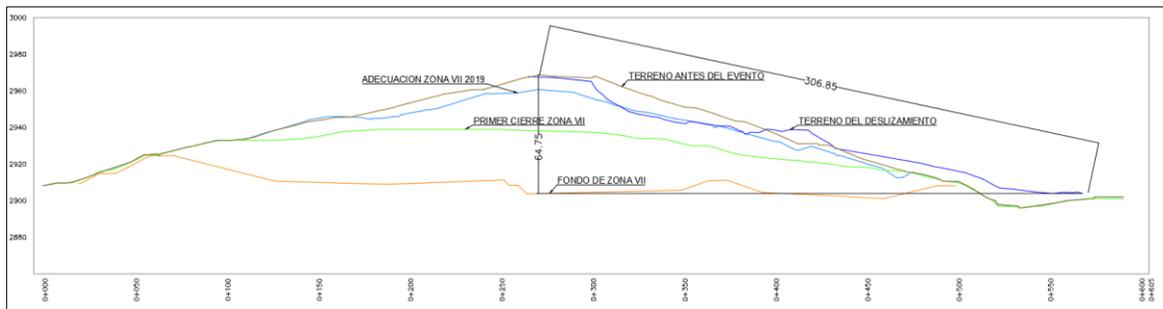


Figura 2-12. Sección transversal del deslizamiento de abril de 2020.

Fuente: Modificado de CGR (2020)

3.Marco Teórico

3.1 Operación del Relleno Sanitario

3.1.1 Secuencia de llenado de residuos

Los métodos constructivos y la secuencia de operación de los rellenos sanitarios están determinados principalmente por la topografía del terreno. Generalmente, se realizan trincheras o excavaciones en donde se depositan los residuos. Cuando no es posible realizar este método, se depositan los residuos compactándolos lo máximo posible elevando poco a poco el terreno con taludes de pendientes suaves (Ramos, 2020)

En la figura 3-1 se observa la operación típica de un relleno sanitario; los residuos son depositados en sitios previamente seleccionados, los cuales tienen impermeabilización respecto al terreno natural, los residuos dispuestos se dividen en lo que se conoce como celdas de disposición, inmediatamente después se compactan para optimizar el espacio, posteriormente, se acomoda material de cobertura sobre los residuos que generalmente es arcilla.

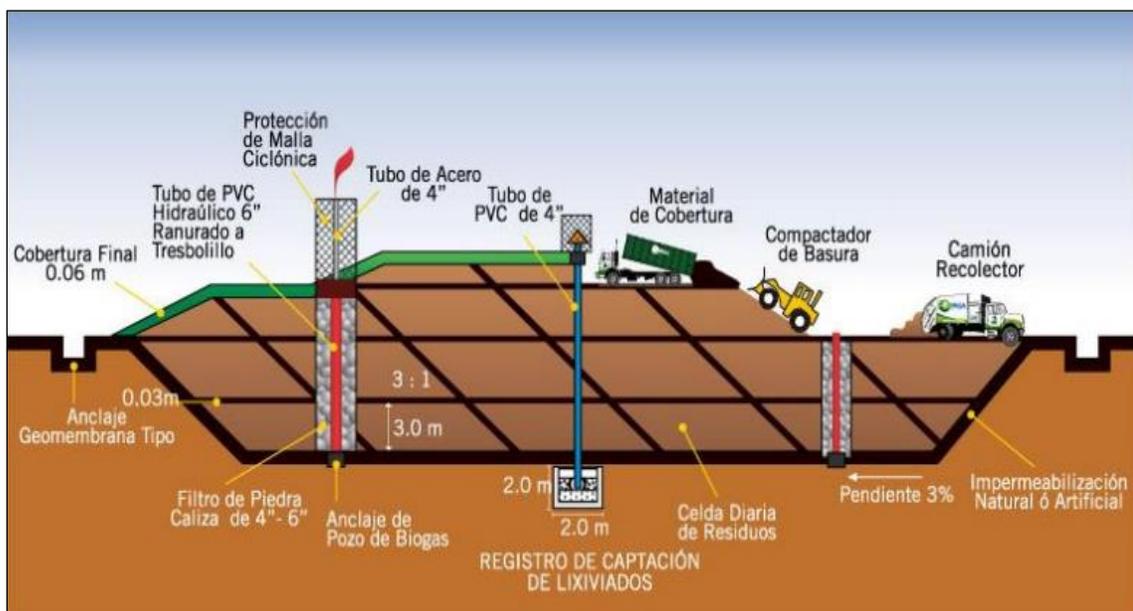


Figura 3-1. Esquema general de un Relleno Sanitario típico.
Fuente: Tomado de (Quiroz, 2014)

En el caso particular de Doña Juana, la deposición de los materiales se da en una secuencia de llenado que aumenta el nivel topográfico mediante celdas, estas se construyen generando plataformas que elevan poco a poco el terreno hasta llegar a la cota máxima 2999 m.s.n.m que permite la actual licencia ambiental expedida por la Autoridad Ambiental.

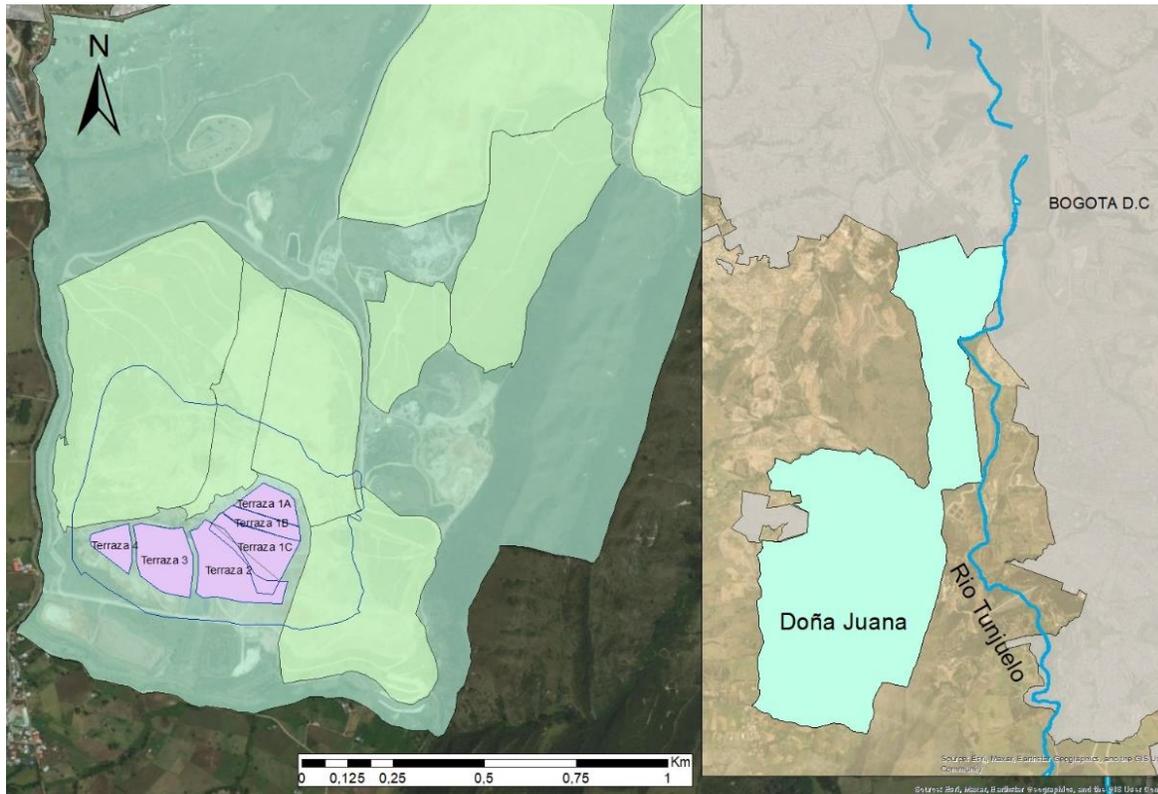


Figura 3-2. Ubicación de las terrazas de disposición actuales en Doña Juana.
Fuente: Propia

El polígono licenciado en Doña Juana se conoce como Optimización Fase II. Fue dividido por el contratista Centro de Gerenciamiento Doña Juana en 4 terrazas (véase figura 3-2). A su vez las terrazas tienen subdivisiones como se observa en la figura 3-2, con la división de la terraza 4 en dos, terraza 4A y terraza 4B, además de las etapas 1, 2 y 3 de la terraza 4A. En la figura 3-4 se observa la geometría plana de las celdas permite que se generen plataformas de llenado que contienen residuos de diferentes edades de disposición.



Figura 3-3. Divisiones de la Terraza 4 de la zona actual de Operación en Doña Juana.
Fuente: Tomado de (UT INTER DJ, 2021)

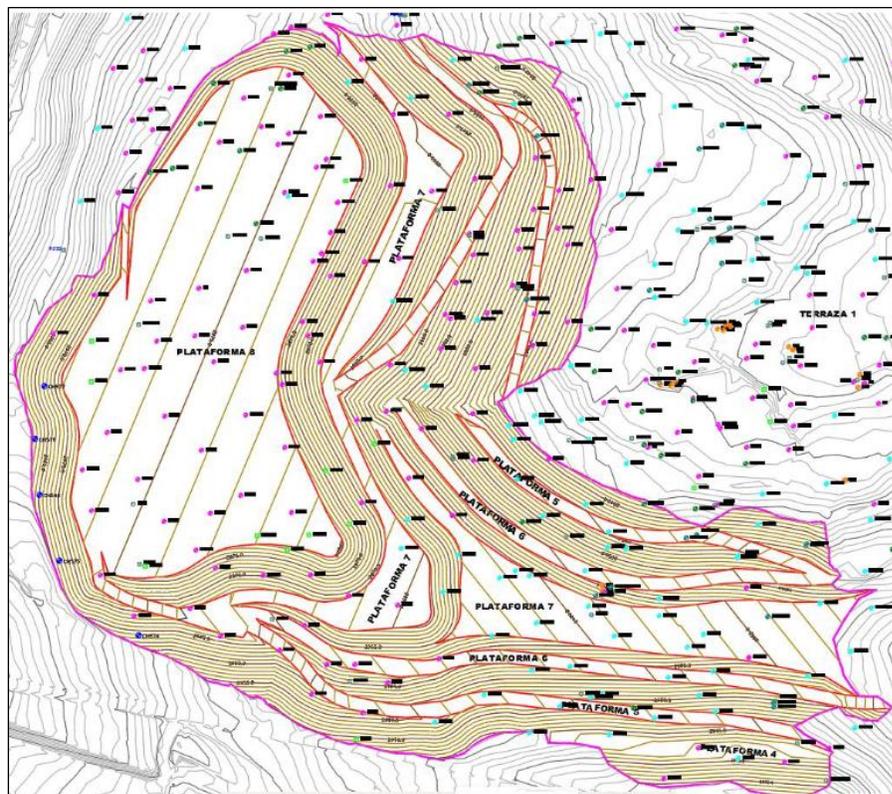


Figura 3-4. Plataformas de llenado de la zona actual de operación en Doña Juana.
Fuente: Tomado de (UT INTER DJ, 2021)

3.1.2 Evolución de los Residuos Sólidos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) varían con el tiempo, producto de las reacciones químicas exotérmicas que pueden alcanzar temperaturas de hasta 71°C. Los profesores Álvaro González y Augusto Espinosa (2003) explican detalladamente la evolución de los rellenos sanitarios en las siguientes fases:

- **Fase I:** En esta etapa se empieza a dar las reacciones iniciales, el oxígeno se comienza a consumir debido a la descomposición microbiana aeróbica
- **Fase II:** Es una etapa de Transición en la que se reduce el potencial de oxidación/reducción. Los sulfatos y nitratos presentes se reducen a nitrógeno (N) y ácido sulfúrico (H₂S). Las bacterias convierten la materia orgánica en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). El pH comienza a descender producto de la presencia de gases orgánicos. Durante esta fase se genera la mayor cantidad de lixiviados.
- **Fase III:** Es la etapa de Acidificación debido a que se incrementa la producción de gases orgánicos y disminución de H₂. El pH ya se encuentra con un valor de 5 o menos, este descenso provoca la solubilización de metales pesados en los lixiviados. Se genera hidrolisis de compuestos como lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, posteriormente ocurre la acidogénesis y se produce ácido acético y dióxido de carbono. Muchos nutrientes se liberan en el lixiviado.
- **Fase IV:** En esta fase de Metanogénesis, predomina otro grupo de bacterias que convierten el ácido acético e hidrogeno en metano y dióxido de carbono. El proceso se revierte y el pH se incrementa oscilando entre 6.8 a 8 y los metales pesados dejan de diluirse en el lixiviado.
- **Fase V:** En esta última fase la mayoría de material biodegradable se ha descompuesto en metano y dióxido de carbono. La cantidad de gas disminuye por la evacuación de los nutrientes en las fases previas. Los parámetros de resistencia también cambian con el tiempo. El valor de cohesión en los residuos aumenta mientras que el ángulo de fricción disminuye, como se observa en la figura 3-5. Esta fue construida con ensayos realizados en campo y con estimación de las edades de las basuras en Doña Juana, frente a lo cual se entrará en desarrollo en

el capítulo 5, con la descripción de la metodología de seguimiento a la estabilidad por parte del operador actual.

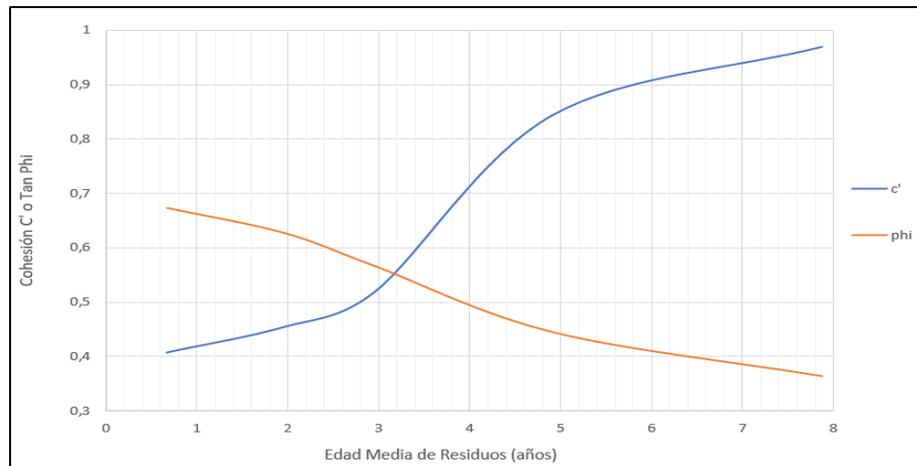


Figura 3-5. Evolución de los parámetros de resistencia en el Relleno sanitario Doña Juana

Fuente: Adaptado de González & Espinosa (b), (2003)

Adicionalmente, a diferencia de los suelos, los sólidos en las basuras no se mantienen constantes con el tiempo. Como se explicó anteriormente, la actividad microbiana convierte los materiales biodegradables en lixiviado y gases con el transcurso del tiempo. Como se observa en la figura 3-6, mientras en los suelos la fase sólida se mantiene constante en la RSU esta desaparece.

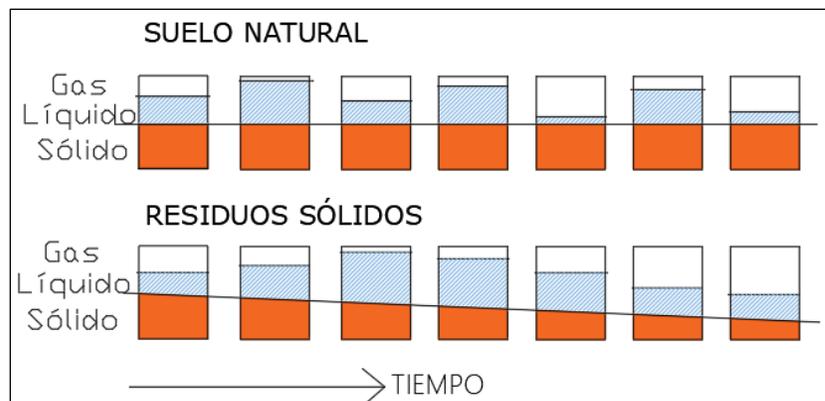
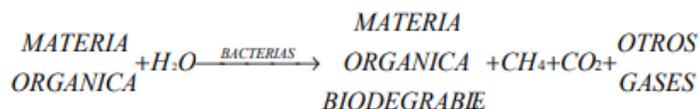


Figura 3-6. Diagrama de fases de un suelo natural comparado con los residuos sólidos.

Fuente: Modificado de González & Espinosa (b), (2003)

3.1.3 Generación de lixiviados y gases

Los lixiviados se producen principalmente de: (a) las precipitaciones que se infiltran en los RSU; (b) el agua que expulsan los RSU al compactarse y (c) por la descomposición bacteriana. Por otro lado, los gases se generan por la descomposición de la materia orgánica y se explica mediante la siguiente ecuación (González & Espinosa (a), 2003):



El comportamiento de la ecuación depende de la composición de los residuos sólidos dispuestos, las condiciones climáticas y el contenido de humedad. Entre mayor sea la cantidad de materia orgánica mayor será la generación de gases (Diosa, 2016).

Si bien, el material biodegradable representa aproximadamente entre un 50% a 70% en los rellenos municipales, lo que se traduce en un 50% a 30% de material remanente. Para el caso particular de Doña Juana, se han encontrado valores de un 80% de biodegradables y solamente un 20% de sólidos remanentes (González & Espinosa (a), 2003).

3.1.4 Composición de los Residuos Sólidos

La composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) influyen fuertemente en el comportamiento geotécnico de estos materiales. La descomposición orgánica de los materiales biodegradables y su consecuente producción de lixiviados y biogás se traduce en una menor resistencia.

Los RSU de las zonas tropicales y de los países en vía de desarrollo tienen una composición de materia orgánica relevante (Ordoñez & Villarraga, 2007). En la figura 3-7 se comparan los datos composicionales de la Zona II de Doña Juana, junto con los de rellenos de EEUU. La diferencia más relevante es que en Bogotá la materia orgánica representa más del 52 % en comparación del 27%. Este alto valor se reporta en rellenos en países en vía de desarrollo (Jahanfar, 2014)(Ordoñez & Villarraga, 2007;)(Díaz et al., 2016)(Daciolo et al., 2022).

DEGRADACIÓN	COMPONENTE	PROMEDIO (%)		
		ZONA II	D. Juana	USA
Rápida	M.orgánica	60.8	52.3	27.5
	Papel	14.9	18.3	40.0
Lenta	Madera	1.5	3.1	2.0
	Tela	2.8	3.8	2.0
	Cuero	0.2	1.8	0.5
	Caucho	0.1	1.0	0.5
Casi nula	Plástico	14.7	13.2	7.0
	Metales	2.1	1.6	9.5
	Minerales	1.2	0.3	3.0
	Vidrio	1.6	4.6	8.0
	Hun ω%	73.9	60.3	27.0

Figura 3-7. Comparación de la Composición de los RSU de Doña Juana con Rellenos de Doña Juana. Tomado de (González & Espinosa (a), 2003)

3.1.5 Fallas históricas en rellenos sanitarios o vertederos

La investigación de los deslizamientos en vertederos es un campo relativamente reciente. Esto se debe, en parte, a que las consecuencias de estos eventos raramente resultan en la pérdida de vidas humanas. Adicionalmente, debido al estigma social asociado con este tema, los gobiernos y entidades a menudo no divulgan información sobre estos sucesos ni llevan a cabo investigaciones exhaustivas para determinar sus causas (Jahanfar, 2014).

Jahanfar (2014) recopiló varios deslizamientos ocurridos alrededor del mundo, en donde se pudo determinar el factor detonante. La mayor parte de estos se encuentran relacionados con lluvias torrenciales que generan un incremento de la lámina de los lixiviados, aumento de la presión de poros y en algunos por problemas operacionales. Cabe destacar que, en la tabla 3-1 no se reporta ningún deslizamiento cuyo factor detonante sea de origen sísmico.

Tabla 3-1. Deslizamientos históricos en Rellenos sanitarios.

<i>Región</i>	<i>Año</i>	<i>Volumen</i>	<i>Tipo de falla</i>	<i>Pérdidas humanas</i>	<i>Factor Detonante</i>
Iran, Shiraz	2013	N/A	Rotacional	11	Los fuegos artificiales sobre los materiales de desechos quemados en el vertedero provocaron un exceso de presión de agua intersticial y un colapso.

Indonesia, Bandung	2005	2.7 millones	Traslacional	147	La razón es la extraordinaria cantidad de residuos ligeros (plásticos) combinada con la alteración del equilibrio hídrico debido a la circulación de lixiviados.
Filipinas, Payatas	2000	1.2 millones	Rotacional	330	10 días de lluvias intensas, Baja densidad de residuos, Percolación de agua en lugar de drenaje, lo que reduce la resistencia al corte de los residuos.
EEUU	1997	100,000	Rotacional	-	El aumento de la carga de lixiviados detrás de la zanja de relleno de arcilla, debido a la presencia tanto de la capa de arcilla dentro de la masa de desechos como del material de relleno arcilloso dentro de la zanja, fue muy probablemente el mecanismo desencadenante de la falla.
África	1997	300,000	Traslacional	-	La falla se produjo después de 48 horas de lluvia. Se consideró que el mecanismo desencadenante fue la colocación excesiva de desechos líquidos en la corteza de madera ya saturada entre las secciones antiguas y recientes del vertedero.
Sur América	1997	1.2 millones	Traslacional	-	El aumento de la carga de lixiviados dentro de la masa de residuos debido a las agresivas operaciones de inyección de lixiviados.
Colombia, Bogotá	1997	800,000	Traslacional	-	Presión de poro causada por la recirculación del lixiviado.
Sur África, Durban	1997	160,000	Rotacional	-	Presión de poro causada por la eliminación conjunta de desechos líquidos.
EEUU, Mahoning	1996	100,000	Traslacional	-	El mecanismo desencadenante de falla fue aparentemente el aumento progresivo de la capa de bentonita húmeda de la geomembrana no reforzada.
EEUU, Rumpke	1996	1.2 millones	Traslacional	-	La acumulación adicional de lixiviados en el vertedero debido a la formación de hielo en la cara de desechos expuesta cerca del pie del talud.
Europa	1994	60,000	Traslacional	-	Humedad excesiva del componente arcilloso de la geomembrana de HDPE a las interfaces CCL. Se informó que la geomembrana se colocó durante un período muy húmedo cuando el CCL ya tenía un alto contenido de agua.
Turquia, Umbanye	1994	12,000	Traslacional	39	Acumulación excesiva de nivel de lixiviado (estimada en 5 m) dentro de los desechos viejos y descompuestos causada por la infiltración de agua desde pondajes de agua superficial adyacentes.
EEUU, Maine	1989	500,000	Rotacional	-	Después de aproximadamente 120 mm de lluvia durante los diez días anteriores al incidente.
EEUU, Kettleman	1988	490,000	Traslacional	-	Se informó que las precipitaciones durante la construcción y la colocación de desechos, así como el agua de consolidación expulsada del CCL, causaron una geomembrana excesivamente mojada en la interfaz del CCL.

Fuente: Traducido de (Jahanfar, 2014)

3.2 Ensayos de campo piezocono (CPTu)

Los ensayos de penetración en cono han ganado valor recientemente como una buena alternativa para la exploración del subsuelo. Estos miden simultáneamente la resistencia por punta y la fricción lateral; Adicionalmente es posible medir la presión intersticial a lo largo del perfil. Este ensayo se realiza según la norma ASTM D-3441 para los sistemas

mecánicos y ASTM D-5778 para los sistemas eléctricos y electrónicos. A grandes rasgos, se trata de introducir una sonda cilíndrica de acero en el suelo a una velocidad constante de 20 mm/s. El penetrómetro estándar tiene una punta cónica de 60° de ángulo, un diámetro de 35,7 mm (área proyectada de 10 cm²), y un manguito de fricción de 150 cm (Chaves, 2016).

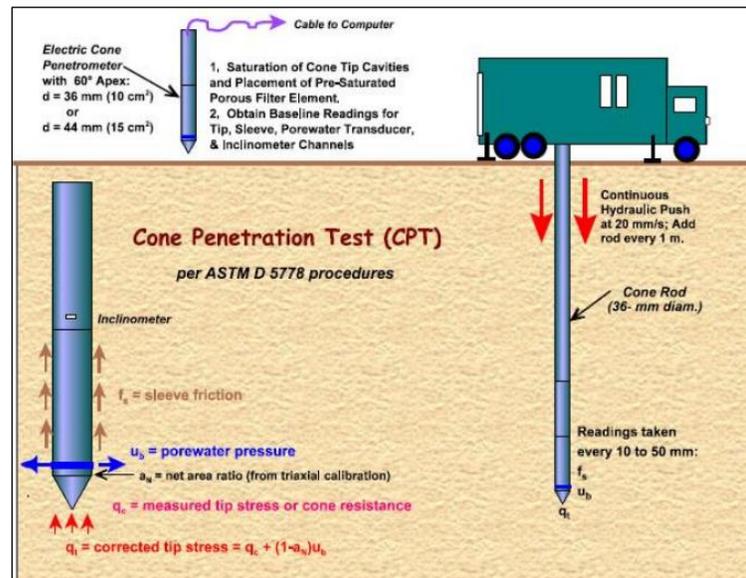


Figura 3-8. Representación gráfica de un ensayo CPT
Fuente: tomado de (Chaves, 2016)

Con los datos de Resistencia en punta q_c y fricción lateral F_s es posible encontrar la relación de fricción R_f (%) y el ángulo de fricción equivalente de Vesic:

$$R_f(\%) = F_s/q_c * 100$$

$$\tan \phi_{eq} = -\frac{1}{3} \log (R_f/11)$$

$$\tau = \sigma'_v \tan \phi_{eq}$$

Con los valores de encontrados de τ y σ'_v es posible determinar los valores efectivos de resistencia de c' y Φ' .

Adicionalmente, la inclusión de la medición de las presiones de poro ha incrementado el valor y la importancia de este ensayo, especialmente en zonas donde se requiere realizar análisis de estabilidad. Los equipos que cuentan con este sistema se denominan piezocono y son muy utilizados hoy en día en nuestro medio, de tal manera que se pueden tener registros simultáneos de resistencia por punta, por fricción y presión de poros. La

figura 3-9 presenta el equipo que fue utilizado en el relleno sanitario Doña Juana, se observa la punta cónica (1), la localización del sensor de medición de presión de poros (2) y el fuste o mango de fricción (3). La figura 3-9b exhibe el equipo utilizado en los ensayos de piezocono teniendo dimensiones relativamente pequeñas lo que facilita su transporte y ubicación sobre zonas de difícil acceso.



Figura 3-9. a) Fotografía de la sonda utilizada. b) Fotografía del equipo utilizado.
Fuente: Tomado de (UAESP et al., 2023)

3.3 Métodos de estabilidad por equilibrio límite

El procedimiento se fundamenta en evaluar la estabilidad de una masa de suelo que se encuentra en una situación de inestabilidad, considerando la masa potencial de falla como un cuerpo libre y aplicando ecuaciones de equilibrio global. En este sentido, se lleva a cabo una comparación entre las fuerzas que actúan y las fuerzas resistentes que se oponen al movimiento a lo largo de una superficie potencial de falla. Para llevar a cabo el análisis, en primer lugar, es necesario determinar una superficie teórica de falla utilizando el criterio de Mohr Coulomb. Los resultados se expresan en términos de un factor de seguridad (F_s), sin considerar las posibles deformaciones en el suelo y asumiendo que los esfuerzos aplicados están distribuidos de manera uniforme (Tapia, 2019).

En estos métodos, tres ecuaciones de equilibrio pueden ser empleadas, equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y equilibrio de momentos. Con tal

equilibrio se calcula la resistencia al corte actuante (τ) y la resistencia al corte disponible (τ_f) obteniéndose el coeficiente de seguridad (f) (Catanzariti, 2016):

$$f = \frac{(\tau_f)}{(\tau)}$$

Existen algunos métodos que consideran el equilibrio global de un cuerpo rígido y otros que dividen el cuerpo evaluado en rebanadas o dovelas, teniendo en cuenta el equilibrio en cada una (Bishop, Janbu, etc.). En el presente trabajo se utiliza esta última metodología.

3.3.1 Método de las dovelas

Los problemas de estabilidad de taludes tienen una naturaleza estáticamente indeterminada, requiriendo la consideración de diversas hipótesis. Con base en estas condiciones, se establecen ecuaciones de equilibrio que relacionan las fuerzas que inducen el deslizamiento con las fuerzas resistentes (Sanhueza & Rodríguez, 2013). En este método, se divide el cuerpo deslizante y se calculan las ecuaciones de equilibrio de cada división. La figura 3-10 ilustra como se divide una masa susceptible a deslizarse en dovelas verticales y las fuerzas de cada una de estas.

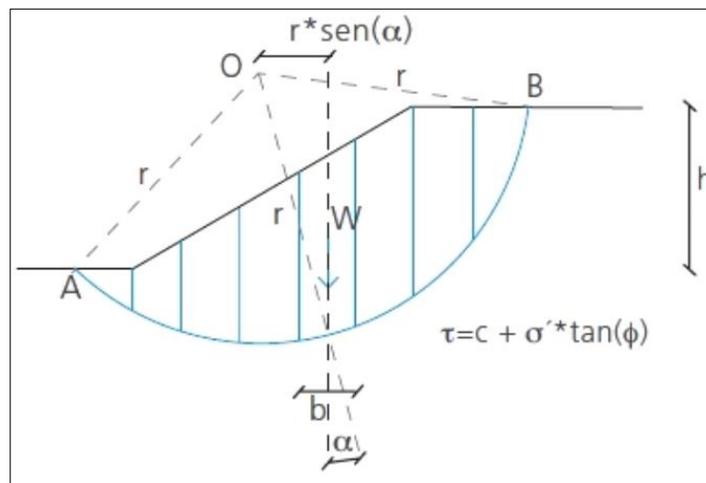


Figura 3-10. Masa deslizante dividida en dovelas verticales y fuerzas interdovelas.
Fuente: tomado de (Sanhueza & Rodríguez, 2013)

La anterior ilustración toma una superficie de falla circular, con un radio r y un punto focal O . En el presente trabajo se utiliza la metodología de equilibrio límite de Bishop Simplificado. El cual satisface el equilibrio de fuerzas verticales y de momento, con la siguiente ecuación:

$$F_s = \frac{c * b * \cos(\alpha) + (W * \mu * b * \cos(\alpha)) * \tan(\phi)}{\cos(\alpha) + \frac{((\sin(\alpha)) * \tan(\phi))}{F_s}} \cdot \frac{1}{W * \sin(\alpha)}$$

Donde, c es la cohesión del suelo, b la longitud de la dovela, α el ángulo entre la dovela y el radio de la dovela, W el peso de la dovela, μ la presión de poros de la dovela y ϕ el ángulo de fricción del suelo. El proceso es iterativo al estar el factor de seguridad a ambos lados de la ecuación. Se busca el menor F_s variando el punto focal y la superficie de falla de un talud determinado. El F_s es constante en toda la superficie de falla, al igual que la resistencia al corte (Sanhueza & Rodríguez, 2013).

3.4 Estudios de riesgo por deslizamiento en residuos sólidos

Jahanfar (2014) realizó una evaluación de riesgo por deslizamiento en el botadero Bhalswa en Nueva Deli, India. Esta investigación calculó los parámetros de cohesión, ángulo de fricción y peso unitario con base en la recopilación de los análisis posteriores de varios deslizamientos previos en rellenos sanitarios de diferentes partes del mundo, específicamente de Sarajevo-Bosnia 1977, Estambul-Turquía 1995, Ohio-EEUU 1996, Bogotá- Colombia 1997, Durban-Sudáfrica 1997 y Bandung-Indonesia 2005. La distribución estadística resultó ser normal para la fricción y el peso unitario, mientras para la cohesión log-normal, igualmente se obtuvo un valor medio de los parámetros, así como su desviación estándar.

Lo anterior permitió calcular la probabilidad de falla mediante el método estadístico Montecarlo (el cual también se utiliza en el presente trabajo y se explica en el capítulo 8) por medio del software Slope/W, por ende, un valor de amenaza. En cuanto a vulnerabilidad Jahanfar (2014) define un factor de fatalidad mediante la siguiente ecuación:

$$FoF = \frac{\text{Distancia de viaje total}}{\text{Distancia de viaje fatal}}$$

Donde el denominador es la distancia entre las áreas residenciales al botadero. Cuando el factor sea mayor a 1, implicaría que se alcanzaría una zona con población y puede haber pérdidas humanas. La distancia de viaje total fue calculada para todos los escenarios de

los deslizamientos ya evaluados al igual que la distancia fatal, de manera que se obtuvieron distribuciones estadísticas y probabilísticas. Por tanto, la vulnerabilidad se definió como la probabilidad de que el valor de FoF sea mayor a 1.

Finalmente, Jahanfar (2014) calcula dos tipos de riesgos, riesgo especial y riesgo total. Donde el riesgo especial es el producto entre la probabilidad de falla y la probabilidad del factor de fatalidad, mientras el riesgo total es el producto entre el riesgo especial y la pérdida total de elementos.

Si bien en términos de amenaza, la investigación de Jahanfar (2014) toma datos de otros sitios a diferencia del presente trabajo, la metodología es esencialmente la misma al asociar la probabilidad de falla calculada mediante el método de Montecarlo, a un valor de amenaza. Sin embargo, la vulnerabilidad difiere debido a que, el caso de estudio de este autor supone un riesgo latente de pérdida de vidas humanas dada la cercanía de zonas residenciales al botadero evaluado. Adicionalmente, al ser un botadero, este no cuenta con estructuras que puedan verse afectadas por un deslizamiento.

En el año 2017 Jahanfar realiza una actualización incluyendo un valor H crítico para exposición a la contaminación, pérdida de vidas, y pérdida de edificaciones. Este valor se refiere a la altura del deslizamiento potencial. Para una altura mayor a 5 m se asocia a pérdida de edificaciones, de entre 5 a 2,5 m a pérdida de vidas, y de 2,5 a 0 m como contaminación. Por último, asocia niveles de riesgo tolerable, intolerable y aceptable a los datos de riesgo total obtenidos, encontrando que el 40% de los escenarios son intolerables en el botadero Bhalswa en Nueva Deli, India. Recomendando que se tomen acciones inmediatas para la mitigación del riesgo (Jahanfar et al., 2017).

3.5 Simulaciones Monte Carlo en análisis de estabilidad

La evaluación y caracterización de la amenaza por deslizamientos lleva intrínsecamente un análisis probabilístico. Diversos autores han ideado enfoques que examinan cómo diferentes aspectos geométricos y de resistencia interactúan. Estas metodologías incluyen

modelos probabilísticos, al calcular la probabilidad de que ocurran fallos, utilizando el método de Monte Carlo.

Existen múltiples estudios de análisis de simulaciones de Monte Carlo en la literatura disponibles debido a uso extendido. Tanto es así que los softwares convencionales tienen las simulaciones implícitas de Monte Carlo como SLIDE, TRIGRS, PLAXIS, entre otros. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos estudios revisados en el que se incluyen trabajos de simulación de Monte Carlo, fundamentalmente orientados a determinar probabilidades de falla.

Baecher & Christian (2003) introducen métodos probabilísticos en la geotecnia y la geología, abordando la distribución espacial de los materiales y en suelos y rocas. Los autores utilizaron diversos métodos de probabilidad incluyendo la simulación de Montecarlo. Entre sus conclusiones se destaca que este método tiene un fácil uso además de un rango de aplicabilidad amplio, como desventaja se menciona que no disminuye la varianza de los datos. Esto último implica que, si se tienen varianzas muy grandes, el método se vuelve tedioso y de un gran consumo computacional por la cantidad de simulaciones que se deben realizar.

Las simulaciones de Monte Carlo empezaron a emplearse para desarrollar mapas de susceptibilidad de deslizamientos. Zhou et al. (2003) generaron un mapa de probabilidad de falla mediante modelos digitales de elevación y simulaciones Monte Carlo. Este método se escogió debido a la incertidumbre de los datos como la cohesión y el ángulo de fricción.

De igual forma, Liu (2008) construyó un mapa de probabilidad de falla asignando a cada píxel de una superficie, parámetros de cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, conductividad hidráulica entre otros. Mediante 2000 simulaciones de Monte Carlo en el software TRIGRS, obtuvo una probabilidad de falla para cada píxel, y cuya metodología se puede replicar fácilmente. Sin embargo, para la aplicación de esta metodología es necesario contar con modelos digitales de elevación muy detallados.

Cepeda et al. (2013) utilizaron la modelación de Monte Carlo para realizar modelamientos de la distancia que pueden alcanzar los deslizamientos cuando no se tengan datos completos de los materiales. Concluyen que, el método es bastante útil para determinar las distribuciones de probabilidad para realizar mapas de amenaza e intensidad. No obstante, destacan que se debe tener buenos análisis retrospectivos para tener una confiabilidad aceptable de los datos.

Peres & Cancelliere (2016) estiman el periodo de retorno para la generación de deslizamientos mediante el método de Monte Carlo en un terreno montañoso en Sicilia. Los autores utilizaron la variabilidad de curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) en términos de las características de las condiciones iniciales y los cambios dentro de intensidad dentro de un mismo evento. Compararon los resultados con la obtención tradicional de las curvas IDF y encontraron que se puede dar una sobreestimación del período de retorno para los deslizamientos de tierra con el método tradicional. Los autores demostraron que la aplicabilidad del método Monte Carlo puede ser incluso mas conservadora que los métodos tradicionales.

4. Metodología

El propósito principal de este trabajo consiste en el análisis de los riesgos por deslizamiento en el Relleno Sanitario Doña Juana. Para llevar a cabo este objetivo, se ha optado por utilizar la Guía Metodológica SGC-UNAL (Ávila et al., 2016) (para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por remoción en masa, como referencia principal. La figura 4-1 presenta el esquema metodológico que se ha seguido en este trabajo, el cual guarda similitud con los esquemas de la Guía en sus análisis de amenaza y vulnerabilidad.

El primer paso se relaciona con la recopilación de toda la información disponible, esta se resume en datos de ensayos geotécnicos de campo tipo CPTu, reconocimiento del entorno, e informes del operador del relleno, donde se encuentran los datos del sistema de instrumentación geotécnica de Doña Juana, compuesto por piezómetros, inclinómetros y lluvias, además de los levantamientos topográficos mensuales de las celdas de residuos.

Los análisis de dicha información partieron del comportamiento de las presiones de poro (R_u) al identificarse como un parámetro crítico en la evaluación de estabilidad. Se evaluó su comportamiento con el tiempo y su variabilidad espacial mediante sistemas de información geográfica. Adicionalmente, se estudió la posible relación que pudiera existir con la lluvia y las horas de bombeo de extracción forzada de lixiviados; esto dio paso a la evaluación de los parámetros de resistencia de los residuos sólidos. Para esto se contó con la información de 18 ensayos de CPTu con ensayos de disipación de presión y cuyos resultados fueron corroborados con lo reportado por Rellenos Sanitarios de características similares a las de Doña Juana.

Utilizando los parámetros obtenidos, así como los valores de las presiones de poro y los modelos digitales de elevación del operador, se construyó el modelo geotécnico de la zona de estudio. A partir de este modelo, se creó una representación tridimensional y se extrajeron las secciones de análisis en bidimensionales que fueron la base para los análisis de estabilidad.

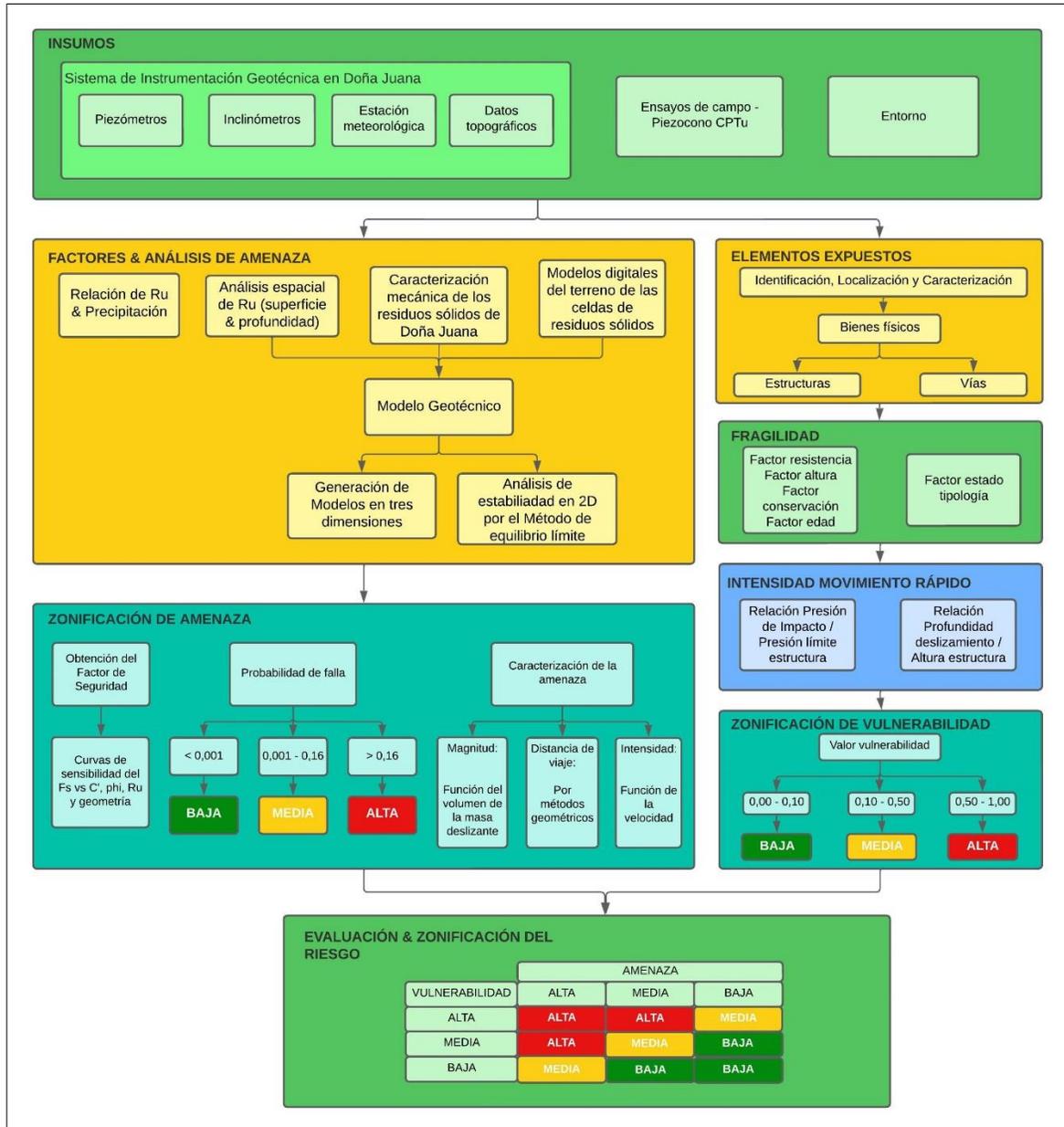


Figura 4-1. Esquema Metodológico del presente trabajo.
Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Se empleó el Software de Equilibrio Límite SLIDE V6.0 para determinar los factores de seguridad y analizar su comportamiento respecto a la cohesión, fricción, presión de poros y geometría. Adicionalmente, el programa facilita la ejecución de análisis probabilísticos, permitiendo determinar la probabilidad de falla. Este valor se utilizó para la zonificación de la amenaza. Los valores de la vulnerabilidad, intensidad y volumen del posible evento

amenazante fueron obtenidos con base en los datos topográficos de los informes de mensuales del operador.

Por otro lado, el análisis de la vulnerabilidad inicia con el análisis de los bienes físicos y naturales del entorno del área de estudio, abarcando los barrios aledaños y las estructuras internas de Doña Juana y el recurso hídrico. Posteriormente, se identifican los elementos expuestos y se calcula su fragilidad considerando los factores de resistencia, altura de la estructura, conservación, edad y estado. En cuanto a la intensidad, se toma en cuenta la velocidad calculada en la caracterización de la amenaza, junto con la presión límite de la estructura, la profundidad del hipotético deslizamiento y la altura de la estructura. La combinación de estos valores de intensidad y fragilidad proporciona el índice de vulnerabilidad y su correspondiente zonificación.

Finalmente, se realiza una superposición de los mapas de amenaza y vulnerabilidad obtenidos, resultando en la zonificación del riesgo. A partir de esta evaluación, se formulan recomendaciones correspondientes para reducir dicho riesgo.

4.1 Actividades desarrolladas

4.1.1 Caracterización de mecánica de los residuos y evaluación de la presión de poros

Los residuos sólidos urbanos son materiales particulares cuyo comportamiento mecánico se ve influenciado por la biodegradación de la materia orgánica, dando lugar a la generación de lixiviados y gases. La aparición de estos aumenta las presiones de poros y reduce los esfuerzos efectivos del material. Para la comprensión de estos fenómenos se desarrollaron las siguientes actividades:

- Se emplea la técnica de geoprocesamiento IDW (Distancia Inversa Ponderada), la cual realiza una interpolación de superficie a partir de puntos asociados a una variable específica, en este caso, el valor del parámetro R_u , el cual expresa el valor de la presión de poros sobre el esfuerzo total de los residuos. Esta metodología facilita el cálculo de áreas de alta presión durante diversos periodos de tiempo, permitiendo así evaluar la posible correlación entre el parámetro R_u , la precipitación y las horas de operación de las bombas de extracción de lixiviado que funciona en Doña Juana.

- Se recopilan y analizan los resultados de los 18 ensayos geotécnicos de campo con piezocono, incluyendo mediciones de presión CPTu. La evaluación detallada de estos ensayos permite determinar los parámetros de cohesión y el ángulo de fricción interna para los residuos.
- Para una evaluación más precisa de los datos obtenidos, se estructuró una base de datos utilizando como referencia la elaborada por Daciolo (2020). Esta base de datos incluye valores de cohesión y fricción de otros rellenos sanitarios similares a Doña Juana, especialmente aquellos con contenidos de materia orgánica comparables.
- Utilizando los valores derivados de la relación del ángulo de fricción con la profundidad y la interacción entre la fricción y la cohesión, se procede a modelar el comportamiento de ambos parámetros en función de la profundidad.

4.1.2 Análisis de Amenaza

Aunque se utilizó la Guía Metodológica SGC-UN (Ávila et al., 2016) como punto de partida para el análisis de riesgos, este trabajo incorpora algunas actividades específicas que se detallan a continuación:

- Construcción del modelo geotécnico, a partir del cual se definieron las unidades geotécnicas y sus parámetros. Este fue construido mediante la caracterización de los parámetros de resistencia de los residuos realizada anteriormente.
- Se creó un modelo tridimensional a partir del modelo geotécnico utilizando el software Autodesk Civil 3D, elegido por su facilidad de exportación a otros programas dedicados al análisis de equilibrio límite. Este modelo resultó práctico para obtener un entendimiento detallado del entorno de la zona de estudio, así como para seleccionar los perfiles más críticos que se emplearían en los análisis de estabilidad.
- Los análisis de estabilidad se desarrollaron mediante el método estadístico Montecarlo mediante el programa de equilibrio límite Slide V6.0, incluyendo curvas de sensibilidad del factor de seguridad con respecto a la cohesión, fricción y Ru (presión intersticial).
- La caracterización de la amenaza se realizó calculando la magnitud, intensidad y distancias de viaje del posible evento amenazante. Estas distancias de viaje se determinaron de acuerdo con lo propuesto por Hung et al. (2005) .

- La construcción del mapa de amenaza por procesos de remoción en masa se realizó a partir de las probabilidades de falla de cada uno de los perfiles de análisis bidimensionales del área de estudio.

4.1.3 Análisis de Vulnerabilidad

Para el análisis de Vulnerabilidad se desarrollaron las siguientes actividades:

- Distribución espacial de los elementos expuestos, de acuerdo con su cercanía a la zona del deslizamiento, y que se encuentre dentro de la longitud comprometida con la distancia de viaje calculada en el análisis de la amenaza.
- Caracterización de los elementos expuestos: tras la elaboración de un inventario detallado, se determinaron factores clave, como la altura, edad, estado de conservación y resistencia, para calcular el valor de fragilidad. Posteriormente, se determinó la intensidad del evento amenazante mediante la relación de la presión de impacto del hipotético deslizamiento y la presión límite del elemento, junto con la relación de la profundidad del deslizamiento y la altura del elemento.
- Zonificación de la vulnerabilidad; la cual se da por el análisis de la fragilidad de todos los elementos expuestos, y la intensidad y magnitud del movimiento del terreno fallado.

4.1.4 Evaluación de Riesgo

La evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa estuvo basada en los resultados obtenidos de la zonificación de amenaza y vulnerabilidad en la zona de estudio. La superposición de los mapas producto de la zonificación permitió obtener un valor de riesgo y determinar las respectivas zonas con niveles bajos, medios y altos de riesgo. Por último, para los niveles inaceptables de riesgo se propuso alternativas para su disminución con base en lo evaluado y los diseños de rellenos sanitarios de otros autores.

5. Sistema de instrumentación en Doña Juana y metodología de seguimiento de estabilidad del operador

5.1 Sistema de instrumentación de Doña Juana

5.1.1 Piezómetros de hilo vibrátil

Como parte del seguimiento continuo de la operación en Doña Juana, se cuenta con piezómetros de hilo vibrátil de la marca Geokon en todas las celdas de residuos, ya sea clausurada o actual. En las celdas que serán evaluadas se tienen alrededor de 187 instrumentos los cuales tienen un registro diario del nivel de presión. Estos instrumentos se instalan dentro de la masa de residuos a diferentes profundidades permitiendo conocer la presión en diferentes puntos, esto es posible gracias al diafragma sensible de acero inoxidable del instrumento que cuenta con una cuerda vibrante. Cuando ocurren cambios de presión, el diafragma sufre deflexiones que ocasionan cambios en la tensión y en la frecuencia de vibración de la cuerda vibrante, estas dos variables son convertidas a presión (véase figura 5-1)(Yepes, 2015).

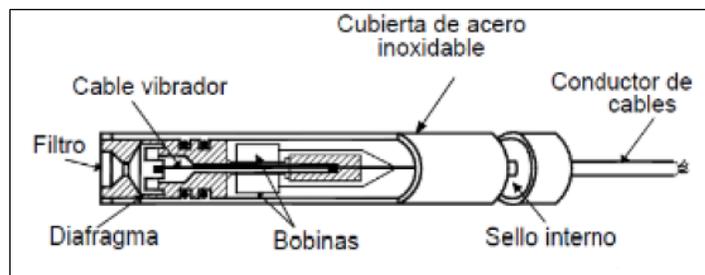


Figura 5-1. Piezómetro de cuerda vibrante.

Fuente: Tomado de Yepes (2015)

Cabe resaltar que los piezómetros cuentan con una boquilla de cerámica con un alto valor de admisión de aire, la cual registra la presión de poros combinada por gases y lixiviados. Sin embargo, aún no es posible diferenciar el porcentaje de presión debido al gas y lixiviado (Yepes, 2015). Este tipo de instrumento también cuenta con la posibilidad de medir los valores de temperatura, sin embargo, en los informes del operador no se reporta ninguno de estos valores.

Los piezómetros son instalados en la masa de los residuos protegidos por tubos perforados de PVC y material rajón que permite el flujo de los fluidos al interior de la estructura. Para el caso de Doña Juana al existir espesores de considerable magnitud, para un mismo punto se tienen varios piezómetros con diferentes profundidades como se observa en la figura 5-2. El piezómetro más profundo tiene por sufijo la letra A generalmente y a medida que se sube a superficie el sufijo será la siguiente letra. Todos los piezómetros tienen cables que van hasta la superficie y un operario recorre todos los días las celdas de residuos buscando estos instrumentos, mediante una consola portátil se toman las respectivas medidas al conectarse con los cables que salen a la superficie.

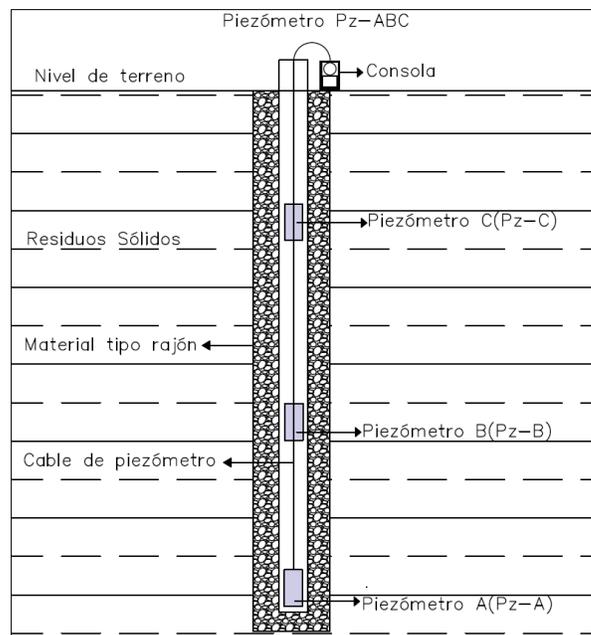


Figura 5-2. Esquema general de los Piezómetros en Doña Juana.
Fuente: Propia

La figura 5-3 muestra la vista en planta de los puntos donde se encuentran los piezómetros en la zona de estudio. Nótese que la cantidad de instrumentos observados es mucho menor a los 187 que se cuentan en total, lo que se explica en la figura 5-2.

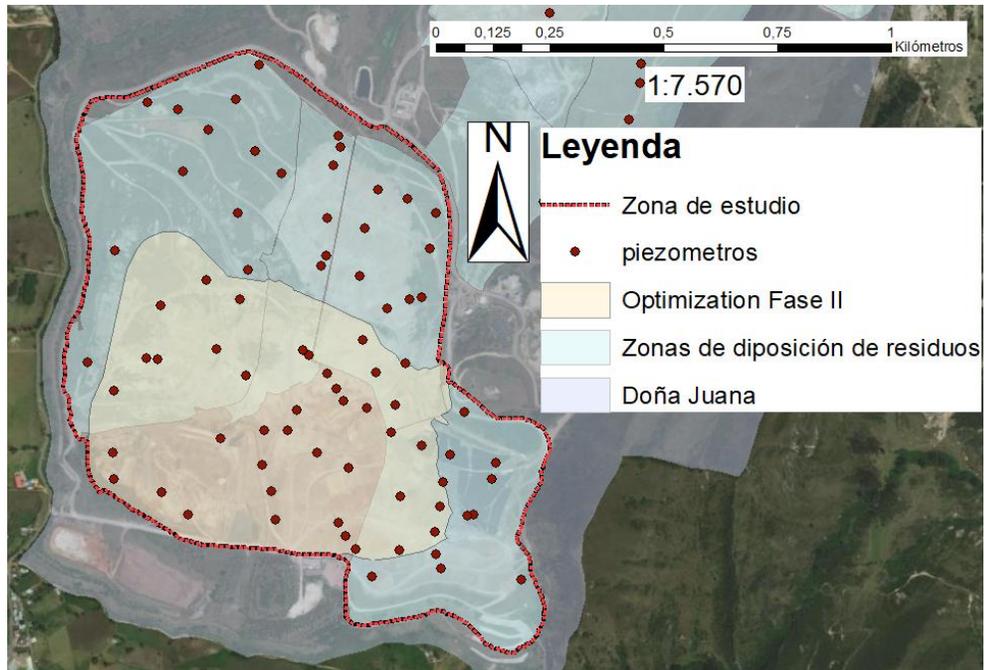


Figura 5-3. Mapa con la ubicación de los piezómetros en la zona de estudio.

Fuente: Propia

Es pertinente indicar que la consola mide vibraciones de onda que son registradas y frente a lo cual cada sensor posee curvas de calibración que resultan en un valor de columna de agua (m H₂O). Y teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$u = \gamma_{h_2O} h \quad (4.1)$$

$$\sigma_t = \gamma_{residuos} h \quad (4.2)$$

$$Ru = \frac{u}{\sigma_t} \quad (4.3)$$

$$Ru = \frac{\gamma_{h_2O}}{\gamma_{residuos}} \quad (4.4)$$

Se obtiene el valor de Ru y sobre el cual se realiza el seguimiento sobre el estado de la presión de poros para la estabilidad global de las celdas de los residuos. Dado que el peso de los residuos es mucho menor el de los suelos, este llega inclusive a tener un peso unitario equiparable al del agua, y por tanto se tiene que en residuos:

$$Ru_{max} \approx 1.0$$

5.1.2 Inclínómetros

El monitoreo de las deformaciones se lleva a cabo mediante inclinómetros ubicados en los límites de las celdas de residuos y en los diques de contención de estas. En la zona de estudio, se han instalado 9 de estos instrumentos, cuyas mediciones se realizan

semanalmente. Los valores registrados suelen ser inferiores a un milímetro de deformación horizontal. En la Figura 5-4 se presentan las mediciones del inclinómetro IT-4 correspondientes al mes de octubre de 2023, donde las deformaciones son prácticamente imperceptibles.

Los valores obtenidos en el deslizamiento de 2020 fueron revisados, y no se identificó ningún dato que indicara alguna anomalía. Esto se atribuye en parte a la periodicidad de la recopilación de datos y a la falta de automatización de estos instrumentos.

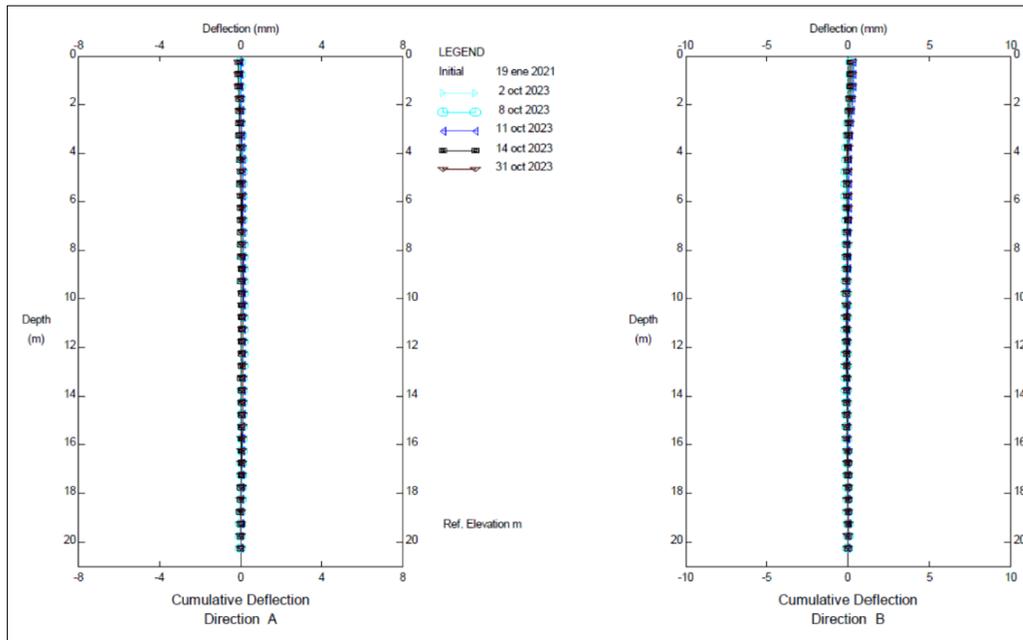


Figura 5-4. Inclinómetro IT-4 en la zona actual de operación.
Fuente: Tomado de CGR (2023)

En el presente trabajo, los datos de los inclinómetros fueron consultados solamente en el registro histórico para verificación de las lecturas en los deslizamientos ya ocurridos. Por su ubicación en los límites de las celdas de residuos no fue posible una verificación de las superficies de falla modeladas.

5.1.3 Estación meteorológica

En Doña Juana existe una estación meteorológica que toma datos de temperatura, precipitación y evaporación. Para el presente trabajo se tomaron solamente los valores de precipitación para evaluar la posible relación de las lluvias con el aumento de las presiones de poro en las celdas de residuos.

La figura 5-5 presenta los valores de la precipitación mensual del área de estudio durante el periodo comprendido entre los años 2013 y 2023. Estos datos se extrajeron de los informes mensuales proporcionados por el operador y fueron compilados para su análisis. Se observa un promedio anual de acumulación de 727 mm. En comparación, una ciudad semiárida como Riohacha, La Guajira, cuenta con un promedio anual de acumulación de 634 mm.

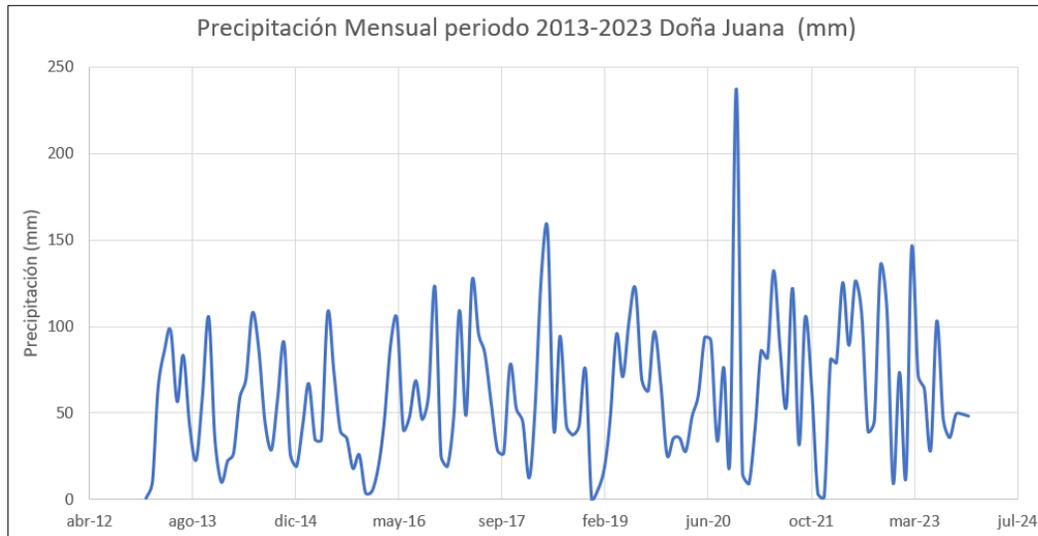


Figura 5-5. Precipitación mensual reportada en Doña Juana 2013-2023.
Fuente: propia

5.2 Análisis de presiones de poros

En la figura 5-6 se observa el comportamiento de tres instrumentos ubicados en la zona de estudio. Se ubican exactamente en la zona actual de operación en un sector denominado Terraza 1, el cual tenía una medida restrictiva desde mediados de 2018 imposibilitando la deposición de nuevos residuos. La figura indica que el piezómetro PZ-29A el cual se instaló desde el inicio la adecuación de la zona, tuvo una fuerte subida para finales de 2017 llegando incluso a valores de $RU=1$, esto coincide con el reinicio de disposición de residuos.

Sin embargo, hasta finales de 2020 no hubo reducciones significativas en la presión a pesar de que se instalaron arcillas impermeables para evitar percolación de agua lluvia, además de que no se aumentó la carga en más de dos años. Esto sugiere que la disipación de presión en residuos sólidos es muy baja y que paulatinamente, se tiene una generación

constante de lixiviado y gas gracias al alto porcentaje de materia orgánica. La gráfica muestra que para mediados de 2020 comenzó la reducción de la presión, esto de acuerdo con los informes de la interventoría coincide con la instalación de nuevos puntos de bombeo de extracción forzada instalados por el operador.

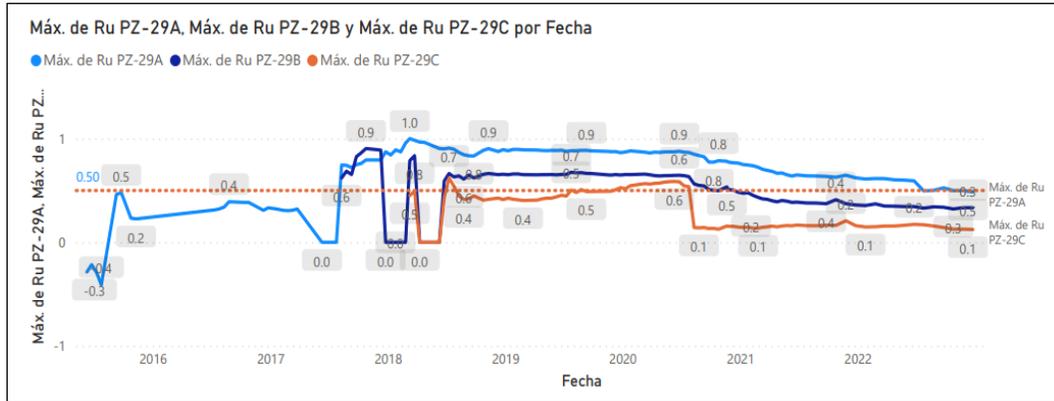


Figura 5-6. Comportamiento de la presión de poro registrada en el piezómetro PZ-29(ABC). Fuente: Propia

Por otro lado, la ficha de manejo de taludes de la actual licencia ambiental establece un valor máximo aceptable de $Ru=0,54$ en promedio para garantizar la plena operación, de igual manera la Resolución ANLA 763 del 2018 mencionada en el capítulo anterior, estableció la meta de $Ru < 0,5$ para la disminución de la presión.

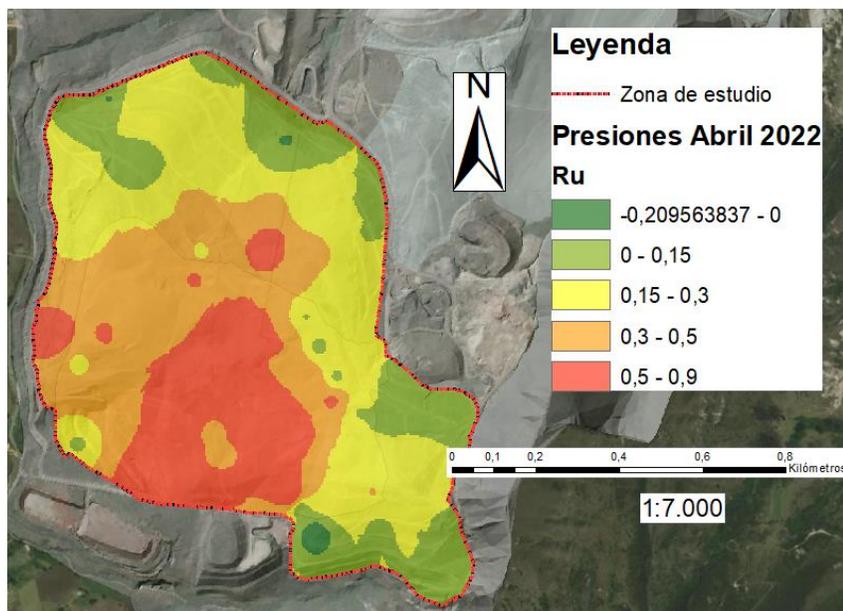


Figura 5-7. Mapa de isopresiones del mes de abril de 2022. Fuente: Propia

Con base en lo mencionado anteriormente, se tomaron los valores de Ru mayores o iguales a 0,5 como de alta presión. Sumado a este criterio, se realizaron análisis espaciales

mediante la interpolación de la presión de poros a partir de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

Cabe aclarar que el valor de R_u es un valor aproximado. La interpolación se basa en los datos georreferenciados de los piezómetros además de que se utilizó el método IDW. El método de ponderación inversa de la distancia (IDW, por sus siglas en inglés) emplea los datos medidos en las proximidades de un punto de predicción para estimar un valor en cualquier punto no muestreado. Este método se fundamenta en la premisa de que objetos cercanos tienen mayor similitud que aquellos más distantes. En la figura 5-7 se observa como el punto de predicción tiene una mayor influencia de los puntos más cercanos, y los puntos más distantes los excluye.

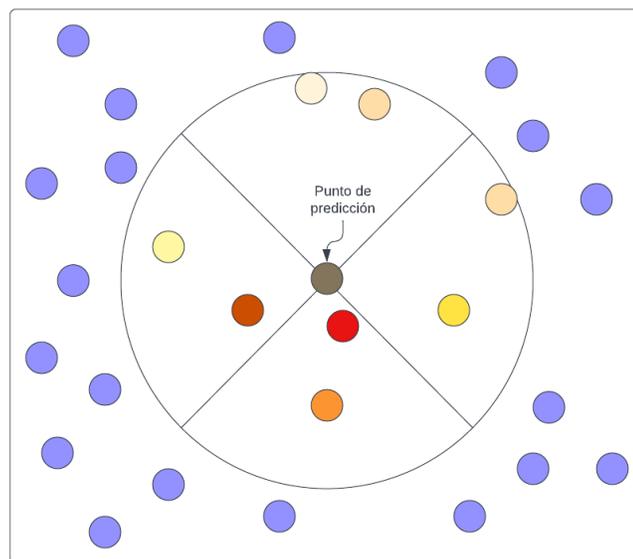


Figura 5-8. Esquema del método IDW.
Fuente: propia

La interpolación de los valores de R_u , tuvieron en cuenta la variabilidad espacial de los instrumentos piezométricos inmiscuidos en la masa de residuos. Estos valores tomaron en cuenta el promedio de la batería piezométrica, el cual se asocia a un punto del plano en planta, es decir, el promedio de tres o más piezómetros se asigna a las coordenadas de la batería piezométrica. En la figura 5-7 se observa el mapa de calor con diferentes zonas asociadas a un rango de presión (isopresiones), donde los tonos rojos hacen referencia a un mayor R_u . Esta zona de alta presión se ubica sobre la celda actual de operación de residuos, lo que se explica por la carga constante de nuevos residuos y el poco tiempo de disipación de los excesos de presión de poros.

En un principio, esta metodología es útil para entender de manera rápida las zonas donde se encuentran las mayores presiones de poros, sugiriendo la ubicación de estructuras para la disminución de presiones como las chimeneas. Ahora bien, al estudiar al detalle los valores de los instrumentos, se denotan algunos errores en los que se puede incurrir al promediar los valores. Por ejemplo, en algunas baterías se cuenta con un valor muy elevado ($R_u > 0,8$) y uno muy bajo ($R_u < 0,2$) cuyo resultado promedio ($R_u \approx 0,5$) no se ajusta a la realidad. Sumado a lo anterior, esta simplificación no tiene en cuenta la variabilidad en profundidad de la presión. Si bien, los principios geotécnicos indican que el valor de R_u aumenta con la profundidad, esta hipótesis no se cumple a cabalidad en un relleno dada la cantidad de acumulaciones individuales de lixiviados y gases que pueden ser análogos a acuíferos colgados.

Este análisis se realizó para los años 2021 y 2022, obteniéndose áreas de alta presión aplicando el criterio de áreas de alta presión igual a $R_u < 0,5$. La figura 5-9 muestra el comportamiento de la presión contrastándolo con la precipitación mensual de cada mes. Existe una cierta tendencia a un aumento de las zonas de alta presión cuando se producen altas precipitaciones y a una reducción de las zonas de alta presión cuando se reducen las precipitaciones, aunque hay una diferencia en el tiempo, con un retraso en la respuesta de 1 a 1,5 meses. Sin embargo, la relación no es tan marcada, porque la presión generada por los residuos es producto de la generación de lixiviados y gases que no depende enteramente de la lluvia.

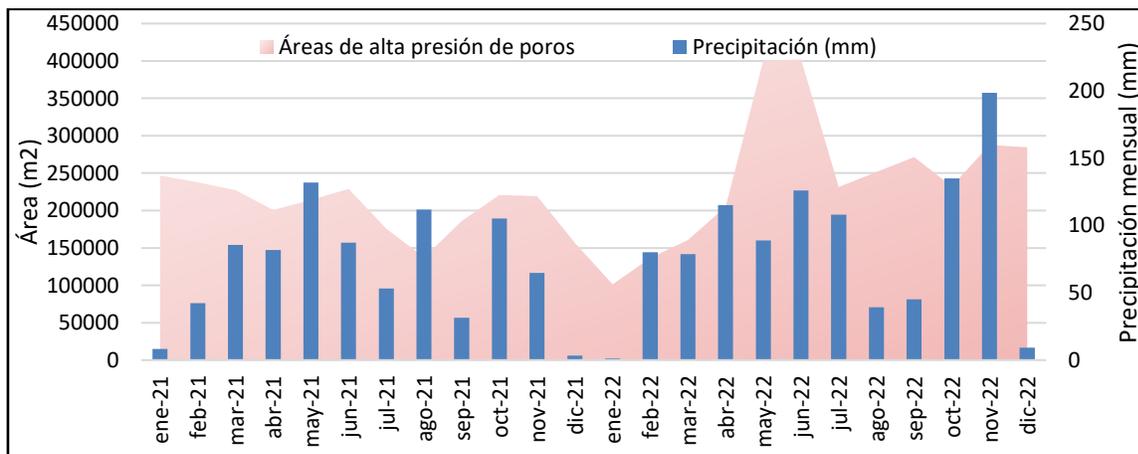


Figura 5-9. Áreas de alta presión de poros (m²) vs precipitación mensual (mm)

Fuente: Propia

Ahora bien, en Doña Juana para la evacuación de los lixiviados generados existen pozos de bombeo mediante los cuales se extraen los líquidos y por ende contribuyen a la disminución de la presión. Estos son dispuestos en diferentes puntos a varias profundidades en la celda de residuos. El operador ha instalado diversos pozos de bombeo fijos, que son complementados con bombas de extracción en chimeneas que se instalan de acuerdo con las necesidades de la operación y con base en los registros de Ru de los piezómetros.

La figura 5-10 presenta el comportamiento de las zonas de alta presión junto con las horas de bombeo. Se advierte que el operador tiende a bombear más cuando hay mayores proporciones de lluvia, sin embargo, estas bombas no son suficientes para reducir significativamente las áreas de alta presión de poro.

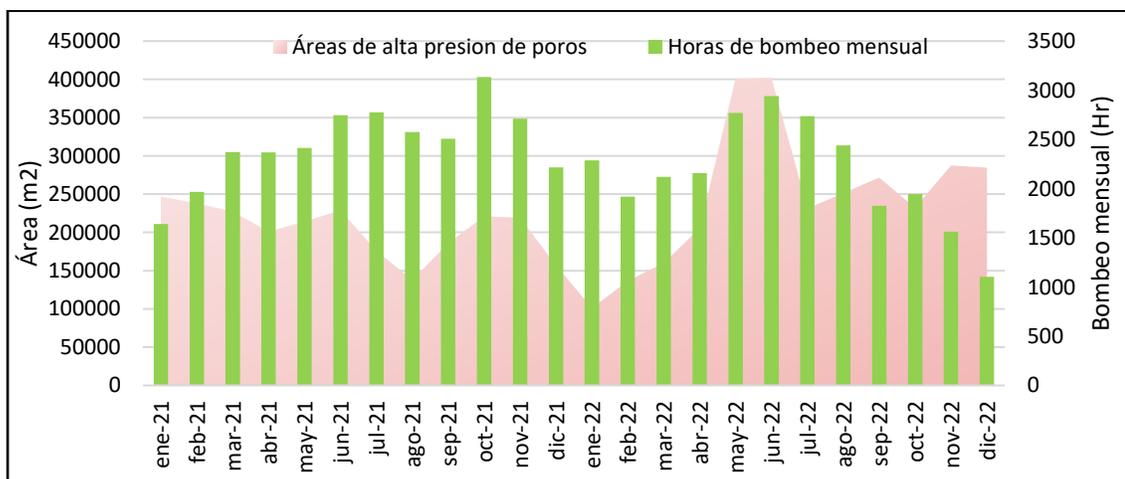


Figura 5-10. Áreas de altas presiones comparadas con las horas de bombeo mensual en Doña Juana.

Fuente: Propia

5.3 Metodología de seguimiento de la estabilidad del geotécnica en Doña Juana

Los antecedentes han provocado que el componente de estabilidad sea parte fundamental de la operación en Doña Juana. Como ya se ha mencionado, existe una cantidad relevante de piezómetros que monitorean el estado de presiones de poro en las celdas de residuos, que sumados a la topografía levantada diariamente permiten construir los modelos de

estabilidad para la estimación de los factores de seguridad. A continuación, se explicará la metodología a mayor detalle.

El operador cuenta con varios equipos de comisión topográfica que levantan los datos topográficos diariamente, estos son el insumo fundamental para la construcción de las secciones de análisis de estabilidad, las cuales fueron definidas por la licencia ambiental actual de operación. Son 8 las secciones realizadas en la zona de estudio del presente proyecto. Estas secciones son divididas en zonas de características similares, de acuerdo con el estado de la celda de residuos (abierta o cerrada) y a los registros de presión de poros.

Ahora bien, las secciones de estabilidad son analizadas mediante el método de equilibrio límite en el software SLIDE V.6.0. Los valores de las propiedades fundamentales como la cohesión y el ángulo de fricción se estiman mediante las gráficas de variación con el tiempo realizadas por el Profesor Álvaro González y calibradas por el anterior operador. La figura 5-11 muestra la gráfica utilizada para la asignación de los valores de cohesión y fricción a los modelos de estabilidad. Se debe entender por edad como el tiempo que los residuos sólidos han sido dispuestos.

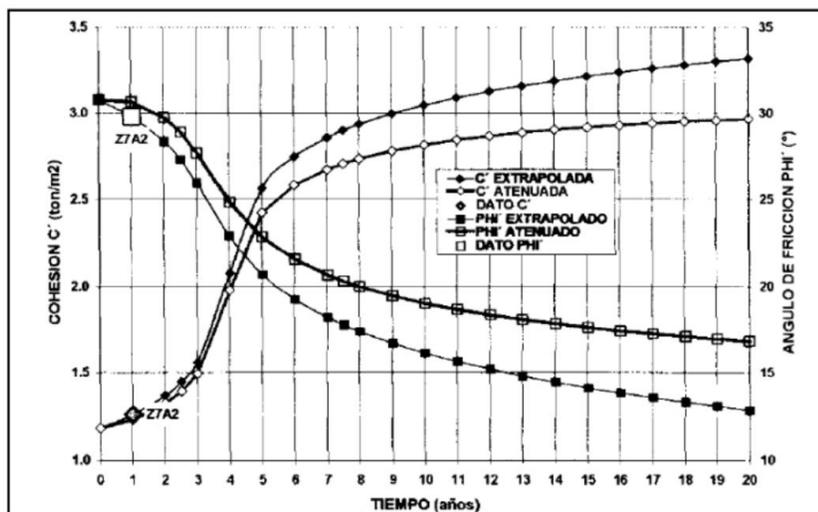


Figura 5-11. Variación de la resistencia de Residuos en Función de la Edad de Disposición. Fuente: tomado de (UT INTER DJ, 2021)

La figura 5-12 ilustra el modelo de estabilidad de una sección de análisis del seguimiento realizado por el operador. Se aprecia la discretización de la sección junto con las propiedades asociadas. Cabe resaltar que la zona actual de operación se denomina Optimización Fase II, es decir, son los residuos más recientes. Nótese que esta zona tiene

una división recta y perpendicular a la superficie natural, diferenciándose solamente el Ru entre sí. Igualmente, se resalta que la cohesión varía muy poco entre la basura en el modelo a excepción de la que se denomina Zona VII, así mismo con el ángulo de fricción. Esto se explica por la diferencia de edad de los residuos, con una diferencia de más de 10 años entre los residuos de Optimización y Zona VII.

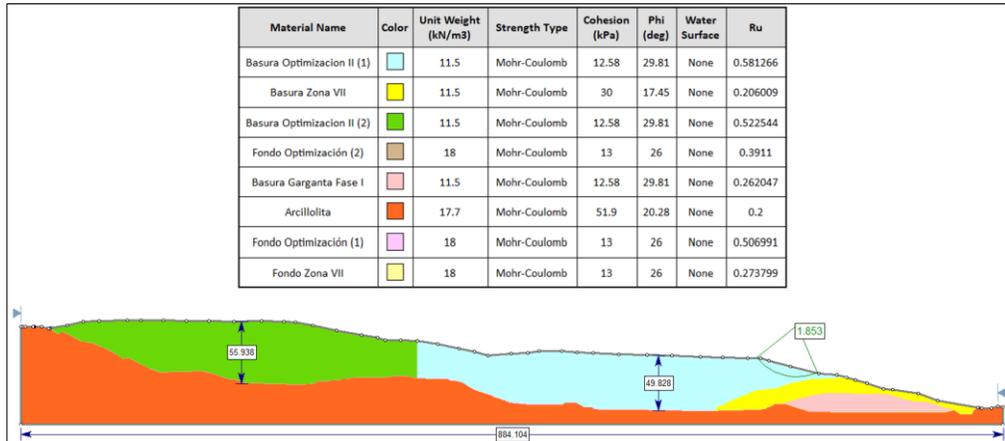


Figura 5-12. Sección de análisis de estabilidad del mes de marzo realizadas por el operador actual de Doña Juana. Fuente: Tomado de (CGR et al., 2023)

Si bien el operador divide el modelo con base en las propiedades y edades de disposición de residuos, la zona de optimización Fase II inició su operación en el año 2015, teniendo una diferencia de más de 8 años entre los residuos más viejos y nuevos. Sin embargo, la sección solamente se divide en dos partes y estas obedecen a una diferencia de presión y no de disposición. Aunando a lo anterior, los valores de presión son muy generales debido a que se toma el promedio de los valores de presión de los instrumentos cercanos a la sección. Esto supone un problema en los modelamientos, teniendo en cuenta que la resistencia de los residuos es variable con el tiempo además de la heterogeneidad de estos para los valores de presión.

Ahora bien, se emplea la metodología de análisis pseudo-estático para evaluar la estabilidad de los taludes de residuos en Doña Juana durante eventos sísmicos. Se considera que los residuos sólidos constituyen una masa de material dúctil que, al experimentar un desequilibrio en las fuerzas resistentes, lleva el factor de seguridad por debajo de 1.0. En tales circunstancias, no se produce una falla catastrófica, sino más bien el inicio de un proceso de desplazamiento plástico. La cuantificación de este desplazamiento está vinculada a la duración y magnitud de las condiciones que provocaron un factor de

seguridad inferior a 1.0. En este contexto, un evento sísmico, siendo un fenómeno esporádico, generará desplazamientos en los rellenos en proporción a su magnitud, sin necesariamente resultar en un deslizamiento. Es importante destacar que no hay informes de deslizamientos causados por sismos en rellenos sanitarios, sino únicamente desplazamientos de la masa (Jahanfar, 2014).

La vulnerabilidad de cada sección de residuos sólidos ante un sismo está condicionada por su configuración geométrica y la naturaleza del material que contienen, determinando así el periodo de vibración que se traduce en la aceleración máxima esperada según el espectro definido. En este contexto, se utiliza un espectro específico para rellenos, derivado de la microzonificación sísmica de Bogotá y sus modificaciones, considerando un periodo de retorno de 475 años (escenario de operación) y un amortiguamiento del 15%, que se percibe como precautorio para residuos. El espectro, elaborado por Proactiva (antiguo operador en Doña Juana) en 2010, se presenta en la figura 5-13 con distintos niveles de amortiguamiento.

Utilizando los valores de aceleración máxima obtenidos del espectro y la aceleración crítica (donde el factor de seguridad pseudoestático es 1.0) para diversas magnitudes de parámetros de presión de poros, se calculan los desplazamientos sísmicos potenciales para el escenario de operación, caracterizado por un largo periodo de retorno.

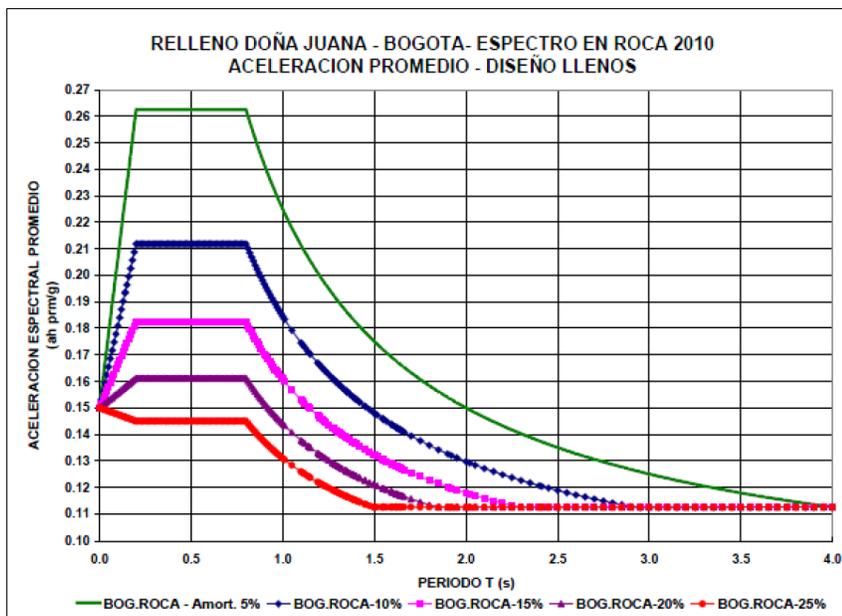


Figura 5-13. Espectro en roca con diferentes amortiguamientos. Aceleración espectral promedio. Fuente: Tomado de (CGR et al., 2023)

Para determinar el periodo de diseño de cada sección, se analizan las propiedades geométricas del depósito. En este caso, se toma como periodo de diseño el menor valor entre:

$$Td = \frac{3D_{max}}{Vs} \quad (4.5)$$

$$Th = \frac{3H_{max}}{Vs} \quad (4.6)$$

Donde D, es el espesor máximo de la masa de residuos y H es la altura máxima. Para la velocidad de onda de corte Vs, se toma el valor de 95 m/s valor que fue corroborado por mediante ensayos geofísicos por el operador actual y antiguo.

Es más apropiado analizar los impactos sísmicos en taludes de residuos mediante la evaluación de desplazamientos potenciales, que reflejan la capacidad de movilización de un depósito de esta índole ante un evento sísmico. Este enfoque, desarrollado por el profesor Álvaro González y adoptado por el actual operador, implica la evaluación de secciones con distintos valores de RuC para obtener la aceleración crítica. Posteriormente, se divide esta aceleración crítica entre el valor máximo del espectro sísmico, y se utilizan las siguientes ecuaciones para calcular los desplazamientos sísmicos potenciales:

$$DpC = DpDin + DpSpc \quad (4.7)$$

$$DpDin = \left[\frac{Kh_{dis} * g * T^2}{4} \right] * e^{[-4.86064 * \frac{Kh_{crt}}{Kh_{dis}} + 1.68114]} \quad (4.8)$$

$$DpSpc = Kh_{dis} * g * \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (4.9)$$

Donde, $DpDin$ son los desplazamientos dinámicos potenciales, Kh_{dis} el coeficiente de aceleración horizontal máxima espectral en superficie, Kh_{crt} la aceleración horizontal crítica para un RuC dado, T el periodo fundamental de vibración de la sección, $DpSpc$ los Desplazamientos espectrales potenciales, DpC los Desplazamientos sísmicos potenciales totales y g la Aceleración de la gravedad.

Para la zona actual de operación se tiene un desplazamiento máximo admisible de 0,3 m. Estos cálculos se realizan quincenalmente y son evaluados en conjunto con la interventoría.

6. Caracterización geotécnica de los residuos sólidos en Doña Juana

6.1 Estimación de parámetros de resistencia

En el relleno sanitario Doña Juana se han llevado a cabo diversas investigaciones geotécnicas con el fin de entender el comportamiento de los residuos sólidos. La primera investigación se llevó a cabo como respuesta al deslizamiento ocurrido en 1997 y fue dirigida por el profesor Álvaro González y Augusto Espinosa, quienes analizaron los primeros ensayos de CPTu sobre estos materiales en el país.

Para el presente proyecto se tendrán en cuenta las perforaciones realizadas en el primer semestre de 2023 por la interventoría de la operación de Doña Juana y se realizará una comparativa con los resultados de González & Espinosa (b) (2003). Se ejecutaron un total de 18 ensayos de CPTu con profundidades variables, entre 6 a 24 m. Las bajas profundidades se deben a que el contratista detenía el ensayo cuando se alcanzaba un ángulo de inclinación mayor a 10° de la punta con respecto a la vertical, con el fin de evitar la pérdida de la sonda. Estas elevadas inclinaciones se asociaron a que el equipo se afirmaba sobre un terreno con una alta deformabilidad, la heterogeneidad de los residuos y la presión ejercida por los gases.

Esta situación ya fue reportada por González & Espinosa (b) (2003). De acuerdo con los autores, se ordenó inicialmente que se realizaran 6 sondeos de 20 m de profundidad mínima, sin embargo, se desarrollaron un total de 9 perforaciones debido a la baja profundidad alcanzada por algunos sondeos. Al ser analizados los datos, se observó que las perforaciones adicionales se realizaron justo al lado de las de poca profundidad, teniendo estas últimas valores muy elevados de presión. Se concluyó que la diferencia de presiones era de gas, el cual se liberaba cuando se sacaba la sonda del sondeo. Observando esto, se ordenaron 6 sondeos más, aunque solamente se ejecutaron 3 ya que en el último ensayo la sonda quedó atrapada a 17 m y no se pudo recuperar. (González & Espinosa (b), 2003)

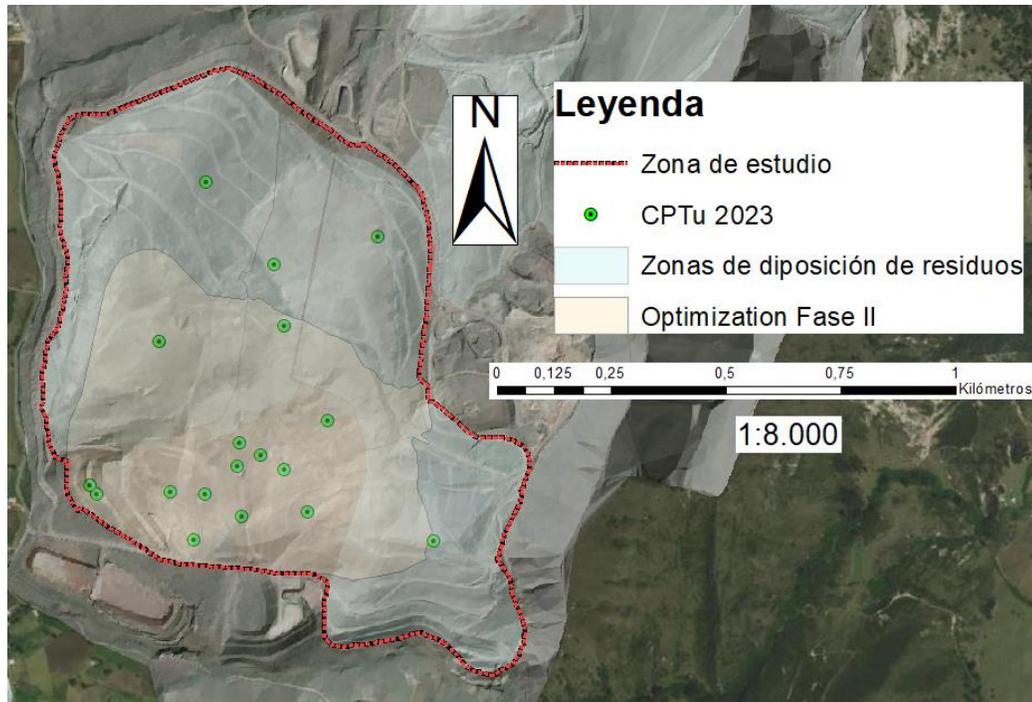


Figura 6-1. Ubicación de los ensayos de Piezocono.
Fuente: propia

Para el análisis e interpretación de los ensayos de CPTu se utilizó la metodología realizada por el consultor que ejecutó e interpretó las perforaciones. En primer lugar, se realizó una clasificación de suelos de los datos del piezocono con base en la realizado por Robertson (2016).

$$I_c = \left[\left(3.47 - \log \left(\frac{q_t}{P_a} \right) \right)^2 + (\log(Rf) + 1.22)^2 \right]^{0.5} \quad (6.1)$$

Donde, q_t es la resistencia por punta corregida por dimensiones de sonda (kPa), P_a la presión atmosférica (100 kPa), y Rf la relación de fricción. La resistencia en punta y la relación de fricción se definen:

$$q_t = q_c + (1 + a_n)u \quad (6.2)$$

$$Rf = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} * 100 \quad (6.3)$$

Donde, q_c es la resistencia por punta medida (kPa), a_n la relación del área neta por punta ($a_n=0.70$), u la presión de poros total medida por el sensor, f_s el esfuerzo de fricción medido por la sonda, y σ_{vo} el esfuerzo vertical total.

Los resultados de la clasificación son mostrados en la figura 6-2. Se realiza una comparación con otros resultados de las mediciones de varios ensayos de CPTu realizados en Brasil, China, Estados Unidos, India y Portugal, presentados por (Ramaiah et al., 2017) donde la mayor cantidad de datos reportados se localizan en la zona 4 y 5, los cuales son comportamientos de mezclas de limos y mezclas de arenas respectivamente, al igual que en Doña Juana.

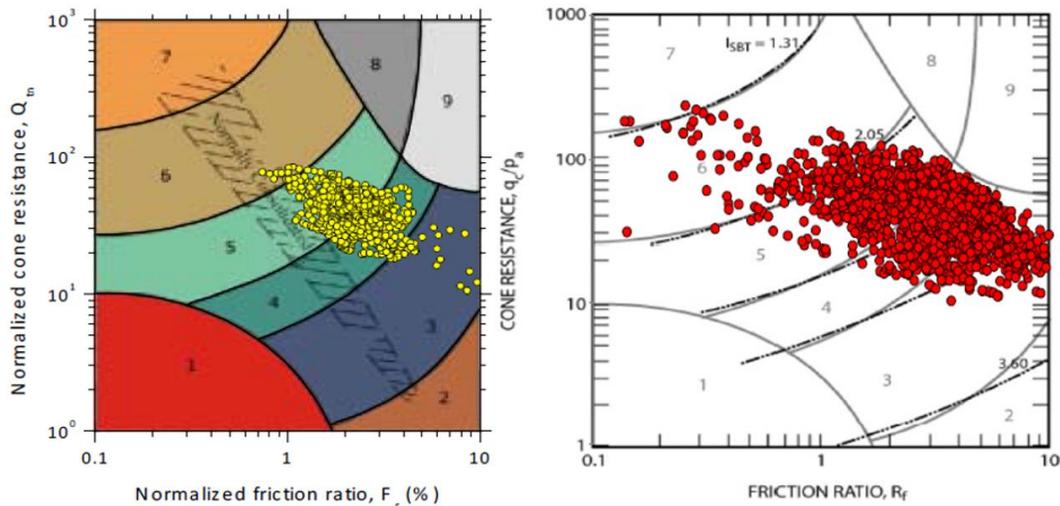


Figura 6-2. a) Clasificaciones presentadas en otros rellenos del mundo. Tomado de (Ramaiah et al., 2017) b) Clasificación Doña Juana
Fuente: propia

Esta asociación con un tipo de suelo resulta valiosa para identificar la relación óptima de los parámetros mecánicos en consonancia con las correlaciones típicas esperadas para el material obtenido. La relevancia de la Figura 6-2 reside en el comportamiento mecánico de los residuos, destacando que, a pesar de la variabilidad en términos de tamaño, composición y resistencia de las partículas que constituyen la masa de residuos, el comportamiento general del volumen se mantiene dentro de ciertos límites. Por consiguiente, resulta factible analizar los parámetros mecánicos a nivel global para evaluar la estabilidad de distintos domos.(UAESP et al., 2023)

Ahora bien, la determinación de los parámetros efectivos de resistencia se basa en la siguiente fórmula, que calcula el esfuerzo cortante en un material con fricción:

$$\tau = \sigma_v' \tan(\varphi) \tag{6.4}$$

Donde, σ_v' es el esfuerzo vertical efectivo, τ el esfuerzo cortante equivalente y φ el ángulo de fricción. Esta metodología considera que el esfuerzo vertical efectivo es el esfuerzo normal que esta aplicado a lo largo de la superficie de falla. Bajo estas consideraciones se considera pertinente trabajar con los invariantes tensionales q y p' , para lo cual se tiene la siguiente relación entre los esfuerzos cortantes y el esfuerzo medio (Kulhawy & Mayne, 1990) (Holtz & Kovacs, 1981).

$$q = p' \text{seno}(\varphi) \quad (6.5)$$

Donde, q es el esfuerzo desviador, p' es el esfuerzo medio calculado como $\sigma_v' (1+K_0) / 2$, φ el ángulo de fricción, K_0 el coeficiente de empuje de tierras calculado como $1 - \text{seno}(\varphi)$. Ahora bien, se utiliza la correlación de Kulhawy & Mayne (1990), para el cálculo del ángulo de fricción efectivo teniendo en cuenta que esta relación se usa para mezclas de arenas y limos, clasificación mayoritaria de acuerdo con la figura 6-2.

$$\varphi' = 17.6^\circ + 11 * \log(q_{t1}) \quad (6.6)$$

Donde, q_{t1} es la resistencia por punta normalizada por esfuerzo, que se define como:

$$q_{t1} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_v'} \quad (6.7)$$

Donde q_t es el esfuerzo por punta corregido por las dimensiones de la sonda, σ_{v0} el esfuerzo vertical total y σ_v' el esfuerzo vertical efectivo.

Con los valores de q y p' calculados a profundidad del ensayo, las cuales se grafican y se clasifican con cada tipo de suelo identificado y posteriormente se hace una regresión lineal donde la pendiente de la envolvente es igual al seno del ángulo de fricción de la capa.

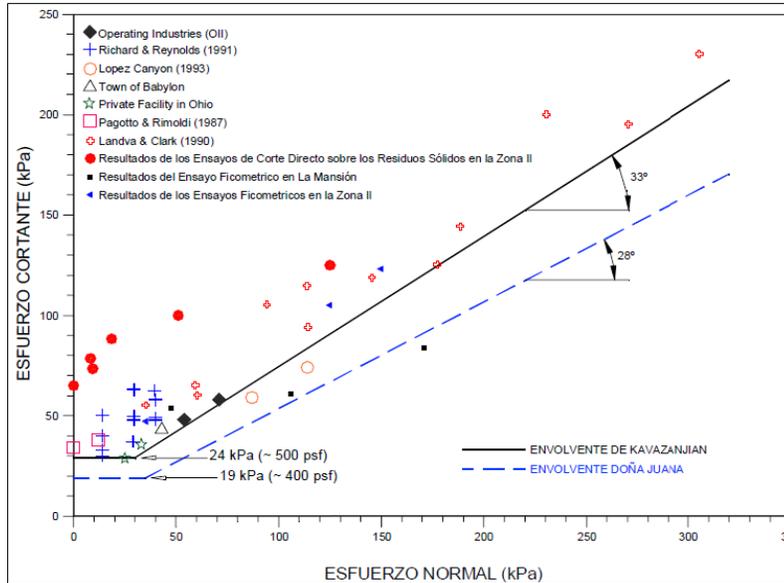


Figura 6-3. Resistencia de rellenos sanitarios.
Fuente: Tomado de (González & Espinosa (a), 2003)

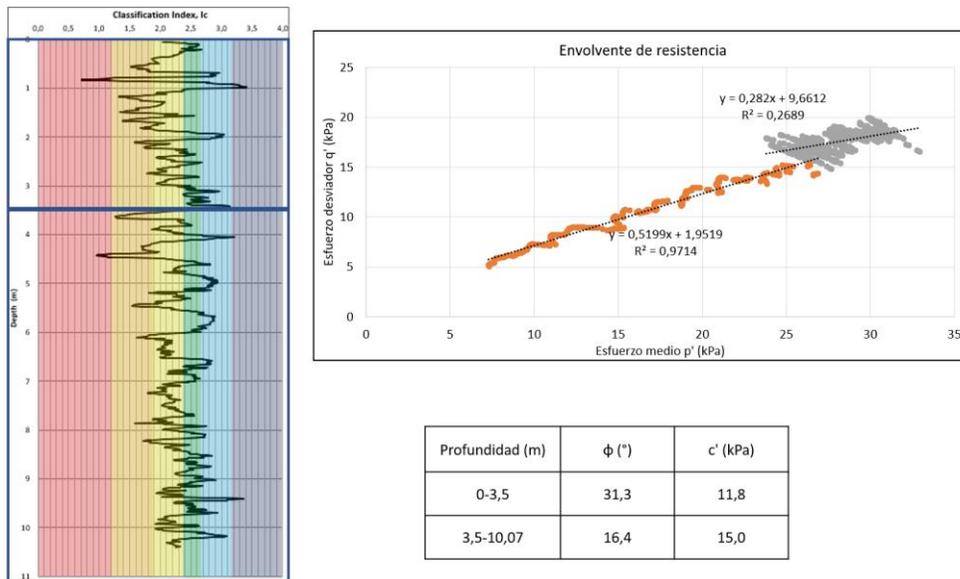


Figura 6-4. Ilustración del método empleado para estimación de parámetros de resistencia.
Fuente: propia

Por otro lado, la cohesión no se interpreta como el intercepto de la línea con el eje de las ordenadas, en este caso se emplea el criterio establecido por (González & Espinosa (a), 2003) en donde se asume como cohesión el intercepto de la envolvente para un esfuerzo equivalente de 19 Kpa (equivalente al esfuerzo a 2 m de profundidad).

Después de calcular los valores de q y p' a la profundidad del ensayo, se representan gráficamente las parejas correspondientes a cada tipo de suelo identificado según la clasificación SBT. Luego, se realiza una regresión lineal en la que la pendiente de la envolvente es igual al seno del ángulo de fricción de la capa.

La figura 6-5 presenta los resultados de los parámetros de resistencia de cohesión y ángulo de fricción. Se observa que existe una relación inversamente proporcional entre la cohesión y fricción. Entre mayor sea el ángulo de fricción menor será la cohesión. Se proyecta así una relación potencial entre los parámetros de resistencia en la cual el valor de cohesión fluctúa entre 11 kPa y 21 kPa para ángulos de fricción variables entre 7° y 48° .

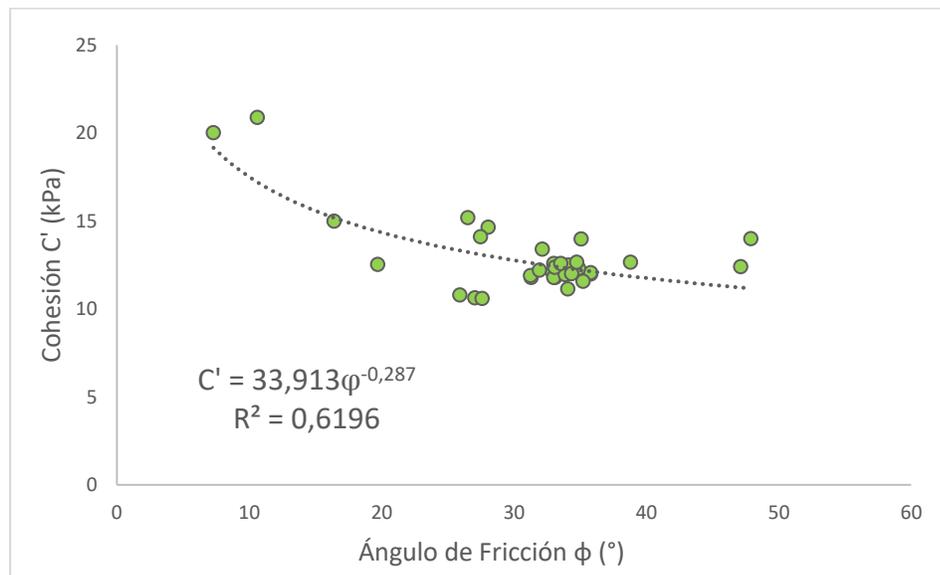


Figura 6-5. Relación entre la cohesión y la fricción en los residuos de Doña Juana.
Fuente: propia

En la figura 6-6 se observan los resultados de la relación de (Kulhawy & Mayne, 1990) de todos los ensayos de CPTu con la profundidad. La línea que resalta en negrilla es el promedio de todos los ensayos, se obtuvo una relación potencial con una tendencia de disminución con la profundidad. Esto es concordante con lo planteado por (González & Espinosa (b), 2003) donde se establece una disminución del ángulo de fricción con la edad, teniendo en cuenta que entre mayor profundidad los residuos sólidos son más viejos.

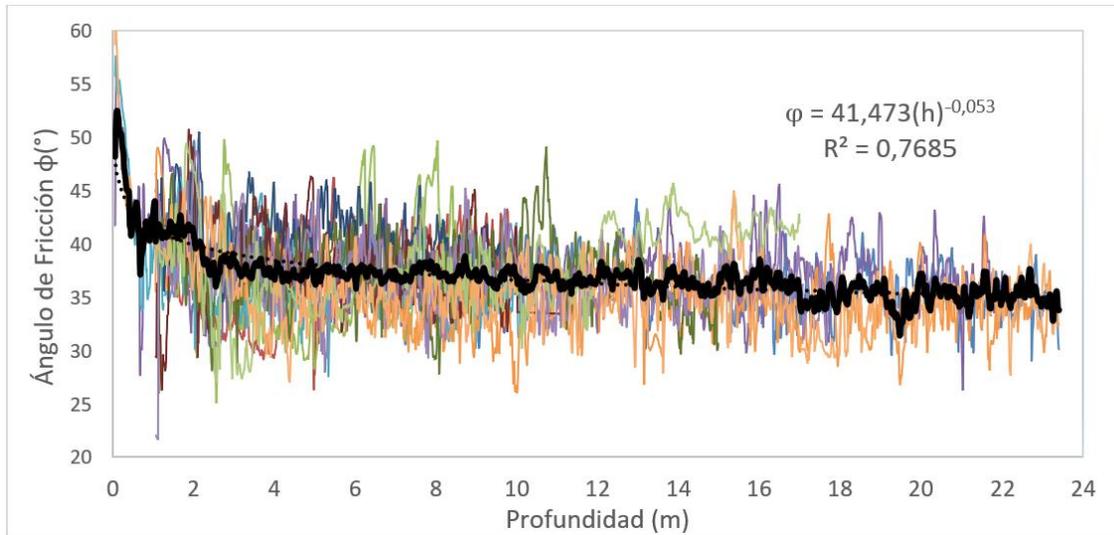


Figura 6-6. Comportamiento del ángulo de fricción con la profundidad.
Fuente: propia

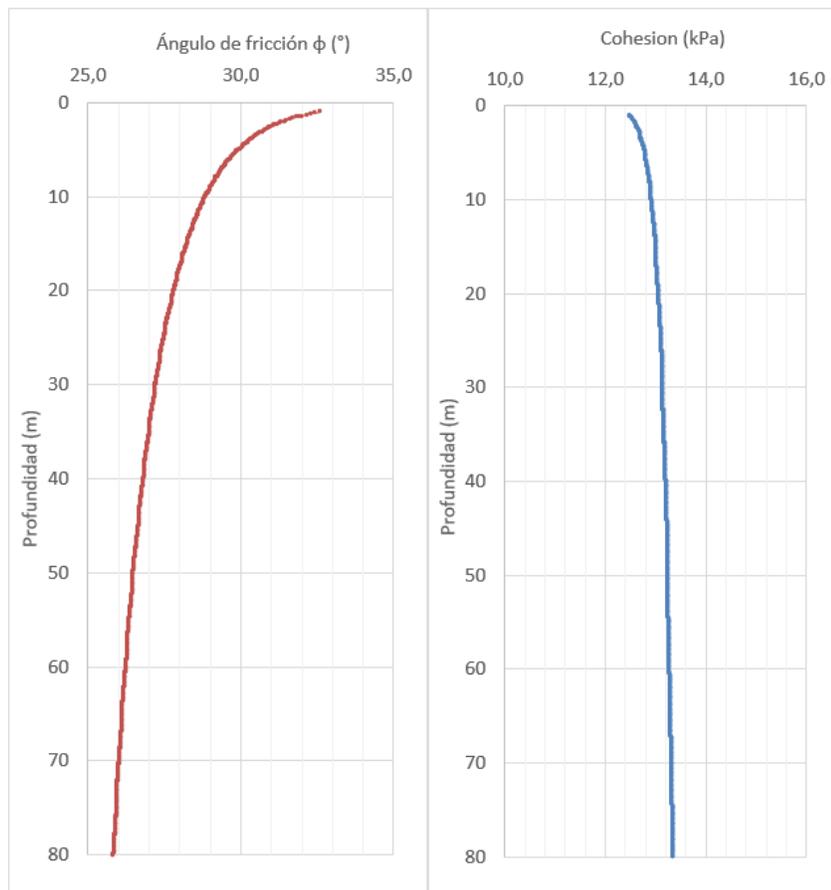


Figura 6-7. Comportamiento de la cohesión y el ángulo de fricción de los residuos sólidos en Doña Juana. Fuente: Propia

Se tienen las siguientes ecuaciones de acuerdo con las gráficas 6-5 y 6-6, donde z se refiere a la profundidad.

$$\varphi(^{\circ}) = 41,473(z)^{-0,053} \quad (6.8)$$

$$C' = 33,913(\varphi)^{-0,287} \quad (6.9)$$

Mediante las ecuaciones 6-5 y 6-6 se determinó la variación de la cohesión y la fricción con la profundidad. En la gráfica 6-7 se observa el resultado de estas ecuaciones, resaltando que entre mayor es la profundidad aumenta la cohesión y disminuye el ángulo de fricción como ya se mencionó líneas arriba.

De la figura 6-7 se infiere que el ángulo de fricción disminuye con el confinamiento, lo que implica que entre mayor sea la edad de disposición de los RSU menor será el valor de φ ($^{\circ}$). Estos resultados son consistentes con lo reportado por González en la figura 4-8, donde se asocia un menor valor de fricción a los residuos que han tenido un mayor tiempo de maduración y biodegradación de la materia orgánica. Por otro lado, los valores de fricción elevados pueden considerarse demasiado elevados por la característica alta deformabilidad de los residuos, sin embargo, la heterogeneidad en la composición de las basuras puede explicar que se tengan valores relativamente altos del ángulo de fricción. Los materiales como plástico, madera y vidrio aumentan la resistencia de los residuos sólidos.(Zekkos (Zeccos), 2005)

Por otro lado, los resultados son concordantes con lo reportado en otras investigaciones. Daciolo et al (2022) realizó una extensa base de datos de los parámetros geotécnicos de los rellenos sanitarios de todo el mundo, con alrededor de 313 datos de laboratorio de 30 publicaciones. La dividió en tres grandes grupos, mediante un análisis factorial donde el factor determinante fue la composición de los residuos y a su vez la cantidad de materia orgánica de estos. El primer grupo se compone de los rellenos con mayor cantidad de componentes deformables (materia orgánica y papel) con más de 60%, mientras el segundo se caracteriza por tener una mayor cantidad de material industrial como madera, vidrio y plásticos. El último grupo se caracteriza por tener una mezcla casi equitativa de todos los componentes.

En la figura 6-8 se exhibe la dispersión de los grupos, referenciando la caja punteada como el 70% de los datos. El grupo A tiene una mayor dispersión para la cohesión comparados con el grupo B y C, esto se debe a la mayor composición de materia orgánica y materiales

compresibles del primer grupo los cuales no tienen un comportamiento homogéneo. La mayoría de los RSU de este grupo son de países en vía de desarrollo.

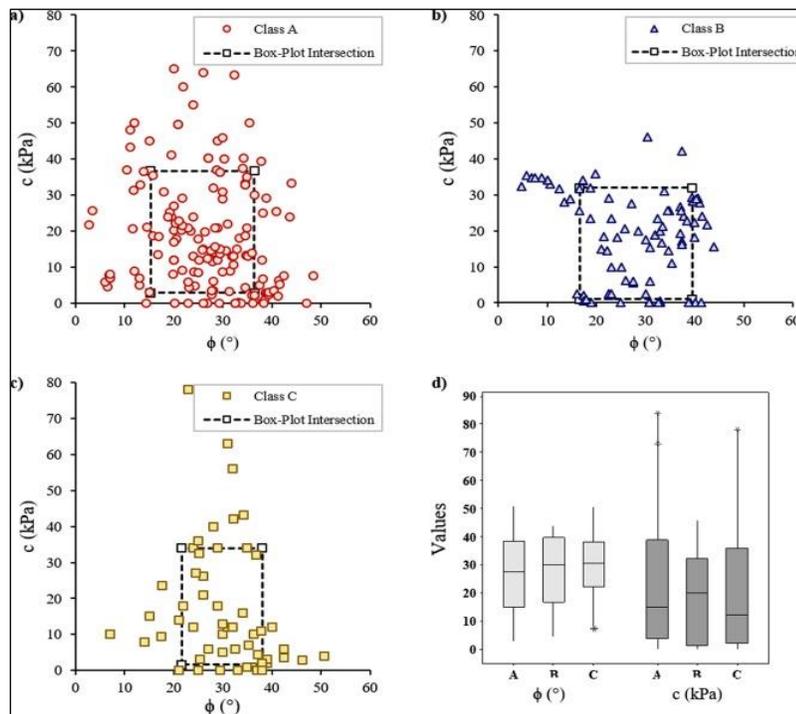


Figura 6-8. Comportamiento general de los parámetros de resistencia al corte de RSU en cada clase propuesta. A) Dispersión en clase A; b) Dispersión en clase B; c) Dispersión en clase C; d) Boxplot de las diferentes clases (70% de los datos en los cuadros).

Fuente: Tomado de Daciolo (2022)

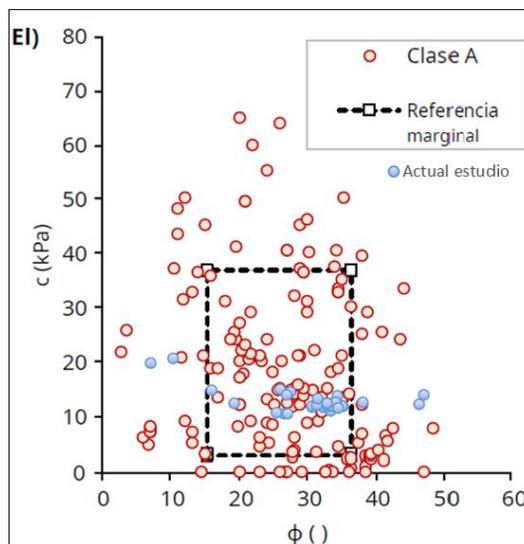


Figura 6-9. El comportamiento de los RSU de Doña Juana dentro del grupo de parámetros clase A propuesto por Daciolo (2020)

Fuente: modificado de Daciolo (2020)

El grupo A de la base de datos de Daciolo (2022), pueden asociarse a los residuos sólidos Doña Juana. La figura 6-9 representa el encaje de los parámetros mecánicos de los residuos de Doña Juana, obtenidos en la figura 6-5. Se observa un buen ajuste de los datos de Doña Juana dentro del grupo de Daciolo.

Los datos de este grupo definido por Daciolo fueron recopilados y comparados con los RSU de Doña Juana. Si bien este grupo tiene una distribución poco homogénea se acuerdo con la figura 6-9, al comparar el histograma de los parámetros de resistencia se observa una relación clara. En la figura 6-10 se observa que la distribución de los daros del ángulo de fricción es normal mientras que para la cohesión se tiene una distribución log-normal para los RSU de Doña Juana, distribuciones estadísticas similares a la de los RSU del grupo A definido por Daciolo.

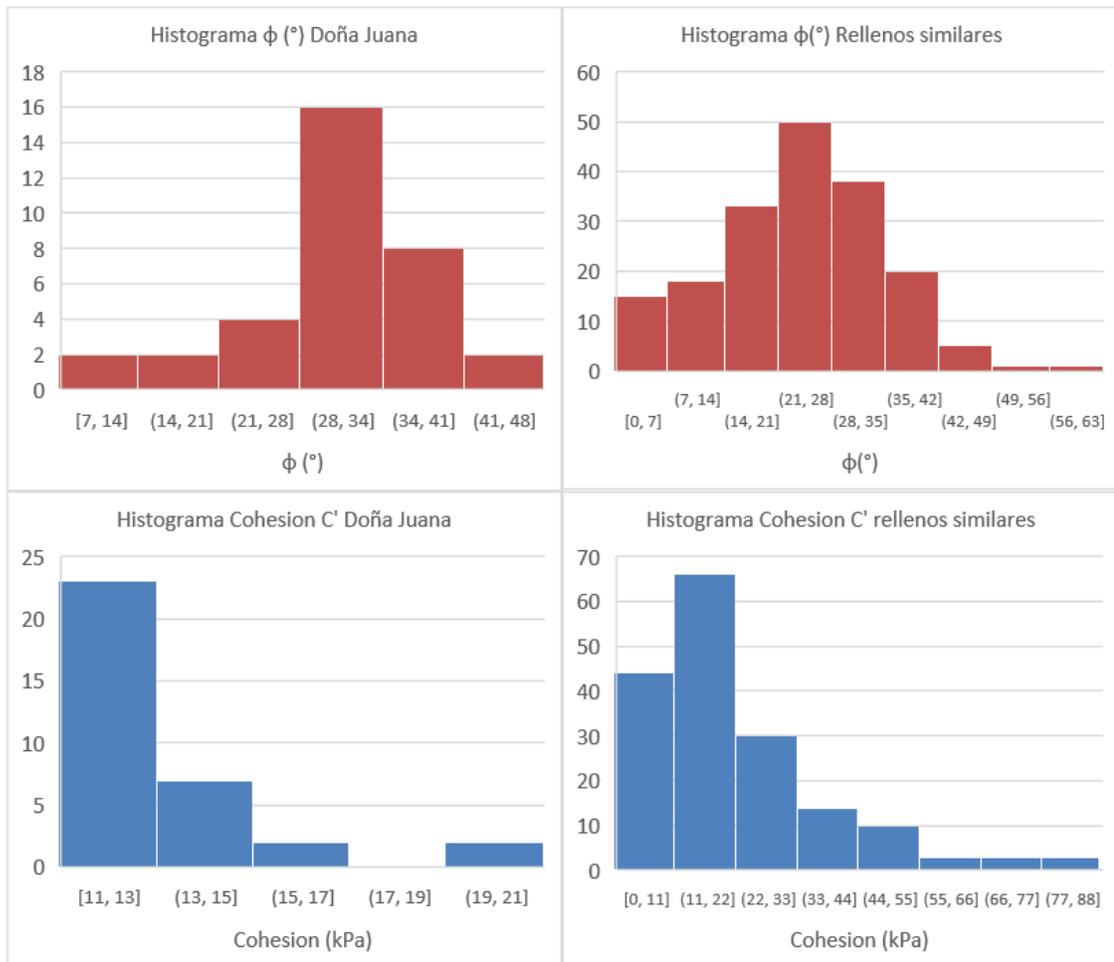


Figura 6-10. Histogramas de parámetros de resistencia de RSU de Doña Juana comparados con parámetros de resistencia de RSU similares

Fuente: Propia

La comparación se realizó con 182 pares de datos de cohesión y fricción, de 6 países diferentes (USA, Brasil, Iran, Nigeria, India, Colombia y China), y 12 publicaciones internacionales (Abreu & Vilar, 2017; Correa et al., 2015; Dias Cardim, 2008; Díaz et al., 2016; Eid et al., 2000; Kavazanjian et al., 1995; Keramati et al., 2019; Martins, 2006; Ojuri & Adegoke, 2015; Reddy et al., 2009; Shariatmadari et al., 2017; Zhan et al., 2008).

La asignación de la distribución de los datos se realizó por inspección visual, no fue posible realizar pruebas de bondad de ajuste dado que la cantidad de datos no es suficiente para obtener un número igual o mayor a 1 de grados de libertad. No obstante, tanto Daciolo (2020) como Jahanfar (2014), utilizaron estas mismas distribuciones para otros rellenos sanitarios.

6.1 Evaluación de presión de poros con la profundidad

En 16 de los 18 ensayos de CPTu se llevaron a cabo ensayos de disipación de presión para un mejor análisis de la presión de poro en los residuos, teniendo en cuenta que la sonda mide un exceso de presión provocado por la carga que genera la punta al ingresar al material. Este ensayo consiste en detener la penetración de la punta sin interrumpir la toma de datos de presión (u).

La figura 6-11 grafica los resultados de estos ensayos incluyendo los datos de los piezómetros instalados contra la profundidad. Se realizan dos gráficas debido a que el polígono de análisis incluye la zona actual de operación de disposición de residuos y las zonas próximas en donde antiguamente se han dispuesto RSU. Se observa que la presión es mayor en la zona actual de operación (Fase II), esto se explica porque la producción de lixiviado es mucho mayor en los primeros años de disposición de los RSU.

Se aprecia que los registros tanto de los piezómetros como de los ensayos de disipación son menores a la línea de presión hidrostática. Al respecto, se debe tener en cuenta que en los residuos sólidos se tiene un porcentaje elevado de Biogás, este se mezcla con el lixiviado generando un fluido viscoso que el Profesor González denominaba lixigas (González & Espinosa A(b), 2003). Este fluido al tener una parte gaseosa relevante tiene un menor peso específico que el agua, deduciendo que la presión generada por este sea menor.

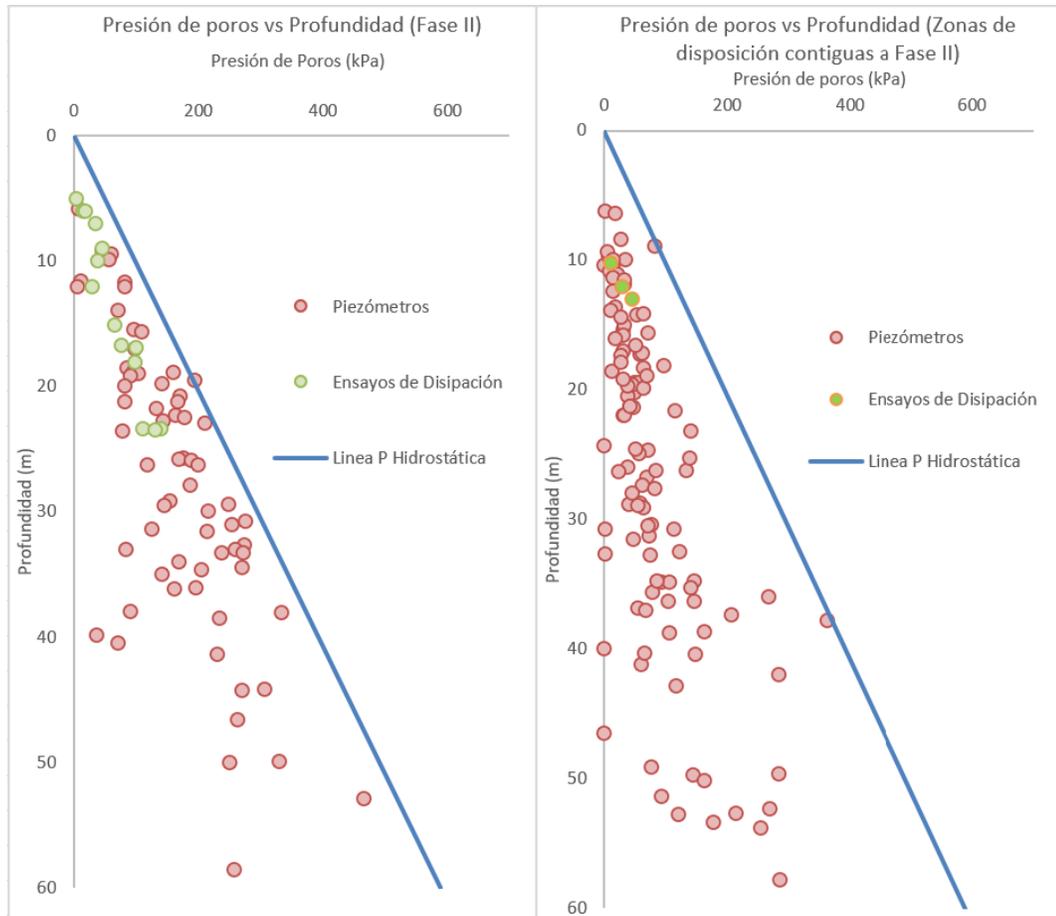


Figura 6-11. Registro de la Presión de poros (u) contra la profundidad en el polígono de análisis (Zona actual de operación y zonas adyacentes).

Fuente: propia

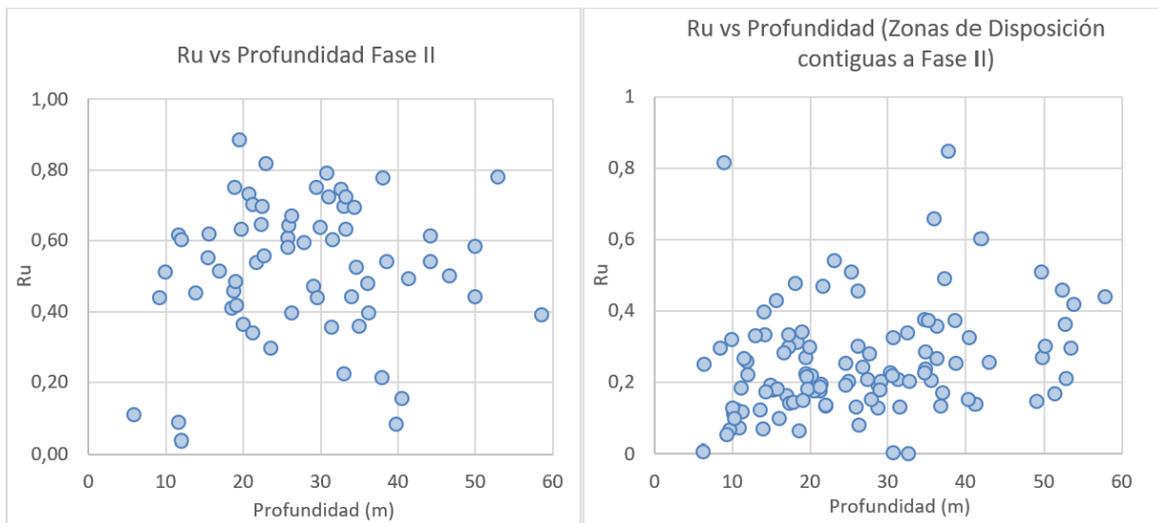


Figura 6-12. Comportamiento del parámetro R_u contra la profundidad en el polígono de análisis (Zona actual de operación y zonas adyacentes).

Fuente: propia

Ahora bien, los valores de Ru no tienen un comportamiento claro con la profundidad como se observa en la figura 6-12. Al ser una razón entre la presión (u) y el esfuerzo total que se ve influenciado por el peso total el cual es inconstante con el tiempo por la degradación de la basura de acuerdo con la figura 2-5.

La distribución del valor del Ru es normal con picos de diferentes magnitudes de acuerdo con la figura 6-13. Para la zona de Fase II se tiene la mayor concentración de valores de Ru mayores a 0,5 y menores a 0,7, mientras que para las zonas cercanas se tienen picos con Ru mayores a 0,1 y menores a 0,2. Al ser Fase II, la zona actual de operación sufre de cargas constantes por disposición continua de residuos lo que impide que se dé una disipación de los excesos de presión de poros.

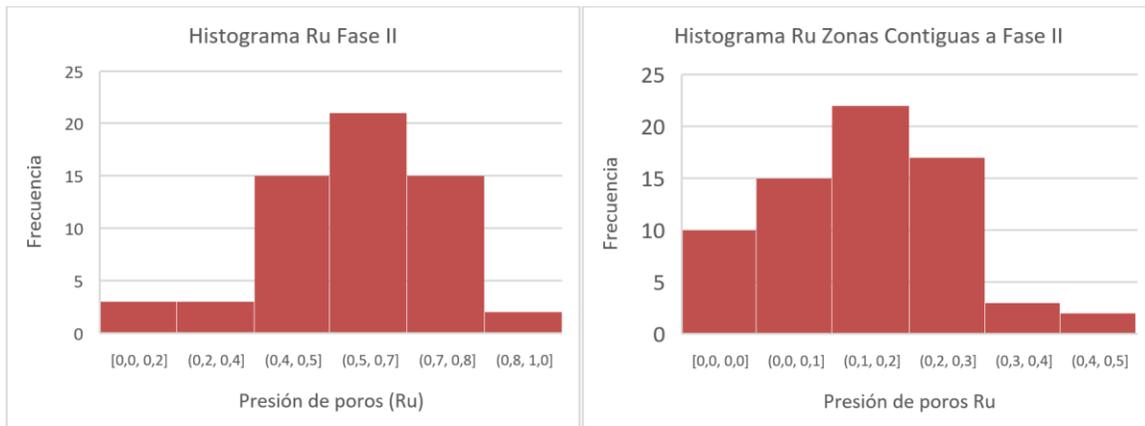


Figura 6-13. Histograma del valor de Ru para las zonas de estudio.
Fuente: Propia

Ahora bien, se realizó una prueba de bondad de ajuste para comprobar la distribución normal asignada al Ru de ambos sectores. Para Fase II se utilizaron 66 datos y para las zonas contiguas a fase II, 50. Este metodo consiste en la comprobación estadística de una hipótesis, que en este caso es que los datos de muestra sigan una distribución normal de acuerdo con su valor medio y desviación estandar. Se tiene entonces lo siguiente:

$$\bar{x}_{Fase II} = 0,52 \quad \sigma_{Fase II} = 0,19$$

$$\bar{x}_{z contiguas a fase II} = 0,20 \quad \sigma_{z contiguas a fase II} = 0,10$$

Para validar la hipótesis debemos hallar el estadístico de prueba y el valor crítico. Se define el estadístico de prueba como:

$$X_{k-p-1}^2 = \sum \frac{(fo - ft)^2}{ft} \quad (6.10)$$

Donde, k es el número de categorías o clase que dividen los datos, p parametros estimados con los datos, f_o frecuencia observada y f_t frecuencia teórica. Para encontrar el valor del estadístico de prueba se dividieron los datos en intervalos y se construyeron las siguientes tablas:

Tabla 6-1. Cálculo del estadístico de prueba para el valor de Ru en Fase II.

Intervalo		Frecuencia Observada (O)	Probabilidad	Frecuencia teórica (t)	(Fo-Ft)2/Ft
0,040	0,252	7	0,077	5,085	0,721
0,252	0,464	16	0,299	19,754	0,713
0,464	0,570	13	0,219	14,424	0,141
0,570	0,676	15	0,192	12,666	0,430
0,676	0,885	15	0,213	14,071	0,061
Sumatoria Σ		66	1,000	66	2,067

Fuente: propia

Tabla 6-2. Cálculo del estadístico de prueba para el valor de Ru en zonas contiguas a Fase II

Intervalo		Frecuencia Observada (O)	Probabilidad	Frecuencia teórica (t)	(Fo-Ft)2/Ft
0,007	0,119	11,000	0,210	10,504	0,023
0,119	0,175	10,000	0,202	10,095	0,001
0,175	0,230	12,000	0,229	11,453	0,026
0,230	0,286	5,000	0,187	9,330	2,010
0,286	0,398	12,000	0,172	8,618	1,328
Sumatoria Σ		50	1,000	50	3,388

Fuente: propia

Para el calculo del valor crítico se debe conocer el valor del nivel de confianza y los grados de libertad. El nivel de confianza más utilizado es 0,05, mientras los grados de libertad en este caso son k-3, donde k es el numero de intervalos, entonces tenemos 2 grados de libertad. Mediante la función IN.CHICUAD.CD en excel se obtuvo el valor crítico de 5,99.

Finalmente, para aceptar la hipotesis el valor del estadístico de prueba debe ser menor que el valor crítico. Por consiguiente, se acepta que los datos de Ru tienen una distribución normal para ambos sectores.

7. Modelo geotécnico y análisis de estabilidad

7.1 Modelo geotécnico

De acuerdo con los resultados de la caracterización de los parámetros geotécnicos, se realizó una discretización de los RSU de acuerdo con la profundidad. Para la construcción del modelo geotécnico, en primer lugar se estimó un valor de ángulo de fricción a nivel de superficie con base en los datos interpretados, en especial teniendo en cuenta la figura 6-5. Luego, se efectuó una extrapolación de los valores de fricción en profundidad utilizando la relación presentada en la ecuación 6,8 para dar paso a la ecuación 6,9 y así determinar el valor de la cohesión con la profundidad. En cuanto al valor del R_u se tomaron los valores de la tabla 7-1.

Tabla 7-1. Resumen del comportamiento del R_u contra la profundidad. A) Zona actual de operación (Fase II) y B) Zonas contiguas a Fase II.

Zona Actual de Operación (FASE II)				
Profundidad (m)	Promedio	Desviación Estándar	Valor Min	Valor Max
0-10	0,35	0,21	0,11	0,51
10-20	0,42	0,29	0,00	0,89
20-30	0,56	0,19	0,00	0,82
30-40	0,49	0,21	0,08	0,79
40-50	0,54	0,06	0,49	0,61
50-60	0,55	0,17	0,39	0,78
Zonas de Disposición Contiguas a FASE II				
Profundidad (m)	Promedio	Desviación Estándar	Valor Min	Valor Max
0-10	0,28	0,38	0,00	0,82
10-20	0,24	0,11	0,12	0,48
20-30	0,26	0,17	0,00	0,54
30-40	0,33	0,22	0,00	0,85
40-50	0,48	0,14	0,32	0,6
50-60	0,49	0,09	0,29	0,46

Fuente: propia

Se realizó una discretización de cada 10 m con límites entre las unidades paralelas a la superficie de acuerdo con el comportamiento de la fricción y la cohesión con el confinamiento y profundidad. A cada unidad se le asignó un valor promedio de de la capa según la gráfica 6-7.

En la figura 7-1 se observa el modelo geotécnico según la metodología descrita anteriormente. Cabe destacar que se diferencian los RSU de Fase II con los de la zona

contigua debido a las diferencias entre los parámetros de los materiales, en especial del Ru.

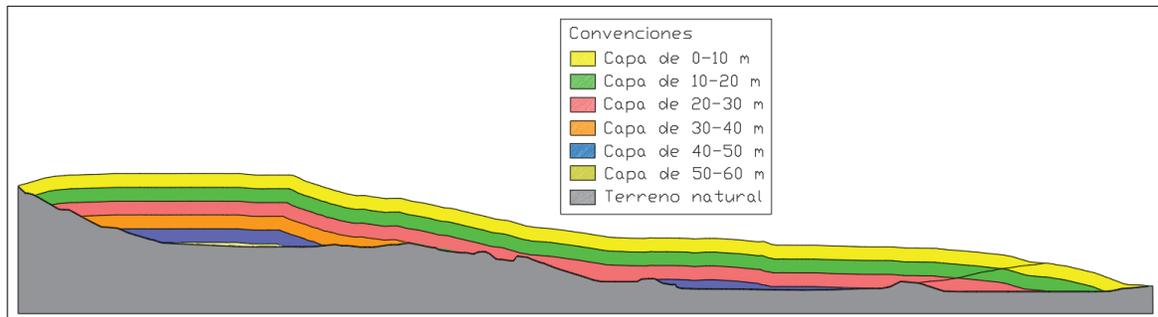


Figura 7-1. Modelo Geotécnico de la zona de estudio.
Fuente: Propia

El modelo geotécnico responde a lo encontrado en los ensayos, con las variaciones de la resistencia de los residuos con la profundidad. La carga que ejerce la columna de residuos genera que los vacíos existentes disminuyan y los materiales que conforman los residuos se encuentren con distancias cada vez más mínimas entre sí. Adicionalmente, el modelo es concordante con la operación de Doña Juana donde se crean plataformas de llenado con la tendencia de disponer residuos de manera paralela.

7.2 Modelo en tres dimensiones

El modelo geotécnico fue construido en tres dimensiones para la obtención de los perfiles de análisis. La construcción fue realizada en el software Civil 3D donde a partir de las curvas de nivel es posible crear superficies de tres dimensiones. Como se modela el comportamiento en profundidad y se teoriza que se puede hacer una discretización de la columna de residuos de manera casi paralela a la superficie natural, se replicó la superficie cada 10 m en profundidad cortándolas con los fondos de las celdas de residuos.

El modelo en tres dimensiones se realizó de las características geométricas propias del relleno sanitario, a partir de la topografía que realiza el operador se construyeron las superficies del terreno. Cabe aclarar que el objeto de esta metodología no es para realizar análisis de deformación en tres dimensiones, sino para entender el entorno.

Se presenta una sección en lugar de la totalidad del modelo debido a la conveniencia para su comprensión. En la figura 7-2 se muestra la ubicación de la sección en el área de

estudio, junto con los barrios de los mochuelos, el río Tunjuelo y la planta de tratamiento de biogás. Las distancias de algunos elementos respecto al polígono de análisis no alcanzan a ser representados en la sección del modelo 3D.

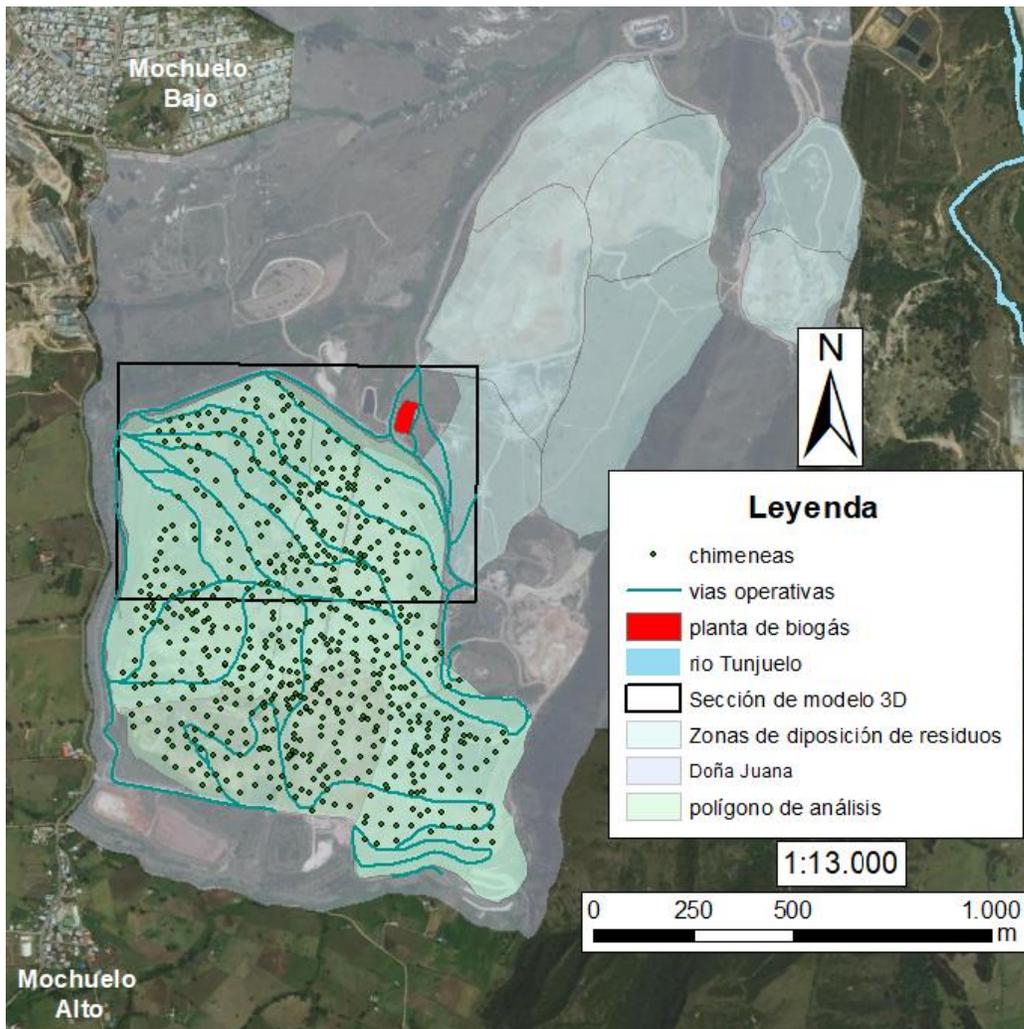


Figura 7-2. Ubicación de la sección del modelo 3D en la zona de estudio.

Fuente: Propia

La figura 7-3 presenta la sección del modelo. En la esquina superior derecha del modelo, se aprecian los ejes tridimensionales, el eje Y representa el norte cartográfico. En la sección se representan algunos de los perfiles utilizados en el presente trabajo (véase figura 7-5). La profundidad de la imagen revela la acumulación a lo largo de los años en la montaña de residuos sólidos, cuya superficie base es el fondo de adecuación de las celdas de residuos, y cómo mediante el modelo geotécnico se modelan las unidades geotécnicas

paralelas entre sí. Es importante destacar que, entre los residuos evaluados en este trabajo, algunos tienen más de 22 años.

El valor intrínseco del modelo en tres dimensiones, se manifiesta en su capacidad para proporcionar una comprensión detallada y precisa del entorno del área evaluada. Este enfoque no solo facilita la identificación de posibles eventos amenazantes, sino que también permite la selección objetiva de perfiles críticos para las secciones de análisis de estabilidad. Lo anterior teniendo en cuenta la sencillez para determinar la dirección de un posible movimiento de remoción en masa además de una estimación preliminar del posible volumen. La información así obtenida se convierte en un elemento clave para la caracterización exhaustiva del entorno de la amenaza, brindando una base sólida para la toma de decisiones informadas en cuanto a medidas de mitigación y gestión del riesgo.

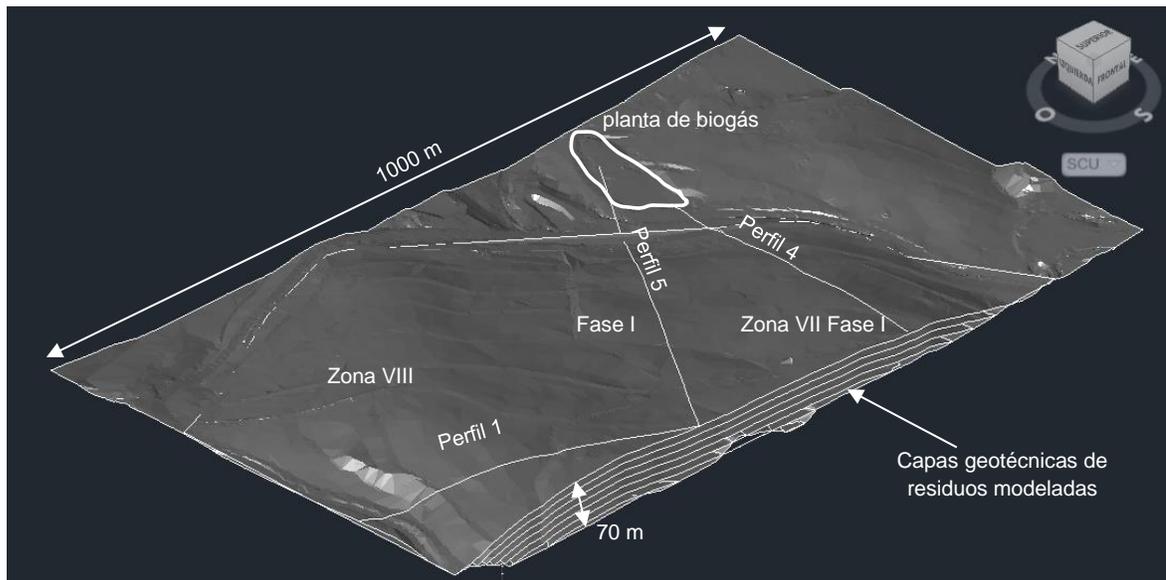


Figura 7-3. Modelo en tres dimensiones de Doña Juana
Fuente: Propia

Por otro lado, la morfología observada relata la dificultad que supone reconformar celdas de disposición de residuos sobre celdas antiguas. La superposición de residuos nuevos sobre antiguos se traduce en un aumento del volumen que puede verse implicado en un posible evento amenazante. De acuerdo con el modelo se tienen profundidades de hasta 70 m, valor que aumenta cada día teniendo en cuenta la generación diaria de residuos en Bogotá.

7.3 Análisis de estabilidad de los modelos en dos dimensiones

El modelo geotécnico junto con el modelo de tres dimensiones fue la base para la construcción de los modelos de estabilidad en dos dimensiones para los análisis de estabilidad. Estos se desarrollaron mediante el software de Equilibrio Límite SLIDE V6.0. Se realizaron análisis para 6 secciones para tener una mayor representatividad en el área de estudio como se observa en la figura 7-4.

El software Slide permite calcular los factores de seguridad determinísticos y medios obtenidos de los análisis probabilísticos, en este capítulo tomaremos los factores de seguridad determinísticos para su análisis y las variaciones de estos con los parámetros críticos de Cohesión, Fricción y Ru. La tabla 7-2 resume los factores de seguridad determinísticos obtenidos, con valores por encima de 1,8. De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS se tienen condiciones estables durante la operación ($FS > 1,5$)

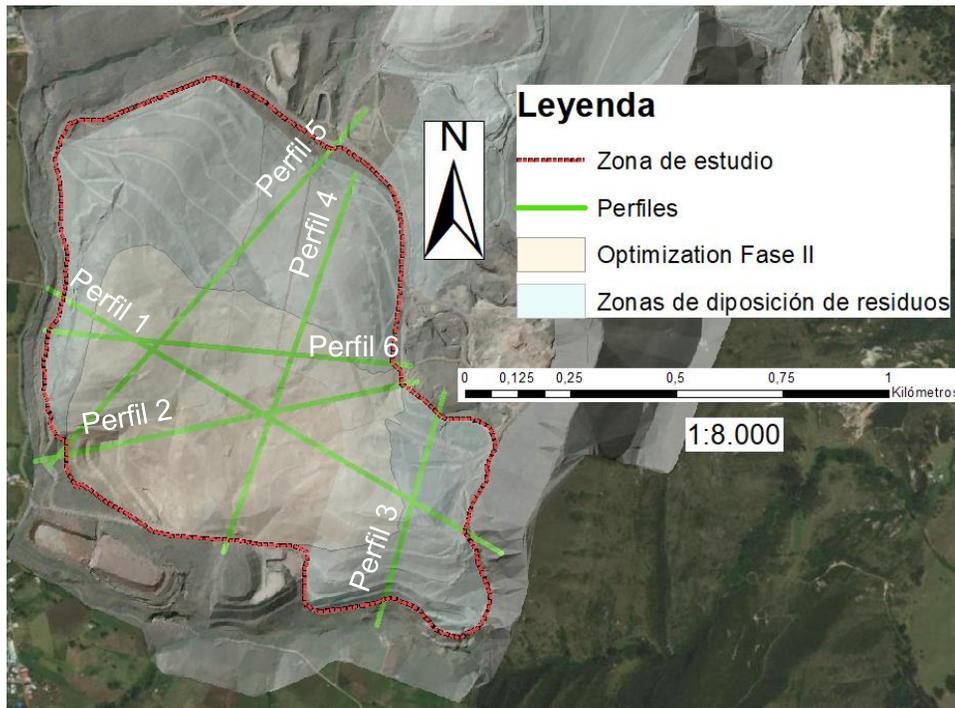


Figura 7-4. Perfiles de análisis en la zona de estudio.
Fuente: Propia

Tabla 7-2. Factores de seguridad determinísticos en los perfiles de análisis.

Perfil de análisis	Factor de seguridad
Perfil 1	2,175
Perfil 2	1,837
Perfil 3	2,275
Perfil 4	1,811
Perfil 5	1,824
Perfil 6	2,314

Fuente: propia

Adicionalmente, Slide permite evaluar el factor de seguridad en función de los valores de entrada que en este caso son la cohesión, fricción y el Ru. El programa solicita el rango de los valores máximos y mínimos, junto con el promedio y realiza los cálculos del factor de seguridad por equilibrio límite con análisis de sensibilidad de acuerdo con el dominio de los datos de los parámetros mediante el método Montecarlo el cual se explica en el capítulo 8. En cuanto al rango del Ru, se utilizó la tabla 7-1. En la tabla 7-3 se observa el rango de valores asignados para el proyecto.

Tabla 7-3. Rango de valores asignados a los parámetros en Slide

Nombre del material	Propiedad	Promedio	Desviación estándar	Rel. Min	Rel. Max
Capa 1 0- 10 m	Cohesión	12,8	2,2	2,4	7,9
	Phi	30,1	8,2	23,8	16,8
Capa 2 10-20 m	Cohesión	13	2,2	2,4	7,9
	Phi	28,3	8,2	23,8	16,8
Capa 3 20-30 m	Phi	27,5	8,2	23,8	16,8
	Cohesión	13,1	2,2	2,4	7,9
Capa 4 30-40 m	Cohesión	13,2	2,2	2,4	7,9
	Phi	27	8,2	23,8	16,8
Capa 5 40 - 50 m	Cohesión	13,2	2,2	2,4	7,9
	Phi	26,6	8,2	23,8	16,8

Fuente: propia

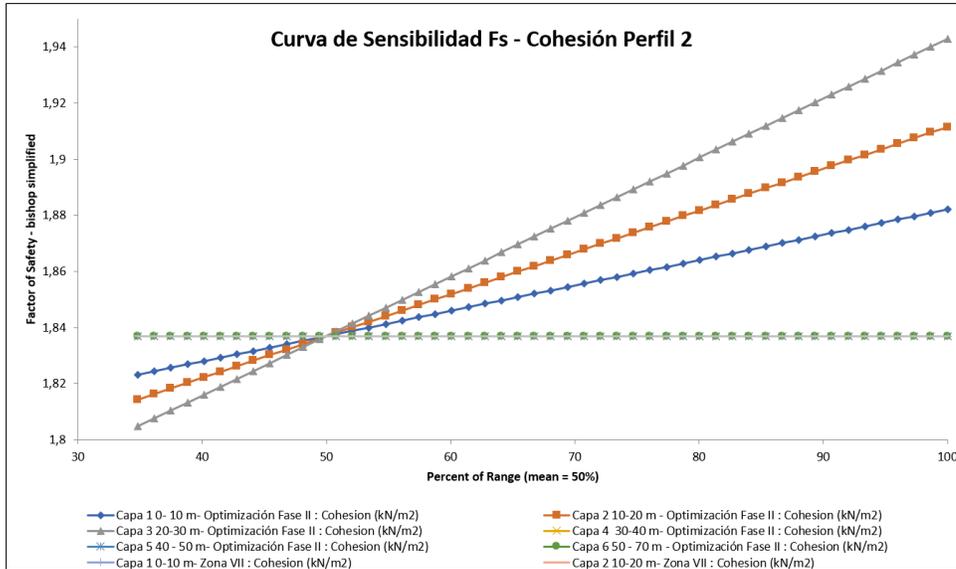


Figura 7-5. Curva de Sensibilidad del Factor de Seguridad y la Cohesión del perfil 2
Fuente: propia

La figura 7-5 presenta la gráfica de comportamiento del factor de seguridad con la cohesión en el perfil 2. El eje de las abscisas se refiere al rango de datos, donde el 50% se refiere al valor promedio de la unidad geotécnica o capa de residuos y el 100 % el valor máximo. Se observa que el valor promedio se encuentra muy cercano al valor mínimo que en este caso se representa en 35% debido a que la cohesión tiene una distribución Log-normal (ver figura 6-10). Las capas superficiales de los primeros 30 m en la zona actual de operación (Fase II) son las más influyentes en el valor del factor de seguridad, sin embargo, la sensibilidad de este con la cohesión es muy baja, variando solamente 1,8 a 1,94 entre el valor más bajo y alto. En las capas influyentes entre mayor es el valor de la cohesión mayor será el FS, pudiendo interpretarse que la cohesión al aumentar con la carga y la edad de disposición eleva el valor del factor de seguridad.

A partir de la figura 7-6 se concluye que la fricción es más influyente que la cohesión para la estabilidad de los Residuos Sólidos. La variación del FS es amplia, desde un FS=1 hasta un FS=2,6. Las unidades más superficiales menores a los 30 m de profundidad son las más influyentes y al igual que con la Cohesión y entre mayor es la Fricción mayor será el FS. No obstante, se debe tener en cuenta que la fricción disminuye con la carga y la edad de disposición del material. Lo anterior esta de cierta manera en contravía de la figura 7-5 donde a partir de la cohesión que a mayor edad mayor será el factor de seguridad.

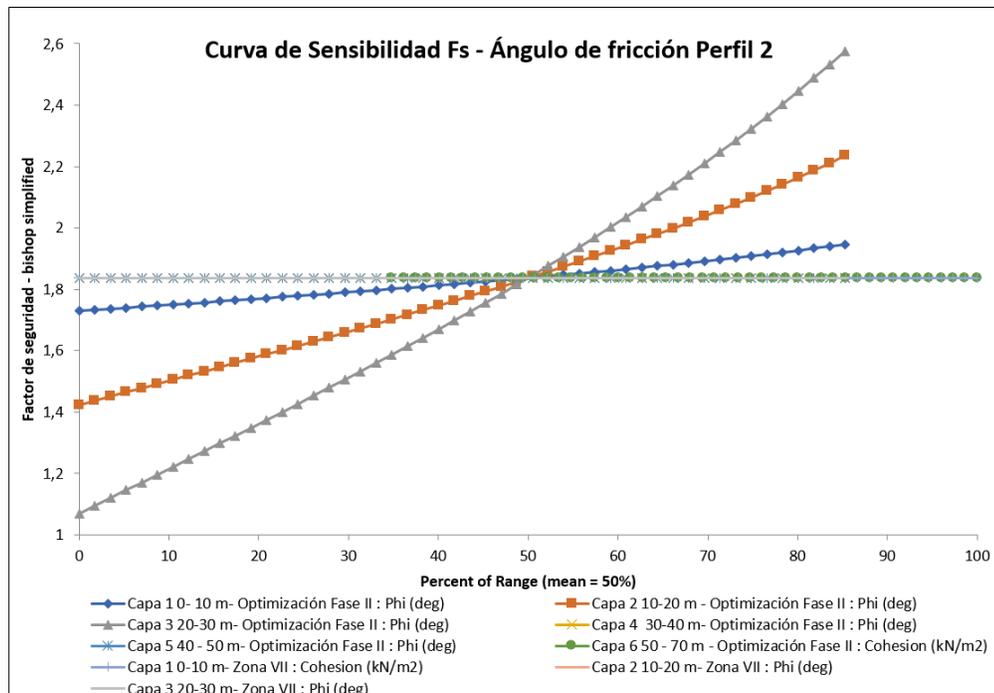


Figura 7-6. Curva de Sensibilidad del Factor de Seguridad y el Ángulo de Fricción del perfil 2.

Fuente: Propia

La curva de sensibilidad del FS - Ru se muestra en la figura 7-7. Como era de esperarse entre mayor es la presión de poros menor será el factor de seguridad. Las capas de entre 10 a 30 m son las más influyentes en el perfil de análisis. Para los demás perfiles se tiene un comportamiento similar, con las unidades entre los 10 y 40 m las más influyentes para el factor de seguridad con las variaciones de Ru. (véase anexo B).

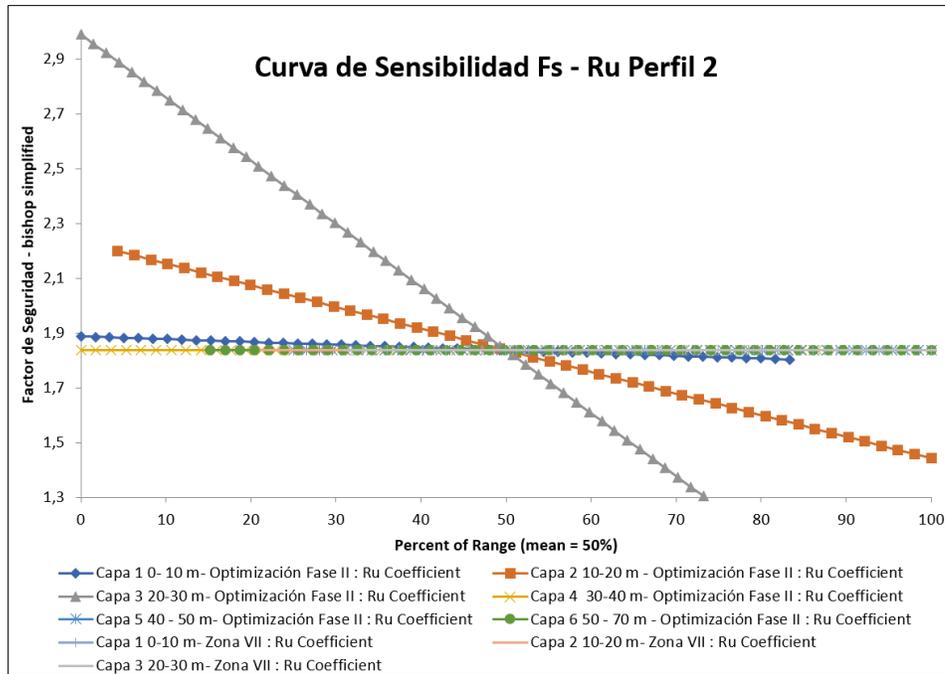


Figura 7-7. Curva de Sensibilidad del Factor de Seguridad y el parámetro Ru del perfil 2
Fuente: Propia

El comportamiento del factor de seguridad con la pendiente también fue evaluado. La figura 7-8 presenta los resultados del FS mínimo con los ángulos de los taludes de los perfiles evaluados. No se observa un comportamiento claro, debido a que los taludes se componen de varias unidades geotécnicas que están definidas con valores diferentes de los parámetros entre sí, y de acuerdo con las curvas de sensibilidad anteriores se tiene una fuerte influencia del Ru y de la Fricción para el FS.

Si bien se tiene un rango del ángulo de la pendiente de los taludes modelados, este es bajo teniendo en cuenta que se basan en la topografía real de Doña Juana para el mes de marzo de 2023, y que el contratista procura mantener la geometría de los taludes de manera que no exista algún problema de estabilidad por este aspecto. Esto último implica que para dicho mes la máxima pendiente de los taludes sea de 15°.

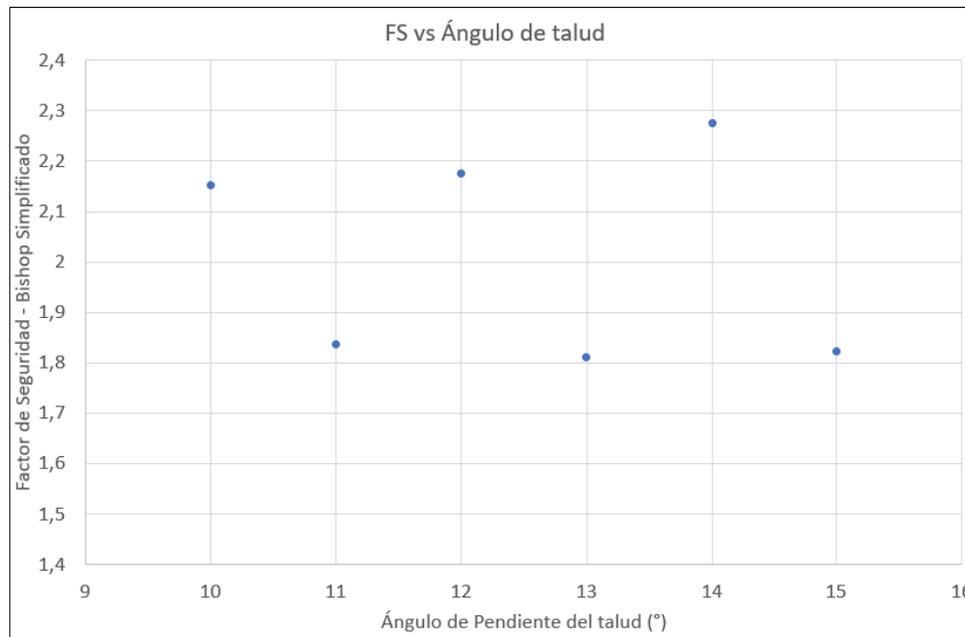


Figura 7-8. Comportamiento del Factor de Seguridad con el ángulo de la pendiente del talud.

Fuente: Propia

7.4 Parámetros críticos para generación de deslizamientos en Doña Juana

Los análisis de estabilidad y la recopilación de información de los deslizamientos ya ocurridos en Doña Juana permitieron, determinar los parámetros que más influyen en la generación de los deslizamientos.

Las gráficas de sensibilidad del factor de seguridad revelan que tanto el valor del R_u como el ángulo de fricción ejercen una notable influencia en dicho factor, especialmente en las capas más superficiales de los residuos. Este hallazgo concuerda con los análisis post-falla de los deslizamientos ocurridos en 1997 y 2015, donde se identifican las altas presiones de poro alcanzadas en las celdas de residuos como uno de los detonantes.

No obstante, no se tiene una clara certeza de la razón de los aumentos y disminuciones de la presión de acuerdo con las figuras 5-8 y 5-9, en las cuales se evalúa la posible relación de las lluvias y el bombeo de extracción de lixiviados con el parámetro R_u . La casi inexistente relación con la lluvia se puede explicar por las coberturas de material arcilloso que coloca el operador sobre los residuos para disminuir la proliferación de los olores y

moscas. Ahora bien, los bombeos tienen una influencia limitada, estos tienen un abatimiento de algunos metros y no llegan a abarcar toda la zona evaluada.

Por otra parte, el ángulo de fricción experimenta variaciones en función de la edad de disposición de los residuos. Este fenómeno se atribuye a la biodegradación de la basura, que reduce la proporción de la fase sólida y aumenta las fases líquida y gaseosa. Con la disminución de partículas sólidas, se reduce la cantidad de material friccionante. En consecuencia, se puede concluir que, con el paso del tiempo, la influencia del valor friccionante disminuye en las fuerzas resistentes del factor de seguridad.

8. Caracterización y análisis de la amenaza

La evaluación de la estabilidad de taludes es esencial en la gestión de riesgos geotécnicos, especialmente cuando se trata de amenazas por deslizamientos. La probabilidad de falla en taludes se ha convertido en un enfoque clave para cuantificar la posibilidad de que un talud experimente un colapso o deslizamiento. Este concepto no solo contribuye a una comprensión más profunda de la seguridad de las pendientes, sino que también facilita la toma de decisiones informada en la planificación y mitigación de riesgos.

Para el análisis de la amenaza se tomó como base la Guía Metodológica del SGC. En primer lugar, se partirá de la definición del modelo geotécnico de la zona y a partir de este se realiza la caracterización del potencial movimiento de remoción en masa y se realiza los cálculos de la probabilidad de falla. Por último, se desarrolla la zonificación de la amenaza.

8.1 Caracterización del proceso

- Volumen de masa potencialmente deslizada

De acuerdo con la Guía metodológica, la magnitud de un posible movimiento puede definirse mediante el volumen de la masa potencialmente inestable. El volumen de masa potencialmente inestable se calcula con la siguiente ecuación, la cual se basa en lo mencionado por SGC-UNAL (2016).

$$V = \left(\frac{1}{6} * \pi * D_r * W_r * L_r \right) * F_{exp} \quad (8.1)$$

En la ecuación anterior se tiene que V es el volumen del deslizamiento, D_r es la profundidad máxima de la superficie de falla esperada, W_r es el ancho máximo de la superficie de falla, L_r es la longitud de la superficie de falla y F_{exp} es el factor de expansión del material desplazado.

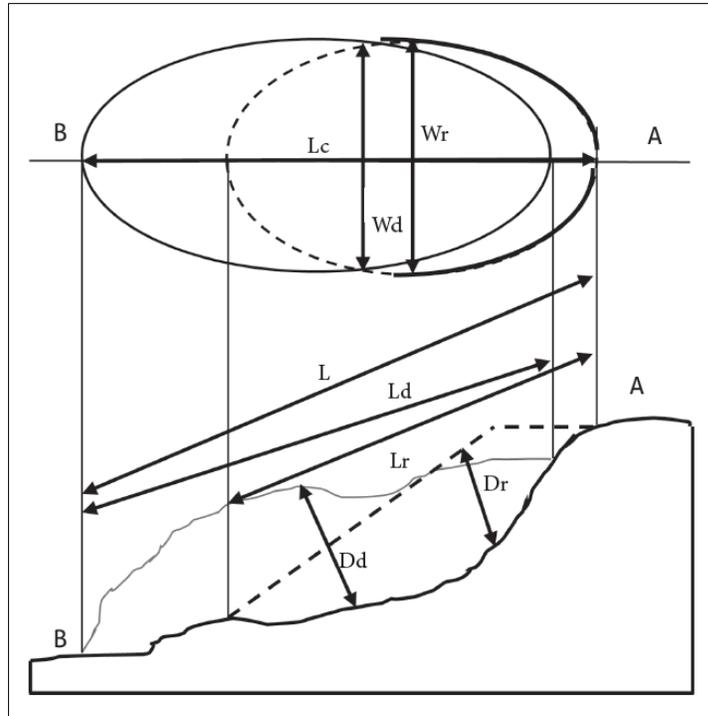


Figura 8-1. Determinación del volumen de un deslizamiento.
Fuente: Tomado de IAEG, 1990 en Ávila et al. (2016)

Se realizó el cálculo para los escenarios más desfavorables, es decir, para los perfiles de análisis donde se obtuvo el menor valor del Factor de Seguridad determinístico. Se calculó para los perfiles 2, 4 y 5.

Se tomaron los siguientes valores, para el factor de expansión se tomó 1,3.

Tabla 8-1. Parámetros utilizados para el cálculo de los volúmenes potencialmente inestables.

	Dr (m)	Wr (m)	Lr (m)
Perfil 2	29	100	233
Perfil 4	31	115	300
Perfil 5	22	75	152

Fuente: Propia

$$V_{perfil\ 2} = \left(\frac{1}{6} * \pi * 29 * 100 * 233 \right) * 1,3 \approx 459.934\ m^3$$

$$V_{perfil\ 4} = \left(\frac{1}{6} * \pi * 31 * 115 * 300 \right) * 1,3 \approx 727.986\ m^3$$

$$V_{perfil\ 5} = \left(\frac{1}{6} * \pi * 22 * 75 * 152 \right) * 1,3 \approx 170.714\ m^3$$

El volumen del deslizamiento del año 2015 fue de alrededor de 343.800 m^3 y el del año 1997 de más de 800.000 m^3 .

- Distancia de viaje

Se utilizaron los métodos geométricos propuestos por Hungr et al. (2005) y reportados en la Guía Metodológica SGC-UNAL (2016). Los parámetros utilizados se muestran en la figura 8-2.

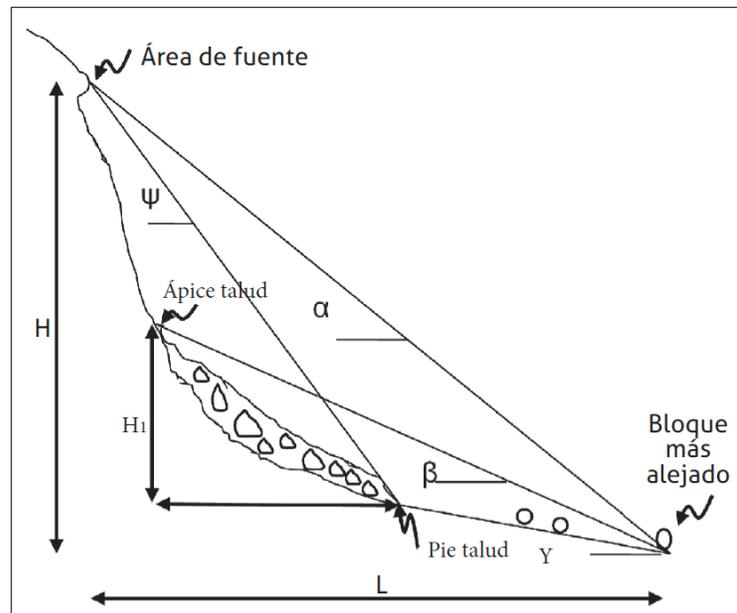


Figura 8-2. Determinación de distancia de viaje.

Fuente: Adaptado Hungr et al., 2005.

Existen distintas ecuaciones propuestas en la Guía. Se realizó el cálculo de estas para los deslizamientos ocurridos en Doña Juana y se seleccionó la que mejor se ajusta. Se calcularon las distancias para los deslizamientos de 2015 y 2020 respectivamente. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 8-2. Ecuaciones para el cálculo de distancia de viaje - Hong Kong (Promedio). Para el deslizamiento de 2015. Con $H = 53,51 \text{ m}$, $\delta = 14^\circ$, $V = 343.800 \text{ m}^3$ y $W = 395.300 \text{ t}$.

Variable dependiente	Ecuación	Resultado (2015)
Corte talud	$\log(L) = 0,109 + 1,010 \log H - 0,506 \log(\tan \delta)$	L:144,5 m
Relleno talud	$\log(L) = 0,453 + 0,547 \log H - 0,305 \log(V/W)$	L:23,9 m
Muro de contención	$\log(L) = 0,178 + 0,587 \log H - 0,309 \log(V/W)$	L:14,9 m
Caída de roca	$\log(L) = 0,235 + 0,703 \log H - 0,417 \log(\tan \delta)$	L:52,4 m

Fuente: Propia

Tabla 8-3. Ecuaciones para el cálculo de distancia de viaje - Hong Kong (Promedio). Para el deslizamiento de 2020. Con $H = 64,75$ m, $\delta = 12^\circ$, $V = 69.000$ m³ y $W = 79.350$ t.

Variable dependiente	Ecuación	Resultado (2020)
Corte talud	$\log(L) = 0,109 + 1,010 \log H - 0,506 \log(\tan \delta)$	L: 190 m
Relleno talud	$\log(L) = 0,453 + 0,547 \log H - 0,305 \log(V/W)$	L: 26,5 m
Muro de contención	$\log(L) = 0,178 + 0,587 \log H - 0,309 \log(V/W)$	L: 16,7 m
Caída de roca	$\log(L) = 0,235 + 0,703 \log H - 0,417 \log(\tan \delta)$	L: 64,1 m

Fuente: Propia

Donde, H es la caída vertical, δ es el ángulo del talud, V el volumen de deslizamiento y W el peso del deslizamiento. En el deslizamiento de 2015 se tuvo una distancia total de 290 metros, mientras en el de 2020 fueron 307 metros. Si bien se observa una mayor correlación para la primera ecuación con la longitud real de los deslizamientos, las distancias de los movimientos en masa ocurridos fueron mucho mayores a los calculados.

Los RSU al ser muy deformables y tener presiones elevadas, pueden comportarse como flujos en algunas ocasiones y alcanzar grandes distancias. No obstante, se utiliza la ecuación de corte de talud debido a que es la que más se acerca al valor real además de ajustarse a lo observado en el terreno. Es así, como se utilizó la ecuación de corte de talud para el cálculo de las distancias de viaje de los perfiles de análisis.

Dado que se tienen varias secciones de análisis, además de que se ha calculado el volumen potencialmente inestable que puede originarse de acuerdo con la superficie de falla de los perfiles más críticos, se calcula la distancia horizontal que puede alcanzar los perfiles con los factores de seguridad más bajos.

Tabla 8-4. Distancias de viaje obtenidas

	H (m)	δ (°)	L (m)
Perfil 2	43	10,5	184
Perfil 4	62	11,7	134
Perfil 5	39	18	92

Fuente: propia

Se obtuvieron distancias de 184, 134 y 92 metros para los perfiles 2, 4 y 5 respectivamente, implicando que ante un posible evento se pueda alcanzar las antorchas y los sopladores que hacen parte de la Planta de Tratamiento de Biogás.

- Intensidad

Siguiendo la misma línea de la Guía Metodológica SGC-UNAL (2016), se define la intensidad de un evento como la velocidad de la masa deslizante involucrada. El método con el que se estimó la velocidad es el del bloque deslizante, con el que se modela el deslizamiento como el movimiento de un bloque sobre una superficie con una resistencia por fricción constante. Para la determinación de la velocidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{2 * H * g * \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta}\right)} \quad (8.2)$$

Donde V es la velocidad del deslizamiento o movimiento del terreno, H es la altura de caída, $-g$ la aceleración de la gravedad de 9.81 m/s², ϕ es el ángulo de fricción interna del talud, y β es la inclinación del talud. Las velocidades obtenidas se muestran a continuación

Tabla 8-5. Velocidades de cada uno de los posibles escenarios.

	H (m)	ϕ (°)	β (°)	V (m/s)
Perfil 2	43	29	10,5	21,0
Perfil 4	62	29	11,7	46,2
Perfil 5	39	28	18	24,0

Fuente: propia

De acuerdo con los resultados obtenidos del comportamiento del ángulo de fricción en el capítulo 6,1, se tomó el promedio de los perfiles para el valor de ϕ , y junto con los datos de la tabla 8-4 fue posible las velocidades. Para los perfiles 2 y 5 las velocidades son 21 m/s y 25 m/s respectivamente, siendo mucho menores que el valor del perfil 4 con 46,2 m/s. Esto se debe a la geometría de este último, debido a que tiene una caída potencial de más de 60 metros.

8.2 Probabilidad de falla

En estudios que evalúan el riesgo, la probabilidad de ocurrencia de un evento que representa la amenaza es fundamental. Para el presente estudio, se evalúa mediante la probabilidad de falla de los taludes. En esta investigación se utilizaron cálculos estadísticos para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa.

Estos procedimientos se desarrollaron mediante el método de Montecarlo, el cual es muy útil cuando se quiere obtener valores o soluciones de ecuaciones que son inherentemente complejas de calcular con precisión. Sin embargo, mediante este método, es posible calcular una aproximación al resultado deseado de manera más sencilla. Este consiste en el uso de números aleatorios para realizar aproximaciones y simulaciones de fenómenos complejos.

Para entender este método se debe suponer un cuadrado de área conocida al igual que un círculo con radio conocido. Se desea saber el valor de pi teniendo en cuenta que el área del círculo es igual a πr^2 . Si se generan números aleatorios en la figura, se obtiene una aproximación al valor de π como se observa en la figura 8-3.

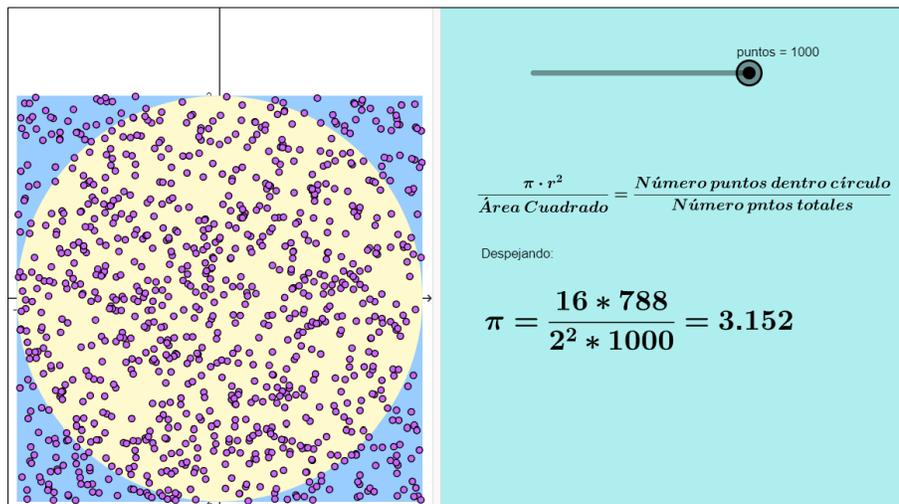


Figura 8-3. Cálculo de Pi mediante el método de Monte Carlo.
Fuente: Tomado de (Pérez, n.d.)

Ahora bien, al aplicar las simulaciones de Monte Carlo a estabilidad de taludes, se debe conocer la distribución estadística de las variables que influyen en los cálculos del factor de seguridad, que para el presente estudio son la cohesión, fricción y R_u . Las distribuciones estadísticas de acuerdo con el capítulo 6, son normales para el R_u y la fricción y log-normal para la cohesión, además de contar con la desviación estándar y los valores máximos y mínimos en las tablas 7-1 y 7-3.

Se utilizó el software de Slide para determinar la probabilidad de falla, el factor de seguridad se calcula N veces (en donde N = Número de Muestras, para el presente estudio $N=5000$) para la superficie de falla Mínima Global, utilizando una serie diferente de variables de entrada aleatoriamente generadas para cada análisis, teniendo en cuenta el

comportamiento estadístico de cada una. Con las variables ya definidas obtiene el número de análisis con factor de seguridad menor de uno, y se divide por el número total de Muestras.

$$\text{Probabilidad de falla} = \frac{Fs < 1.0}{\text{Número de muestras}} * 100\%$$

El número de simulaciones de Montecarlo fue seleccionado debido a la baja diferencia al realizarlas con un número mayor las simulaciones, además del aumento del tiempo de cálculo que toma el programa. La tabla 8-6 muestran los resultados de tres secciones con diferentes simulaciones con variaciones muy bajas en las probabilidades de falla y los factores de seguridad.

Tabla 8-6. Resultados de distinto número de simulaciones Montecarlo en tres perfiles

Perfil 2			
# simulaciones	Fs (promedio)	Fs (determinístico)	Probabilidad de falla
1000	1,899	1,837	1,10%
5000	1,930	1,837	1,14%
10000	1,927	1,837	1,19%
Perfil 4			
# simulaciones	Fs (promedio)	Fs (determinístico)	Probabilidad de falla
1000	1,737	1,811	0,10%
5000	1,717	1,811	0,34%
10000	1,714	1,811	0,32%
Perfil 5			
# simulaciones	Fs (promedio)	Fs (determinístico)	Probabilidad de falla
1000	1,682	1,824	1,00%
5000	1,693	1,824	1,00%
10000	1,689	1,824	1,02%

Fuente: propia

Además del valor de la probabilidad de falla, se obtuvo el factor de seguridad medio del análisis probabilístico para el método de Bishop-Simplificado y Morgenstern-Price. En la tabla 8-7 se resumen los resultados obtenidos, encontrando que se tienen probabilidades por encima del 0,1 % para los perfiles 2, 4 y 5. De igual manera los Fs más bajos corresponden a las mismas secciones.

Tabla 8-7. Resultados del Factor de Seguridad Probabilístico y de la Probabilidad de falla.

	Bishop		Mogersten-Price	
	Fs (prob)	PF	Fs (prob)	PF
Perfil 1	2,16	< 0,001	2,17	< 0,001
Perfil 2	1,93	0,0114	1,94	0,0104
Perfil 3	2,40	< 0,001	2,41	< 0,001
Perfil 4	1,71	0,0034	1,72	0,0026
Perfil 5	1,69	0,010	1,70	0,0084
Perfil 6	2,24	< 0,001	2,25	< 0,001

Fuente: Propia

Adicionalmente, los perfiles 2 y 4 se pueden detallar en las figuras 8-4 y 8-5 respectivamente. Se observan las posibles superficies de falla para los casos evaluados. En la figura 8-4 la superficie de falla se ubica casi de manera central al perfil 2 cuya longitud es de 826 metros. De materializarse un evento en este escenario, el deslizamiento ocurriría dentro de la celda de residuos impactando en la operación diaria además de los daños sobre la infraestructura.

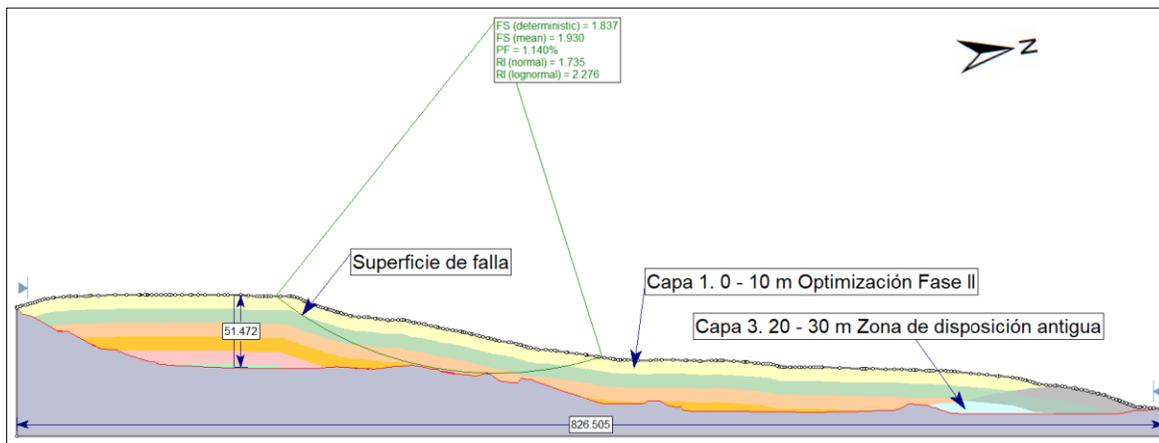


Figura 8-4. Esquema del Perfil 2.

Fuente: Propia

En cuanto al perfil 4, esta superficie de falla se encuentra casi en dirección recta hacia la planta de Biogás. A diferencia del perfil 2, esto podría afectar no solamente la infraestructura interna de la celda de residuos sino además la externa como vías y partes de la planta. No obstante, las superficies de ambos perfiles tienen dirección al norte debido a que es en este sentido donde existen las mayores pendientes.

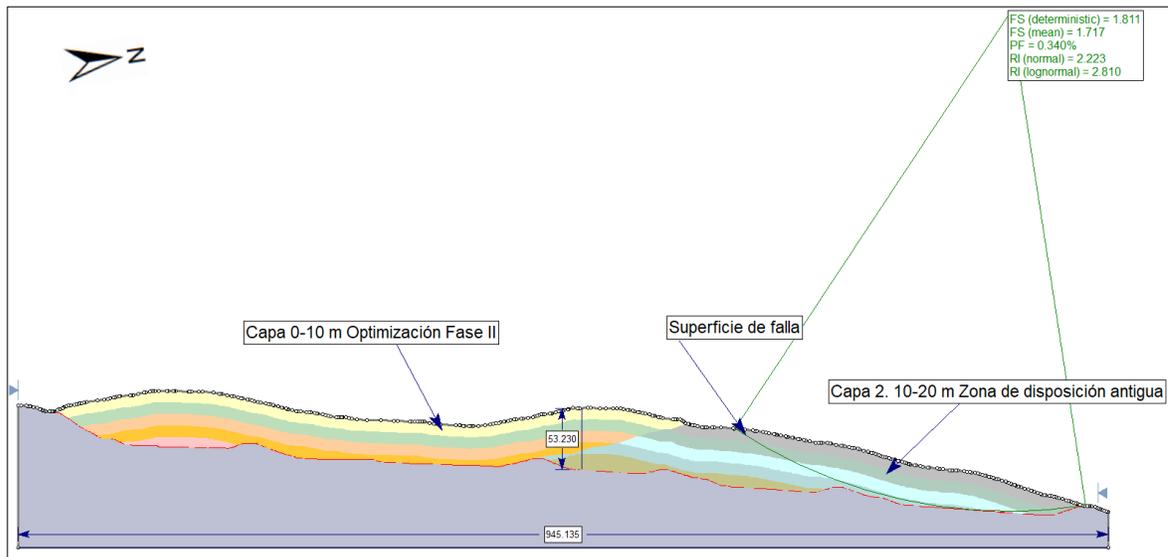


Figura 8-5. Esquema del perfil 4.
Fuente: propia

8.3 Zonificación de la Amenaza

Para la zonificación de la amenaza se utilizó el criterio de la Guía metodológica SGC-UNAL (2016). Sin embargo, dado que no se cuenta con un registro completamente histórico por algunos faltantes de piezómetros debido a los mantenimientos que se necesitan para los instrumentos, se tomará solamente una probabilidad de falla y no una probabilidad de falla anual, como lo reporta la Guía metodológica. Adicionalmente, la Guía Metodológica se basa en distintos escenarios para determinar la probabilidad de falla anual con datos históricos de lluvias, a diferencia del presente trabajo que toma en cuenta los valores de R_u para un tiempo específico. En la tabla 8-8 se observa que un nivel de amenaza alta corresponde a una probabilidad de falla superior al 16%; un nivel de amenaza media hasta una probabilidad entre 0,1% y 16%, y un nivel de amenaza baja si la probabilidad de falla es inferior al 0,1%.

Tabla 8-8. Clasificación de la amenaza en función de la probabilidad de falla.

Nivel de amenaza	Probabilidad de falla
Baja	< 0,001
Media	0,001-0,16
Alta	>0,16

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

El mapa 8-6 se obtiene mediante la extrapolación de las superficies de falla con el menor factor de seguridad y probabilidad de falla de cada sección. Esta extrapolación se realizó

gracias a sistemas de información geográfica, mediante el método IDW (explicado en el capítulo 5) se asignaron valores de probabilidad de falla a los puntos que conforman las superficies de falla de los perfiles, y finalmente, mediante la tabla 8-8 se obtuvieron áreas con un valor de amenaza.

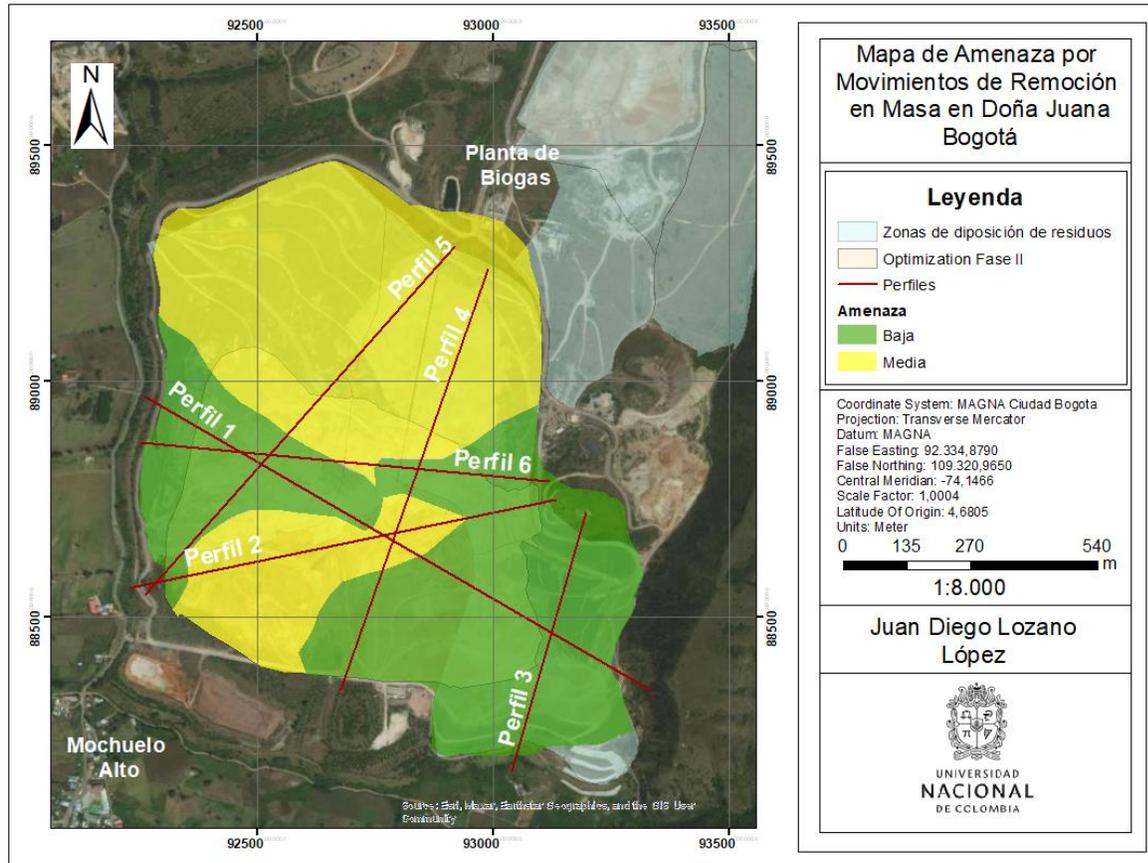


Figura 8-6. Zonificación de la Amenaza por Procesos de Remoción en Masa en Doña Juana, Bogotá.

Fuente: propia

Se puede observar que existen dos grandes zonas en nivel de amenaza media, y el resto está nivel de amenaza baja. Una de las zonas de nivel de amenaza media se encuentra cerca de la planta de tratamiento de Biogás, que es una de las instalaciones internas del relleno sanitario, ubicada en un sector de pendientes topográficas altas, y la otra zona, en el sector de valores máximos de presión de poro, cerca de un barrio llamado Mochuelo Alto. Los modelos de estabilidad son muy sensibles a la pendiente y la presión, dictando estas características las áreas con mayor probabilidad de falla.

9. Caracterización y análisis de la vulnerabilidad

9.1 Identificación, localización y caracterización de elementos expuestos

Los elementos expuestos incluyen tanto elementos físicos (bienes e infraestructura) como servicios ambientales, recursos económicos y sociales y bienes culturales, que por su localización pueden resultar afectados por la materialización de una amenaza. En este trabajo no se tendrá en cuenta la afectación a las personas, teniendo en cuenta que históricamente previo a un deslizamiento en residuos, siempre se han presentado deformaciones como grietas de tracción que dan aviso de un evento inminente y permiten la evacuación del personal con anterioridad. Las afectaciones cuando se generan los deslizamientos de residuos a la población son en su mayoría de salud y frente a lo cual no se da alcance al presente trabajo.

9.1.1 Barrios aledaños & Recurso Hídrico en Doña Juana

El ahora llamado Parque de Innovación Doña Juana cuenta con un cerramiento perimetral que evita el ingreso y la invasión de los predios por particulares, además de contar con zonas de amortiguamiento ambiental que alejan las viviendas de las celdas de disposición de residuos. Sin embargo, Doña Juana la zona actual de operación denominada como Optimización Fase II se encuentra cerca de los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo, estas hacen parte de la zona de influencia del relleno y sobre el cual el operador ha realizado obras entre otras actividades de compensación. A continuación, se describen:

- Mochuelo Bajo

Este sector se compone de varios barrios y se encuentra separado de las celdas de operación por una zona de amortiguamiento ambiental donde no se puede desarrollar ninguna actividad industrial. Se denomina Mochuelo Bajo porque se encuentra topográficamente por debajo de Mochuelo Alto. Este barrio sufrió una transformación marcada con el inicio de la operación en Doña Juana. Para 1984 entre los dos Mochuelos había apenas 30 casas y ambas eran de vocación rural. Con el traslado de los botaderos El Cortijo y Gibraltar a Doña Juana, muchas familias recicladoras se mudaron a Mochuelo

Bajo donde por intereses particulares se vendieron lotes de manera fraudulenta (Rincón, 2020).

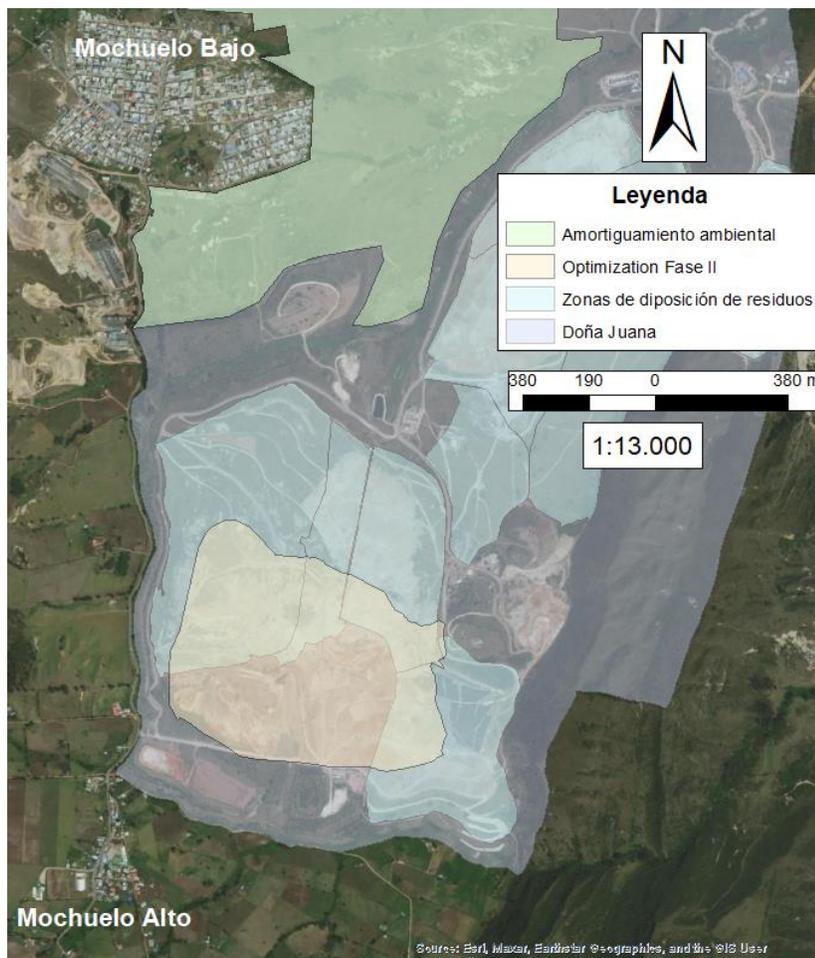


Figura 9-1. Ubicación de los sectores de Mochuelo Alto y Mochuelo Bajo respecto a Doña Juana. Fuente: propia

Para 1999 el alcalde Enrique Peñaloza legalizó el sector en cuatro barrios, Barranquitos, Esmeralda, Lagunitas y Patícos, lo cual representa alrededor de 10.000 habitantes y cuya estimación es aproximada debido a que es continua la llegada de familias y no hay un censo poblacional. Se calcula que alrededor de un 25% de la población se estableció en Mochuelo Bajo por ser víctima de desplazamiento forzado (Rodríguez, 2020).

De acuerdo con los datos obtenidos de los datos de abiertos de la ciudad de Bogotá, los barrios que componen Mochuelo Bajo se componen de 1913 viviendas, 12 de 4 plantas, 132 con 3 plantas, 492 de 2 plantas y 1276 de 1 planta.

- Mochuelo Alto

Este sector tiene un carácter más rural que por su cercanía a la zona actual de operación se ve afectado por los olores y vectores como moscas y roedores. Estos son controlados por la operación mediante arcilla de cobertura temporal sobre la basura que evita la proliferación de olores, así como de moscas.

Según los datos abiertos de la ciudad de Bogotá en Mochuelo Alto que se encuentra cercanía a Doña Juana se compone de 256 viviendas, 1 de 3 plantas, 21 de 2 plantas y 234 de 1 planta. En cuanto a la población se estima que cuenta con alrededor de 1200 habitantes.

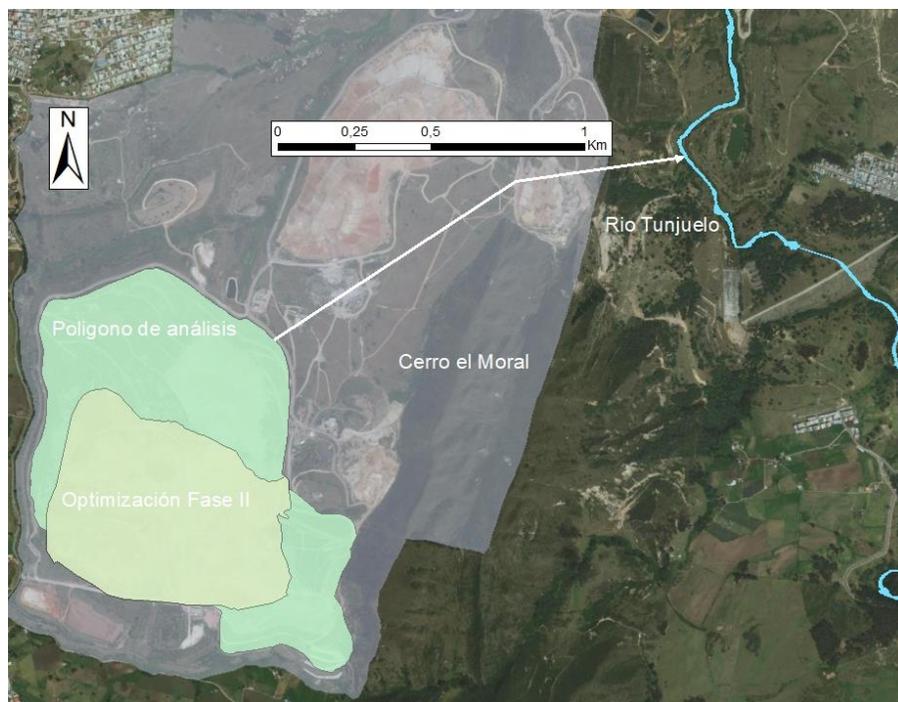


Figura 9-2. Ubicación del Río Tunjuelo respecto a la zona de análisis.

Fuente: Propia

- Río Tunjuelo

El Río Tunjuelo se encuentra en la parte baja de los predios de Doña Juana, por la entrada y salida de los vehículos recolectores y al este de la zona de estudio (véase figura 9-2). Se vio fuertemente afectado en el deslizamiento de 1997 al sufrir un taponamiento de su cauce producto de los residuos sólidos que alcanzaron a llegar a su lecho. La emergencia fue tal que se tuvo de desviar el río para evitar que se generara una avalancha por el represamiento del agua.

En el punto más cercano se encuentra aproximadamente a 1 kilómetro y medio respecto a la zona estudiada en el presente trabajo. Dado lo anterior para que los residuos sólidos lleguen a afectar este Río en un posible movimiento de remoción en masa, estos se deben comportar como un flujo, de la misma manera que lo hicieron en el año 1997. De darse este comportamiento, los residuos se moverían ladera abajo y se encontrarían con el Cerro el Moral el cual los condujera hacia el lecho del cuerpo hídrico, al no existir ninguna barrera que impida el paso.

9.1.2 Elementos expuestos.

Dentro del predio Doña Juana se encuentran diferentes edificaciones que sirven para la plena operación del Relleno. Entre ellas se encuentran la planta de tratamiento de Biogás, los drenajes y las chimeneas que funcionan como estructuras de extracción de lixiviado y Biogás como ya se mencionó en este trabajo.

- Chimeneas

En la zona de estudio para el mes de noviembre de 2023 se cuenta con alrededor 625 chimeneas, este número puede cambiar en función de las necesidades de la operación. Teniendo en cuenta que las celdas de disposición ocupan 91 ha, hay casi 7 chimeneas por hectárea.

Las chimeneas consisten en estructuras de polietileno de alta densidad que en teoría deben ser protegidas por gaviones con material tipo rajón, la cuales se extienden desde el fondo de la celda de residuos hasta el tope. Esta tubería se perfora para permitir el flujo del gas.

Sin embargo, de acuerdo con la interventoría, más de la mitad de estas estructuras no llegan ni siquiera a la mitad de la profundidad deseada. Prueba de ello son las constantes labores de adecuación que debe realizar el operador donde debe realizar perforaciones para realzar las estructuras. En la figura 9-4a se observan varias chimeneas con una marcada inclinación y sin la correspondiente protección de diseño. Esto se genera por los movimientos internos de la masa de residuos incitados principalmente por el movimiento de los gases y lixiviados y por la maquinaria que disgrega los residuos de manera tal que se generan plataformas de disposición. Es evidente la fragilidad de estas estructuras.

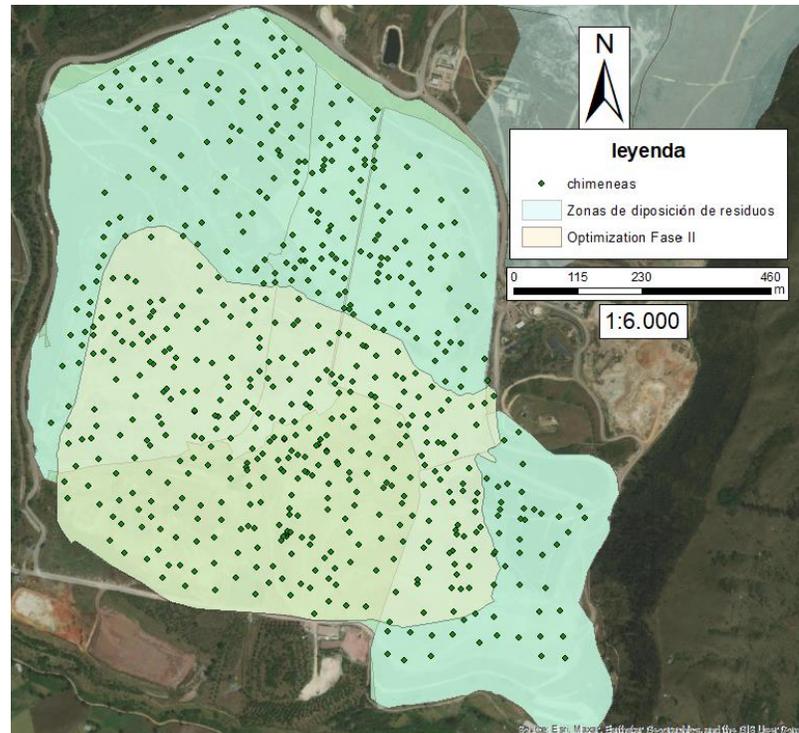


Figura 9-3. Chimeneas en la zona de estudio.

Fuente: Propia



Figura 9-4. a) Chimeneas en Doña Juana. b) Diseño inicial de las chimeneas.

Fuente: Tomado de CGR (2015)

- Planta de Tratamiento de Biogás

La planta de tratamiento de Biogás hace parte integral de la operación al transformar el gas generado por los residuos en energía siendo construida en el año 2009. En la figura 9-4 se muestra el plano en planta, se compone de varias estructuras que queman el metano captado, quemándolo y en menor medida transformándolo en energía. Esta planta

se construyó en cercanía a las zonas de operación de residuos dada la facilidad para el traslado del gas a la misma.

En la figura 9-6 se observa el registro fotográfico de la planta. Los sopladores captan todos los gases recolectados en por las chimeneas y lo distribuyen en la planta donde el 95% termina en las antorchas quemadoras, mientras el 5 % es redirigido hacia los filtros y moto generadores de energía. Actualmente la planta cuenta con una capacidad de 1,7mw por hora. Cabe resaltar que la intervención humana en la planta es mínima ya que se encuentra totalmente automatizada.

Al ir de la mano con la operación de disposición y la construcción y mantenimiento de las chimeneas, esta planta ha sufrido una volatilidad en el flujo que puede captar mediante estas estructuras. La planta se financia mediante la venta de bonos de reducción de carbono por la quema del biogás. Es por esta razón que la Concesión de la planta fue ampliada 20 años de la fecha inicialmente pactada ya que al captar menos biogás la planta genera menos energía y la inversión no ha sido recuperada.

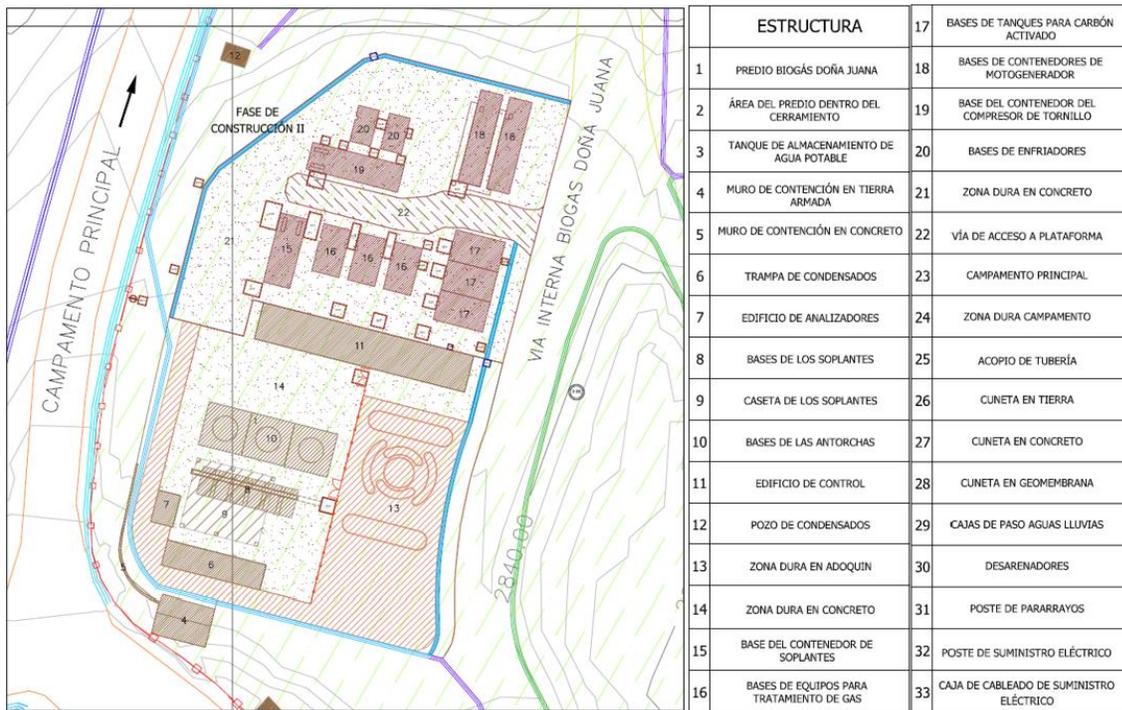


Figura 9-5. Plano de la Planta de Tratamiento de Biogás.
Fuente: Tomado de UT INTER DJ (2021)



Figura 9-6. Fotografías de la Planta de Biogás. a) Antorchas quemadoras de Biogás, b) Sopladores de biogás, c) motogeneradores de energía, d) filtros de carbón activado.

Fuente: tomado de (UT INTER DJ, 2023)

- Vías operativas en Doña Juana

Para la operación de Doña Juana, dentro de la zona de estudio existen varias vías operativas que funcionan para la circulación de los vehículos recolectores hacia la plataforma de disposición, además de la movilidad de la maquinaria como bulldozer, vibro compactadoras, retroexcavadoras, etc...

Estas vías internas de Doña Juana consisten en material afirmado obtenido dentro del mismo sector de los mismos predios. Estas tienen espesores bajos entre 5 a 6 metros, siendo estas muy irregulares. En la figura 9-6 se detalla la ubicación de estas arterias viales observándose que se distribuyen por todas las celdas de disposición debido a que los vehículos recolectores las recorren para disponer los residuos sólidos.

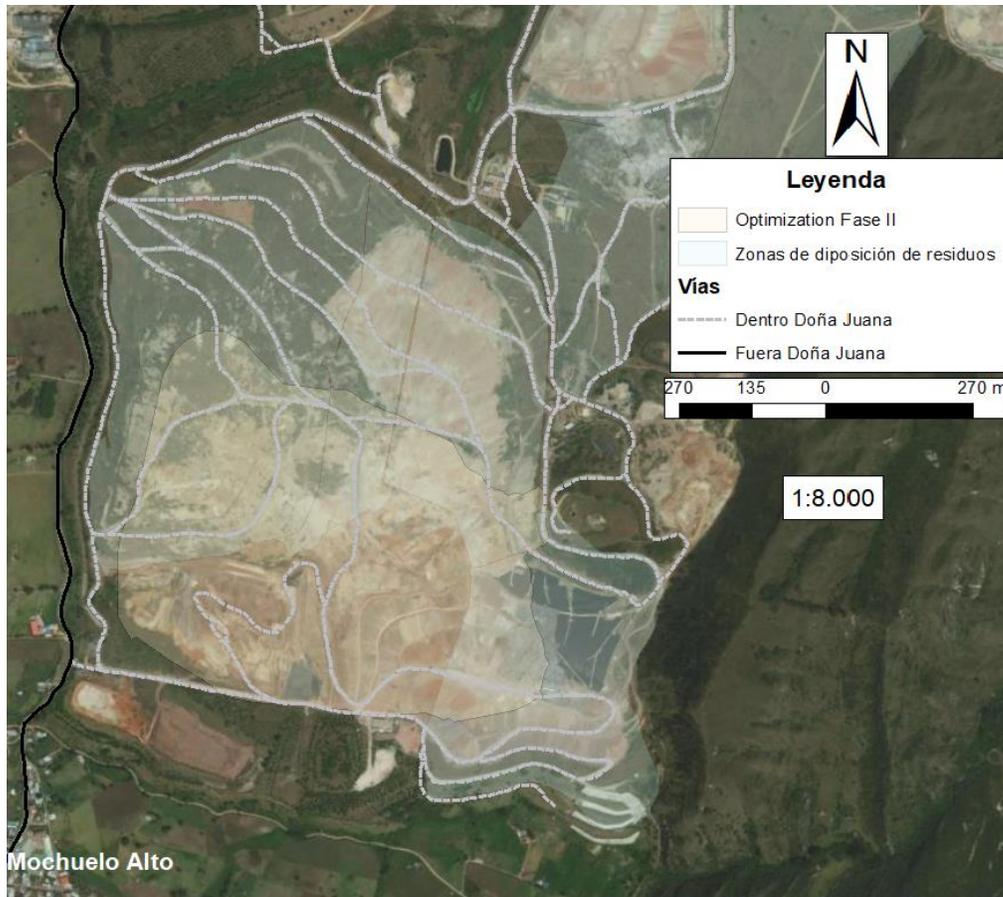


Figura 9-7. Vías en la zona de estudio en Doña Juana
Fuente: propia

9.2 Cálculo y zonificación de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad en el presente trabajo se realizará de manera cualitativa para las estructuras. Esto implica que se asocia un valor de vulnerabilidad baja, media o alta a partir de las cualidades de las estructuras, ya sea estado de conservación, altura de la estructura entre otros. Para el cálculo y zonificación de la vulnerabilidad, se tomó la metodología expuesta por Ávila et al (2016) en la Guía Metodológica, en la que influyen la fragilidad y la intensidad del posible evento amenazante. Así se determina que:

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 & I \leq 1-S \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 & I > 1-S \end{cases} \quad (9.1)$$

Donde:
V es la vulnerabilidad.

I la intensidad del evento amenazante.
 S la fragilidad del elemento.

La ecuación 9.1 tiene una escala de 0 a 1 donde este último valor significa una mayor vulnerabilidad de la estructura y su completa destrucción, mientras que 0 significa que no presenta ningún daño.

9.2.1 Exposición y Fragilidad

Los barrios aledaños se encuentran dentro de una distancia relativamente lejana, con 563 metros del punto más cercano de las celdas de disposición de residuos evaluadas para Mochuelo Bajo y 300 metros para Mochuelo Alto. Estas distancias superan las distancias de viaje calculadas en el capítulo 8, y aunque estas poblaciones se ven afectadas cuando han ocurrido eventos de remoción en masa, no tienen una afectación física directa, sino que sufren de perjuicios de salud indirectos.

Las estructuras internas de Doña Juana descritas anteriormente, se encuentran dentro de la trayectoria de un posible evento amenazante o sobre la ladera del deslizamiento potencial en si, por lo tanto, se esperan daños importantes sobre estas estructuras.

Para el cálculo de la fragilidad de las estructuras se adoptó la metodología propuesta por Li et al. (2010), modificada por Du J et al. (2013), mencionada en la Guía Metodológica.

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed}) \quad (9.2)$$

Donde:

S_e es la fragilidad de la estructura

S_{tip} es el Factor de fragilidad por tipo de estructura.

S_{alt} es el Factor de fragilidad por altura de la estructura.

S_{con} es el Factor de fragilidad por conservación de la estructura.

S_{ed} es el Factor de fragilidad por edad de la estructura.

- Fragilidad por tipo de estructura S_{tip}

Para el tipo de estructura se consideran los factores de resistencia a partir de las tipologías establecidas de las estructuras mediante la siguiente tabla.

Tabla 9-1. Factor de fragilidad por tipología de la estructura.

Tipología		Fragilidad	S_{tip}
F	Construcciones simples	Muy Alta	1.00
E	Estructuras ligeras	Alta	0.90
D	Estructuras con confinamiento deficiente	Media	0.70
C	Mampostería reforzada	Baja	0.50
B	Edificaciones reforzadas	Muy Baja	0.30
A	Edificaciones con reforzamiento especial	Extremadamente Baja	0.10

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Las chimeneas se pueden clasificar entre estructuras ligeras y construcciones simples asignándoles un valor de entre 1 y 0,90, si bien por diseño estas deben contar con material tipo rajón de protección, en muchos casos estas no se realizan adecuadamente como se observó en campo (véase figura 9-3), prueba de ello es que no mantienen la verticalidad de diseño. Por otro lado, la Planta de Biogás se clasificó como de una edificación reforzada asignándole un valor de 0,30.

- Fragilidad por altura de la estructura S_{alt}

La altura de las chimeneas es relativamente alta teniendo en cuenta que se extiende desde la base hasta el techo, y al ser de una tipología f se le da un valor de 0,90. Para el valor de la Planta de Biogás se le asigna un valor de 0,05 al ser de la tipología tipo B.

Tabla 9-2. Factor de fragilidad por altura de la edificación.

Tipología	Número de pisos	S_{alt}
E, F	≥ 2	0,90
D	≥ 4	0.90
D	2 y 3	0.60
Demás tipologías y alturas		0.05

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

- Fragilidad por conservación de la estructura S_{con}

La inspección en campo de las chimeneas pudo determinar que la mayoría de estas sufren de deformaciones graves con inclinaciones evidentes por fuera del plano vertical, razón por la cual se le asigna un valor de 0,75. La Planta de Biogás por su parte no presenta evidencia de grietas o deformaciones claras, asignándole un valor de 0.

Tabla 9-3. Factor de conservación de las estructuras.

Estado de conservación	Descripción	SEPARACIÓN GRIETAS (mm)	S_{con}
------------------------	-------------	-------------------------	-----------

Muy bueno	No se observan deformaciones, agrietamiento o envejecimiento.	0	0.00
Bueno	Solo se observan daños superficiales leves en los acabados.	0 - 0,5	0.05
Deformaciones leves	Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior de elementos verticales.	0,5 - 1,0	0.25
Deformaciones medias	Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él (pandeo).	1,0 - 5,0	0.50
Deformaciones Graves	Inclinaciones del elemento fuera de su plano vertical.	5,0 - 10,0	0.75
Deformaciones Muy graves	Unidades de mampostería con fallas por aplastamiento. Concreto con fallas por aplastamiento.	>10,0	1.00

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

- Fragilidad por edad de la estructura S_{ed}

El parámetro de fragilidad relativo a la edad de la edificación se estima a partir de la relación de los años de servicio con respecto a la vida útil de diseño de la edificación (servicio/vida útil). Como ya se mencionó la planta tiene una tipología tipo B y teniendo en cuenta que inicio operación en noviembre de 2009 tiene una relación de 0,46 y de acuerdo con la tabla 9-4 se le asigna un valor de 0,30.

Para las chimeneas al ser una edificación tipo F, según Ávila et al. (2016) tiene una vida útil de 1-2 años, estos datos concuerdan con lo reportado por el operador actual y la interventoría donde se reporta que las chimeneas con 14 pulgadas sufren estrangulamientos fuertes entre los 10 a 15 metros de profundidad en los primeros 8 meses mientras las de 24 en los primeros 2 años (UT INTER DJ, 2018). Teniendo en cuenta que la mayoría de las chimeneas cuyo relace y readecuación completa son mayores a los dos años se le asignará un factor de 1.00 a estas estructuras

Tabla 9-4. Factor de fragilidad edad de la edificación.

RELACIÓN AÑOS DE SERVICIO/VIDA ÚTIL	S_{ed}
≤ 0.1	0.05
0.1 - 0.4	0.10
0.4 - 0.6	0.30
0.6 - 0.8	0.50
0.8 - 1.0	0.70
1.0 - 1.2	0.80
≥ 1.2	1.00

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Tabla 9-5. Vida útil en función del tipo de edificación.

Tipología	Vida útil
A y B	50 años
C y D	30 años

E	15 años
F	1-2 años

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Por otro lado, para determinar la fragilidad de las vías que se encuentran expuestas a un posible evento amenazante se toma la ecuación de la guía metodológica que toma en cuenta el ancho de la vía

$$S_{ancho} = \frac{3,0}{W_{vía}} \quad (9.3)$$

Siendo $W_{vía}$ el ancho de la vía en metros y 3,0 el espacio mínimo de un carril para el tránsito normal de un vehículo.

Las vías que internas de Doña Juana las cuales sirven para el pleno funcionamiento de la operación tienen una anchura relativamente baja con un promedio de solo 5 m. Por lo tanto, se determina un factor de fragilidad de 0,6.

Los resultados de la fragilidad de todos los elementos se muestran en la siguiente tabla, Los valores de S cercanos a 1 indican una estructura muy frágil, es decir, con muy mala respuesta frente a un potencial deslizamiento de residuos.

Tabla 9-6. Cálculo de la fragilidad de los elementos expuestos

	S_{tip}	S_{alt}	S_{con}	S_{ed}	Fragilidad S_e	Fragilidad S_{ancho}
Planta Biogás	0,3	0,05	0	0,3	0,4	
Chimeneas	1	0,9	0,75	1	1	
Vías						0,6

Fuente: Propia

9.2.2 Intensidad

La intensidad del potencial movimiento se evaluará como un movimiento rápido dados los antecedentes ocurridos en la zona de estudio. Se adopta la propuesta de (Du J et al., 2013) mencionada en la Guía Metodológica que consiste en lo siguiente:

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre})(1 - I_{f-prof}) \quad (9.4)$$

Donde I_{rap} es la intensidad para el escenario con movimientos rápidos, I_{f-pre} es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la estructura.

Tabla 9-7. Parámetro de intensidad por presión de impacto.

RELACIÓN PRESIÓN DE IMPACTO DE DESLIZAMIENTO/ PRESIÓN HORIZONTAL LÍMITE DE ESTRUCTURA	I_{f-pre}
<0,1	0,05
0,1-0,2	0,20
0,2-0,4	0,40
0,4-0,7	0,70
0,7-1,0	0,90
$\geq 1,0$	1,00

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Para determinar la presión horizontal de la estructura se toma lo planteado por Du J et al. (2013) en donde se asocia una presión límite resistente en kPa para cada tipología de las estructuras.

Tabla 9-8. Presión de falla según tipología de estructura.

Tipología	Presión Límite de la estructura (kPa)
F Construcciones simples	1
E Estructuras ligeras	5
D Estructuras con confinamiento deficiente	8
C Mampostería reforzada	11
B Edificaciones reforzadas	18
A Edificaciones con reforzamiento especial	20

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Por su parte, la carga lateral y la presión de los movimientos rápidos son función del cuadrado de la velocidad que desarrolla. Así, la presión puede aproximarse mediante la ecuación

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (9.5)$$

Donde

P es la presión de impacto (kPa).

ρ es la densidad de la masa movida (kg/m^3)

v es la velocidad (m/s).

La densidad de los residuos de las celdas evaluadas de acuerdo con los informes del operador es igual a 1,15 Ton/m³, mientras la velocidad ya se calculó en el capítulo 8. Tomándose la velocidad máxima se encuentra que

$$P = \frac{1}{2} * 1150 \frac{kg}{m^3} * \left(46,2 \frac{m}{s}\right)^2 = 1.227,3 \text{ kPa}$$

Dada la presión calculada se tienen una relación mayor a 1 y por ende un factor I_{f-pre} igual a 1 para la Planta de Biogás y las chimeneas.

Para determinar el parámetro I_{f-prof} se necesita la profundidad del deslizamiento potencial junto con la altura de la estructura. Como los deslizamientos ya ocurridos han tenido profundidades mayores a los 10 metros y ninguna edificación alcanza esa altura, se asigna un valor de 1,0.

Tabla 9-9. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura.

RELACIÓN PROFUNDIDAD DEL DESLIZAMIENTO/ ALTURA EDIFICACIÓN	I_{f-prof}
<0,2	0,10
0,2-0,4	0,30
0,4-0,6	0,50
0,6-0,8	0,70
0,8-1,0	0,90
≥1,0	1,00

Fuente: Adaptado de Ávila et al. (2016)

Aplicando los valores de los parámetros obtenidos en la ecuación 9.4 se obtiene:

$$I_{rap} = 1 - (1 - 1)(1 - 1) = 1$$

Siendo esta la intensidad calculada para la Planta de Biogás y las chimeneas.

El parámetro de intensidad de la amenaza para redes viales se define a partir del ancho de vía invadido u ocupado por la masa deslizada, de acuerdo con la ecuación (9.6). El ancho invadido se determinará a partir de la distancia de viaje

$$I_{dist} = \frac{L_p}{W_{aisl} + W_{efec}} \quad (9.6)$$

Donde:

L_p es la distancia de viaje medida desde la pata del talud.

W_{aisl} es el ancho de los elementos que se encuentran entre la calzada y la pata del talud, tales como bermas, andenes, zonas verdes, lotes vacíos, etc.

W_{efec} es el ancho de la calzada útil para el tránsito de vehículos.

Como las vías en Doña Juana que se encuentran dentro del rango del posible movimiento no cuentan con bermas o andenes y el ancho está en promedio sobre los 5 m, se le asigna un valor de intensidad de 1 debido a que la distancia de viaje desde la pata del talud supera varias veces al ancho de las vías.

Con los parámetros de intensidad y fragilidad obtenidos para cada uno de los elementos se calcularon los valores de la vulnerabilidad utilizando la ecuación 9.1. Los resultados se resumen en la tabla 9.10.

Tabla 9-10. Resumen resultados evaluación de vulnerabilidad.

Estructura/línea Vital	Fragilidad (S)	Intensidad (I)	Vulnerabilidad
Planta de Biogás	0,4	1,0	1,0
Chimeneas	1	1,0	1,0
Vías	0,6	1,0	1,0

Fuente: Propia

9.2.3 Daños esperados sobre los Elementos Expuestos

Las tablas 9-11 y 9-12 relacionan el valor de la vulnerabilidad con el nivel de daño esperado, y para el caso particular de este trabajo todos los elementos se encuentran en un nivel total de colapso ante un eventual deslizamiento en la zona estudiada.

Ante un hipotético evento de remoción en masa se perderían todas las vías de acceso a las celdas de disposición y se tendría que adecuar y construir una celda de contingencia. Los drenajes intermedios y las chimeneas se perderían en su totalidad por lo que la captación tanto de lixiviados y biogás disminuiría drásticamente, provocando un aumento súbito de la contaminación en el sector. Por último, la Planta de Biogás podría sufrir de una posible explosión en las antorchas de quema de gas, sopladores y generadores, sin sufrir de pérdidas humanas debido a que la planta está completamente automatizada.

Tabla 9-11. Clasificación de la vulnerabilidad para edificaciones y líneas vitales.

CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	VALOR DE VULNERABILIDAD	NIVEL DE DAÑO
ALTA	0,50-1,00	Total-colapso
MEDIA	0,10-0,50	Grave
BAJA	0,02-0,10	Moderado
	0,00-0,02	Leve

Fuente: Tomado de Ávila et al. (2016)

Tabla 9-12. Daños esperados para edificaciones y líneas vitales.

CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	EDIFICACIONES	RED VIAL	REDES DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	REDES ELÉCTRICAS Y DE TELECOMUNICACIONES
ALTA	Colapso parcial o total de la estructura. Rotura de muros. Destrucción total de acabados y accesorios.	Bloqueo total de la vía. Se afecta totalmente el tránsito de vehículos.	Rotura inminente de las tuberías. Interrupción del servicio. Es necesario reconstruir el tramo de la red.	Los postes son derribados o fragmentados. Las líneas de tensión se ven afectadas y se interrumpe el servicio.
MEDIA	Grietas anchas y profundas. Plastificación local de los elementos estructurales. Posible colapso de elementos no estructurales. Daños en los muros. Daño grave de acabados.	Parte del volumen deslizado reposa sobre la vía. Los vehículos pasan con dificultad.	Las tuberías se afectan e incluso se pueden romper. El servicio se ve disminuido. Es necesario reparar la red luego del evento.	Los postes son alcanzados por la masa deslizada, induciendo desplazamientos o inclinaciones en los postes sin comprometer las líneas de tensión y sin interrumpir el servicio.
BAJA	Grietas grandes y profundas. Daños graves en elementos no estructurales. Quiebre de ventanas. Entrada de material a la edificación. Daños en pisos. Grietas pequeñas. Despegues de pequeños pedazos de pañete, despegue de algunos ladrillos.	No existe material sobre la vía o el material que alcanzó la vía es fácilmente evadible por los vehículos.	Las tuberías se desplazan levemente, sin sufrir daños y sin afectar el servicio.	Los postes no son alcanzados por la masa del deslizamiento o son alcanzados con una energía de impacto baja que no les induce desplazamientos o daños.

Fuente: Tomado de Ávila et al. (2016)

9.2.4 Zonificación de vulnerabilidad

La zonificación de la vulnerabilidad se presenta en la figura 9-8. Se destaca que todos los elementos cuentan con una vulnerabilidad alta. Esto se debe a que la intensidad del posible evento amenazante es bastante alta. Toda la infraestructura disponible para el funcionamiento del relleno sanitario Doña Juana en la zona de estudio se encuentra muy vulnerable, y en particular las chimeneas que tienen una fragilidad elevada y se distribuyen por todo el polígono de análisis.

Las vías cuentan con una vulnerabilidad alta dado su muy baja anchura, además de no contar con bermas. Estas son las arterias para el funcionamiento de Doña Juana, permitiendo la entrada y salida de los vehículos recolectores. Un colapso de estas vías imposibilitaría que se realice la disposición de los residuos en la celda actual y como se menciona en capítulos anteriores no se cuenta con otro sitio de disponible en la ciudad para recibir tal magnitud de residuos.

En cuanto a la Planta de Biogás, esta tiene una vulnerabilidad alta en las antorchas y sopladores, elementos más cercanos al talud del posible evento amenazante (véase figura 9-9). De acuerdo con las distancias de viajes calculadas, un posible evento amenazante llegaría hasta la base de las antorchas quemadoras del Biogás involucrando también los equipos sopladores los cuales inyectan el gas para su quema en las antorchas, y de materializarse un deslizamiento se generaría una explosión y posterior incendio en el lugar.

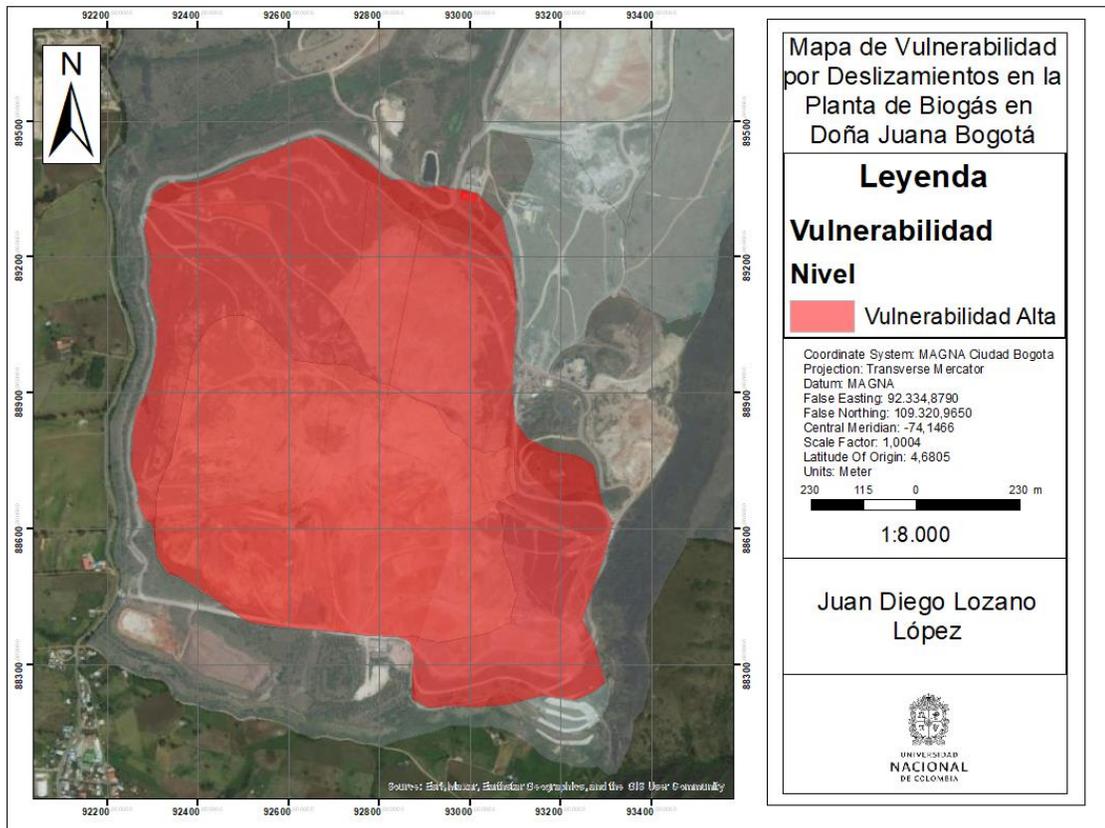


Figura 9-8. Mapa de Vulnerabilidad de la zona de estudio.
Fuente: Propia

El coste de la relocalización de la Planta de Biogás no sería tan elevado debido a que no se tendría que movilizar toda la planta sino una parte de ella, reubicando solamente los sopladores y las antorchas de quema de Biogás. Igualmente, para la disminución de la amenaza puede existir un mejoramiento en las chimeneas para que se disminuya la presión de manera efectiva o algún proceso de estabilización del talud cercano a la planta.

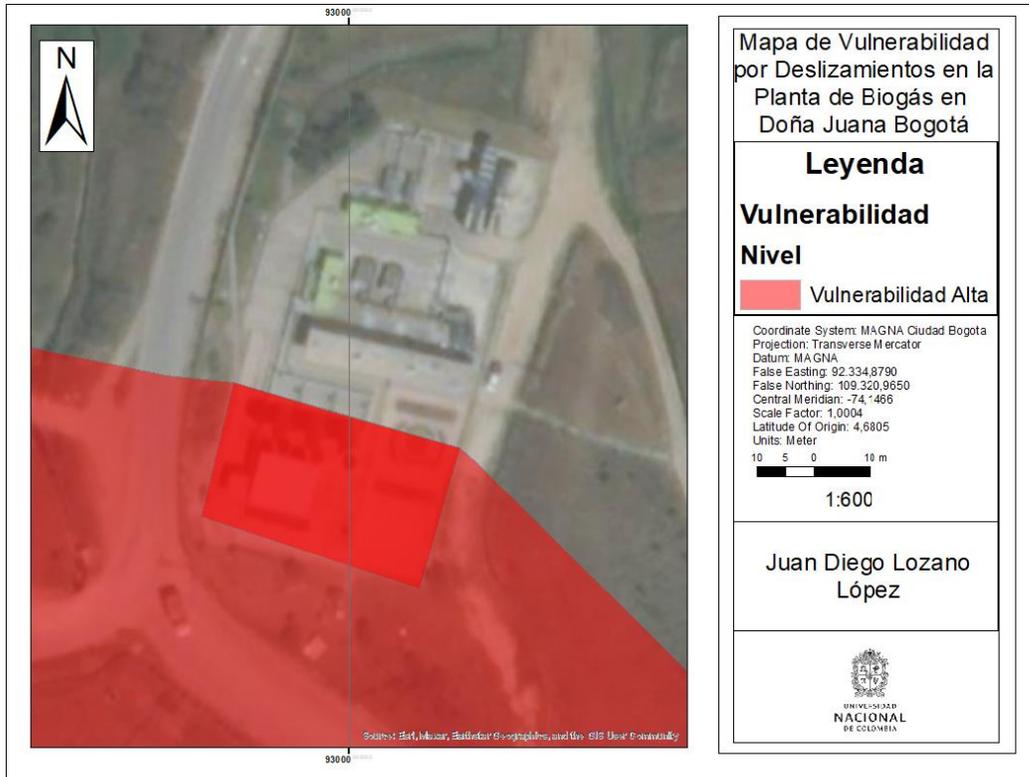


Figura 9-9. Vulnerabilidad por deslizamiento en la Planta de Biogás en Doña Juana
Fuente: Propia

10. Evaluación y Cálculo del Riesgo.

10.1 Evaluación y zonificación del riesgo

La evaluación del riesgo partió de los resultados de los análisis de la amenaza y vulnerabilidad de la zona de estudio mediante la superposición de los mapas de vulnerabilidad y riesgo. Se aplica el criterio de la tabla 10-1 y se zonifica el riesgo

Tabla 10-1. Criterio de evaluación de riesgo.

EVALUACIÓN DEL RIESGO			
VULNERABILIDAD	AMENAZA		
	ALTA	MEDIA	BAJA
ALTA	Alto	Alto	Medio
MEDIA	Alto	Medio	Bajo
BAJA	Medio	Bajo	Bajo

Fuente: Tomado de (Ríos, 2022)

La figura 10-1 muestra el mapa de riesgo obtenido al superponer los mapas de amenaza y vulnerabilidad y aplicando el criterio de la tabla 10-1.

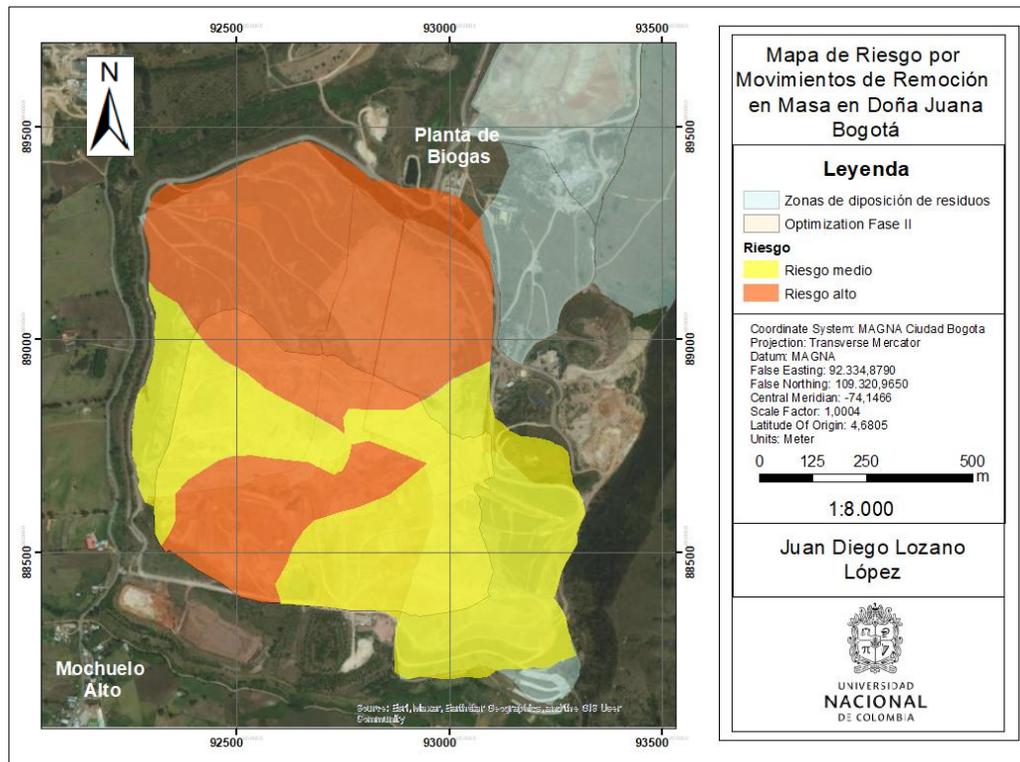


Figura 10-1. Zonificación del Riesgo por procesos de remoción en masa en la zona de estudio. Fuente: Propia

Se observa que en el talud norte de la zona evaluada todas las estructuras que hacen parte de la operación (vías, chimeneas) se encuentran en un riesgo alto, al igual que la sección de la Planta de Tratamiento de Biogás donde se encuentran los sopladores y las antorchas quemadoras del Biogás. Existe otra franja con riesgo alto en la zona denominada Optimización Fase II la cual es la zona de operación al momento del estudio, donde se tienen zonas de amenaza media debido a que en este sector se registran las mayores presiones de poro de los residuos sólidos.

10.2 Alternativas para la Disminución de las Condiciones de Riesgo.

Las condiciones evaluadas, en conjunto con la metodología aplicada, han revelado niveles elevados de riesgo de deslizamientos en diversos sectores de la zona de estudio. Según la categorización del riesgo y su tolerancia, tal como lo establece Ávila et al. (2016), un nivel de riesgo alto resulta inaceptable, por lo que se hace imperativo buscar alternativas para su reducción. En contraste, para niveles de riesgo intermedios, la tolerancia puede ser más aceptable, aunque aún es necesario tomar medidas adecuadas para su gestión.

Tabla 10-2. Categorización del Riesgo de Bienes Físicos

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
ALTO	Riesgo inaceptable. Es necesaria la ejecución de investigaciones detalladas, planeación e implementación de medidas para reducir el riesgo. Las medidas de intervención estructural pueden ser dispendiosas y poco prácticas; además, pueden ser más costosas que el valor mismo de la propiedad.
MEDIO	Puede tolerarse en ciertas circunstancias (de acuerdo con la regulación estatal), pero requiere investigación y planeación detallada para evitar que aumente. Las medidas para reducir el riesgo son viables económicamente.
BAJO	Usualmente aceptable para los tomadores de decisiones. Se requiere mantenimiento normal de taludes y laderas.

Fuente: Adaptado de (Ávila et al., 2016)

Al examinar detenidamente los resultados, se concluye que, en el caso de la infraestructura vital para el funcionamiento de Doña Juana, como las chimeneas y las vías, la vulnerabilidad emerge como el parámetro más determinante, presentando valores significativamente altos.

Según la figura 9-3, las chimeneas deberían contar con cierta protección, que, en la realidad no se cumple. Asumiendo que se garantizará la implementación de gaviones de protección en todas las chimeneas, la fragilidad persistiría en niveles relativamente altos. Reportes de la interventoría indican que algunas chimeneas, incluso con gaviones, no mantienen una integridad completa hasta la base (UT INTER DJ, 2021).

En este trabajo, se propone reducir la fragilidad de las chimeneas, centrándose en dos aspectos. En primer lugar, se sugiere cambiar el material utilizado; a pesar de que el polietileno de alta densidad es útil en rellenos sanitarios, el relleno sanitario Doña Juana es uno de los más grandes del mundo y recibe más de 6000 toneladas diarias de residuos², experimentando una carga significativa la cual se ejerce sobre las chimeneas. Utilizar tuberías de concreto proporcionaría mayor robustez a la estructura, disminuyendo su fragilidad. Este tipo de tuberías ya se implementa en otros rellenos sanitarios y se encuentra en algunos manuales de diseño, como se observa en la figura 10-2. En segundo lugar, se propone mejorar la robustez de la protección con material tipo rajón; en la figura 10-3 se presenta un diseño con mayor anchura hacia la base de la chimenea, otorgándole mayor esbeltez a la estructura y evitando aplastamientos a ciertas profundidades.

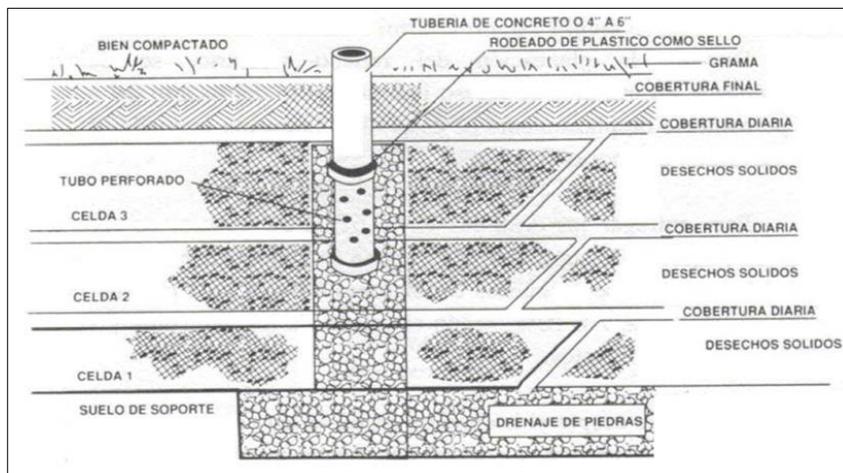


Figura 10-2. Chimenea con tubería de concreto.

Fuente: Tomado de Roben (2002)

² Frank Molano Camargo, «El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá: la producción política de un paisaje tóxico, 1988-2019», *Historia Crítica*, 74 | 2019, 127-149. (Molano Camargo, 2019)

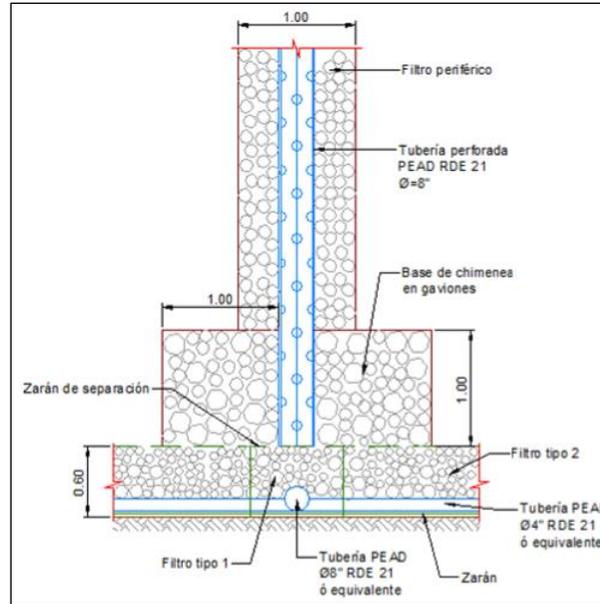


Figura 10-3. Esquema de chimenea con una mayor protección hacia la base.
Fuente: Tomado de: (P&K S.A.S. E.S.P, 2019)

Este refuerzo en las chimeneas no solamente disminuiría la fragilidad de estas estructuras, sino que contribuiría a que se disminuyan las presiones de poro y se tenga un menor valor de R_u , lo que a su vez se implicaría un menor índice de amenaza al obtener factores de seguridad más bajos. Lo anterior teniendo en cuenta que, las chimeneas sirven como puntos de extracción de gas y lixiviado, y particularmente en Doña Juana donde por el deslizamiento del 2015 y manejos ineficientes del operador, se taponaron las redes de drenaje de fondo lo que conllevó a que se implementara un sistema de extracción forzada mediante bombeo en ciertas chimeneas para la evacuación de lixiviados.

Por otro lado, la Planta de tratamiento de Biogás tiene un factor de fragilidad relativamente bajo de 0,4 (véase tabla 9-10). Sin embargo, tiene una vulnerabilidad alta debido al elevado valor de la intensidad del posible evento amenazante. Esta vulnerabilidad no afecta a toda la planta, sino solamente a los sopladores y las antorchas (véase figura 9-8), haciendo que no sea tan costosa una reubicación de estos elementos y que se disminuya el riesgo de la planta. Una posible explosión de estos componentes por un deslizamiento de residuos representaría la pérdida total de estos equipos e inutilizaría completamente la planta.

11. Conclusiones

Los aspectos principales que se pudieron concluir durante el desarrollo del trabajo y en cumplimiento con los objetivos inicialmente planteados son:

- a) El relleno sanitario Doña Juana es vital para la prestación del servicio público de aseo de Bogotá, al ser el único sitio para disponer la cantidad de residuos que genera la ciudad. Si bien ha contado con varias celdas de disposición de residuos, este no es infinito y actualmente se está optimizando el espacio disponiendo residuos nuevos sobre más viejos. Esta característica puede generar riesgos de deslizamientos de residuos y se concluye que una evaluación de los riesgos por fenómenos de remoción en masa es importante para rellenos sanitarios.
- b) La evaluación de los deslizamientos históricos en Doña Juana permite concluir en primera instancia que la presión de poro generada por los lixiviados y gases junto con la geometría de los taludes de los residuos es la causa principal de los deslizamientos ocurridos en Doña Juana. Esto en gran medida se debe al porcentaje elevado de materia orgánica que contienen los Residuos Sólidos Urbanos, además de las deficiencias en el sistema de extracción de lixiviados debido a que en Doña Juana funciona un sistema de extracción forzada mediante bombeo.
- c) Los parámetros de resistencia de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) varían con la profundidad y por ende varían con la edad. La fricción tiende a disminuir con la profundidad, caso contrario con la cohesión, concordando con lo encontrado en otras investigaciones. Con este comportamiento fue posible realizar una discretización de las masas de los residuos en profundidad y la modelización de capas equidistantes con propiedades geotécnicas que sirvieron para construir los modelos en tres dimensiones.
- d) Los análisis de sensibilidad calculados sobre los factores de seguridad permiten definir que la fricción y el parámetro R_u (presión de poros) son los valores más influyentes. Siendo directamente proporcional el ángulo de fricción mientras el R_u es inversamente proporcional. Al disminuir los valores de fricción con la profundidad y por ende la edad se puede concluir que el factor de seguridad tiende a disminuir con la edad de los residuos.
- e) La geometría de los taludes de los RSU encontrados en Doña Juana no tiene una relación clara con el factor de seguridad. Esto se debe a que, en el momento de la

investigación no existía una amplia variedad de pendientes de taludes en la zona evaluada, y en su mayoría tenían valores bajos.

- f) Al ser la presión el valor más influyente para determinar el valor del factor de seguridad, este determina el nivel de amenaza por deslizamiento en los residuos y para el caso particular en Doña Juana, los niveles más elevados se tienen en la zona actual de operación denominada Optimización Fase II y sobre el talud norte de la zona estudiada.
- g) Toda la infraestructura de la operación del relleno sanitario Doña Juana se encuentra en una vulnerabilidad alta, debido a la intensidad del potencial evento amenazante. El potencial volumen deslizante puede inhabilitar e inutilizar todos los elementos evaluados incluida la planta de tratamiento de Biogás.
- h) La zona evaluada tiene áreas de riesgo alto, específicamente la zona norte de la zona evaluada y la zona actual de operación. El nivel inaceptable de riesgo de la parte norte supone que, una sección de la planta de tratamiento de biogás pueda verse fuertemente afectada por un deslizamiento, provocando una explosión. Esto puede verse acompañado de la pérdida de todas las estructuras como chimeneas y vías que sirven para la operación del relleno sanitario. Igualmente, esta pérdida de bienes físicos puede darse en las zonas de riesgo medio que representan la parte occidental y suroriental del área de estudio.
- i) Las chimeneas son el corazón de la operación y uno de los puntos álgidos para la disminución del riesgo. Estas, al ser parte de la infraestructura que puede perderse se encuentran en vulnerabilidad muy alta, pero a su vez influyen en la disminución del nivel de amenaza al influir en la presencia de lixiviados y gases que disminuyen los esfuerzos efectivos y los factores de seguridad.
- j) La Planta de Biogás es muy vulnerable a un posible evento de deslizamiento. No obstante, esta puede reducirse al reubicar solo una parte de su infraestructura, más exactamente las antorchas y los soplores que pueden ser reubicados más al norte, alejados del talud amenazante.

12. Recomendaciones

Al ser la presión de poros un parámetro crítico para la generación de deslizamientos, se recomienda un estricto control y disminución de este valor, con más puntos de extracción de bombeo, y construcción de drenajes intermedios de lixiviado. El control de este parámetro puede mejorar al implementar un sistema de automatización de los piezómetros instalados, dando paso a un seguimiento en tiempo real. Por otra parte, se podría evaluar el comportamiento de la presión de poros en los residuos al ocurrir un sismo.

Otro parámetro crítico es la fricción de los residuos, cuyos cambios con el tiempo pueden influir en variaciones significativas en el factor de seguridad. Se recomienda que se realicen las compactaciones de los residuos de manera eficaz para que el cambio de la fricción sea mínimo con el tiempo.

Las chimeneas deben contar con al menos la protección de diseño, lo que implica que se instale material tipo rajón en toda la altura de la estructura. Adicionalmente, se recomienda realizar sondeos permanentes en las chimeneas, para realzar y adecuar aquellas cuya profundidad no sea de al menos un 70 % de lo esperado (hasta el fondo de la adecuación de la celda de residuos).

Si bien se modeló el comportamiento de los residuos con la profundidad, es pertinente desarrollar metodologías adecuadas para las estimaciones de los pesos unitarios de los residuos para diferentes niveles de compactación. Es recomendable llevar al laboratorio muestras y realizar una curva de variación entre las densidades y el esfuerzo de confinamiento de los residuos. Lo anterior principalmente por dos razones, la variación de los pesos unitarios cambia con la profundidad y la compactación, pero a su vez con la edad por la biodegradación de los residuos, debido a esto estos cambios en los pesos unitarios no fueron tenidos en cuenta en las modelaciones, aunque es clara su influencia. El segundo motivo es para incluir estas variaciones del peso unitario en el cálculo del parámetro R_u .

Se recomienda realizar una investigación detallada de cuáles son los factores o parámetros que más influyen en el aumento de presión de poros en el relleno sanitario Doña Juana,

ya sea coberturas diarias en las celdas, caudales de lixiviado bombeado y volúmenes del biogás captado.

Se recomienda realizar ensayos de resistencia sobre muestras compactadas en laboratorio con el fin de obtener directamente parámetros de resistencia de los residuos sólidos y modelar las secciones de análisis de manera más precisa. Dichos ensayos pueden ser ensayos triaxiales estáticos CU, en muestras con diámetro mínimo de 150mm.

Bibliografía

- Abreu, A. E. S., & Vilar, O. M. (2017). Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. *Waste Management*, 68, 263–274.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.05.038>
- Ávila, G., Cubillos, C., Granados, A., Medina, E., Rodríguez, E., Rodríguez, C., & Ruiz, G. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano.
<https://doi.org/10.32685/9789589952856>
- Baecher, G., & Christian, J. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*.
- Bonaparte, R. (2020, January). Geotechnical Stability of Waste Fills- Lessons learned and Continuing Challenge. *Webinar to Fabricated Geomembrane Institute*.
- Caicedo. (2021). Desigualdad espacial y conflictos territoriales en Bogotá: el caso del botadero Gibraltar (1979 - 2015). *Geográfica Digital*, 18(35), 15.
<https://doi.org/10.30972/geo.18355131>
- Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L., & Soler, N. (2002, January). *The landslide of Dona Juana Landfill in Bogota. A Case Study*. Conference: Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics (4th ICEG).
https://www.researchgate.net/publication/274194377_the_landslide_of_Dona_Juana_Landfill_in_Bogota_A_Case_Study
- Catanzariti, F. (2016, June 13). *Estabilidad de taludes*.
<https://www.geostru.eu/es/blog/2016/06/13/Estabilidad-de-Taludes/>.
- Cepeda, J., Quan, B., & Nadim, F. (2013). *Assessment of landslide run-out by Monte Carlo simulations*.
- CGR. (2015). *Informe Mensual de Operación (Octubre de 2015) (Sociedad Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. ESP)*.

- CGR. (2020). *INFORME DESCRIPTIVO DESLIZAMIENTO 28 DE ABRIL DE 2020 (Sociedad Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. ESP)*.
- CGR. (2023). *Informe mensual de operación (Octubre 2023) (Sociedad Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. ESP)*.
- CGR, Bello, G., & Niño, C. (2023). *ANÁLISIS GEOTÉCNICO – DOMO PARCIAL TERRAZA 1A Y TERRAZA 1B (Sociedad Centro de Gerenciamiento de Residuos Doña Juana S.A. ESP)*.
- Chaves, D. (2016). *Caracterización y zonificación sismogeotécnica de 700 Ha en la zona rural del Nor Occidente del Municipio de Barrancabermeja*.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58967>
- Collazos, H. (1998). *Deslizamiento de Basura en el Relleno Sanitario Doña Juana*. CEPIS (https://Rds.Org.Co/Apc-Aa-Files/Ba03645a7c069b5ed406f13122a61c07/Deslizamiento_relleno_sanitario_do_a_juana.Pdf).
- Correa, C., Jucá, J. F., & Motta, E. (2015). The influence of soft plastic in shear strength analysis of municipal solid waste. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 20(3), 427–436.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000125006>
- Daciolo, L. V. P. (2020). *Parâmetros de resistência de RSU: abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos*.
<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12886>
- Daciolo, L. V. P., Correia, N. de S., & Boscov, M. E. G. (2022). Extensive database of MSW shear strength parameters obtained from laboratorial direct shear tests: Proposal for data classification. *Waste Management*, 140, 245–259.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.015>
- Dias Cardim, R. (2008). *ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES*.
- Díaz, Jaime., Iguarán, Juan., Larrahondo, Joan., & Jaramillo, L. A. (2016). *Shear Strength of Municipal Solid Waste (MSW): Beyond the Raw Values of “Cohesion” and Friction Angles*. 264–274. <https://doi.org/10.1061/9780784480144.026>
- Diosa, D. C. (2016). *Comportamiento geotécnico de los taludes conformados por residuos sólidos en rellenos sanitarios*.
<https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/5151>
- Du J, Yin K, Nadim F, & Lacasse S. (2013). *Quantitative vulnerability estimation for individual landslides Estimation quantitative de la vulnérabilité aux glissements de terrain*.

- Eid, H. T., Stark, T. D., Evans, W. D., & Sherry, P. E. (2000). Municipal Solid Waste Slope Failure. I: Waste and Foundation Soil Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 397–407.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:5\(397\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397))
- Garrick, L. E. (2004). A historical context of municipal solid waste management in the United States. *Waste Management & Research : The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 22(4), 306–322.
<https://doi.org/10.1177/0734242X04045425>
- González, A. (2016). *Relleno Sanitario Doña Juana- Deslizamiento 2 de octubre de 2015 Estimación preliminar de Estabilidad y de posibles causas.*
- González, A. (2021). *Falla del relleno sanitario Doña Juana de Bogotá D.C en 1997 YouTube.* <https://www.youtube.com/watch?v=j0M5J1Izuwc>
- González, & Espinosa (a). (2003). Las Basuras Acumuladas como Material Geotécnico. . *Boletín Colombiano de Geotecnia.*
- González, & Espinosa (b). (2003). Presión de poros y Resistencia al Cortante en el Relleno Sanitario Doña Juana- Bogotá Colombia. *Boletín Colombiano de Geotecnia.*
- González, & Espinosa (c). (2003). *La falla Catastrófica del Relleno Sanitario Doña Juana en 1998 – Bogotá – Colombia.*
- Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering.*
- Hungr, Corominas, & Eberhardt. (2005). State of the Art Paper # 4. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *Landslides Risk Management.*
- Jahanfar, Amirmojahedi, M., Gharabaghi, B., Dubey, B., McBean, E., & Kumar, D. (2017). A novel risk assessment method for landfill slope failure: Case study application for Bhalswa Dumpsite, India. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 35(3), 220–227.
<https://doi.org/10.1177/0734242X16686412>
- Jahanfar, M. A. (2014). *Landfill Slope Stability Risk Assessment [A Thesis Presented In partial fulfilment of requirements for the degree of Master of Applied Science].* University of Guelph.
- Kavazanjian, E., Matasovic, N., Bonaparte, R., & Schmertmann, G. (1995). *Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis.*
https://www.researchgate.net/publication/279854270_Evaluation_of_MSW_Properties_for_Seismic_Analysis
- 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>
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Electric Power Research Institute.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125–134.
<https://doi.org/10.1007/S10346-009-0190-3/METRICS>
- Liu, C.-N. (2008). Landslide Hazard Mapping Using Monte Carlo Simulation- a Case Study in Taiwan. In *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation* (pp. 189–194). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-79846-0_14
- Martins, H. L. (2006). *AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM EQUIPAMENTO DE GRANDES DIMENSÕES* [Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.]. Universidad e Federal de Minas Gerais.
- Molano Camargo, F. (2019). El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá: la producción política de un paisaje tóxico, 1988-2019. *Historia Crítica*, 74, 127–149.
<https://doi.org/10.7440/histcrit74.2019.06>
- Moreno, J. M. (2001). Fotointerpretación y dinámica del deslizamiento en el relleno sanitario de doña juana, bogotá – colombia. *J.M.*, 26(26), 153–175.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/42095>
- Ojuri, O. O., & Adegoke, P. K. (2015). Geotechnical characteristics of synthetic municipal solid waste for effective landfill design. *International Journal of GEOMATE*, 9(1), 1418–1427. <https://doi.org/10.21660/2015.17.4335>
- Ordoñez, C., & Villarraga, M. (2007). *Resistencia al corte de residuos sólidos urbanos: estado del arte* | *Revista Politécnica*.
<https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/79>
- Peres, D. J., & Cancelliere, A. (2016). Estimating return period of landslide triggering by Monte Carlo simulation. *Journal of Hydrology*, 541, 256–271.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.036>
- Pérez, R. (n.d.). *El Método Monte Carlo. Estimación del Valor de Pi.* – GeoGebra. Retrieved January 5, 2024, from <https://www.geogebra.org/m/cF7RwK3H>
- P&K S.A.S. E.S.P. (2019). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTUDIOS Y DISEÑOS DE DETALLE I-2775-RSBL-ET-01-Rev4*. RELLENO SANITARIO BLUE LIZARD DEL

ARCHIPIÉLAGO DE PROVIDENCIA - EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA P&K S.A.S. E.S.P.

- Quiroz, R. (2014, July 16). *Evaluación y Recomendaciones para mejorar el Rendimiento de los Sistemas de Contención de Residuos*. <https://Gidahatari.Com/lh-Es/Evaluacion-y-Recomendaciones-Para-Mejorar-El-Rendimiento-de-Los-Sistemas-de-Contencion-de-Residuos>.
- Ramaiah, B. J., Ramana, G. V., & Datta, M. (2017). Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. *Waste Management*, 68, 275–291. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.05.055>
- Ramos, P. (2020, May 8). Una tecnología equivocada, el problema del Relleno Sanitario Doña Juana. . *Periódico Universidad Nacional de Colombia*. .
- Reddy, K. R., Gangathulasi, J., Parakalla, N. S., Hettiarachchi, H., Bogner, J. E., & Lagier, T. (2009). Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. *Waste Management and Research*, 27(6), 578–587. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103825>
- Rincón, D. (2020, April 29). Relleno Doña Juana, la historia de un vecino incómodo y peligroso. *El Tiempo*.
- Ríos, D. (2022). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TRES METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS, EN LA LADERA NORTE DEL AEROPUERTO DE PEREIRA* [Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería - Geotecnia]. Universidad Nacional de Colombia.
- Roben, E. (2002). *Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales*. DED/ Ilustre Municipalidad de Loja. https://Www.Academia.Edu/37618492/Dise%C3%B1o_Construcci%C3%B3n_Operaci%C3%B3n_y_Cierre_de_Rellenos_Sanitarios_Municipales.
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — An update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/CGJ-2016-0044>
- Rodriguez, Y. (2020). *Afectación al derecho a un ambiente sano de los habitantes del barrio Mochuelo Bajo de la localidad de Ciudad Bolívar en Bogotá por su cercanía al relleno sanitario Doña Juana* [Trabajo de Investigación para optar al título de Magíster en Ciudadanía y Derechos Humanos]. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Sanhueza, C., & Rodríguez, L. (2013). Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de La Construcción*, 12(1), 17–29. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>
- Shariatmadari, N., Asadi, M., & Karimpour-Fard, M. (2017). Investigation of fiber effect on the mechanical behavior of municipal solid waste by different shearing test apparatuses. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(10), 2239–2248. <https://doi.org/10.1007/S13762-017-1297-Z>
- Tapia, G. (2019). *Estudio del comportamiento de una presa de tierra en condiciones de desembalse rápido mediante modelación numérica en 3D, Caso: presa Mancilla, Municipio de Facatativá*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76597>
- UAESP, UT INTER DJ, & Saicon Ingenieria SAS. (2023). *Report 3. Addition 9. Contract 130E - 2011*.
- UT INTER DJ. (2018). *Informe Mensual de Interventoría Julio de 2018*.
- UT INTER DJ. (2021). *Informe Mensual de Interventoría Abril 2021*.
- UT INTER DJ. (2023). *Informe mensual de Interventoría Noviembre 2023*.
- Yepes, J. (2015). *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera* [Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Geotécnica]. Universidad Nacional de Colombia.
- Zekkos (Zeccos), D. P. (2005). *Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid-Waste*. <http://waste.geoengineer.org>
- Zhan, T. L. T., Chen, Y. M., & Ling, W. A. (2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering Geology*, 97(3–4), 97–111. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2007.11.006>
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M., & Mori, J. (2003). Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology*, 68(3–4), 373–386. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00241-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00241-7)

ANEXOS

ANEXO A. REGISTRO Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE PIEZOCONO CPT_u

ANEXO B. GRÁFICAS DE SENSIBILIDAD DEL FACTOR DE SEGURIDAD