

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELO DE FLUJO PARA DETERMINAR EL
COMPORTAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS Y GASES
GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO PARQUE
ECOINDUSTRIAL MIRAMAR.

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del
Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil para
optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería
Geotécnica.

WILLIAM ALONSO POVEDA MONTOYA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

Dedicatoria y agradecimientos

Deseo dedicar este trabajo a mi familia que ha sido un apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, han creído y motivado siempre para mejorar y crecer. Definitivamente son mi principal motivación para lograr muchas de las cosas que me he propuesto en la vida.

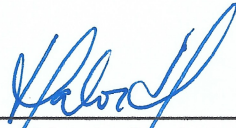
Deseo agradecer al profesor Dr. Rafael Baltodano Goulding por compartir conmigo todo su conocimiento y experiencia de manera incondicional siempre que así lo necesité. Su valioso acompañamiento en este proceso ha sido vital para la ejecución de este y otros proyectos que hemos desarrollado. Espero poder seguir compartiendo por mucho tiempo de manera que pueda seguir aprendiendo de tan valiosa persona.

Agradezco a los profesores que me han asesorado en este proceso, Dr. William Vargas Monge y Dr. Alberto Serrano Pacheco ya que siempre me atendieron y me brindaron su asesoría de forma muy atenta, motivándome a seguir con el trabajo realizado. También reconozco el valioso aporte de la ingeniera Marcia Cordero Sandí, quien estuvo pendiente del avance de esta investigación colaborando para poder finalizar el proyecto.

Debo reconocer toda la ayuda brindada por parte de la ingeniera Paola Vidal y de Dagoberto Oviedo del laboratorio de Ingeniería Ambiental ya que me abrieron las puertas de dicho laboratorio y me asesoraron en la ejecución de las pruebas requeridas. De igual manera al personal del Relleno Sanitario de Miramar por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones.

Por último, debo agradecer a mis compañeros de la Escuela de Ingeniería en Construcción y del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción por su apoyo y paciencia en esta etapa. Han sido fundamentales en mi carrera profesional para alcanzar los distintos objetivos propuestos.

Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado
en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para
optar al grado y título de Maestría Académica en
Ingeniería Geotécnica



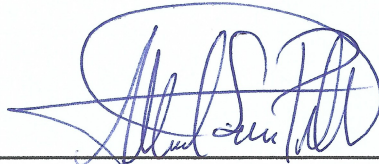
Mag. Marcia Cordero Sandí
Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado



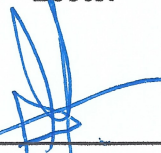
Dr. Rafael Baltodano Goulding
Profesor Guía



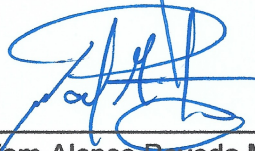
PhD. William Vargas Monge
Lector



PhD. Alberto Serrano Pacheco
Lector



MSc Oscar Calvo Carranza
Representante del Director Programa de Posgrado en Ingeniería Civil



William Alonso Poveda Montoya
Sustentante

Contenido

Portada.....	i
Dedicatoria y agradecimientos.....	ii
Hoja de aprobación.....	iii
Contenido.....	iv
Resumen.....	viii
Índice de figuras.....	ix
Índice de cuadros.....	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Título.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General:.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	5
1.4 Delimitación del estudio.....	6
1.4.1 Alcance.....	6
1.4.2 Limitaciones.....	7
Capítulo 2. Marco Teórico	9
2.1 Geotecnia Ambiental.....	9
2.2 Relleno sanitario.....	10
2.2.1 Características de sitios para construcción de rellenos sanitarios.....	12
2.2.2 Construcción de una celda.....	13
2.2.3 Tratamiento de los desechos	14
2.3 Caracterización de los materiales del relleno.....	19
2.3.1 Propiedades físicas de los materiales de un relleno sanitario.....	19
2.3.2 Propiedades hidráulicas de los materiales de un relleno sanitario.....	21

2.4	Balance hídrico.....	27
2.5	Modelo de flujo.....	31
Capítulo 3. Metodología		39
3.1	Caracterización de los materiales.....	40
3.2	Determinación de las propiedades físicas de las muestras.....	41
3.2.1	Contenido de humedad.....	41
3.2.2	Contenido de material orgánico.....	41
3.2.3	Límites de Atterberg.....	42
3.2.4	Análisis granulométrico	42
3.2.5	Gravedad específica	42
3.3	Determinación de las propiedades hidráulicas de las muestras	43
3.3.1	Permeabilidad.....	43
3.3.2	Succión del suelo.....	44
3.3.3	Curva característica del suelo	46
3.4	Balance hídrico.....	49
3.5	Modelo de flujo.....	54
Capítulo 4. Resultados		55
4.1	Muestreo de materiales.....	56
4.2	Determinación de las propiedades físicas.....	59
4.2.1	Contenido de humedad de las muestras	59
4.2.2	Contenido de orgánicos de las muestras.	60
4.2.3	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	63
4.2.4	Análisis granulométrico de los materiales muestreados	72
4.2.5	Gravedad específica de suelos	82
4.3	Determinación de las propiedades hidráulicas	83
4.3.1	Conductividad hidráulica de los materiales analizados.....	83
4.3.2	Curva característica suelo agua	95

4.4	Balance hídrico.....	110
4.4.1	Resumen de datos anuales.....	113
4.4.2	Pico diario durante periodo de simulación.....	113
4.4.3	Análisis de sensibilidad.....	114
4.4.4	Validación de los resultados.....	115
4.5	Modelo de flujo.....	118
4.5.1	Modelo de flujo estacionario.....	119
4.5.2	Modelo de flujo transitorio.....	121
Capítulo 5. Análisis de resultados.....		122
5.1	Operación del relleno sanitario y muestreo de materiales.....	122
5.2	Propiedades físicas de las muestras analizadas.....	125
5.2.1	Contenido de humedad.....	125
5.2.2	Contenido de material orgánico.....	127
5.2.3	Determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.....	128
5.2.4	Análisis granulométrico de los materiales muestreados.....	130
5.2.5	Gravedad específica.....	132
5.3	Propiedades hidráulicas de las muestras analizadas.....	134
5.3.1	Conductividad hidráulica.....	135
5.3.2	Curva característica suelo agua.....	142
5.4	Balance hídrico.....	144
5.5	Modelo de flujo.....	146
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....		148
6.1	Conclusiones.....	148
6.2	Recomendaciones.....	152
Referencias.....		154
Apéndices.....		158

Apéndice 1. Contenido de humedad de los materiales muestreados	158
Apéndice 2. Contenido de orgánicos de los materiales muestreados	158
Apéndice 3. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	159
Apéndice 4. Análisis granulométrico.....	163
Apéndice 5. Determinación de la conductividad hidráulica.	167
Apéndice 6. Resultados de calibración de papel de filtro.....	170
Apéndice 7. Propiedades de suelos utilizados para determinar curvas características.	171
Apéndice 8. Resultados de succión de papel de filtro en suelos analizados.	173
Apéndice 9. Datos para análisis de sensibilidad de balance hídrico.	175
Apéndice 10. Detalle de datos recopilados de conductividad hidráulica vs densidad seca.	176
Apéndice 11. Resultados de análisis fractal para permeabilidad de los materiales analizados	177
Apéndice 12. Cálculos de balance hídrico mediante la implementación de ecuaciones.....	178
Apéndice 13. Perfiles utilizados para el modelo de flujo.....	179
Apéndice 14. Resultados del modelo de flujo para relleno sanitario de Miramar.	181
Anexos	194
Anexo 1. Características de materiales preestablecidos en el modelo HELP	194
Anexo 2. Levantamiento topográfico de relleno sanitario	196

Resumen

Para la realización de este trabajo se seleccionó el relleno sanitario de Miramar como punto de estudio. En dicho sitio se seleccionaron varios puntos donde se realizaron muestreos de los desechos. Para asegurar que las muestras obtenidas fueran de distintas edades, se varió la profundidad de obtención de la muestra para lo cual fue utilizada maquinaria pesada. Adicionalmente se muestreó el suelo utilizado como material de cobertura al cual se le aplicaron los mismos análisis de laboratorio que a los desechos.

Las muestras fueron analizadas mediante ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades físicas e hidráulicas (saturadas y no saturadas). Los resultados de los análisis de laboratorio fueron utilizados para la construcción del modelo de flujo subterráneo. Para la construcción del modelo de flujo, además de los resultados de los análisis de laboratorio, se utilizó información de campo como por ejemplo los levantamientos topográficos de las celdas.

Adicionalmente, para la construcción del modelo de flujo subterráneo, se requirió realizar un balance hídrico de la celda de manera que se determinó, a partir de los datos de precipitación, la cantidad de agua que infiltró a la celda, la cantidad de agua evaporada por efecto de la temperatura ambiental y la cantidad de agua que se infiltró al interior de la celda. Estos valores de infiltración se ingresaron al modelo de flujo para determinar el comportamiento del lixiviado a lo interno de la celda.

Se construyó un modelo de flujo estacionario con datos anuales de manera que se logró estimar el volumen de lixiviado generado en el tiempo de análisis definido. Estos datos se compararon con los valores de campo, los del balance hídrico y con los de otro modelo empírico con el fin de realizar una validación de estos. Adicionalmente se realizó un modelo de flujo transitorio considerando diferentes niveles de lixiviado y un evento de precipitación extraordinario. Este análisis permitió conocer el comportamiento interno de la celda ante este tipo de eventos de manera que se conoce cómo se satura el medio y otros valores como las presiones internas dentro de la celda.

Palabras clave: Relleno sanitario, desechos, medio poroso no saturado, balance hídrico, lixiviado, modelo de flujo.

Índice de figuras.

Figura 1. Esquema de celda de rellenos sanitarios	11
Figura 2. Composición de los desechos tratados en (a) países de altos ingresos económicos y (b) países de bajos ingresos económicos.....	12
Figura 3. Incremento en la recolección de gas debido al descenso del nivel de lixiviado en rellenos sanitarios.	17
Figura 4. Comparación de modelos de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios	18
Figura 5. Efecto de la reinyección de lixiviado en el factor de seguridad de taludes	19
Figura 6. Curva característica del suelo	22
Figura 7. Esquema de un permeámetro de carga constante	23
Figura 8. Determinación de la dimensión fractal.....	26
Figura 9. Esquema general de balance hídrico	28
Figura 10. Producción acumulada de lixiviados.....	34
Figura 11. Caracterización de la matriz del relleno sanitario.....	36
Figura 12. Variación de la presión de gas para distintos valores de profundidad.....	37
Figura 13. Ubicación del Relleno Sanitario de Miramar.	39
Figura 14. Uso de terrazas para la construcción de celdas.	40
Figura 15. Proceso de calibración de papel de filtro	45
Figura 16. Interfaz de aplicación RETC.....	48
Figura 17. Esquema conceptual de modelo HELP.	49
Figura 18. Interfaz de aplicación para la implementación del modelo HELP.....	51
Figura 19. Radiación solar en Costa Rica según sitio de NRLE	52
Figura 20. Ventana de ingreso de propiedades de materiales.	53
Figura 21. Distribución del Parque Ecoindustrial de Miramar	55
Figura 22. Ubicación de los puntos de muestreo.....	56
Figura 23. Punto de muestro de los materiales para ensayos.	57
Figura 24. Muestras para ser procesadas en el laboratorio.	61
Figura 25. Muestras procesadas para ensayos de laboratorio	62
Figura 26. Determinación del límite líquido del suelo de cobertura.	64
Figura 27. Carta de plasticidad suelo de cobertura.....	65
Figura 28. Determinación del límite líquido en el desecho de 1 año.	66
Figura 29. Carta de plasticidad desecho de 1 año.....	67

Figura 30. Determinación del límite líquido en el desecho de 3 años.	68
Figura 31. Carta de plasticidad desecho 3 años.	69
Figura 32. Determinación del límite líquido en el desecho de 5 años.	70
Figura 33. Carta de plasticidad desecho 5 años.	71
Figura 34. Probeta de sedimentación utilizada en el análisis granulométrico por vía húmeda.	72
Figura 35. Granulometría de suelo de cobertura.	74
Figura 36. Granulometría desecho 1 año	76
Figura 37. Granulometría de desecho 3 años.....	78
Figura 38. Granulometría de desecho de 5 años.....	80
Figura 39. Comparación de granulometrías	81
Figura 40. Picnómetro con muestra de suelo del relleno sanitario.....	82
Figura 41. Determinación de permeabilidad en muestras de relleno sanitario	84
Figura 42. Resultados de ensayos de permeabilidad para el suelo de cobertura.	86
Figura 43. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 1 mes.....	87
Figura 44. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 6 meses.	88
Figura 45. Resultados de ensayo de permeabilidad para desechos de 1 año.	89
Figura 46. Resultados de ensayo de permeabilidad para desechos de 2 años.	90
Figura 47. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 3 años.....	91
Figura 48. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 4 años.....	92
Figura 49. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 5 años.....	93
Figura 50. Gráfico de calibración de papel de filtro.....	96
Figura 51. Curva característica suelo de cobertura	100
Figura 52. Conductividad hidráulica del suelo de cobertura.....	100
Figura 53. Curva característica desecho de 1 año	101
Figura 54. Conductividad hidráulica de desecho de 1 año.....	101
Figura 55. Curva característica desechos de 3 años	102
Figura 56. Conductividad hidráulica de desechos de 3 años	102
Figura 57. Curva característica desechos de 5 años	103
Figura 58. Conductividad hidráulica de desechos de 5 años	103
Figura 59. Dimensión fractal para suelo de cobertura	104
Figura 60. Dimensión fractal para desechos de 1 año	105
Figura 61. Dimensión fractal para desechos de 3 años	105

Figura 62. Dimensión fractal para desechos de 5 años	106
Figura 63. Modelo fractal para suelo de cobertura	108
Figura 64. Modelo fractal para desechos de 1 año	108
Figura 65. Modelo fractal para desechos de 3 años	109
Figura 66. Modelo fractal para desechos de 5 años	109
Figura 67. Esquema de materiales utilizado en el modelo de balance hídrico.	112
Figura 68. Análisis de sensibilidad para el balance hídrico ante variación de pendientes	114
Figura 69. Perfil del modelo utilizado para el análisis de flujo.....	118
Figura 70. Tasas de flujo asignadas a cada capa de material	119
Figura 71. Operación del relleno mediante el uso de maquinaria	122
Figura 72. Aspecto del material degradado con una edad de 5 años.	124
Figura 73. Comportamiento del contenido de humedad de las muestras.	126
Figura 74. Cantidad de materiales orgánicos en las muestras analizadas.....	127
Figura 75. Determinación del límite líquido de suelos de cobertura.	128
Figura 76. Carta de plasticidad para materiales analizados del relleno sanitario	129
Figura 77. Comparación de granulometrías de desechos.....	131
Figura 78. Comparativa entra muestras de investigación de Yesiller y otros (2014) (a) y muestras de relleno de Mirarar (b)	134
Figura 79. Gráfico comparativo de conductividades hidráulicas	140

Índice de cuadros.

Cuadro 1. Reducción en la eficiencia de recolección de gas debido al nivel del lixiviado .	16
Cuadro 2. Modelos de flujo y aplicaciones empleadas	33
Cuadro 3. Concentraciones de soluciones para calibración de papel de filtro	45
Cuadro 4. Determinación de los parámetros del modelo de Van Genuchten.....	47
Cuadro 5. Distribución de los puntos de muestreo	58
Cuadro 6. Contenido de humedad de las muestras analizadas.....	59
Cuadro 7. Contenido de material orgánico de las muestras analizadas.....	60
Cuadro 8. Determinación del límite líquido y plástico del suelo de cobertura	63
Cuadro 9. Resumen de resultados suelo de cobertura.....	64
Cuadro 10. Determinación del límite líquido y plástico del desecho de 1 año.....	65
Cuadro 11. Resumen de resultados desecho de 1 año.	66
Cuadro 12. Determinación del límite líquido y plástico del desecho de 3 años	67
Cuadro 13. Resumen de resultados desecho 3 años.	68
Cuadro 14. Determinación del límite líquido y límite plástico del desecho de 5 años.....	69
Cuadro 15. Resumen de resultados desecho 5 años	70
Cuadro 16. Resumen de datos de determinación del límite líquido y límite plástico para las muestras analizadas	71
Cuadro 17. Resultados de granulometría de suelo de cobertura.....	73
Cuadro 18. Resultados de granulometría de suelo con desechos de un año	75
Cuadro 19. Resultados de granulometría de suelo con desechos de 3 años	77
Cuadro 20. Resultados de granulometría de suelo con desechos de 5 años	79
Cuadro 21. Resultados de gravedad específica para muestras del relleno sanitario	83
Cuadro 22. Muestras utilizadas en los ensayos de permeabilidad.....	84
Cuadro 23. Condiciones de las muestras analizadas	85
Cuadro 24. Resultados de permeabilidad para suelo de cobertura	86
Cuadro 25. Resultados de permeabilidad para muestra 1	87
Cuadro 26. Resultados de permeabilidad para muestra 2	88
Cuadro 27. Resultados de permeabilidad para muestra 3	89
Cuadro 28. Resultados de permeabilidad para muestra 4	90
Cuadro 29. Resultados de permeabilidad para muestra 5	91
Cuadro 30. Resultados de permeabilidad para muestra 6	92

Cuadro 31. Resultados de permeabilidad para muestra 7	93
Cuadro 32. Resumen de resultados de ensayos de permeabilidad	94
Cuadro 33. Propiedades de las muestras obtenidas del ensayo de permeabilidad	95
Cuadro 34. Resultados de calibración de papel de filtro	95
Cuadro 35. Contenido de humedad de los materiales analizados para la determinación de la curva característica	97
Cuadro 36. Contenido de humedad de papeles de filtro	97
Cuadro 37. Resultados para generación de curvas características	98
Cuadro 38. Parámetros de Van Genuchten para la generación de curvas características	99
Cuadro 39. Resultados de dimensión fractal para los materiales de relleno sanitario.....	106
Cuadro 40. Valores de entrada de aires para los materiales analizados	107
Cuadro 41. Datos mensuales ingresados al modelo HELP	110
Cuadro 42. Áreas de celdas del relleno sanitario	112
Cuadro 43. Balance hídrico anual	113
Cuadro 44. Datos pico diarios de balance hídrico	113
Cuadro 45. Estimación de balance hídrico superficial	116
Cuadro 46. Balance hídrico interno	117
Cuadro 47. Comparación de resultado de flujos.....	120
Cuadro 48. Tasas de infiltración para modelos de flujo transitorio.....	121
Cuadro 49. Valores de Gs de referencia	133
Cuadro 50. Relaciones de vacíos y porosidad de las muestras de desechos analizadas	135
Cuadro 51. Recopilación de datos conductividad hidráulica	137
Cuadro 52. Datos de variación de la permeabilidad contra densidad seca (1).....	138
Cuadro 53. Datos de variación de la permeabilidad contra densidad seca (2).....	139
Cuadro 54. Valores estadísticos de datos de permeabilidad para rellenos sanitarios.....	142
Cuadro 55. Resultados obtenidos mediante la simulación Montecarlo para la variable de permeabilidad.....	142



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, William Alonso Poveda Montoya, con cédula de identidad 1 1362 0040, en mi condición de autor del TFG titulado Modelo de flujo para determinar el comportamiento de los lixiviados y gases generados en el Relleno Sanitario Parque Ecoindustrial Miramar

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Título

Modelo de flujo para determinar el comportamiento de los lixiviados y gases generados en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar.

1.2 Justificación

Costa Rica es un país en vías de desarrollo por lo que actualmente se encuentra en crecimiento su población y su economía. Esto hace que se dé un mayor consumo de bienes y productos con lo cual, debido a las actividades de las personas se da un incremento en la cantidad de desechos que se generan a nivel nacional. Este incremento de desechos causa a su vez un aumento en la demanda del servicio de tratamiento de la basura, lo que se traduce en la necesidad de contar con más sitios adecuados para la disposición de los desechos.

Para mitigar o reducir el incremento en la generación de desechos el país puede implementar políticas de reducción, reutilización y reciclaje de materiales sin embargo esto no garantiza que se elimine la necesidad de contar con más y mejores lugares para el tratamiento de desechos. Esto hace que sea necesario que los sitios destinados para el tratamiento de desechos lo hagan de una manera eficiente para aprovechar al máximo el espacio físico destinado.

El crecimiento del país además causa un aumento en el tipo de productos y materiales que deben ser tratados y debido a esta variedad de materiales, se da una necesidad de una disposición especial, distinto al de los desechos convencionales. Esta necesidad de realizar un manejo de desechos no convencionales también hace que se requieran de empresas que brinden este servicio debido a que muchas veces, la administración pública no está en capacidad de atender las necesidades de manejo de desechos.

Es por esta razón que se debe buscar que el proceso de tratamiento de la basura sea eficiente y adecuado, considerando las condiciones de los sitios disponibles para dicho proceso. Se vuelve de suma importancia que los administradores de rellenos sanitarios se adapten a los factores presentes de los sitios que afectan el diseño de las celdas donde se

dispondrán los desechos. Dentro de los factores que se deben tomar en cuenta para la selección del sitio de construcción de un relleno sanitario están:

- Poblaciones aledañas y vías de acceso al sitio.
- El tipo de suelo y las condiciones geológicas.
- Factores hidrológicos.
- Condiciones topográficas.
- Variables climáticas.
- Tipo de desecho a ser tratado.
- Cantidad y características del lixiviado generado.

Considerar estos factores en el diseño de un relleno sanitario facilitaría el funcionamiento de estas estructuras asegurando el adecuado tratamiento de los desechos depositados. Además, analizar dichas condiciones mediante estudios e investigaciones de los sitios, permitiría fortalecer el conocimiento en materia de rellenos sanitarios y mejorar así la reglamentación y guías utilizadas a nivel nacional para el diseño y construcción de rellenos sanitarios que se utilizan por parte de la administración pública o de las empresas privadas. Actualmente, muchos de los criterios para la construcción de los elementos que integran los depósitos de desechos, se establecen a partir de la experiencia de los responsables del proyecto o por reglamentos o códigos internacionales que no necesariamente toman en cuenta las condiciones presentes en nuestro país. Por ejemplo, si un talud de una celda falla, se procede a reducir la pendiente de este para que no se repita el problema sin hacer un análisis de la causa de dicha inestabilidad. En este caso no se da un análisis técnico de la estabilidad del talud para determina el factor de seguridad de dicha estructura y así asegurarse que la falla no se dé.

Los estudios e investigaciones que se realicen en rellenos sanitarios permitirán determinar el comportamiento de los agentes más contaminantes producidos a partir de la descomposición de los desechos como lo son, el gas y el lixiviado. El comportamiento de estos agentes a través del flujo interno en las celdas tendrá un comportamiento complejo y dependerá de distintas variables como la permeabilidad del medio poroso y el grado de saturación de los materiales.

Conocer la manera en la que se comporta el flujo dentro de la celda del relleno sanitario, será un insumo para otros análisis que se pueden realizar en los sitios de disposición de

desechos sólidos, por ejemplo, la determinación de esfuerzos totales y efectivos, estabilidad de los taludes o asentamientos de la celda. El análisis del flujo dentro de una celda puede ser considerado como uno de los primeros pasos que se debe de dar para establecer los procedimientos para el diseño de los rellenos sanitarios.

Al ser el lixiviado y el gas los agentes más contaminantes producidos por la degradación de los desechos, se requiere analizar la cantidad, composición y comportamiento de estos. Para esto es necesario caracterizar el medio donde serán producidos y almacenados y adicionalmente considerar aspectos como la precipitación y la infiltración de la lluvia al interior de la celda. Con esta información se podrá realizar un balance hídrico del sitio en estudio que será insumo para determinar el comportamiento del flujo dentro de la celda.

Con este análisis se podrá determinar la cantidad de lixiviado y gases generados dentro del relleno sanitario, tomando en cuenta variables adicionales que se incluyen dentro del balance hídrico. El conocimiento del posible rango de producción de lixiviados es importante para dimensionar el sistema de recolección de lixiviados (por ejemplo, tuberías) y para tomar decisiones sobre cómo administrar el tratamiento del lixiviado (Peyton & Schroeder, 1993)

Los estudios realizados en los sitios de disposición de desechos han permitido que estos sistemas evolucionen y se vuelvan más eficientes tal y como lo que establece S.T.S. Yuen et al. (2001), al indicar que el diseño de los vertederos de residuos sólidos municipales se basó principalmente en un concepto de almacenamiento y contención permanente o celda seca. Es decir, se busca que el agua que ingresa en la celda sea la mínima, con lo que la cantidad de lixiviado generado por la celda será el mínimo posible. Sin embargo, esta filosofía ha evolucionado ya que, con los años, la celda se vuelve ineficiente por lo que se ha adaptado la idea de la celda húmeda o biorreactor. En este concepto la humedad es necesaria para lograr la descomposición de la basura, lo cual se logra mediante la recirculación de la lechada o lixiviado.

Por esta razón, el análisis para determinar las cantidades generadas de lixiviados debe ser lo más preciso posible y esto se logra mediante el balance hídrico. Este depende de las condiciones meteorológicas (intensidad y distribución de la precipitación y evaporación potencial), de las características hidráulicas y las condiciones iniciales del material de

desecho, y de los procesos biológicos dentro del relleno sanitario (Bengtsson, Bendz, Hogland, Rosqvist, & Akesson, 1994).

Una vez analizado y realizado el balance hídrico para el relleno sanitario en estudio, se podrá estudiar el comportamiento del lixiviado dentro de la celda tomando en cuenta todas las variables que lo afectan. Los rellenos sanitarios son sistemas complejos y dinámicos en los cuales se da una interacción entre las distintas fases (sólido, líquido y gaseoso) y dicha interacción hace que cada una de las fases impacte a las otras de distintas maneras. Por ejemplo, si se analiza la celda del relleno como un sistema saturado, donde los vacíos entre los sólidos están ocupados por lixiviado, el movimiento se verá afectado por esta condición por lo que no se podrá determinar el comportamiento real del gas.

Para el análisis del medio bajo condiciones no saturadas se deben tomar en cuenta otras variables que no afectan el flujo saturado. Por ejemplo, la presión generada por el fluido será negativa y se debe tomar en cuenta la succión que será un componente que afectará directamente la presión. El flujo en medio no saturado en un relleno sanitario, es un caso donde dos fluidos inmiscibles (aire y agua), interactúan entre sí, en la cual se supone que la fase gaseosa está estática y su presión es cero en todos los medios porosos.

A partir de lo indicado anteriormente, se determina que muchas de las áreas de estudio de la geotecnia se pueden relacionar aplicar a un relleno sanitario como por ejemplo flujo en medio poroso, resistencia de materiales o bien estabilidad de taludes. Por esta razón, para los estudios y análisis que aseguren un adecuado y eficiente tratamiento de los desechos mediante el sistema de rellenos sanitarios, la geotecnia juega un papel fundamental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Analizar mediante un modelo computacional, el comportamiento del flujo subterráneo en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar.

1.3.2 Objetivos Específicos:

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la celda y de los materiales presentes en esta.

Determinar las propiedades hidráulicas de la celda y de los materiales presentes en esta que influyen en el comportamiento del flujo.

Realizar un balance hídrico para la estimación de caudales de lixiviados que atraviesan la celda en estudio.

Elaborar el modelo numérico para el estudio del flujo de acuerdo con las propiedades de la celda en estudio.

Comparar los resultados del modelo con los resultados de campo obtenidos en el relleno sanitario.

1.4 Delimitación del estudio

1.4.1 Alcance

El presente estudio fue realizado en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar ubicado en el cantón de Montes de Oro. Los resultados mostrados en esta investigación son aplicables a dicho sitio por lo que se debe analizar la aplicabilidad a otros lugares de acuerdo con las características de los materiales analizados y las consideraciones de los diferentes análisis indicadas en este documento.

El análisis se centró en el flujo subterráneo generado por la descomposición de los diferentes desechos dispuestos en el relleno sanitario, la generación del lixiviado y la filtración de agua al interior de la celda generada a partir de la lluvia que se precipita en la zona y se filtra al interior de la celda.

Los análisis realizados se basaron en la caracterización de los materiales muestreados mediante ensayos de laboratorio llevados a cabo para determinar las propiedades físicas e hidráulicas de dichas muestras. Los ensayos se realizaron con base en métodos normalizados por lo que se consideran metodologías adecuadas para los análisis efectuados. El tipo de ensayo y las repeticiones se definieron a partir de la cantidad de material disponible para las muestras y la disponibilidad de equipos.

Para la realización del balance hídrico de la celda se utilizaron los datos suministrados por la administración del relleno sanitario. Dichos datos son obtenidos de la estación meteorológica ubicada en las instalaciones del relleno. Dentro de los datos que se obtienen a partir de la estación meteorológica se encuentran la cantidad de precipitación, temperatura y la humedad relativa. Dicho equipo no registra la radiación solar por lo que se utilizará otra herramienta para la estimación de dicho parámetro requerido en la realización del balance hídrico.

Como parte del análisis para realizar el balance hídrico de la celda en estudio, se utilizó la herramienta HELP de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Dicha herramienta requiere del ingreso de información meteorológica ya mencionada y de información adicional de la celda como por ejemplo el área, pendientes de taludes y alturas de las capas. Es información se obtuvo con colaboración de la administración del relleno

sanitario al facilitar los levantamientos topográficos realizados a las celdas del relleno en distintos periodos de tiempo.

El modelo de flujo se elaboró a partir de la información obtenida de los anteriores análisis. Por ejemplo, se utilizaron los resultados de los ensayos de laboratorio tales como los de conductividad hidráulica y los resultados de succión del suelo. También se utilizaron los resultados de la estación meteorológica para incluir la infiltración dentro de la celda del relleno. Dicha celda se planteó en el modelo a partir de los levantamientos topográficos, tomando como referencia las bases de cada celda y las curvas de nivel de la macro celda.

1.4.2 Limitaciones

Dentro de las limitaciones para la ejecución del presente estudio se puede mencionar aspectos como la disponibilidad de información relevante para la realización de los análisis. Como parte de esta información se puede mencionar los levantamientos topográficos, datos de la estación meteorológica y datos de generación de lixiviados y cantidad de desechos tratados.

Otra limitación es la selección de los puntos de muestreo ya que este proceso se realizó mediante maquinaria pesada. Por esta razón los muestreos se realizaron en sitios donde la maquinaria podría tener acceso sin comprometer la estabilidad del terreno o del equipo. Además, aspectos como la profundidad de donde se obtuvo la muestra estuvo limitada ya que la misma dependía del alcance del equipo utilizado.

Adicional a las limitaciones mencionadas, se puede mencionar la disponibilidad y cantidad de equipos de laboratorio para la ejecución de los diferentes ensayos. Para la elaboración de los ensayos a los materiales muestreados se requirió coordinar en los diferentes laboratorios el uso de los equipos para no interferir con otras actividades de investigación, docencia o prestación de servicios que se realizan de manera rutinaria en los laboratorios.

De la mano con las anteriores limitaciones se encuentra también la cantidad de pruebas a realizar. Esta limitante se debe a la disponibilidad de uso de las instalaciones y equipos de los laboratorios y a la heterogeneidad del material. Con respecto a este último aspecto, debido a la cantidad de muestreo y cantidad de material disponible, no se realizó un estudio detallado de la composición exacta de los desechos para conocer los distintos componentes que conforman cada uno de los especímenes analizados.

Por último, para la elaboración de este estudio no se consideró realizar instrumentación del sitio (Piezómetros, celdas de carga, medidores de caudal) para medir aspectos como la producción de lixiviado o los niveles de este dentro de la celda.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Geotecnia Ambiental

La geotecnia, como una rama de la ingeniería civil, dio sus primeros pasos en los países industrializados entre las décadas de 1940 y 1960. Esto se debió a la necesidad de dichos países de contar con materias primas para la fabricación de los distintos bienes. Por esta razón los ingenieros empezaron a investigar de una manera más exhaustiva, la estratigrafía y la condición del suelo para su explotación y así obtener materias primas como metales, petróleo o gas natural. Sin embargo, no se le daba ningún énfasis o análisis al aspecto ambiental y su relación con la geotecnia hasta que se empezaron a crear regulaciones para disminuir el impacto generado por las actividades extractivas necesarias para obtener las materias primas mencionadas.

El aspecto ambiental se empezó a tomar en cuenta con mayor relevancia a partir del auge de las plantas de energía nuclear ya que dentro de los requisitos para poder construir estas edificaciones, se requería conocer el daño que ocasionaría la operación de estas plantas en los sitios de construcción. Debido a la experiencia generada por los ingenieros geotecnistas en la exploración, análisis del suelo y el impacto ambiental de la explotación del suelo, naturalmente se recurrió a estos profesionales para determinar el impacto de la construcción y operación de las plantas de energía nuclear.

Posteriormente se requirió determinar los sitios adecuados para disponer de los desechos de las plantas nucleares por lo cual, la geotecnia volvió a tomar un papel relevante para determinar la metodología adecuada de disposición de los desechos de las plantas nucleares. Para esto se realizaron investigaciones tanto en Europa como en Estados Unidos, las cuales fueron dirigidas por profesionales en el área de geotecnia donde se necesitaba definir los sitios que contaban con el tipo de roca adecuada para almacenar los materiales y donde estos tuvieran un comportamiento estable bajo condiciones de temperatura y presiones particulares. Además, se debía analizar el potencial de contaminación del agua subterránea y potenciales de asentamiento peligrosos para la planta nuclear.

Posteriormente en la década de 1980, en Estados Unidos se inició una campaña por lograr la limpieza de sitios que estaban siendo contaminados de una manera preocupante debido

a las actividades humanas. Se promulgaron leyes que ordenaban a limpieza de sitios contaminados y la adecuada disposición de los desechos generados por actividades industriales, comerciales y las actividades humanas diarias. Además, se promovió el uso de geomembranas, sistemas de impermeabilización, drenajes que facilitaron y mejoraron el tratamiento de sitios contaminados.

Gracias a la experiencia generada en el análisis de sitios y exploración de suelos y rocas, y en los estudios de potencial de contaminación e impacto ambiental debido a las distintas actividades humanas, se les encargó a los ingenieros geotécnicos el análisis y definición de los sitios más adecuados y las medidas necesarias para la disposición de desechos sólidos. De esta manera se buscó disminuir la contaminación, el impacto ambiental de las actividades humanas y la adecuada disposición y manipulación de los desechos generados diariamente.

2.2 Relleno sanitario

Los rellenos sanitarios son una técnica de disposición de los desechos sólidos en el suelo, cuyo impacto en la salud de la sociedad y en el ambiente debe de ser mínima, tanto en su fase operativa como durante su cierre técnico. Para optimizar el espacio disponible en el sitio del relleno, los desechos depositados se compactan y se cubren con suelo.

Durante este proceso y también debido a la descomposición de los desechos, se generarán lixiviados y gases que deben de ser tratados de manera adecuada. Para asegurar el adecuado tratamiento de dichos productos de la descomposición de los desechos, se deben construir una serie de estructuras para la adecuada disposición de dichos agentes contaminantes. Inicialmente se debe contar con una celda que según el Reglamento de Rellenos Sanitarios de Costa Rica (2014) “es aquella conformación geométrica en un terreno donde se depositan los residuos sólidos y su material de cobertura debidamente compactados, como parte de la técnica de relleno sanitario”.

Dicha celda debe estar adecuadamente impermeabilizada para evitar la contaminación del sitio donde se ubica el relleno. El relleno debe de contar con un sistema de colección de lixiviado que conduce dicho desecho hasta una planta de tratamiento donde es almacenado y tratado adecuadamente. También se debe tener una serie de chimeneas para extraer el gas generado por la descomposición de los sólidos y ser tratado adecuadamente. En la Figura 1 se muestra un esquema de la composición de una celda.

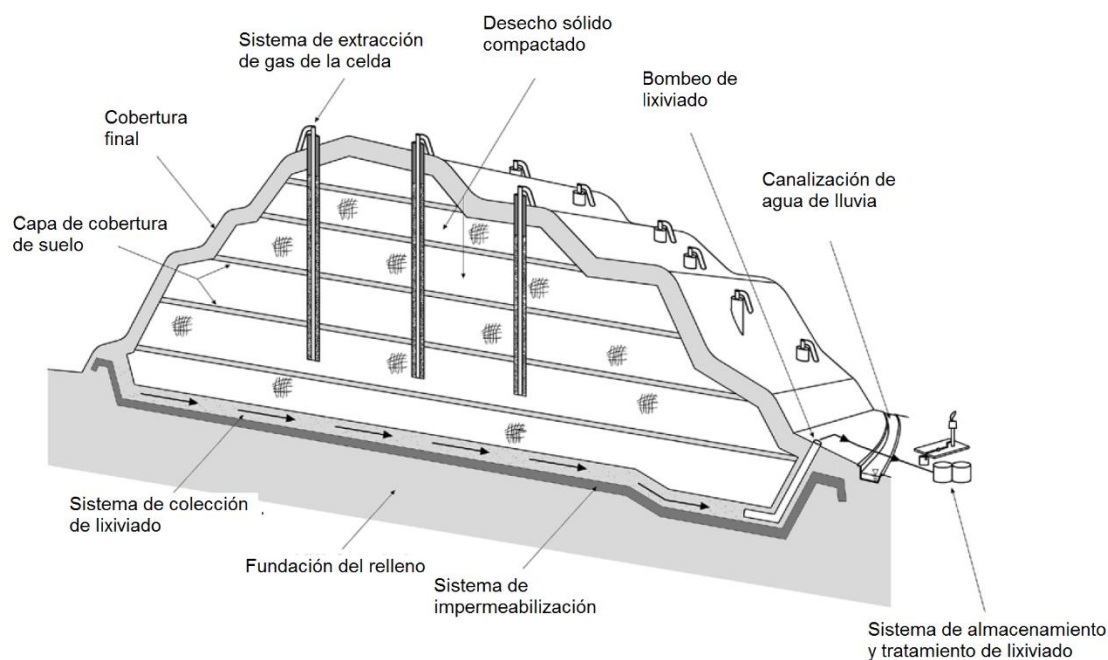


Figura 1. Esquema de celda de rellenos sanitarios

Fuente: Townsend, y otros (2015)

Según el Ministerio de Salud de Costa Rica (2014), los rellenos sanitarios pueden ser de dos tipos, manual o mecanizado. El relleno sanitario manual es el que sólo requiere de equipo pesado para la adecuación del sitio y la construcción de vías internas, así como para la excavación de zanjas, la extracción, el acarreo y distribución del material de cobertura. Todos los demás trabajos, tales como construcción de drenajes para lixiviados y chimeneas para gases, así como el proceso de acomodo, cobertura, compactación y otras obras conexas, se llevan a cabo manualmente. Por su parte el relleno sanitario mecanizado es aquel en que se requiere de equipo pesado tanto para su construcción como para su operación, así como de mecanismos de control y vigilancia de su funcionamiento.

En cuanto a los desechos que se disponen en un relleno, existen los residuos peligrosos que son aquellos que, por sus características químicas, tóxicas, explosivas, corrosivas, radioactivas, biológicas, bioinfecciosas e inflamables, o que por su tiempo de exposición puedan causar daños a la salud o al ambiente. Por otro lado, están los desechos o residuos ordinarios que son generados en viviendas y en cualquier otra fuente, que presentan composiciones similares a los de las viviendas. Estos están constituidos por artículos de

uso diario como desperdicios de cocina, adornos de jardín, plásticos, metales, vidrio, papel, cartón, textiles, madera y materiales diversos (EPA, 2010). En la Figura 2 se muestra la composición de los distintos que se disponen en rellenos sanitarios desechos según el nivel económico de los países.

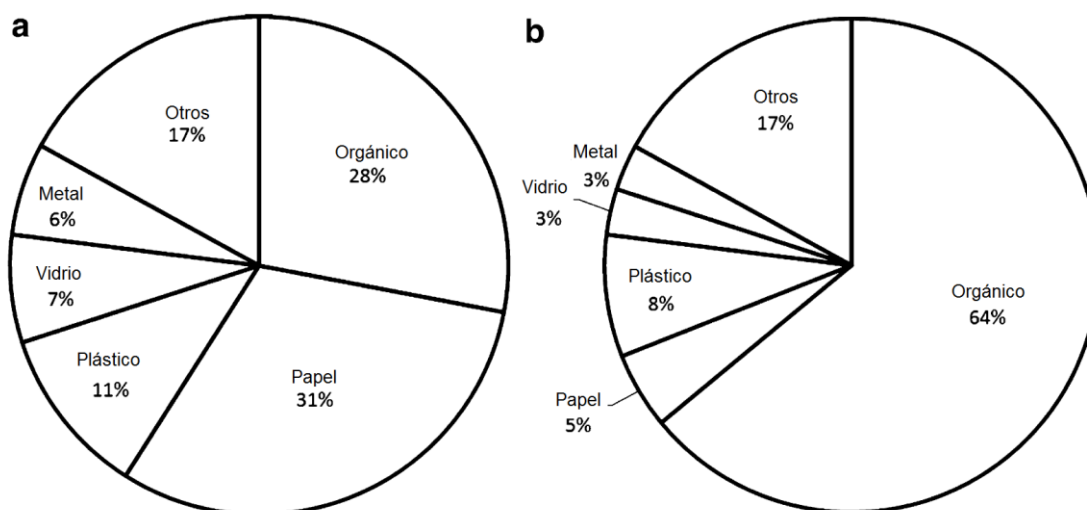


Figura 2. Composición de los desechos tratados en (a) países de altos ingresos económicos y (b) países de bajos ingresos económicos

Fuente: Hoornweg & Bhada-Tata (2012)

Las características y heterogeneidad de estos residuos influyen en aspectos geotécnicos como la compresibilidad, la capacidad de soporte portante, la estabilidad de los taludes y el flujo dentro de la celda. Por ello, en la actualidad existe una creciente participación de los profesionales geotécnicos en las etapas de elección del emplazamiento, diseño, construcción y cierre técnico de rellenos sanitarios.

2.2.1 Características de sitios para construcción de rellenos sanitarios

Según el reglamento de rellenos sanitarios de Costa Rica, el sitio donde se vaya a construir un relleno sanitario debe contar con las siguientes características:

- Terrenos estables no expuestos a deslizamientos.
- Terrenos fuera de zonas de inundación con periodos de retorno inferiores de 100 años.
- No existan en ella humedales, pantanos y manglares.

- Contar con vías de acceso transitables durante todo el año.
- Fuera de áreas naturales protegidas.
- Terrenos que no puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno.
- La finca debe de contar con servicios de suministro de agua potable y eléctrico permanentes, ya sean propios o en su defecto con facilidades de interconexión con terceros.

Adicionalmente a esas características, se debe asegurar que no existan fallas geológicas a una distancia menor de 60 m con respecto a cualquier infraestructura del relleno, esto incluyendo las celdas de tratamiento del desecho. También se debe asegurar una separación mínima de 100 m con respecto proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento de pozos para extracción de agua para uso doméstico, recreativo, industrial, riego y agropecuario. En caso de que no se puede determinar el cono de abatimiento la distancia al pozo será de 500 metros.

2.2.2 Construcción de una celda

Continuando con la referencia del Reglamento sobre Rellenos Sanitarios, se establece que, para la operación de un relleno sanitario, una vez seleccionado el sitio y realizados los trabajos movimientos de tierra, impermeabilización del sitio y cualquier infraestructura necesaria para iniciar a procesar desechos se deben cumplir con varios requisitos, principalmente para la construcción de la celda (Ministerio de Salud de Costa Rica, 2014)

El sitio donde se realizará la construcción de la celda debe contar con ciertas características dentro de las cuales se pueden mencionar que este debe ser estable contra deslizamientos, debe contar con vías internas adecuadas para ser transitadas en cualquier época del año y que la base del terreno sea impermeabilizada antes de colocar desechos. De igual manera debe contar con canales para el manejo de aguas pluviales, drenajes para los líquidos lixiviados y chimeneas para gases y las instalaciones necesarias y adecuadas para captar y tratar o recircular sobre el relleno, los lixiviados.

Cumpliendo estos requisitos, para la construcción de la celda, en primera instancia se debe clasificar la primera capa de desechos a tratar para evitar que esta contenga residuos que puedan dañar la geomembrana de impermeabilización del sitio. Las capas de residuos deben tener espesores de 60 cm de espesor, en el caso de rellenos mecanizados y para

un relleno manual las capas de residuos serán de 30 cm de espesor. Estas capas deben ser compactadas hasta alcanzar una densidad de 800 kg/m^3 para el caso de un relleno mecanizado y de 500 kg/m^3 en el caso de un relleno sanitario manual.

Es importante que se verifique la densidad de compactación de los materiales colocados en el relleno sanitario ya que alcanzar la densidad de diseño asegurará el adecuado funcionamiento del relleno sanitario. El movimiento del lixiviado y los gases dependerá de la densidad de los desechos, ya que a mayor densidad la permeabilidad será menor con lo que la velocidad de flujo será menor.

Las capas de desechos, una vez colocadas y compactadas, deben ser cubiertas con el suelo de cobertura que permita la infiltración de agua o de lixiviado a las capas inferiores de manera que este se pueda dirigir hacia los drenajes y la planta de tratamiento. El espesor de dichas capas debe ser de 15 cm excepto la última capa de la celda que debe tener 60 cm de espesor. Adicionalmente a la última capa se debe colocar una capa adicional de suelo vegetal de 20 cm de espesor. Esta capa de cobertura debe tener la capacidad de resistir la erosión y el arrastre del viento, la escorrentía superficial y que no afecte la estabilidad de la celda y sus taludes.

2.2.3 Tratamiento de los desechos

Tal y como se mencionó anteriormente, a los rellenos sanitarios llega una gran cantidad de materiales que deben ser tratados los cuales son muy diferentes por lo cual es necesario que en algunas ocasiones dichos materiales deban ser tratados de una manera diferenciada. A partir del tratamiento de los residuos se generan una serie de productos los cuales resultan ser muy contaminantes. Estos agentes son los lixiviados y los gases que requieren de un adecuado tratamiento.

Según Hernández Barrios, Wehenpohl, & Heredia Cantillana (2006) los lixiviados son los líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.

Además, Hernández y otros (2006) también establecen que el gas es producto de la degradación biológica de los residuos. Los gases que se producen en mayor proporción son metano, bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y nitrógeno. El gas metano busca salida del interior de las celdas hacia la atmósfera, teniendo un riesgo de explosión si su concentración alcanza valores entre el 5% al 15% en volumen.

Las principales razones para el control de biogás son:

- La alta contaminación atmosférica que provoca y su importante contribución al efecto invernadero.
- La posible existencia de unidades habitacionales en las áreas circundantes al sitio de disposición final.
- El alto contenido de materia orgánica contenidos en los residuos sólidos urbanos, lo que aumenta su producción.
- La posible planeación de uso futuro del sitio, que considere el acceso al público (parques, jardines),
- La prevención de emisiones que pongan en peligro la salud de la población por sus características fisicoquímicas,
- El control de la producción de olores desagradables para la población circundante,
- El evitar que la presión del biogás sea tal que ocasione una fuerte migración lateral y/o afecte a la vegetación que rodea al sitio.

El tratamiento de estos agentes contaminantes resulta crucial en el manejo de los desechos, por esta razón la incorporación de profesionales en el estudio del manejo de los desechos sólidos y en el diseño y construcción de rellenos sanitarios, han permitido que se mejoren las condiciones del tratamiento de la basura. Muchas de esas mejoras se deben a investigaciones realizadas en rellenos sanitarios en temas de generación de lechada, gas, estabilidad de taludes, uso de geomembranas y monitoreo e instrumentación.

Por ejemplo, Tong Zhan, Bing Xu, Min Chen, Fei Ma, & Lan (2015), analizaron el efecto de la eficiencia en la recolección de gas en los niveles de lechada en rellenos sanitarios municipales. Actualmente países europeos y Estados Unidos buscan recolectar el gas producido en las celdas donde se depositan los desechos sólidos para ser aprovechados en la generación de energía. Con esto también se disminuye el efecto contaminante de los

gases producidos ya que estos contienen una alta concentración de dióxido de carbono y metano.

En aquellos sitios de disposición de desechos, donde el nivel de la lechada sea alto, la basura tendrá un alto contenido de humedad y los vacíos entre las partículas sólidas serán ocupados por lechada con lo cual, el flujo de gas a través del sólido se verá afectado y por ende esto disminuirá la eficiencia en la recolección de gas. Con esto se puede afirmar que se debe estimar un nivel de lechada donde la eficiencia en la recolección de gas sea la mayor posible. Así lo demostró Tong Zhan et al. (2015), quien mediante ensayos de laboratorio determinó la presión y el flujo de gas en la celda del relleno a distintas profundidades, relaciones de vacíos, contenidos de humedad y permeabilidades de los sólidos muestreados. Además, se realizaron pozos de exploración para determinar mediante un proceso de bombeo, los niveles del lixiviado a través de la celda del relleno sanitario en estudio. Estos análisis fueron realizados en el relleno sanitario de Liming, Shanghai, China. El análisis numérico de los datos obtenidos muestra una clara dependencia de la eficiencia en la recolección del gas con respecto al nivel del lixiviado.

El resumen de los resultados obtenidos se muestra en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Reducción en la eficiencia de recolección de gas debido al nivel del lixiviado

Nivel del lixiviado h con respecto a la altura de la celda H (h/H) (%)	Reducción en la eficiencia de recolección de gas (%)
<30	0
30 – 50	10-20
50 – 70	20-30
70 – 90	30-60
>90	>60

Fuente: Tong Zhan, Bing Xu, Min Chen, Fei Ma, & Lan (2015)

Posteriormente, en el relleno de Xiaping se dio el deslizamiento de uno de los taludes. Como medida de contingencia se implementaron sistemas para bajar el nivel del lixiviado en el relleno sanitario de Xiaping y así disminuir la presión de poro sobre los taludes. Dicha medida fue aprovechada para medir el comportamiento de la eficiencia en la recolección de gas dando como resultado un notable incremento en este parámetro con la disminución del nivel del lixiviado tal y como lo muestra la Figura 3.

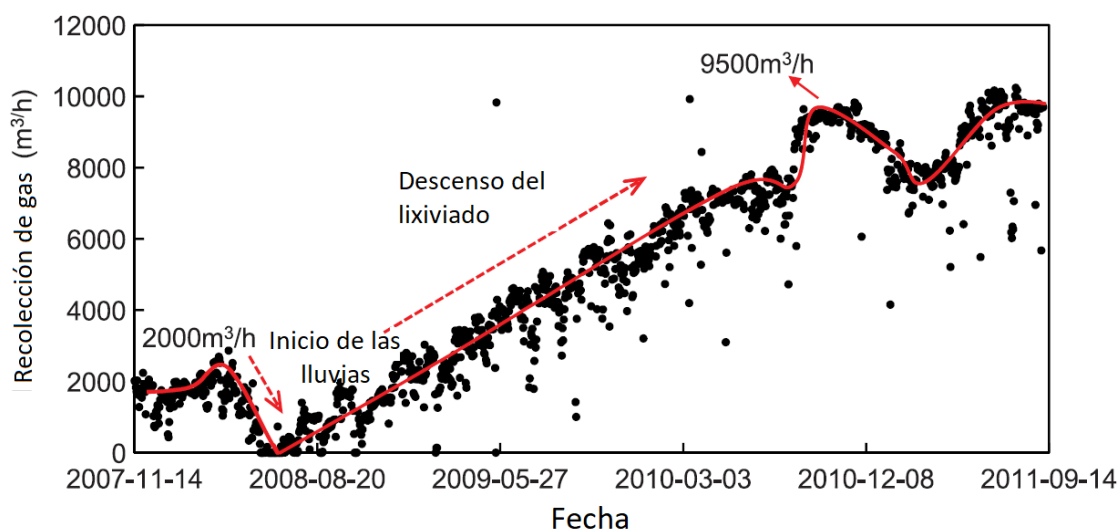


Figura 3. Incremento en la recolección de gas debido al descenso del nivel de lixiviado en rellenos sanitarios.

Fuente: Tong Zhan, y otros (2015)

Además de la recolección de gases, el nivel y la cantidad de lixiviado generado afecta aspectos como la estabilidad de los taludes que se generan por la acumulación de la basura. Así lo demuestra Giri, R. y Reddy K (2014) en su estudio sobre los efectos de la heterogeneidad y anisotropía de los rellenos sanitarios municipales en la distribución del lixiviado y la estabilidad de los taludes. En este estudio se realizó un análisis de como la reinyección de la lechada a la celda de los rellenos afecta la resistencia al corte de los materiales sólidos dentro del relleno. Esto se debe a se incrementan las presiones de poro dentro del relleno y al no existir una metodología clara sobre como diseñar los taludes de los rellenos sanitarios se pueden generar fallas en dichas estructuras.

Para realizar este estudio se compararon modelos de un talud en un relleno sanitario bajo condiciones homogéneas (HWA) y otro modelo donde se tome en cuenta la heterogeneidad

del material presente en el relleno (HTWA). Dichos modelos muestran un proceso de 10 años de reinyección de lechada al cual sería sometida la celda del relleno sanitario.

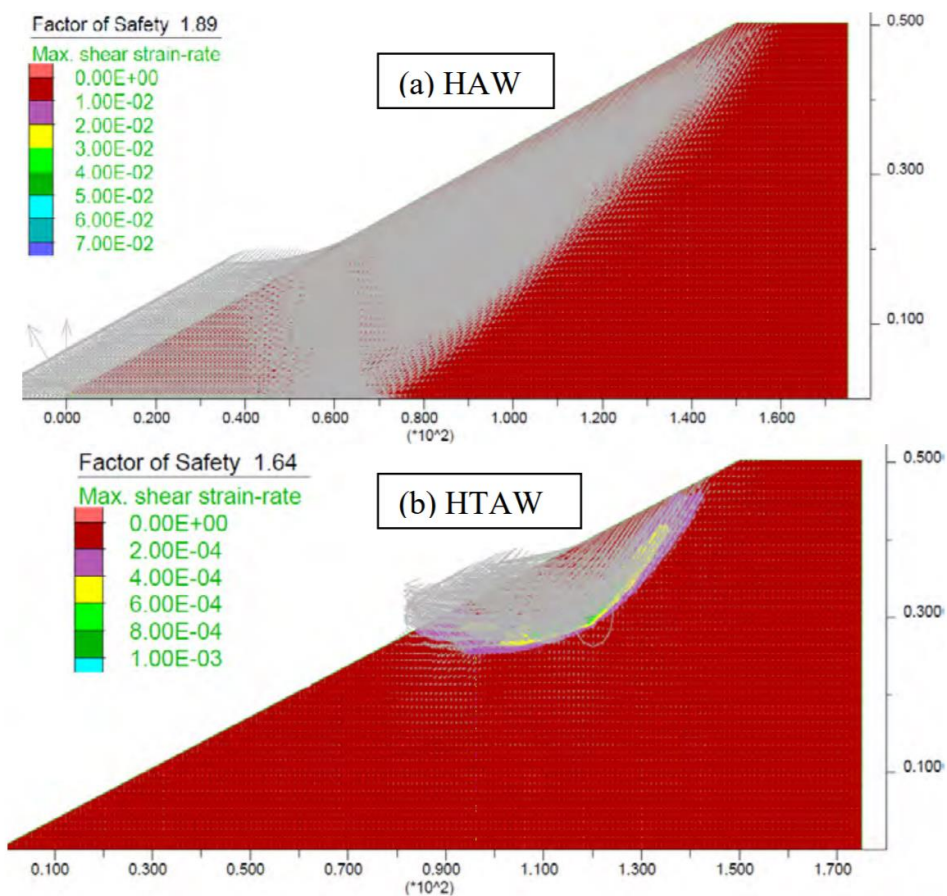


Figura 4. Comparación de modelos de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios

Fuente: Giri & Reddy (2014)

De acuerdo con los autores, el modelo homogéneo (a) muestra que las inestabilidades se dan cerca de la base y a una mayor profundidad de la cara del talud, mientras que, para el modelo de material heterogéneo, las inestabilidades se generan a un nivel más superficial y cerca de la cresta del talud. Esto debido a que el proceso de reinyección de la lechada genera mayores presiones de lixiviado en dicha zona.

Según la investigación, es claro que la reinyección de la lechada y la heterogeneidad de los materiales presentes en la celda afectan el factor de seguridad del talud. El hecho de no tomar en cuenta estos aspectos proporcionarían que los taludes lleguen a fallar, exponiendo los desechos sólidos depositados y generando un potencial problema ambiental.

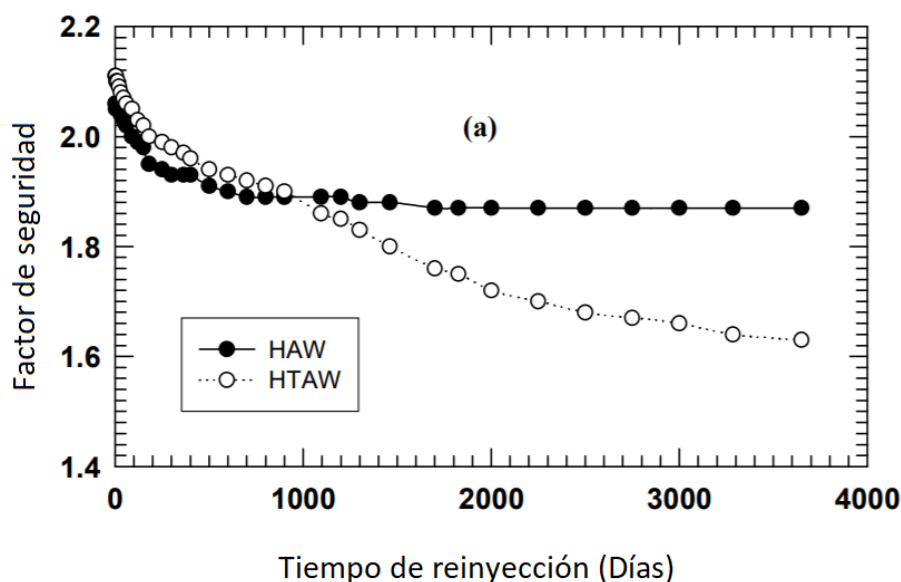


Figura 5. Efecto de la reinyección de lixiviado en el factor de seguridad de taludes

Fuente: Giri & Reddy (2014)

2.3 Caracterización de los materiales del relleno

La caracterización de los materiales depositados dentro de una celda de un relleno sanitario y de aquellos materiales generados a partir del tratamiento de los desechos, se realiza mediante la aplicación de técnicas de campo y laboratorio que permitan determinar una propiedad específica. Para la selección de la técnica adecuada se debe tener claro la propiedad que se desea determinar, la cantidad de muestra requerida y cualquier particularidad que deba ser tomada en cuenta durante el análisis.

2.3.1 Propiedades físicas de los materiales de un relleno sanitario

Se refiere a todas aquellas propiedades que pueden ser determinadas mediante la medición u observación directa del material analizado. Se determinan mediante el análisis de una muestra representativa por lo que se considera que representan a la fuente de extracción. Las propiedades físicas pueden ser modificados debido a acciones externas como la aplicación de energías o bien por un proceso de modificación temporal. La aplicación de

estas acciones dependerá de las condiciones de servicio y del tipo de material que se está analizando.

Para el caso de rellenos sanitarios, algunas de las propiedades físicas más relevantes que se pueden analizar son las siguientes:

2.3.1.1 Densidad

Se refiere a la cantidad de material (masa) que ocupa un volumen específico. Para la construcción y diseño de rellenos sanitarios se debe especificar un valor de densidad la cual deberá ser verificada durante la construcción de la celda. La densidad de los desechos influirá directamente en el comportamiento de los desechos generados por la descomposición.

2.3.1.2 Contenido de humedad

Se puede determinar el contenido de humedad gravimétrico al relacionar la masa del líquido con la masa de la muestra en estado seco. También se puede determinar el contenido de humedad volumétrico al relacionar el volumen del líquido con el volumen total de la muestra. Estas relaciones se expresan en términos porcentuales y serán insumo para determinar el comportamiento de los materiales analizados.

2.3.1.3 Tamaño de partículas

La determinación del tamaño y distribución de las partículas de una muestra se realiza mediante un análisis granulométrico o de distribución de tamaño de partículas. El análisis se puede realizar mediante tamizado, análisis de sedimentación o bien, mediante la combinación de ambos métodos. Conocer la distribución del tamaño de partículas de un material permite relacionar esto con otras características de los materiales como la permeabilidad o la resistencia.

2.3.1.4 Gravedad específica

La gravedad específica relaciona la densidad de un material con la densidad de otro material de referencia que en este caso es el agua. Los resultados de la gravedad específica se pueden relacionar con la calidad de un material como por ejemplo cuando se analizan agregados y en el caso de suelos permite determinar la relación de fases, relación de vacíos o grado de saturación. En el caso de rellenos sanitarios, debido a la heterogeneidad de los materiales depositados en las celdas, es de esperar que los resultados varíen según el tipo de análisis que se realice.

2.3.1.5 Relación de vacíos

Índica la razón entre el volumen de vacíos y el volumen de las partículas sólidas de una muestra en análisis. Dicho valor se puede relacionar con el grado de compactación de un suelo ya que entre más baja sea la relación de vacíos, más denso será el material. Esto indica que, para reducir la relación de vacíos, se pueden aplicar técnicas de compactación o consolidación de suelos. Para casos donde se requiera una alta permeabilidad del medio poroso se puede considerar la relación de vacíos como un parámetro para la selección del material.

2.3.2 Propiedades hidráulicas de los materiales de un relleno sanitario

Para el caso de los suelos, las propiedades hidráulicas indican la manera en la que un fluido se comportará al relacionarse con un suelo o viceversa. Muchas de las propiedades hidráulicas se pueden correlacionar con las propiedades físicas de un material, por ejemplo, la conductividad hidráulica se puede relacionar con el tamaño de partículas o la relación de vacíos de una muestra.

2.3.2.1 Grado de saturación

Expresión porcentual que indica la cantidad de vacíos que están ocupados por un fluido en estado líquido. La saturación de una muestra puede estar entre 0% cuando está completamente seca y 100% cuando todos los vacíos se encuentran ocupados por un líquido. Esta propiedad es necesaria conocerla para la ejecución de algunos ensayos que solicitan que la muestra alcance un grado de saturación del 100%.

En caso de que el suelo tenga una saturación menor al 100% se considera que éste se encuentra en un estado no saturado, donde los poros además de la fase líquida van a tener presente una fase gaseosa. Los suelos en estas condiciones se pueden encontrar en materiales que se encuentran por encima del nivel freático y donde la capilaridad del suelo no logra saturar el material. También materiales superficiales donde la evaporación y evapotranspiración causa que la humedad del suelo no sea la suficiente para alcanzar el 100% de vacíos ocupados para líquido.

Los suelos no saturados pueden presentar fenómenos asociados a esta condición como por ejemplo los cambios volumétricos. Según Alfaro (2008), el volumen del suelo no saturado se modifica por que se encuentra sometido a un estado de tensión diferenciado e influenciado por una componente denominada tensión de succión. Esto implica que la

succión puede hacer variar el volumen del suelo en una magnitud que dependerá de la humedad presente en el medio poroso.

La succión se refiere a la capacidad que tiene un suelo para retener agua y en el caso de los suelos no saturados, la succión está compuesta por la succión matricial (Ψ_m) y la succión osmótica (Ψ_o). La suma de ambos tipos de succiones corresponde a la succión total y representa la acción total de las fuerzas de capilaridad, absorción y osmosis. Para representar el comportamiento de la succión en un suelo, esta se puede relacionar con la humedad generando la curva característica suelo-agua o curva de retención de agua.

El comportamiento del suelo indica que, a mayor contenido de humedad, la succión se verá reducida debido a que el estado energético del suelo está siendo requerido en la acción de retener el agua presente en el medio. Según Fredlund, Xing & Huang (1994), la curva de retención del agua en el suelo puede ser definida como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macro y micro poros del suelo. En la Figura 6 se muestra una representación de una curva característica de suelo.

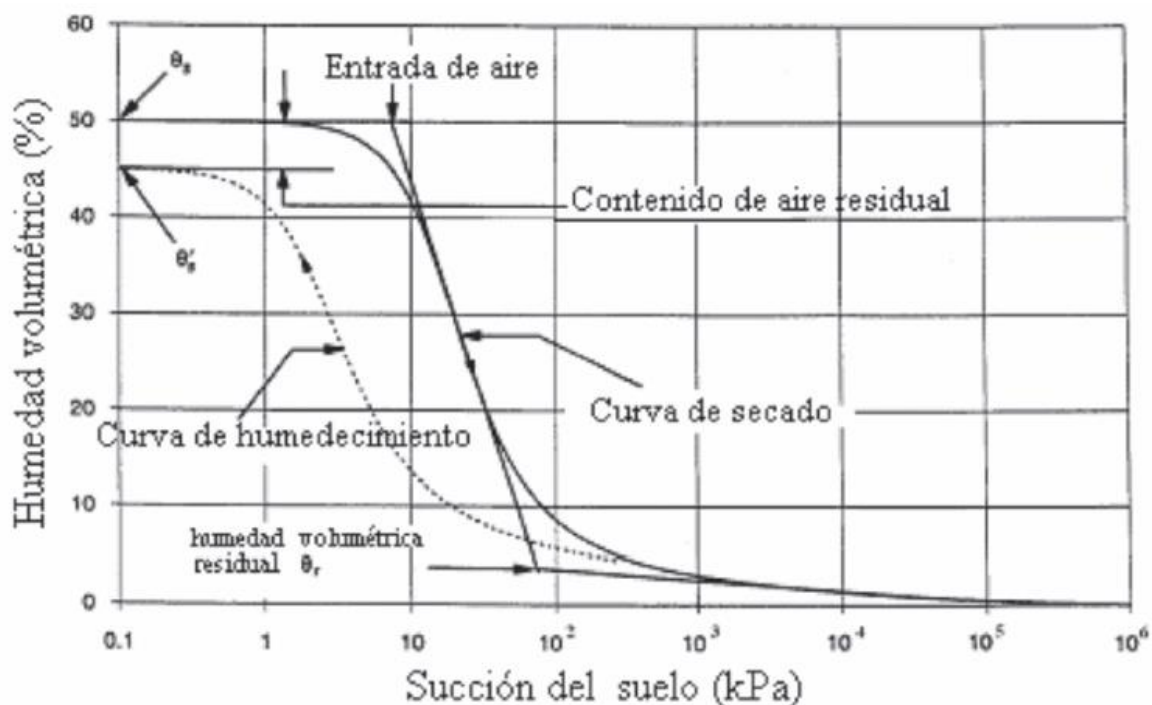


Figura 6. Curva característica del suelo

Fuente: Fredlund y otros. (1994)

2.3.2.2 Conductividad hidráulica

Propiedad también conocida como permeabilidad y se refiere a la facilidad con la que un líquido se mueve en un medio poroso a través de los poros interconectados. La permeabilidad depende de factores como el tipo de suelo, la relación de vacíos, el tamaño de las partículas del medio poroso y la saturación de la muestra. Además, también depende de las propiedades del fluido como por ejemplo la viscosidad, la cual también puede variar según la temperatura del fluido.

De esta manera, un material granular tendrá una mayor permeabilidad que un material de grano fino debido al tamaño de sus partículas y a la cantidad de poros presentes en la muestra. Por esta razón los materiales de grano fino pueden tardar más tiempo en alcanzar el estado de flujo estacionario. Según Vargas W (2016) en los limos y especialmente en las arcillas, que tienen drenaje muy lento por su baja permeabilidad, el flujo puede tardar varios años en alcanzar la condición estacionaria. El periodo de flujo transitorio tiene importancia para el estudio de la consolidación y la expansión de suelos arcillosos.

Para determinar la permeabilidad de un material uno de los métodos más comunes es el del permeámetro en laboratorio. En este método se coloca una muestra del material analizado y se le deja fluir un líquido (por lo general agua) hasta alcanzar la saturación y posteriormente se miden las caegas y el tiempo requerido para recolectar un volumen determinado del fluido.

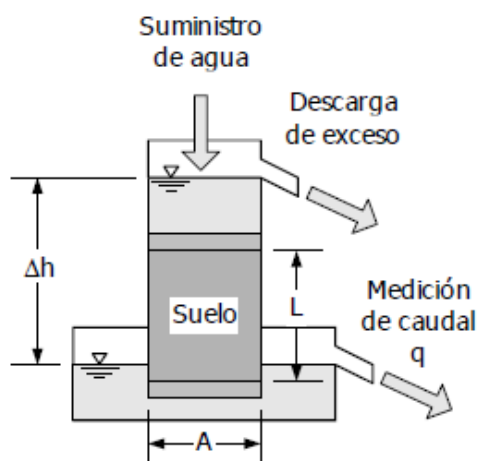


Figura 7. Esquema de un permeámetro de carga constante

Fuente: Vargas, W. (2016)

Para determinar la permeabilidad de un material se utiliza como referencia la ley de Darcy que expresa la velocidad de descarga a través de un medio saturado. La ley de Darcy determina la manera en la que el flujo se moverá a través del medio saturado mediante la siguiente expresión:

$$q = \frac{Q}{A} = k \frac{\partial h}{\partial l} \quad (1)$$

Donde Q (m^3/s) es el caudal que se desplaza a través del medio en un tiempo determinado, A (m^2) es el área de la sección por la que se desplaza el flujo, k (m/s) es la conductividad hidráulica del medio poroso y $\partial h/\partial l$ expresará el gradiente hidráulico.

En caso de que el material no se encuentre saturado, los vacíos que se encuentran ocupados por aire se pueden convertir en una barrera para el líquido. De esta manera la conductividad hidráulica se verá disminuida debido a la interrupción del paso del líquido. La conductividad hidráulica no saturada ($K_{(\theta)}$) puede variar según el grado de saturación de la muestra y se puede estimar mediante el modelo de Van Genuchten. Dicho modelo se muestra en la siguiente expresión:

$$K(\theta) = K_s S_e^{1/2} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (2)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada y S_e (%) corresponde a la saturación efectiva, la cual se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

Donde:

θ : Contenido de humedad volumétrico (%).

θ_r : Contenido de humedad volumétrico residual (%).

θ_s : Contenido de humedad volumétrico saturado (%).

Al relacionar la conductividad hidráulica no saturada ($K_{(\theta)}$) y la saturada ($K_{(s)}$) se puede determinar la conductividad hidráulica relativa (K_r) del medio analizado. Poder conocer la conductividad hidráulica relativa resulta de suma importancia para distintos estudios geotécnicos que requieren un análisis en condiciones no saturadas. La conductividad

hidráulica no saturada puede resultar compleja de estimar, por lo que, los parámetros relativos de esta permitirían realizar una estimación adecuada de los parámetros no saturados del material.

Una aproximación o modelo fractal puede predecir la conductividad hidráulica relativa y así realizar una comparación con datos experimentales de permeabilidad saturada y no saturada para verificar su validez. Por ejemplo, el modelo fractal propuesto por Tao G., Zhu X., Cai J., Xiao H, Chen Q., Chen Y. (2019), se basa en la curva característica suelo-agua y establece que la conductividad hidráulica relativa se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$K_r(\psi) = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{5-D} \quad (4)$$

Donde:

$K_r(\psi)$: Conductividad hidráulica relativa en función de la succión (cm/s).

ψ_a : Valor de succión donde se da la entrada de aire (kPa).

ψ : Valores de succión medidos en el material analizado (kPa).

D: Dimensión fractal.

Para el análisis fractal se debe estimar la dimensión fractal (D) graficando, para cada material estudiado, el $\ln(\theta)$ con el $-\ln(\psi)$. Al tener distintos valores de humedad volumétrica y succión, se obtiene una curva que permite determinar la dimensión fractal. La dimensión fractal de cada análisis se puede estimar como $D=3-m$, donde m es la pendiente del gráfico. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de dicho análisis.

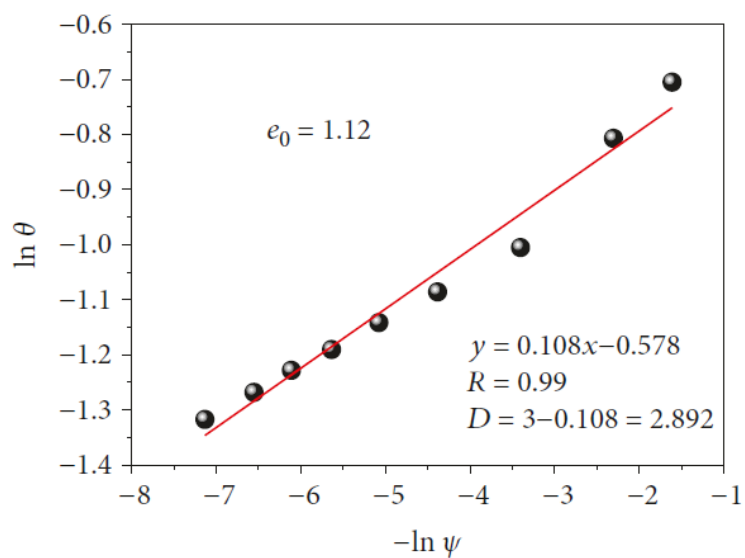


Figura 8. Determinación de la dimensión fractal

Fuente: Tao y otros. (2019)

Dicha dimensión fractal junto con la ecuación (4) permite indicar el comportamiento de la permeabilidad relativa (K_r) para el material analizado al graficar los valores de permeabilidad relativa para cada valor de succión.

2.4 Balance hídrico

Para lograr un diseño y funcionamiento adecuado de un relleno sanitario, es necesario realizar un balance hídrico tomando en cuenta la estructura de las celdas. Para la ejecución de un balance hídrico, se requiere ejecutar distintos análisis a partir de las condiciones del sitio. En este proceso se deberá tomar en cuenta las condiciones meteorológicas del sitio (intensidad, distribución de la precipitación, temperatura ambiental) y condiciones generadas por las características de los materiales como por ejemplo capacidad de filtración a la celda, evaporación, escorrentía y características hidráulicas y biológicas del material del relleno.

Tomando en cuenta esos factores se logrará estimar de manera adecuada la cantidad de lixiviado producido a partir de la descomposición de los desechos depositados y así se logrará diseñar de manera las estructuras para el tratamiento de dicho contaminante de manera tal, que se asegure que el impacto ambiental que pueda producir la generación de lechada sea el mínimo posible.

La lechada o lixiviado es el agente más contaminante que se produce en el proceso de operación en un relleno sanitario e incluso posterior a su cierre. Este desecho se genera a partir de la descomposición de los diferentes materiales depositados en estos sitios durante la etapa de operación. Durante el proceso de operación del relleno sanitario, se generan un proceso de filtración del agua que precipita al área de construcción del proyecto. El agua filtrada es retenida por los materiales a lo interno del relleno hasta que la humedad de estos supera dicha capacidad de retención de manera que se liberan líquidos en forma de lixiviado.

Además de la generación del lixiviado, es importante tomar en cuenta el proceso de generación de biogás el cual es producto de la descomposición de los desechos. El biogás a su vez genera un consumo de líquido, el cual es tomado del agua filtrada. Por lo que el balance hídrico deberá tomar en cuenta esta producción de gas y consumo de agua para tener un cálculo adecuado de volúmenes de desechos a tratar mediante la planta de tratamiento y las chimeneas.

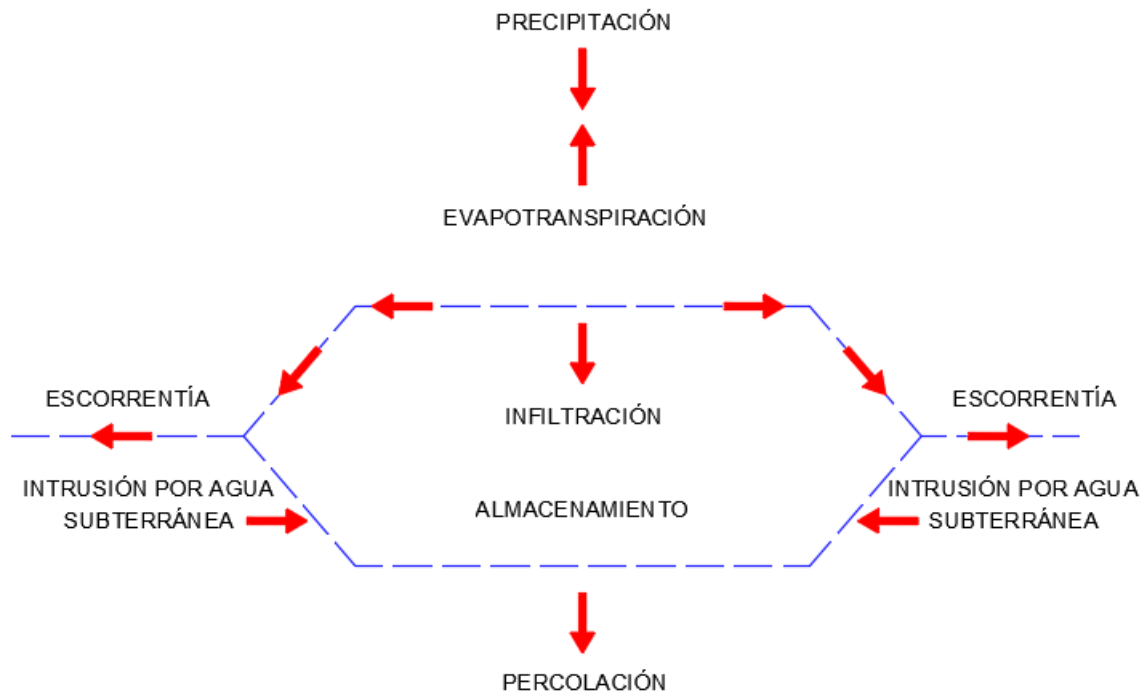


Figura 9. Esquema general de balance hídrico

Según Ramos (2011) en su trabajo sobre Geotecnia de rellenos sanitarios, establece que la lluvia es el factor más importante en la formación de lixiviados y aunque los residuos presentes en el relleno también aportan humedad, el mayor precursor para la formación de lixiviados es la infiltración del agua lluvia hacia el interior de la celda. También es importante saber que no toda el agua que se precipita sobre el relleno sanitario se filtra al interior de la celda y tampoco la lluvia es el único aporte de agua que va a recibir la celda en su interior.

Existe un porcentaje de la precipitación que se va a evaporar, esta cantidad dependerá de factores como la temperatura ambiental del sitio. Otro porcentaje de la precipitación fluye hacia afuera del área de la celda por escorrentía. Se puede considerar que la cantidad restante de agua precipitada se va a infiltrar dentro de la celda. Además del aporte al interior de la celda debido a la infiltración, se encuentra el aporte por la intrusión de agua o humedad subterránea y el lixiviado generado por la descomposición de los desechos.

A partir de lo anterior y lo representado en la Figura 9 se puede establecer de manera general que el balance hídrico se puede determinar mediante las siguientes ecuaciones:

$$I = P - ET - ES \quad (5)$$

Donde:

I: Infiltración (m³).

P: Precipitación (m³).

ET: Evapotranspiración (m³).

ES: Escorrentía (m³).

Luego de estimar la infiltración, se procede a estimar la percolación al fondo de la celda o cantidad de lixiviado generado mediante la siguiente ecuación:

$$Perc = I + IS + \Delta A \quad (6)$$

Donde:

Perc: Percolación (m³).

IS: Intrusión por agua subterránea (m³).

ΔA : Cambio de almacenamiento (m³).

Para proceder a realizar un modelo de balance hídrico en rellenos sanitarios, se cuenta con herramientas como el software Evaluación Hidrológica del desempeño de rellenos sanitarios, HELP por sus siglas en inglés. El modelo HELP estima el balance hídrico para vertederos y otros sistemas de disposición de desechos. Este programa contempla la lluvia, la escorrentía y la infiltración para estimar cuánta agua se acumula sobre cada capa del vertedero.

Costa, Lemos & Barbosa (2012), mencionan una serie de publicaciones donde se utilizó esta herramienta para determinar el balance hídrico en rellenos sanitarios de países tropicales. En dichas investigaciones se determinó que existía una diferencia entre el valor estimado con el modelo y los datos recolectados en campo. Esto se debe a que, por ejemplo, el modelo HELP no considera el lixiviado generado durante la compresión de los desechos sólidos ni el proceso de biodegradación. Otras herramientas como el programa

MODUELO generó datos que difieren entre un 20% a 30% menos con respecto a los datos recolectados en campo lo cual se debe a que no se consideró la influencia del contenido de humedad de los desechos.

Por su parte Yuen, Wang, Styles, & McMahon (2001) estudiaron comparativamente el balance hídrico para rellenos sanitarios húmedos y secos. Para este estudio se trabajó en una celda del relleno sanitario Lyndhurst en Melbourne Australia. Dicha celda fue dividida en 2 secciones donde la mitad seca se tomó como la sección de control y la mitad húmeda tenía un sistema de recirculación de lechada.

Para la celda en estudio se realizó el balance hídrico de la celda durante los 25 meses de llenado con desechos sólidos y se estimó que, de las precipitaciones, aproximadamente el 20% se evaporó, el 54% fue absorbida por los desechos y 26% fluyó por escorrentía. Una vez llenada y tapada la celda, el balance hídrico estimó que entre el 67% y el 84% de la cantidad de precipitación se evaporó, entre el 22% y el 8% fluyó por escorrentía y el restante se filtró en la celda.

Además del balance hídrico realizado a la celda, se estimó que la reinyección del lixiviado en la celda generó un incremento del contenido de humedad en la parte húmeda del 27% al 31% mientras que la parte seca de la celda se mantuvo con una humedad del 27%.

2.5 Modelo de flujo

El suelo al ser un medio poroso, donde dichos poros pueden estar interconectados entre ellos, permite que se dé un flujo a través de ellos. La facilidad con la que el flujo se mueve a través de un medio poroso depende de muchos factores asociados principalmente a las características físicas e hidráulicas del medio. Dentro de esas características podemos mencionar las siguientes:

- Conductividad hidráulica (permeabilidad).
- Tamaño de las partículas.
- Cantidad de vacíos
- Grado de saturación del medio.
- Características del fluido.

Conocer el comportamiento del flujo en un medio poroso resulta ser de suma importancia para la ingeniería geotécnica ya que permitirá estimar la manera en la que el fluido se moverá a través del medio, evaluar cómo la estabilidad de estructuras geotécnicas como taludes, muros o cimentaciones y diseñar sistemas de drenaje que faciliten la conducción o tratamiento del flujo analizado.

En un medio poroso, los fluidos se moverán desde los puntos de alta presión a los puntos de menor presión hasta alcanzar el equilibrio. Hasta el momento en que se haya alcanzado el equilibrio entre esos puntos de análisis, el flujo se denominará transitorio y una vez que se alcanza el equilibrio el flujo se convierte en un flujo estacionario. Esta última condición está en función de la permeabilidad del medio analizado por lo cual para un análisis de flujo resulta fundamental realizar un análisis de permeabilidad del material estudiado.

Como se mencionó anteriormente, el uso del permeámetro y la Ley de Darcy tal y como se planteó, son funcionales para un medio saturado sin embargo para medios no saturados se deben de tomar en cuenta otros aspectos relevantes del análisis.

Se sabe que un suelo es un medio compuesto por las partículas sólidas y los vacíos y que a su vez los vacíos van a estar compuestos por líquido y gas. Cuando el suelo se encuentra en un estado saturado, los vacíos están llenos de agua por lo tanto no se cuenta con la fase gaseosa. Para un medio no saturado es necesario tener en cuenta que se va a trabajar con las 3 fases convirtiendo se el gas en una variable más dentro del análisis.

Los suelos no saturados se pueden encontrar cerca de la superficie, lejos del nivel freático y por encima de la zona de saturación por capilaridad. En este tipo de suelos se considera que la conductividad hidráulica será menor que en un medio saturado dado que los vacíos ocupados por gas o aire se convierten en una barrera para el fluido dejando menos espacios para que el flujo se desplace y reduciendo la velocidad de este a través del medio poroso.

Para determinar el comportamiento del flujo en condiciones no saturadas se puede utilizar la ecuación de Richards, la ley de Darcy y los parámetros de Van Genuchten. La ley de Darcy para flujo en medio no saturado se muestra en la siguiente expresión:

$$q = k(\theta) \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z} \quad (7)$$

Donde k (m/s) es la conductividad hidráulica del medio poroso, ψ se refiere a la succión del medio debido a la capilaridad y z se refiere a la elevación desde el nivel de referencia. Tanto la permeabilidad como la succión dependerán de la humedad del medio y podrán ser determinada de acuerdo con los parámetros de Van Genuchten. La succión en función de la humedad se puede determinar con la siguiente expresión:

$$\frac{\theta - \theta_r}{n - \theta_r} \quad (8)$$

Donde θ_r (%) es el contenido de humedad residual y n (%) es la porosidad del medio.

Los rellenos sanitarios pueden ser muy similares a la de los suelos, sin embargo, la principal diferencia se encuentra en que los sólidos dentro de las celdas se degradan generando gases y lixiviados. Estos elementos constituyen parte del flujo dentro de las celdas de los rellenos sanitarios, que a su vez son los elementos más contaminantes generados por el tratamiento de los desechos. Por esta razón la interacción entre el desecho sólido, el lixiviado y el gas dentro de los vertederos tiene un comportamiento complejo.

Para analizar el comportamiento del lixiviado se han desarrollado distintas metodologías que estudian el comportamiento del flujo en distintos escenarios y que ya han sido implementadas en distintas investigaciones. El Cuadro 2 muestra el nombre de algunos de los modelos que permiten el análisis del flujo mediante modelos numéricos y algunas de sus aplicaciones.

Cuadro 2. Modelos de flujo y aplicaciones empleadas

Modelo	Descripción	Aplicación
SUTRA	Modelo de flujo saturado y no saturado con capacidad para variar la densidad, así como modelar el transporte de soluto y de energía	SUTRA se usó para modelar la distribución de lixiviados alrededor de dispositivos de recirculación de lixiviados verticales y horizontales para una gama de tasas de adición de lixiviados, permeabilidades, anisotropía y heterogeneidad de los residuos.
MODFLOW	Modelo de flujo de aguas subterráneas, utilizado para simular el flujo estacionario y transitorio.	Utilizado para modelar la infiltración dentro del relleno sanitario con variaciones en la conductividad hidráulica como función del esfuerzo efectivo.
TOUGH (2)	Modelo de flujo no saturado, generación de calor y movimiento del gas	Modelo de flujo que incorpora la interacción entre el gas y el líquido. Utilizado en un vertedero de biorreactores
VS2DI	Modelo de diferencias finitas que simula el flujo del lixiviado y el soluto o el transporte de energía en medios porosos saturados y no saturados	Utilizado para simular el flujo de líquido desde zanjas horizontales en un medio homogéneo e isotrópico para estimar las extensiones laterales y verticales de la zona de impacto en función de la presión de inyección para el funcionamiento intermitente del sistema
HYDRUS	Modelo de elementos finitos para simular el movimiento en 2 dimensiones de agua, calor y solutos en medios con distintos grados de saturación.	Modelo de flujo en estado estacionario del flujo en trincheras horizontales en función de las presiones de inyección, geometría y tamaño de la zanja, conductividad hidráulica del relleno de la zanja y espaciado horizontal y vertical de la zanja para residuos isotrópicos
SEEP/W	Simula el flujo en medios saturados y no saturados utilizando una combinación de elementos finitos y métodos de diferencia finita	Usado modelar la distribución de líquidos horizontales y verticales de diferentes orígenes para un rango de presión de inyección de lixiviados, permeabilidad y anisotropía de desechos.

Fuente: (Townsend, y otros, 2015)

El uso de estos y otros modelos, permite estimar el comportamiento del lixiviado y del gas bajo diferentes escenarios donde claramente uno de los temas más importantes es la determinación de la cantidad y comportamiento del lixiviado y gases generados dentro de una celda. De este tema se pueden generar muchas investigaciones como por ejemplo Loehr & Haikola (2003) analizaron la producción a largo plazo de lechadas en la cual determinaron que, durante el periodo de operación, la cantidad de lixiviado primario corresponde a un 64% de la precipitación presente en sitio. Posterior al cierre, la producción de lixiviado correspondía a un promedio del 2% de la precipitación. En ambos casos, la cantidad de lixiviado secundario generado osciló en un rango entre el 1% y el 0,25%.

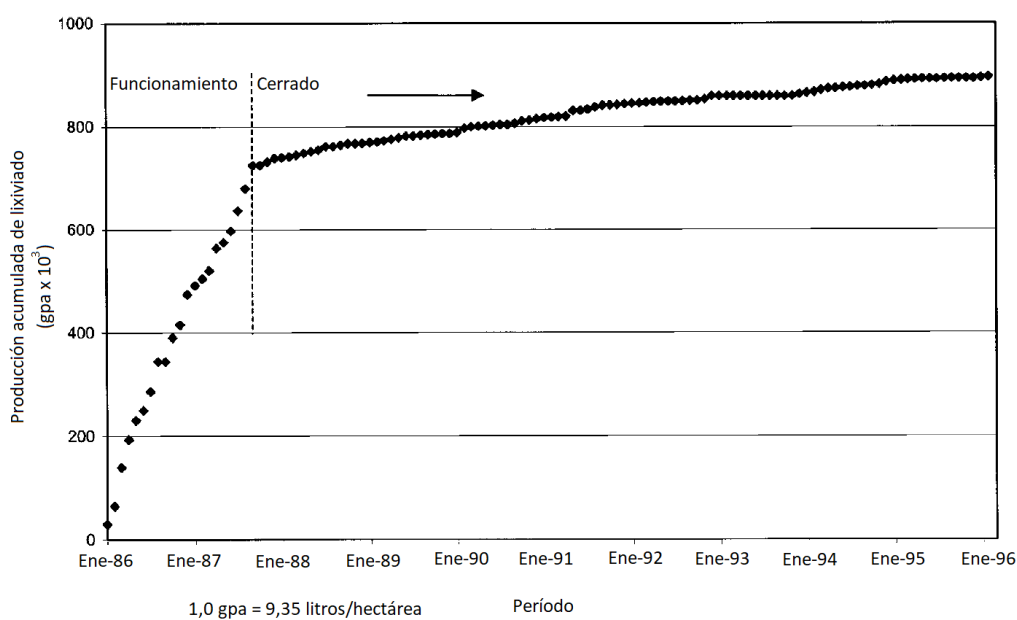


Figura 10. Producción acumulada de lixiviados.

Fuente: Loehr & Haikola (2003)

La complejidad de la interacción entre las fases hace necesario que se considere un régimen de flujo heterogéneo a través de la celda del relleno. Este criterio no fue utilizado en los primeros modelos de flujo en rellenos sanitarios donde se consideraba el medio como un medio poroso y homogéneo. Esto se puede apreciar en la publicación de Demetracopoulos, Sehayek, & Erdogan (1986) sobre modelación de lixiviados en rellenos sanitarios municipales. En dicha investigación se indica que el modelo matemático utilizado considera el material como homogéneo, donde el líquido únicamente se mueve verticalmente.

Modelos de flujo más recientes como el desarrollado por McCreanor & Reinhart (2000) consideran el comportamiento del flujo a través del material como un material anisotrópico homogéneo y también como un material heterogéneo. El escenario anisotrópico homogéneo se modeló utilizando conductividades hidráulicas verticales de 10^{-3} cm/s y 10^{-4} cm/s mientras que la conductividad hidráulica horizontal se simuló como un orden de magnitud mayor que estos valores. La masa heterogénea de desechos se simuló aplicando relaciones estadísticas con las conductividades hidráulicas locales.

Los modelos más nuevos también consideran otros aspectos que durante el tiempo y gracias a investigaciones realizadas en el tema de flujo, han empezado a ser considerados. Por ejemplo, se considera la variación en la permeabilidad de los sólidos vertical y horizontalmente, también se considera la variación de la humedad, la saturación y la succión de los sólidos. Fellner & Brunner (2010) modelaron el comportamiento del flujo dentro del relleno sanitario tomando en cuenta que este se desplaza en 2 direcciones y en 2 medios. Estos medios son la matriz que tiene una gran capacidad de almacenamiento donde el flujo será en su mayoría se desplaza horizontalmente y a bajas velocidades. El otro medio tendrá una baja capacidad de almacenamiento donde el flujo se desplazará a mayores velocidades y verticalmente se llamará canal dominante.

Para la construcción del modelo se caracterizó la matriz para determinar la succión, la conductividad hidráulica no saturada y el contenido de humedad. Dichos valores fueron comparados con valores de la literatura tal y como se muestra en la Figura 11 donde se muestra que los datos obtenidos siguen la tendencia de los valores recolectados en la literatura.

Los resultados de esta modelación demostraron que el comportamiento del flujo dentro de las celdas de rellenos sanitarios es diferente a la de los suelos y presentan un comportamiento no uniforme debido a la presencia de materiales impermeables o zonas de bajas permeabilidad para el flujo horizontal y a zonas de alta permeabilidad para el flujo vertical. Sin embargo, a pesar de que el modelo se logró calibrar con datos de campo y revisiones a la literatura, no se logró determinar el grado de heterogeneidad del flujo en la celda.

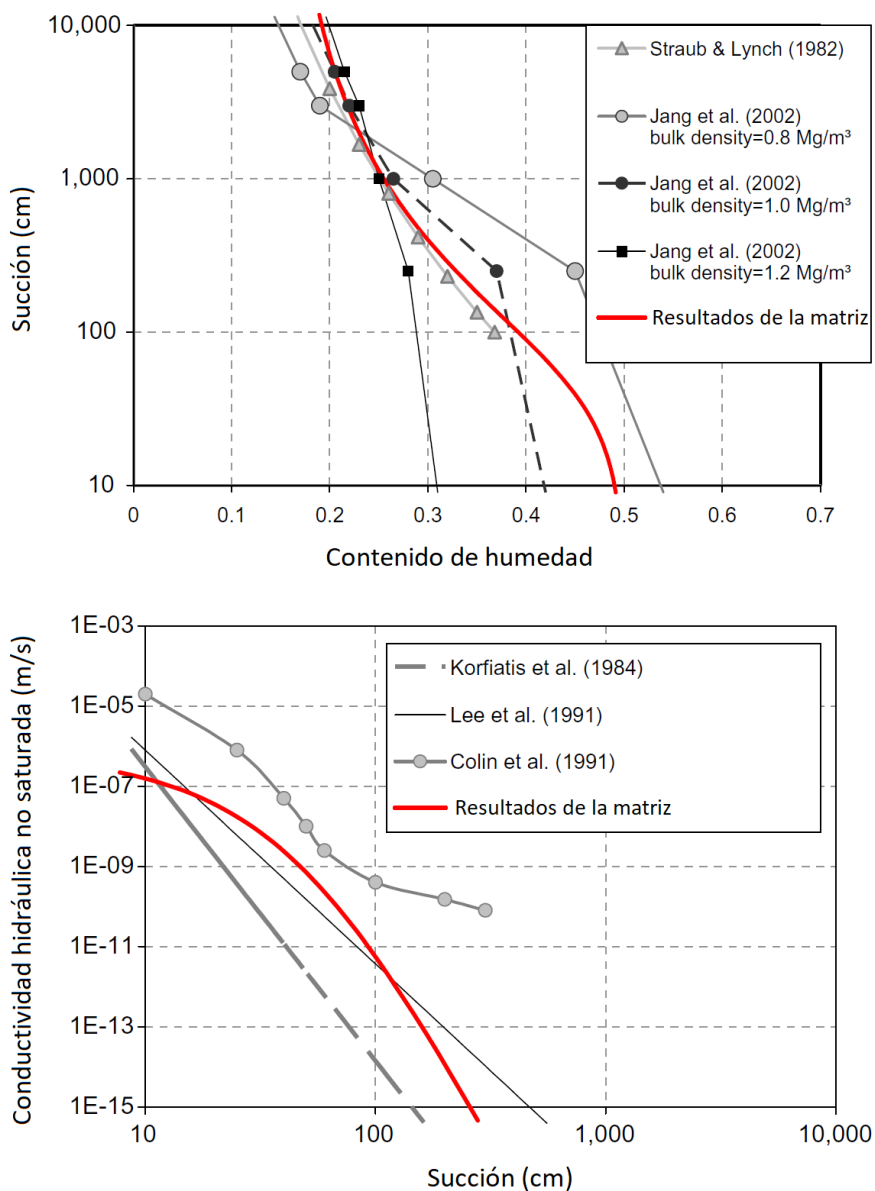


Figura 11. Caracterización de la matriz del relleno sanitario

Fuente: Fellner & Brunner (2010)

Los modelos de flujo no saturado han tomado relevancia en los últimos años por lo cual ha sido necesario caracterizar los factores que afectan el flujo bajo estas condiciones. Feng, Zheng, & Chen (2017) realizan una revisión de los modelos que actualmente existen y que analizan el comportamiento del flujo en rellenos sanitarios como un medio no saturado. En los modelos analizados es claro que existen claras limitaciones debido principalmente a la variabilidad de los materiales existentes y a la biodegradación de estos.

Para determinar el comportamiento del gas dentro de la celda, para simplificar el análisis, la mayoría de las teorías analíticas asumen una tasa de generación de gas y permeabilidad homogéneas. Sin embargo, la tasa de generación de gas y la permeabilidad de los rellenos sanitarios no es homogénea con respecto a la profundidad debido a la compresión, la degradación y una distribución no homogénea del contenido de humedad de los desechos (Faour, Reinhart, & You, 2006).

El gas generado dentro de la celda del relleno está compuesto principalmente de metano (45-60%) y dióxido de carbono (40-55%) con trazas de otros gases como dióxido de azufre o compuestos orgánicos volátiles. (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1993). La composición de este gas tiene un alto potencial energético y contaminante, por lo que conocer el comportamiento de este es de suma importancia.

Modelos numéricos más recientes, analizan el relleno por capas con diferentes valores de coeficientes de permeabilidad horizontal y vertical, y distintas tasas de generación de gas. Por ejemplo, Shi-Jin Feng & Qi-Teng Zheng (2014) analizó el flujo de gas a través del sistema de drenaje del relleno, tomando en cuenta los distintos valores de permeabilidad y generación de gas. En este caso, el sistema de drenaje está compuesto por pozos verticales y drenajes horizontales.

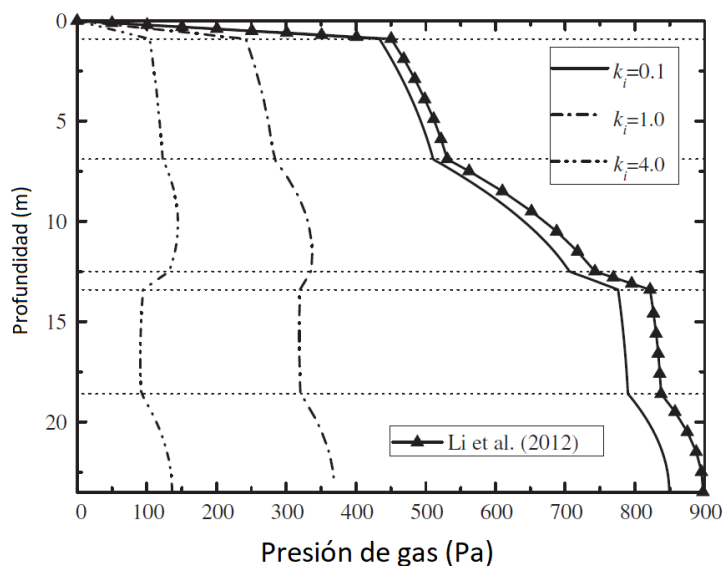


Figura 12. Variación de la presión de gas para distintos valores de profundidad.

Fuente: Feng & Zheng, 2014

La Figura 12, muestra la variación de la presión de gas con respecto a la profundidad para distintos valores de coeficientes de permeabilidad. Los distintos valores de permeabilidad $k_r = 0,1$, $k_r = 1,0$, $k_r = 4,0$; corresponden a modelos realizados por Feng & Zheng. Dichos modelos muestran que las mayores presiones de gas se alcanzan en el fondo de la celda y claramente muestran la influencia de la anisotropía en la presión del gas dentro de la celda.

Capítulo 3. Metodología

El presente trabajo se desarrolló como parte del proyecto de investigación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica registrado como Evaluación de la respuesta mecánica de desechos sólidos ordinarios depositados en un relleno sanitario en clima tropical. Se contó con el apoyo de la empresa Tecnoambiente quienes facilitaron el acceso al proyecto Parque Ecoindustrial de Miramar que es un relleno sanitario ubicado en Miramar de la provincia de Puntarenas. En dicho relleno sanitario se depositan, se tratan y se le da disposición final de los desechos sólidos de varios cantones del país.

El acceso a dicho relleno queda sobre la ruta Interamericana Norte (Ruta 1), exactamente a 7,5 km de la estación de RECOPE en el sentido Puntarenas Guanacaste.



Figura 13. Ubicación del Relleno Sanitario de Miramar.

Proyección: CRTM-05

Mapa base: Google Maps.

3.1 Caracterización de los materiales

El acceso al sitio de estudio y la asesoría del personal operativo del relleno permitió tomar muestras de los materiales depositados en las celdas del relleno para el respectivo análisis en laboratorio. Las muestras que fueron analizadas se obtuvieron a distintas profundidades mediante el uso de maquinaria pesada tipo retroexcavadora y aprovechando las distintas terrazas del relleno.

Esto se realizó así con el fin de que las muestras tengan diferentes edades y de esta manera poder evaluar la variación en las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas a diferentes edades debido a la presencia de desechos sólidos y a la degradación que estos sufren al pasar el tiempo. La construcción de las celdas a través de terrazas permitió el acceso a diferentes alturas de esta y con esto se logró alcanzar las muestras a mayor profundidad y por ende con más tiempo de estar en el relleno.



Figura 14. Uso de terrazas para la construcción de celdas.

Para conocer la edad de las muestras, se entrevistó a la ingeniera encargada de la operación del relleno y al personal técnico que trabaja continuamente en la colocación de los desechos y conformación de las celdas. Gracias a este conocimiento se ubicaron los puntos donde se obtuvieron muestras de desechos con edades desde un mes hasta 5 años

y más de estar colocados en las diferentes celdas del relleno. En adelante, la muestra de 5 años y más será denominada como muestra de 5 años. También se procedió a analizar el suelo utilizado como suelo de cobertura para cubrir las distintas capas de desechos y darle la cobertura final a la celda.

Las muestras obtenidas en el relleno fueron llevadas a laboratorio para obtener las propiedades físicas e hidráulicas mediante ensayos de laboratorio. Los ensayos ejecutados a las distintas muestras son los siguientes:

- Contenido de humedad.
- Contenido de orgánicos.
- Límites de Atterberg.
- Análisis granulométrico.
- Gravedad específica.
- Permeabilidad.
- Curvas características del suelo.

Para la ejecución de los anteriores ensayos se utilizó como referencia la normativa de American Society of Testing Materials (ASTM) ya que se consideró importante utilizar métodos conocidos y validados de manera que se asegure la validez de los resultados obtenidos. A continuación, se presenta una descripción de los ensayos realizados para caracterizar las muestras analizadas.

3.2 Determinación de las propiedades físicas de las muestras.

3.2.1 Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad de las muestras obtenidas, se tomó como referencia el procedimiento establecido por la norma ASTM D2216. Las muestras de suelo se colocaron en un horno a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ hasta que se alcance la masa constante de la muestra de manera que se asegure que los líquidos presenten en las muestras han sido eliminados. En dicha condición se determinó el peso seco de la muestra y el peso del agua para determinar el contenido de humedad al relacionar dichos valores.

3.2.2 Contenido de material orgánico

El contenido de material orgánico en las muestras analizadas se podrá determinar aplicando la norma AASHTO T 267 (2018) que es el método para determinar el contenido

orgánico en suelos por pérdida debido a la ignición. En este método se selecciona una muestra representativa la cual es pesada y colocada dentro de un horno tipo mufla el cual es encendido para calentar la muestra y hasta que las partículas orgánicas sean sublimadas.

Para aplicar este procedimiento es necesario someter a las muestras previamente pesadas a una temperatura de $455\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 6 horas. Posterior a este periodo la muestra debe ser retirada de la mufla para que alcance una temperatura ambiente y poder determinar su masa final. La relación entre la masa final y la masa inicial será el contenido de orgánicos de la muestra.

3.2.3 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se determinan para la fracción fina de las muestras. Para esto se tamizaron los especímenes de ensayos por la malla de 0,425 mm (N° 40) de tamaño de abertura. Con el material pasando dicho tamiz se procede a determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad utilizando la norma ASTM D4318. Con dichos resultados se clasificaron las muestras a partir de la carta de plasticidad para su posterior clasificación SUCS. Adicionalmente con dicho resultado se puede conocer el estado del suelo al relacionar los límites con el contenido de humedad de la muestra.

3.2.4 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico de las muestras analizadas se realizó mediante la aplicación del ensayo ASTM D7928. Dicho procedimiento permite determinar la distribución de partículas de suelo mediante el uso del hidrómetro. Esta metodología permite conocer la gradación de las muestras más finas que el tamiz de 0,075 mm (N° 200) con lo cual se logra determinar la cantidad de limos y arcillas presentes en una determinada muestra. Adicionalmente para la fracción retenida en el tamiz N° 200 se realizó un proceso de tamizaje de manera que junto con los resultados del hidrómetro se pueda generar la curva de distribución granulométrica completa para cada muestra analizada.

3.2.5 Gravedad específica

Al conocer la gravedad específica de los suelos muestreados, se podrá determinar la densidad de los sólidos del suelo al relacionar la gravedad específica con la densidad del agua. Además, la gravedad específica permite estimar importantes relaciones de los suelos

como relación de vacíos o saturación. Para calcular la gravedad específica de suelos, se utilizó la norma ASTM D854.

Este método es aplicable para materiales que no floten en el agua por lo que, en caso de presentarse este fenómeno, dichas partículas deberán ser retiradas del picnómetro de manera que se analicen únicamente las muestras que son más densas que el agua. Posteriormente dichas partículas serán sacadas del picnómetro y secadas en el horno para determinar así el peso del material analizado.

3.3 Determinación de las propiedades hidráulicas de las muestras

3.3.1 Permeabilidad

Para determinar la conductividad hidráulica de los materiales muestreados en el relleno sanitario de Miramar, se utilizó como referencia la normativa ASTM D5084. Al determinar la conductividad hidráulica de los suelos presentes en el relleno sanitario, se busca analizar el comportamiento del flujo debido a las variaciones en la permeabilidad.

Para realizar el ensayo de permeabilidad se utilizarán muestras previamente procesadas que serán colocadas en un permeámetro con densidades similares a las utilizadas en el relleno sanitario en estudio. Las muestras se someterán a un proceso de saturación durante un período cercano a las 48 horas para posteriormente proceder a la toma de lecturas del ensayo de permeabilidad.

Para estimar la permeabilidad de cada una de las muestras se utilizará la siguiente ecuación:

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (9)$$

Donde:

k: Conductividad hidráulica de la muestra (permeabilidad) (m/s).

Q: Volumen de líquido recolectado en un tiempo definido (m³).

L: Longitud de la muestra analizada a través de la cual se mueve el líquido (m).

A: Área de la sección de la muestra analizada (m²).

h: Diferencia de carga en manómetros (m).

t: Tiempo de duración del ensayo (s).

Al final de la realización de las pruebas de permeabilidad, para determinar la saturación de la muestra analizada se procederá a calcular la humedad final de las muestras. Conociendo la humedad final y las dimensiones de la probeta se puede estimar el grado de saturación mediante la siguiente expresión:

$$S(\%) = \frac{\%H * Gs}{e} \quad (10)$$

Donde:

S: Grado de saturación de la muestra analizada (%).

%H: Contenido de humedad de la muestra (%).

Gs: Gravedad específica de las partículas de sólido analizadas.

e: Relación de vacíos de la muestra (%).

Los resultados de la humedad final se obtendrán luego de realizar los ensayos de permeabilidad al tomar la muestra del permeámetro, obtener el peso total de la muestra y colocarla en el horno para que se seque y de esta manera poder determinar el contenido de humedad.

3.3.2 Succión del suelo

Para determinar el potencial de succión de las muestras obtenidas, se tomó como referencia el método de ensayo establecido en la norma ASTM D5298 (2016). Dicho procedimiento utiliza papel de filtro debidamente calibrado y cuyo potencial de succión es conocido y que al entrar en contacto con el suelo se determinará la succión de este para diferentes contenidos de humedad.

Para la calibración del papel se realizará un proceso de secado del papel utilizando un horno con el objetivo de eliminar el contenido de humedad que estos presenten. Posteriormente estos papeles se colocarán en recipientes sellados que contienen soluciones de KCl y NaCl a diferentes concentraciones de manera que se pueda determinar la succión del papel a diferentes humedades.

El proceso de calibración se debe realizar durante al menos 7 días colocando los recipientes en un sitio que mantenga las condiciones de humedad y temperatura controladas. El papel no debe entrar en contacto con la solución por lo que se debe colocar algún tipo de espaciador que asegure mantener la distancia entre la solución y el papel. Una vez transcurridos los 7 días se determinará el contenido de humedad de los papeles colocados en cada solución



Figura 15. Proceso de calibración de papel de filtro

Las concentraciones de las soluciones utilizadas para la calibración del papel se muestran en el Cuadro 3:

Cuadro 3. Concentraciones de soluciones para calibración de papel de filtro

Molalidad (g/mol)	Concentración de solución (g/L)	
	NaCl	KCl
2,000	117,0000	149,0000
1,600	93,6000	119,2000
0,600	35,1000	44,7000
0,400	23,4000	29,8000
0,020	1,1700	1,4900
0,005	0,2925	0,3725

Para construir la curva de calibración se grafica el contenido de humedad de los papeles junto con los valores de succión de cada solución. Se utilizarán los valores de succión reportados por Bulut, Lytton, & Wray (2001) para varias molalidades y soluciones.

Para determinar la succión del suelo se deberá seguir un proceso similar al utilizado en la calibración del papel. En dicho proceso el suelo en estudio será colocado dentro de diferentes recipientes con diferentes contenidos de humedad y posterior a esto se colocará en papel de filtro dentro del recipiente el cual deberá ser sellado tal y como se realizó para el proceso de calibración.

En caso de requerir medir la succión total, el papel no deberá estar en contacto con el suelo por lo que se deberá colocar una pantalla divisora que evite el contacto entre el papel y el suelo pero que a la vez permita que el papel realiza el proceso de succión. Cuando se requiera medir la succión matricial, el papel de filtro deberá estar en contacto directo con el suelo por lo que no se requiere colocar ninguna pantalla adicional.

Para asegurar que se alcance el equilibrio entre el papel y el suelo, se recomienda dejar las muestras reposando un periodo de al menos 7 días posterior al cual se podrá determinar la masa final y la masa seca de los papeles.

3.3.3 Curva característica del suelo

Para la construcción de la curva característica de los materiales analizados, se utilizarán los resultados de la determinación de la succión del suelo mediante el método del filtro de papel. Dichos resultados se aplicarán al modelo desarrollado por Van Genuchten (1980) para obtener así la curva característica de los materiales analizados. El modelo matemático desarrollado por Van Genuchten es el siguiente:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (11)$$

Donde:

θ : Contenido de humedad volumétrico (%).

θ_r : Contenido de humedad volumétrico residual (%).

θ_s : Contenido de humedad volumétrico saturado (succión cero) (%).

α : Parámetro de la curva dependiente del tamaño de la partícula de la muestra analizada.

h: Succión (kPa).

n: Parámetro de la curva.

m: Parámetro de la curva.

Los parámetros de la curva mencionados anteriormente se determinarán a partir ecuaciones desarrolladas en la investigación realizada por White, Zardava, Nayagum, & Powrie (2015) donde recopilaron datos de análisis realizados a materiales de distintos rellenos sanitarios para establecer ecuaciones que permiten estimar dichos parámetros a partir del contenido de humedad volumétrico saturado (θ_s).

En el Cuadro 4 se muestran las ecuaciones propuestas por White, Zardava, Nayagum, & Powrie (2015) utilizadas en el presente proyecto.

Cuadro 4. Determinación de los parámetros del modelo de Van Genuchten

	Ecuación	Condición
α	$\alpha = 0,118$	$\theta_s < 0,42$
	$\alpha = 7,9\theta_s - 3,2$	$0,42 < \theta_s < 0,73$
	$\alpha = 2,567$	$\theta_s > 0,73$
θ_r	$\theta_r = 0,268$	$\theta_s < 0,42$
	$\theta_r = 0,52 - 0,6\theta_s$	$0,42 < \theta_s < 0,6$
	$\theta_r = 0,16$	$\theta_s > 0,6$
n	$n = 1,55$	$\theta_s < 0,52$
	$n = 3,5\theta_s - 0,27$	$0,52 < \theta_s < 0,62$
	$n = 1,9$	$\theta_s > 0,62$
m	$1 - \frac{1}{n}$	N/A

La construcción de las curvas características de los suelos analizados se realizará mediante el uso de la herramienta RETC que es un programa que puede utilizarse para analizar las funciones de retención de agua del suelo y de conductividad hidráulica de los suelos no saturados. El programa utiliza los modelos paramétricos de:

- Brooks-Corey (1964).
- Van Genuchten (1990).
- Modelo de distribución log normal de Kosugi (1996)
- Modelo de permeabilidad dual de Durner (1994)

Utilizando dichos modelos se logra representar la curva de retención de agua del suelo, y los modelos teóricos de distribución del tamaño de los poros de Mualem (1976) y Burdine (1953) para predecir la función de conductividad hidráulica no saturada a partir de los datos de retención de agua del suelo.

Los valores que dicha aplicación permite ingresar son el tipo de problema, las unidades, el modelo a utilizar, los parámetros del suelo y los datos de succión del suelo. En la Figura 16 se presenta la interfaz de la aplicación RETC tomada del sitio web de descarga.

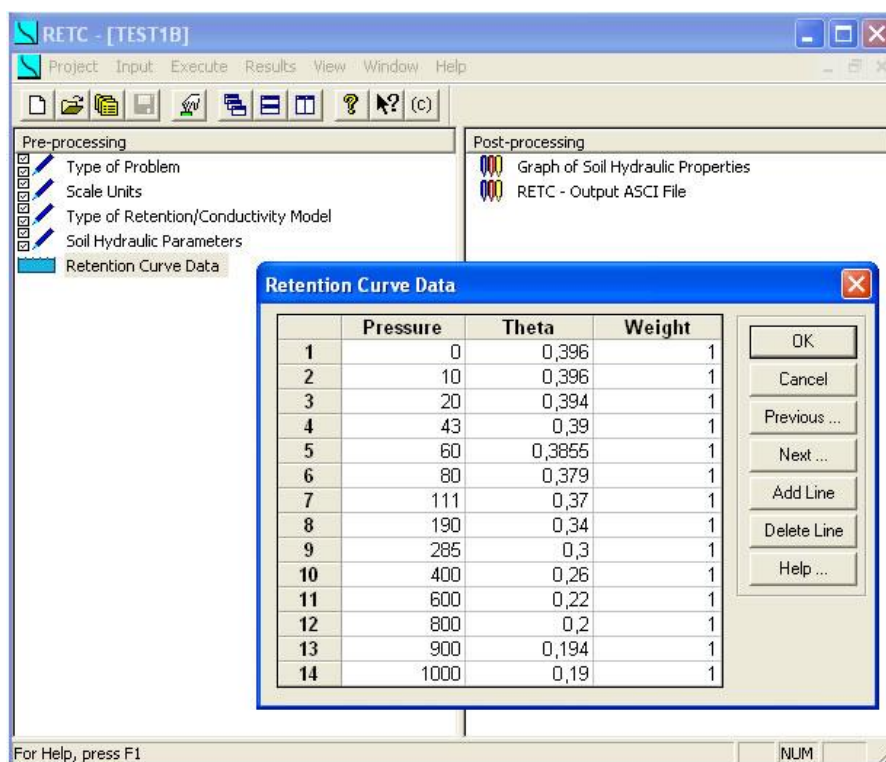


Figura 16. Interfaz de aplicación RETC

3.4 Balance hídrico

Conocer el comportamiento y la variación de la conductividad hidráulica dentro del relleno sanitario permitirá que el modelo de flujo refleje de una manera precisa el comportamiento de este dentro de la celda. Para lograr esto se requiere determinar el balance hídrico del sitio en análisis con el cual se determinará el comportamiento del flujo dentro de la celda. El sitio seleccionado para el presente estudio cuenta con una estación meteorológica que registra distintos datos como por ejemplo la precipitación y la temperatura ambiental durante el día. Con estos datos se podrá utilizar la herramienta HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) para determinar el balance hídrico del relleno sanitario de Miramar.

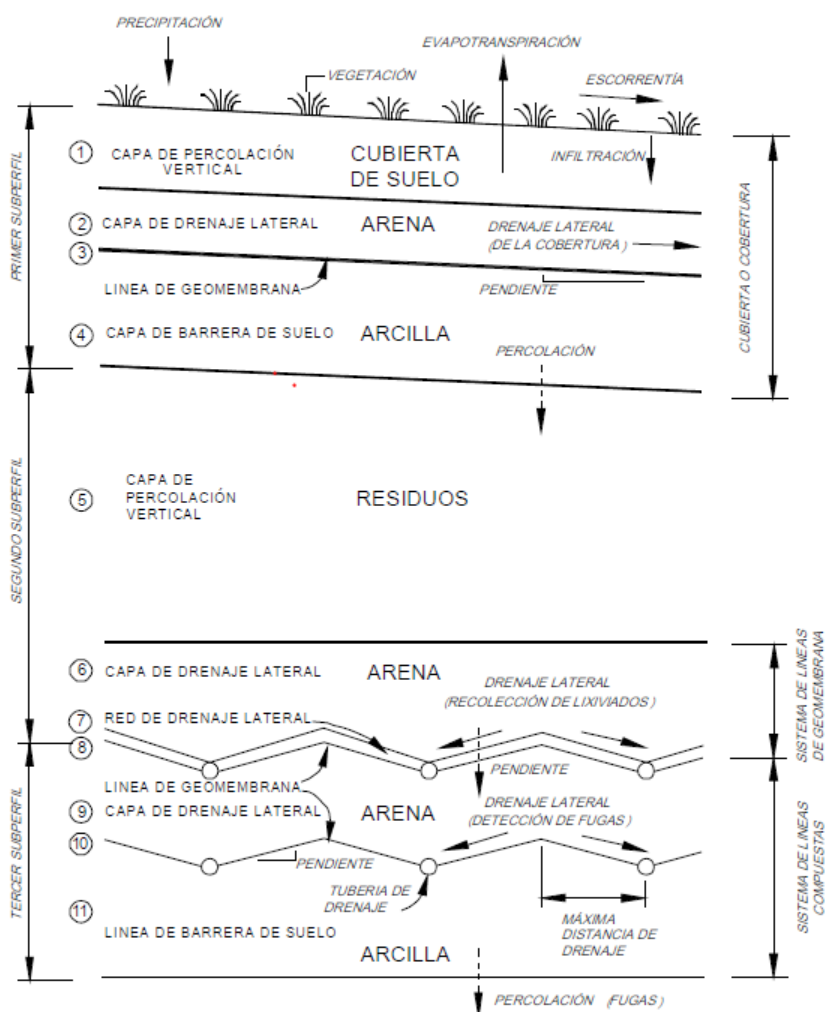


Figura 17. Esquema conceptual de modelo HELP.

Fuente: Vargas Guerrero (2009)

El modelo HELP fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos para EPA (Environmental Protection Agency) el cual es un modelo hidrológico bidimensional del movimiento del agua a través, hacia, y fuera de los vertederos. Estima el balance hídrico de los vertederos y otros sistemas de tratamiento de residuos. El programa modela las precipitaciones, la escorrentía, la infiltración y otras fuentes de agua para estimar la cantidad de lixiviado generado dentro del relleno sanitario. El modelo tiene en cuenta los parámetros de diseño utilizados en la construcción de las celdas y puede incorporar los siguientes datos:

- Vegetación.
- Tipo de suelo.
- Uso de geosintéticos.
- Condiciones iniciales de humedad.
- Espesores de capas.
- Taludes y pendientes.
- Condiciones de drenaje.

Para la utilización del modelo HELP, EPA cuenta con una aplicación de libre acceso tipo hoja de cálculo donde se ingresan los diferentes datos requeridos para generar el modelo de Balance hídrico. En la siguiente imagen se muestra la interfaz de la herramienta utilizada para la generación del modelo de balance hídrico.

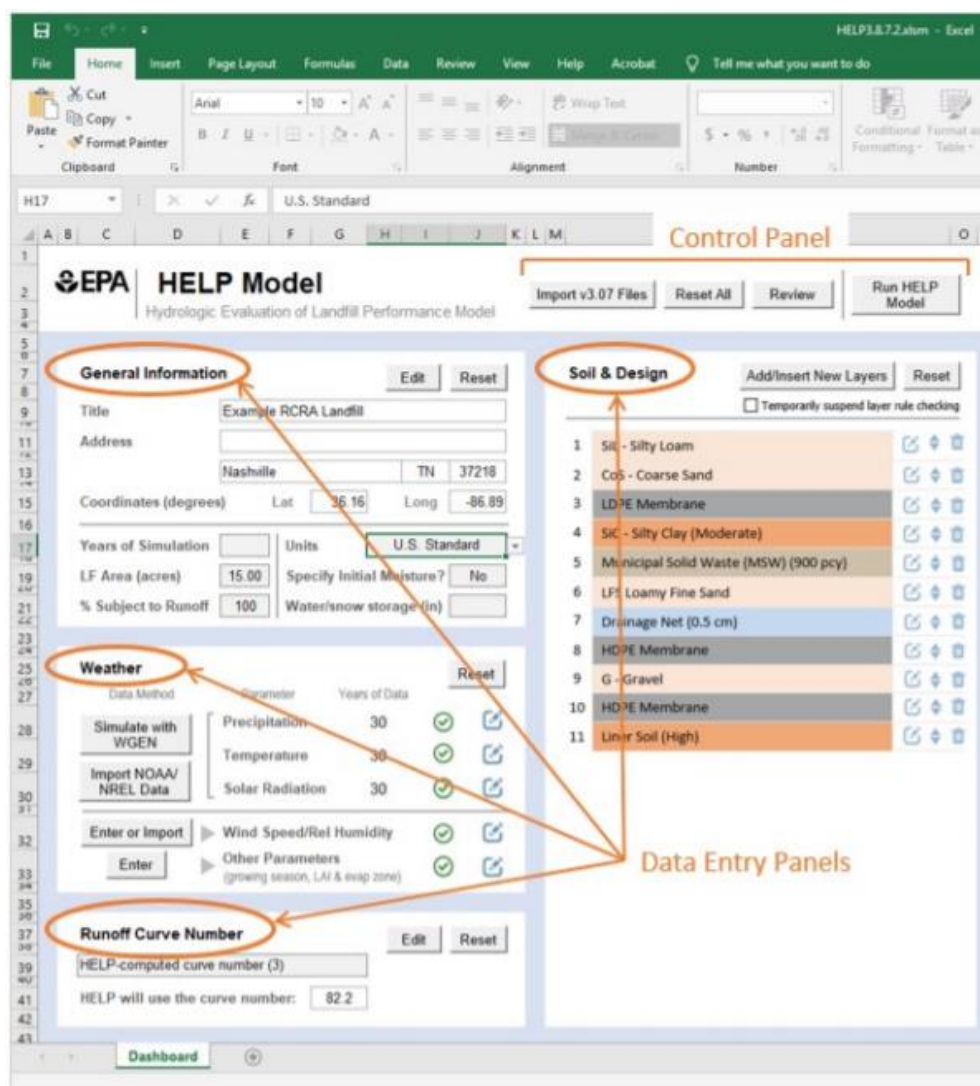


Figura 18. Interfaz de aplicación para la implementación del modelo HELP

Para el uso de la aplicación del modelo HELP, se debe ingresar la información general del sitio analizado como por ejemplo las coordenadas y la ubicación. Se debe ingresar los años de simulación del modelo para la estimación del balance hídrico y otros aspectos como el área de cobertura del relleno sanitario y el sistema de unidades a utilizar en la modelación.

Adicionalmente se debe registrar la información climatológica requerida por la herramienta como por ejemplo la precipitación, la temperatura y la radiación solar. Estos datos son obtenidos de los registros de la estación meteorológica del relleno sanitario con excepción de la radiación solar debido a que este parámetro no es registrado por dicho equipo. HELP

permite que estos parámetros sean ingresados o bien se importen de bases de datos lo cual fue lo usado para la radiación solar.

Para contar con el dato de radiación solar, la herramienta del modelo HELP permite importar datos desde el sitio The National Renewable Energy Laboratory (NREL) que cuenta con datos de radiación solar para distintos puntos de Costa Rica, dentro de ellos la zona de Miramar. Al seleccionar el sitio en estudio y el periodo de análisis se habilita la opción de descarga de datos a través de un link, el cual contiene los datos que se cargan a la herramienta HELP.

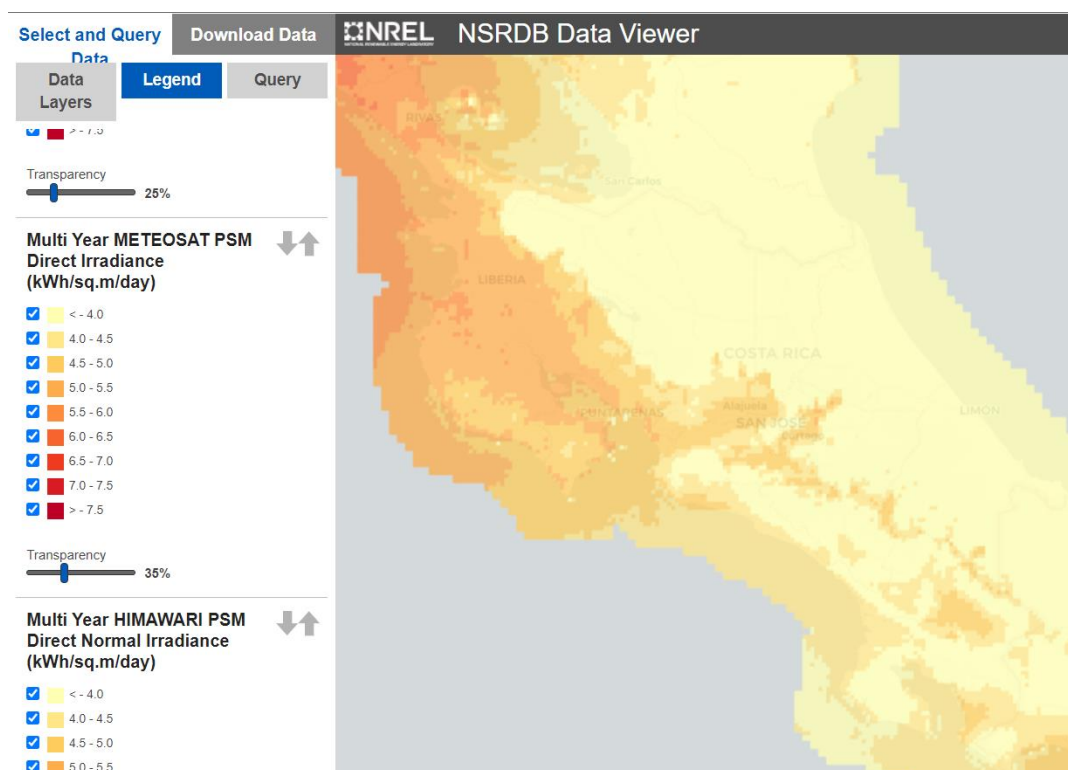


Figura 19. Radiación solar en Costa Rica según sitio de NRLE

Datos adicionales que se deben ingresar en la aplicación son los de humedad relativa y velocidad del viento. HELP solicita que se ingrese un dato de velocidad del viento promedio y cuatro datos de humedad relativa para cada trimestre del año.

Por último, para correr el modelo se deben ingresar las capas de la celda del relleno y sus características. La herramienta HELP permite ingresar distintas capas de materiales con propiedades preestablecidas por la aplicación o bien ingresar. De igual manera es posible

editar dichas propiedades y utilizar las definidas mediante estudios realizados a las capas de materiales en análisis.

Soil & Design

Layer No. 3

Layer category: Waste | Standard HELP layer
 Saved custom layer
 New custom layer

Layer description: Desechos 2 años | Edit Description

Layer thickness: 500 (cm) | Layer texture no.: 86

Total porosity (vol/vol): 0,722 | Wilting point (vol/vol): 0,077
 Field capacity (vol/vol): 0,38 | Saturated hydraulic conductivity (cm/s): 1 E -3

Subsurface inflow* (mm/y):

* Optional (blank value assumed to be "0" or N/A)

Cancel | Reset | Submit

Figura 20. Ventana de ingreso de propiedades de materiales.

Para finalizar y poder correr el modelo, la herramienta HELP realiza una revisión de todos los parámetros ingresados para verificar que los mismos cumplan con lo requerido por la aplicación.

El relleno sanitario de Miramar ha construido varias celdas de manera secuencial de manera que conforme se van colocando desechos en una de ellas, al lado se está construyendo la siguiente celda. Todas las celdas están conectadas a la misma planta de tratamiento donde se conducen los lixiviados generados por el tratamiento de los desechos. Se podría decir que al estar las celdas juntas y enviar los lixiviados a una misma planta de tratamiento, el relleno sanitario está trabajando con una macrocelda integrada por celdas más pequeñas.

Por esta razón se van a realizar balances hídricos para cada una de las celdas que integran el relleno sanitario de manera que se pueda tener la estimación de la cantidad de lixiviado que se está generando dentro del relleno sanitario.

3.5 Modelo de flujo

La construcción del modelo de flujo se realiza a partir de datos de campo como los levantamientos topográficos de la celda y de los resultados de los distintos análisis de laboratorio realizados a los materiales muestreados. Para la elaboración del modelo se realizan dos perfiles de las celdas a partir del levantamiento topográfico de la celda. Los perfiles propuestos corresponden a zonas cercanas a los sitios de muestreo de desechos.

La herramienta utilizada para la construcción del modelo de flujo será el programa Slide® desarrollado por RocScience en el cual se ingresarán los perfiles de la celda obtenidos de la topografía y de la información de la base de la celda. En el Anexo 2 Anexo 2. Levantamiento topográfico de relleno sanitario se muestra el levantamiento utilizado como referencia.

En el modelo de flujo se utilizará la misma información obtenida del balance hídrico como por ejemplo la infiltración. Para este caso, como se conoce el volumen de infiltración obtenido del balance hídrico, se propone una tasa de infiltración al relacionar el volumen infiltrado y el área de la celda. Adicionalmente se utilizará el número de capas, espesores, las propiedades físicas e hidráulicas de los materiales usadas en el análisis de balance hídrico.

Para cada capa de desecho se definirá una tasa de producción de lixiviado, con lo cual se podrá determinar un volumen total de lixiviado producido para el relleno sanitario. Esto permite estimar la cantidad de volumen generado al interior de la celda debido a la infiltración y la producción de lixiviado. La medición del lixiviado generado en el interior de la celda se logra realizar al colocar colectores de caudal, los cuales deben estar de manera perpendicular a las líneas de flujo. En el modelo propuesto, estos colectores de caudal se colocan en la parte inferior de la celda y a los extremos, considerando que son los puntos donde se realiza la recolección del lixiviado.

Utilizando los resultados del modelo de flujo, se realizará una comparación con los resultados de campo facilitados por la administración del relleno. El objetivo de dicha comparación es verificar si los resultados de la modelación se ajustan a los datos de campo de manera que se pueda validar el análisis realizado o bien, verificar si se requieren ajustes en el modelo.

Capítulo 4. Resultados

Los resultados que se presentan a continuación son producto de los análisis de campo y laboratorio realizados en el Parque Ecoindustrial de Miramar. A partir de los muestreos realizados se procedió a realizar una serie de ensayos que permitieron realizar los correspondientes modelos para determinar el comportamiento del flujo dentro de las celdas del relleno sanitario. El sitio de estudio cuenta con varias celdas que han sido construidas por etapas de manera que los materiales fueron muestreados de diferentes celdas de acuerdo con las condiciones de acceso y edad de las muestras. En la Figura 21 se muestra una distribución de los espacios y áreas del relleno sanitario.

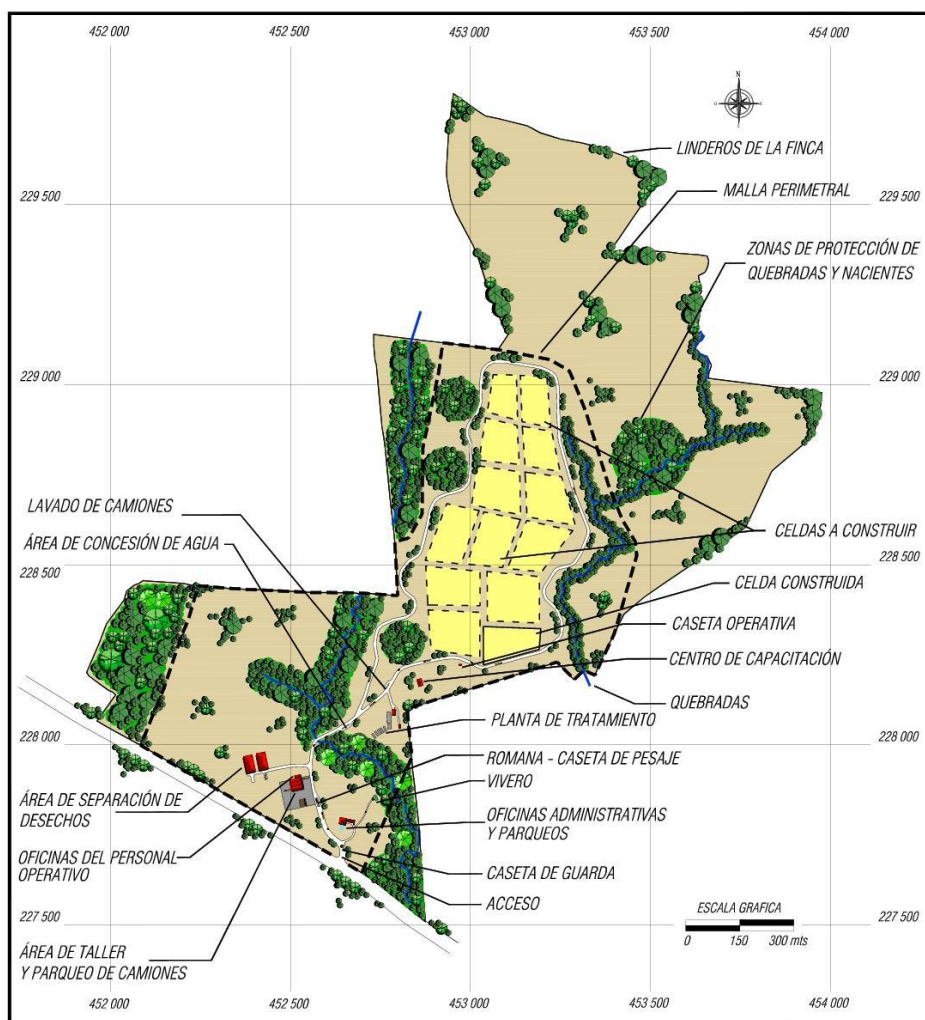


Figura 21. Distribución del Parque Ecoindustrial de Miramar

Fuente: Tecnoambiente (2019)

4.1 Muestreo de materiales.

El muestreo de los desechos presentes en las celdas del relleno se realizó con el fin de ejecutar una caracterización de las propiedades físicas e hidráulicas de dichos materiales. El muestreo fue llevado a cabo en diferentes puntos del relleno y a diferentes profundidades con el objetivo de estudiar las posibles variaciones en dichas propiedades con respecto a la edad de la muestra.

En la Figura 22 se presenta la ubicación de los puntos de muestreo llevados a cabo en el relleno sanitario. Para presentar la ubicación de dichos muestreos se toma como referencia el mapa de levantamiento topográfico del relleno sanitario facilitado por la administración. Se debe recalcar que los puntos de muestreo fueron indicados por el personal técnico de la operación del relleno sanitario.

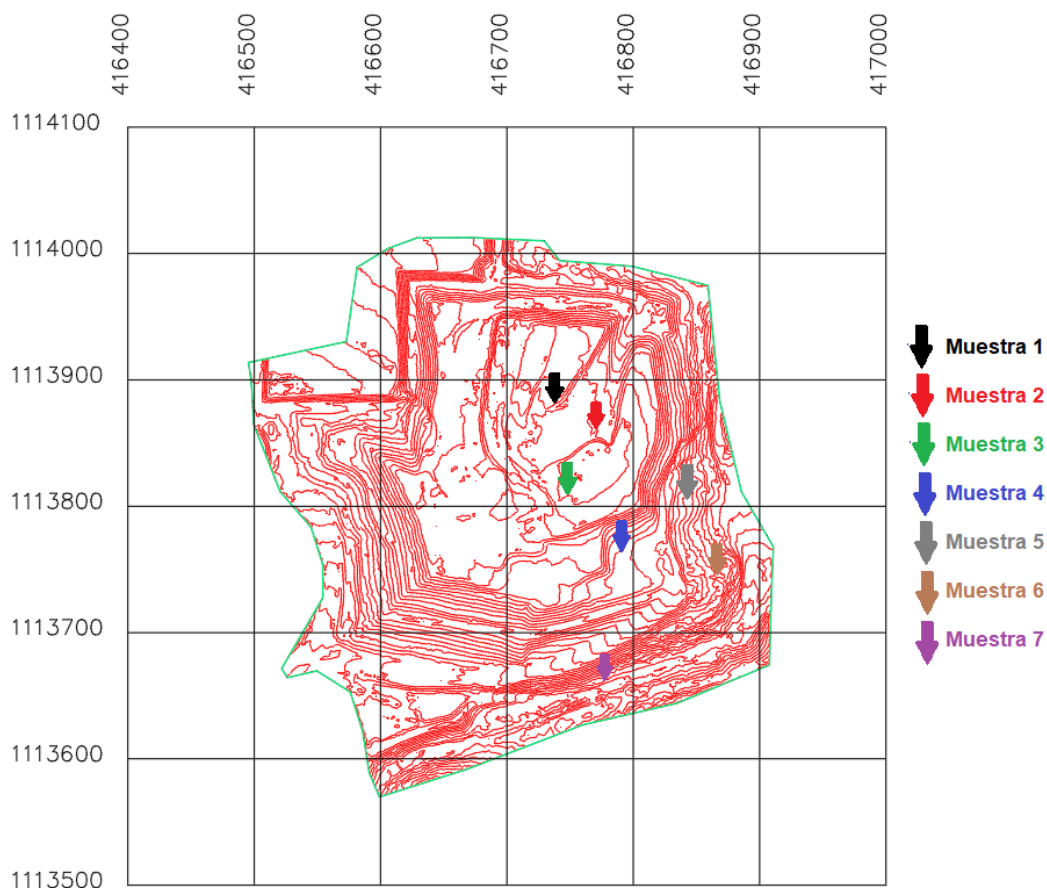


Figura 22. Ubicación de los puntos de muestreo

Proyección: CRTM-05

Para poder acceder a los materiales que se encontraban a distintas profundidades se utilizó maquinaria pesada tipo retroexcavadora facilitada por la administración del relleno sanitario. El proceso de muestreo consistió en utilizar el equipo facilitado para realizar una gaveta en las terrazas seleccionadas hasta una profundidad donde visualmente se logró apreciar la presencia de desechos sólidos. La Figura 23 muestra uno de los puntos de muestreo que se seleccionó para obtener los materiales requeridos para la elaboración de la presente tesis.

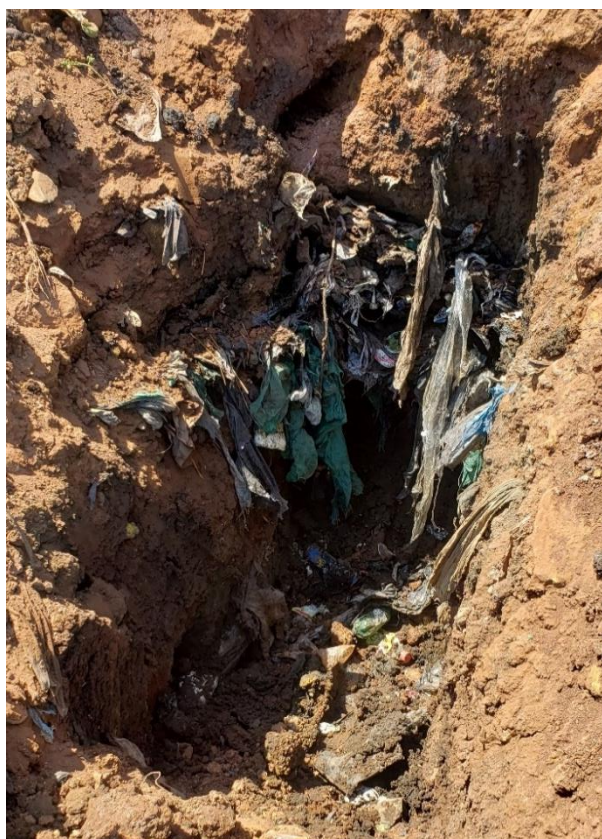


Figura 23. Punto de muestro de los materiales para ensayos.

El proceso descrito anteriormente permitió obtener muestras con suelo y desechos sólidos, por lo cual, al ser analizadas se tomó en cuenta el posible efecto de dichos materiales en los análisis realizados en laboratorio.

Las muestras una vez obtenidas fueron debidamente identificadas para ser llevados al laboratorio y ser procesadas para los diferentes ensayos. Es importante mencionar que antes de colocar las muestras en las bolsas para ser transportadas, se procedió a excluir

manualmente los trozos grandes de plástico procedentes de restos de bolsas ya que dichos residuos no serían utilizados en los análisis de laboratorio.

En el siguiente cuadro se muestra la cantidad de sondeos realizados junto con la edad de la muestra, el punto de muestreo y el análisis que se les realizará en el laboratorio.

Cuadro 5. Distribución de los puntos de muestreo

Muestra	Edad	Punto de muestreo	Análisis realizado
Suelo de cobertura	-	Sitio de préstamo	Propiedades físicas e hidráulicas
1	Menos de un mes	Celda 4	Propiedades hidráulicas
2	6 meses	Celda 3	Propiedades hidráulicas
3	1 año	Celda 3	Propiedades físicas e hidráulicas
4	2 años	Celda 3	Propiedades hidráulicas
5	3 años	Celda 3	Propiedades físicas e hidráulicas
6	4 años	Celda 3	Propiedades hidráulicas
7	5 años	Celda 1	Propiedades físicas e hidráulicas

Como se mencionó anteriormente, la edad de las muestras y el punto de muestreo fue indicado por el personal que opera el relleno sanitario que realizó dicha recomendación a partir del conocimiento y experiencia generado durante la colocación de los desechos y la construcción de las respectivas celdas.

Aproximadamente por cada punto de muestreo se obtuvieron 2 bolsas llenas de desechos y suelo que se llevaron al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica y al Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción del Tecnológico de Costa Rica donde se realizaron los distintos ensayos. Los primeros ensayos realizados a las muestras obtenidas son los de contenido de orgánicos y contenido de humedad de las muestras. Las muestras utilizadas para la realización de dichas pruebas no fueron procesadas por lo que no se separaron materiales como metales, plásticos, vidrios u otros. Los resultados de dichos ensayos se muestran a continuación.

4.2 Determinación de las propiedades físicas

4.2.1 Contenido de humedad de las muestras

Previo a la realización del procesamiento de las muestras para la elaboración de los ensayos para determinar las propiedades físicas e hidráulicas de las muestras obtenidas en el relleno sanitario, se tomó de las bolsas una muestra representativa para determinar el contenido de humedad de los desechos y del suelo muestreado. De esta manera se tendrá una estimación de la humedad natural que presentan los materiales obtenidos en sitio para su posterior análisis

Para la determinación del contenido de humedad se tomó como referencia la norma de ensayo ASTM D2216 (2019). El procedimiento del ensayo consiste en colocar una muestra del material analizado dentro de un horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. La masa constante se alcanza al obtener una diferencia menor a 0,1% entre 2 pesos secos de la muestra analizada. Dichos pesos secos deberán ser medidos de manera consecutiva en un espacio de tiempo de al menos 1 hora. El propósito de determinar la masa constante es asegurarse que el material estudiado ha perdido toda la humedad o agua al momento de determinar el peso total de la muestra.

En el siguiente cuadro se muestra los resultados del contenido de humedad de las distintas muestras que fueron analizadas:

Cuadro 6. Contenido de humedad de las muestras analizadas

Muestra	Edad	Punto de muestreo	Contenido de humedad (%)
Suelo de cobertura	-	Sitio de préstamo	37,49
1	1 mes	Celda 4	124,70
2	6 meses	Celda 3	102,51
3	1 año	Celda 3	79,84
4	2 años	Celda 3	47,38
5	3 años	Celda 3	49,65
6	4 años	Celda 3	82,32
7	5 años	Celda 1	57,46

El detalle de los cálculos se muestra en el Apéndice 1. Contenido de humedad de los materiales muestreados.

4.2.2 Contenido de orgánicos de las muestras.

Para el análisis de los materiales muestreados y realizar la clasificación de estas utilizando resultados de otros ensayos, es necesario conocer la cantidad de material orgánico presentes en los materiales analizados.

Para cada muestra de desechos se determinó el peso total inicial de una porción representativa de la muestra original y posteriormente se sometió dicha porción a una temperatura de 455 °C durante 6 horas. Una vez transcurrido ese periodo se determinó el peso final de las muestras y se relacionó con el contenido de humedad inicial de las muestras de manera que se determinó el contenido de material orgánico en las muestras analizadas.

El siguiente cuadro muestra los resultados de la estimación de cantidad de material orgánico presente en las muestras analizadas.

Cuadro 7. Contenido de material orgánico de las muestras analizadas

Muestra	Edad	Punto de muestreo	Contenido de material orgánico (%)
1	1 mes	Celda 4	25,41
2	6 meses	Celda 3	52,42
3	1 año	Celda 3	45,30
4	2 años	Celda 3	44,11
5	3 años	Celda 3	35,42
6	4 años	Celda 3	41,87
7	5 años	Celda 1	33,42

El material utilizado como material de cobertura no fue analizado en este caso ya que se considera que el mismo es de origen inorgánico por lo que no se reportan resultados al respecto.

El detalle de los cálculos se muestra en el Apéndice 2. Contenido de orgánicos de los materiales muestreados.

Posterior a la realización de los anteriores ensayos, se continuó con la caracterización física de los materiales mediante ensayos de laboratorio. Los siguientes ensayos requirieron de un procesamiento previo de las muestras para asegurarse una adecuada ejecución y resultado de las pruebas realizadas.

Dicho procesamiento consistió en eliminar aquellas partículas que pueden alterar los resultados de los ensayos a realizar como por ejemplo plásticos y sus derivados, vidrio, metales o trozos grandes de madera. En la Figura 24 se puede apreciar una de las muestras antes de ser procesadas para los ensayos de laboratorio. Se puede notar la heterogeneidad de los materiales presentes donde se encuentran desde materiales orgánicos como trozos de madera hasta restos de plástico.



Figura 24. Muestras para ser procesadas en el laboratorio.

A partir de dicho procesamiento, las muestras se analizaron con partículas de suelo, desechos orgánicos y otras partículas de materiales como el papel teniendo como limitante que se desconoce el porcentaje que cada uno de los materiales que integran las muestras. La siguiente imagen muestra el contenido de las muestras posterior al procesamiento en laboratorio para la ejecución de los respectivos ensayos.



Figura 25. Muestras procesadas para ensayos de laboratorio

Posterior al procesamiento de las muestras se continuó con los ensayos de caracterización de las propiedades físicas, siendo el primer ensayo realizado el de límites de Atterberg cuyos resultados se muestran a continuación.

4.2.3 Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Una vez realizado el procesamiento de las distintas muestras obtenidas con el fin de eliminar todos los materiales no requeridos para la ejecución de los ensayos propuestos, se procedió a determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para la fracción más fina de los suelos analizados. Específicamente se determinará el límite líquido que es el contenido de humedad al cual es suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido o viceversa. También se determinará el límite plástico que es el contenido de humedad al cual el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico o viceversa. Por último, se calculará el índice de plasticidad que es el rango de humedades en las que la muestra analizada tendrá una consistencia plástica.

La ejecución de este ensayo permitirá tener un insumo para la clasificación de las muestras obtenidas a través del uso de la carta de plasticidad. Además, se establecerán los valores de humedad en los cuales el suelo pasa de estado lo cual se podrá relacionar con los contenidos de humedad de las muestras obtenidas.

Tal y como lo establece el procedimiento de referencia, el ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de una muestra es ejecutado en la fracción de material más fino que el tamiz con una abertura de 425 μm (N° 40) por lo que previo a la elaboración del ensayo se procede a obtener una muestra representativa del total del material muestreado por medio del método de cuarteo. Dicha fracción de muestra es molida y tamizada por la malla N° 40 hasta obtener la cantidad de material necesario para la ejecución del ensayo. El detalle del proceso implementado es descrito en la norma de referencia ASTM D4318 (2017).

Para el suelo de cobertura, los resultados obtenidos de la determinación del límite líquido y límite plástico se muestran a continuación:

Cuadro 8. Determinación del límite líquido y plástico del suelo de cobertura

Ensayo	Límite Líquido			Límite Plástico	
	1	2	3	1	2
Humedad (%)	76,7	79,0	80,6	52,7	53,3
	N° de Golpes			% Diferencia humedades	
	28	26	21	0,5	

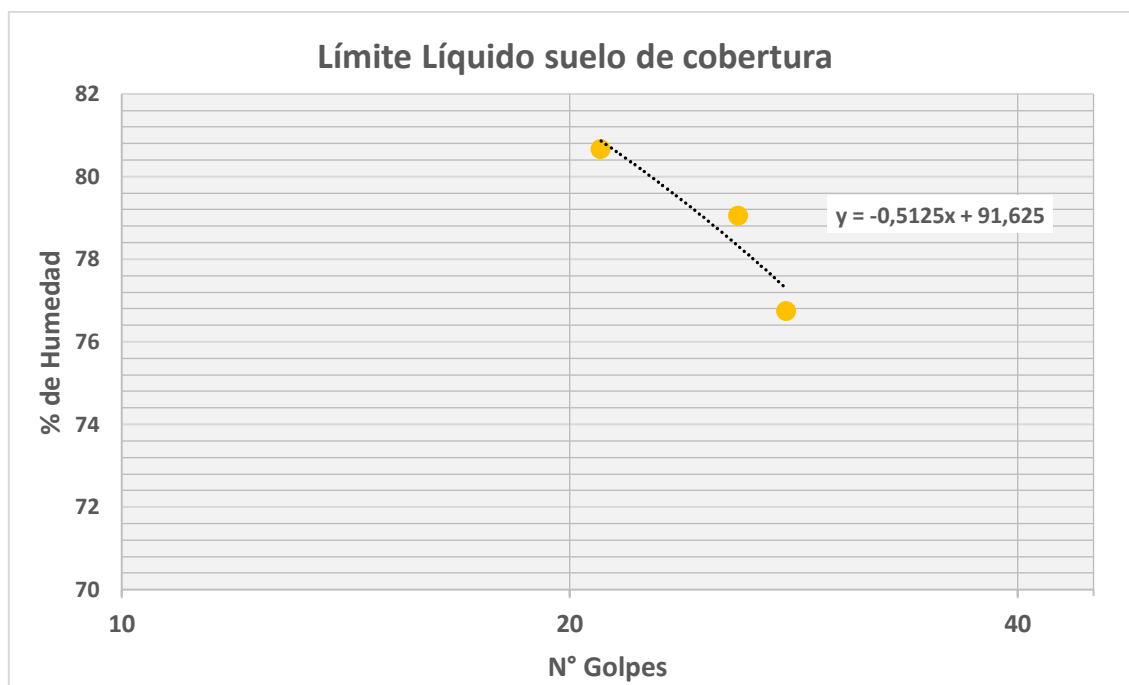


Figura 26. Determinación del límite líquido del suelo de cobertura.

Con la información anterior se determinan los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, los cuales se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Resumen de resultados suelo de cobertura

Resultados	
Límite Líquido (LL)	79 %
Límite Plástico (LP)	53 %
Índice de Plasticidad (IP)	26 %

Posteriormente se procede a clasificar la muestra mediante el uso de la carta de plasticidad. En la Figura 27 se muestra la clasificación por carta de plasticidad para el suelo de cobertura.

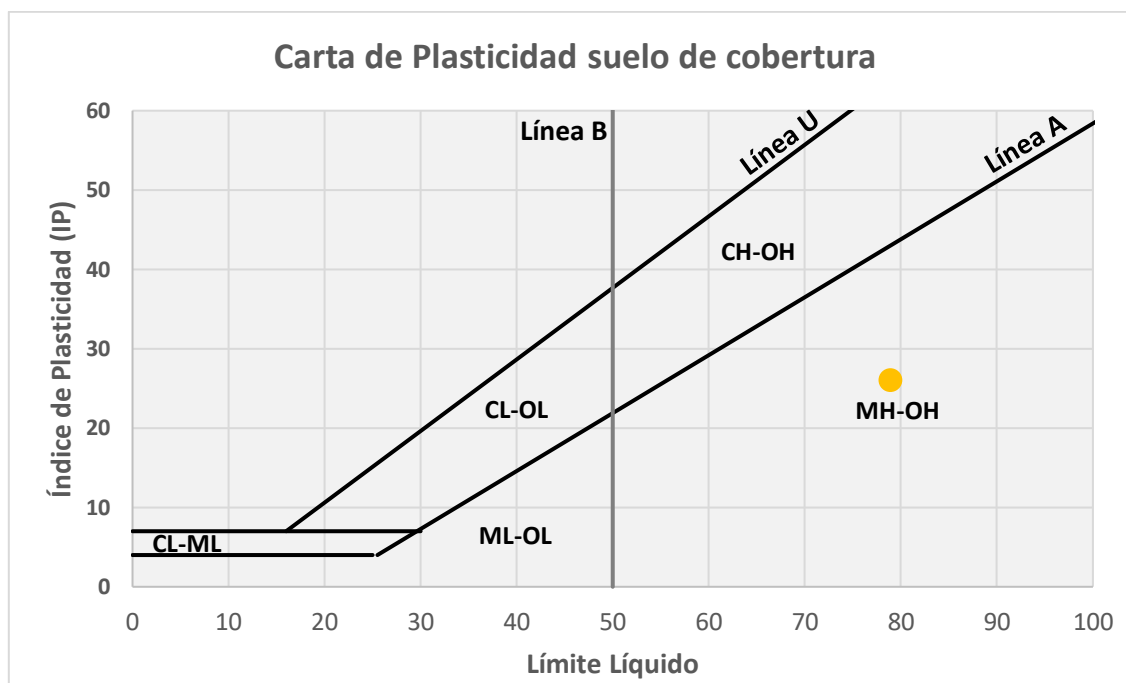


Figura 27. Carta de plasticidad suelo de cobertura.

A partir de los resultados obtenidos para el análisis del suelo de cobertura, se determina que este presenta una ubicación en la carta de plasticidad en la zona de los limos de alta plasticidad (MH).

Posterior a este análisis se procedió a realizar la misma metodología para el suelo con materiales de desecho de un año. Al igual que en el caso anterior, la determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se realizó a la fracción más fina que el tamiz N° 40. Los resultados de dicho análisis se muestran a continuación.

Los resultados obtenidos de la determinación del límite líquido y límite plástico para la muestra de desechos de 1 año se muestran en el Cuadro 10:

Cuadro 10. Determinación del límite líquido y plástico del desecho de 1 año

Ensayo	Límite Líquido			Límite Plástico	
	1	2	3	1	2
Humedad (%)	63,1	67,2	71,1	43,4	43,2
	N° de Golpes			% Diferencia humedades	
	34	28	22	0,3	

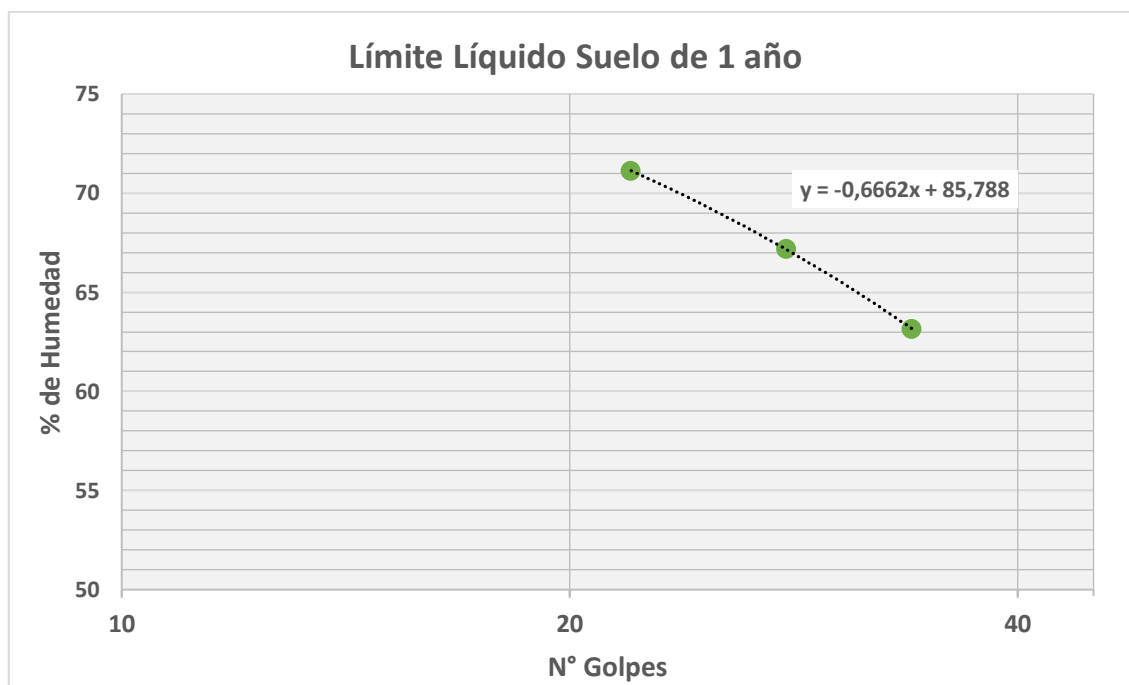


Figura 28. Determinación del límite líquido en el desecho de 1 año.

Mediante la información anterior se determinan los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para la muestra de desechos de 1 año, los cuales se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Resumen de resultados desecho de 1 año.

Resultados	
Límite Líquido (LL)	69 %
Límite Plástico (LP)	43 %
Índice de Plasticidad (IP)	26 %

La información anterior permite clasificar la muestra de desechos de 1 año mediante la carta de plasticidad tal y como lo muestra la Figura 29.

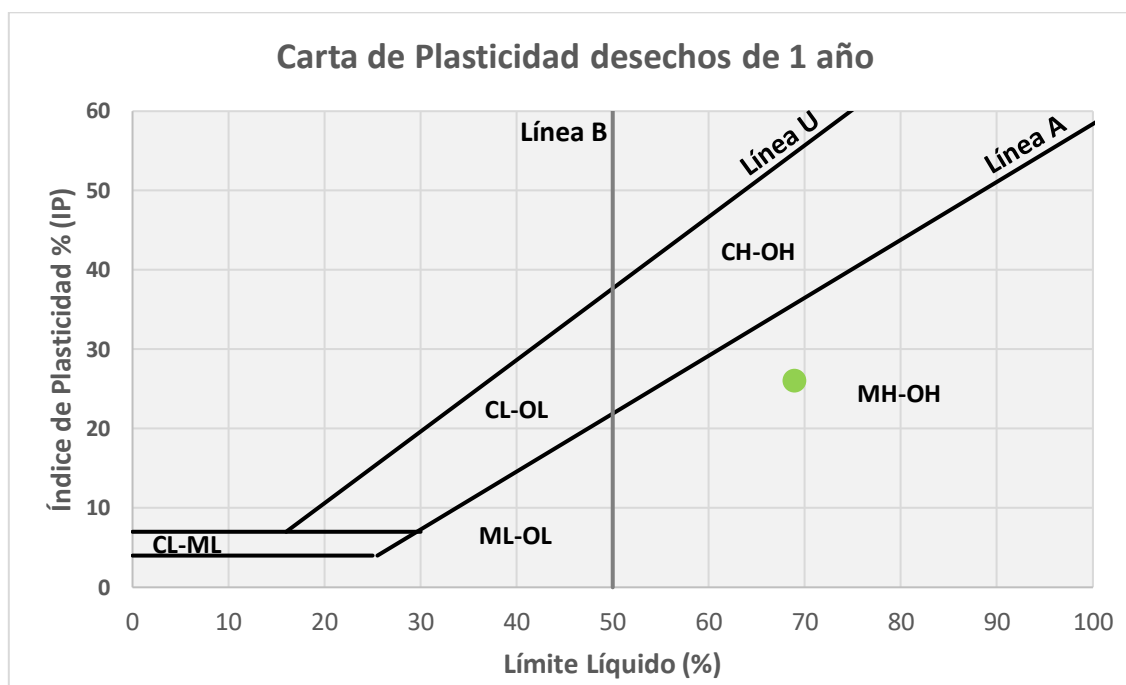


Figura 29. Carta de plasticidad desecho de 1 año.

A partir de los resultados obtenidos para el análisis de los desechos de 1 año, se determina que este presenta una ubicación en la carta de plasticidad en la zona de los limos y orgánicos de alta plasticidad (MH-OH). Dado el tipo de material analizado, se considera que se clasifica como material orgánico de alta plasticidad (OH).

Continuando con el análisis, se realizó la determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los desechos de 3 años utilizando la misma metodología. El resumen de los resultados de dicho análisis se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Determinación del límite líquido y plástico del desecho de 3 años

Ensayo	Límite Líquido			Límite Plástico	
	1	2	3	1	2
Humedad (%)	71,9	75,5	78,8	46,3	47,2
	N° de Golpes			% Diferencia humedades	
	34	29	22	0,9	

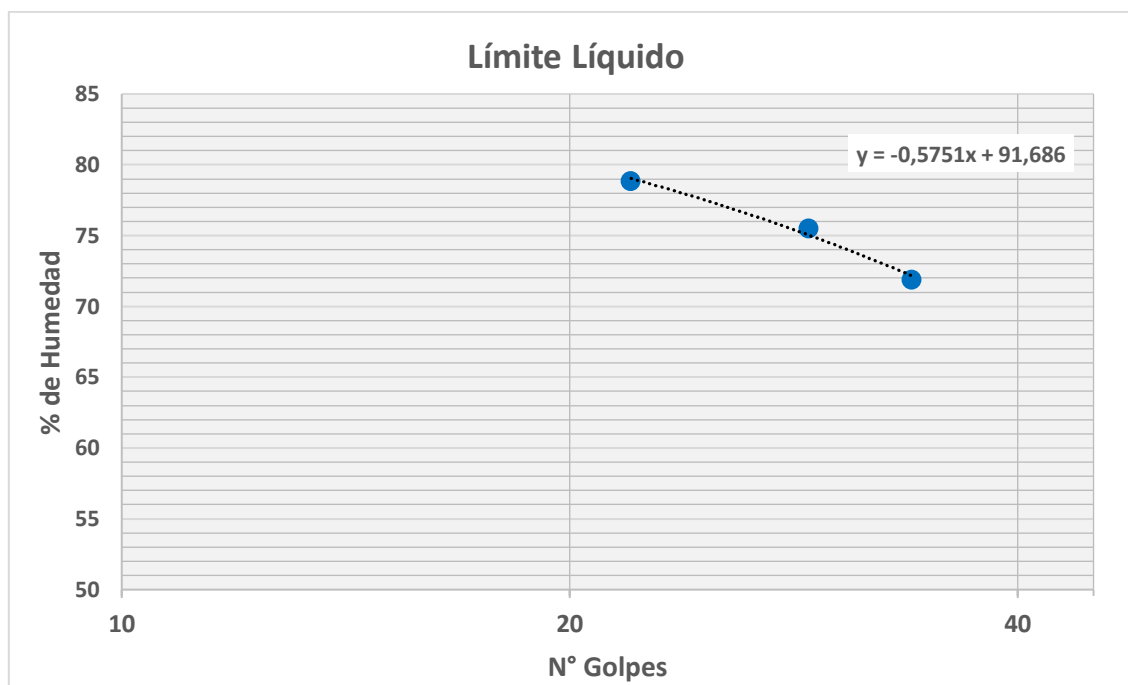


Figura 30. Determinación del límite líquido en el desecho de 3 años.

El análisis anterior permite determinar los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para la muestra de desechos de 3 años.

Cuadro 13. Resumen de resultados desecho 3 años.

Resultados	
Límite Líquido (LL)	77 %
Límite Plástico (LP)	47 %
Índice de Plasticidad (IP)	30 %

Con dicha información se determina la clasificación de la muestra de 3 años mediante la aplicación de la carta de plasticidad. Dicha clasificación se muestra en la Figura 31.

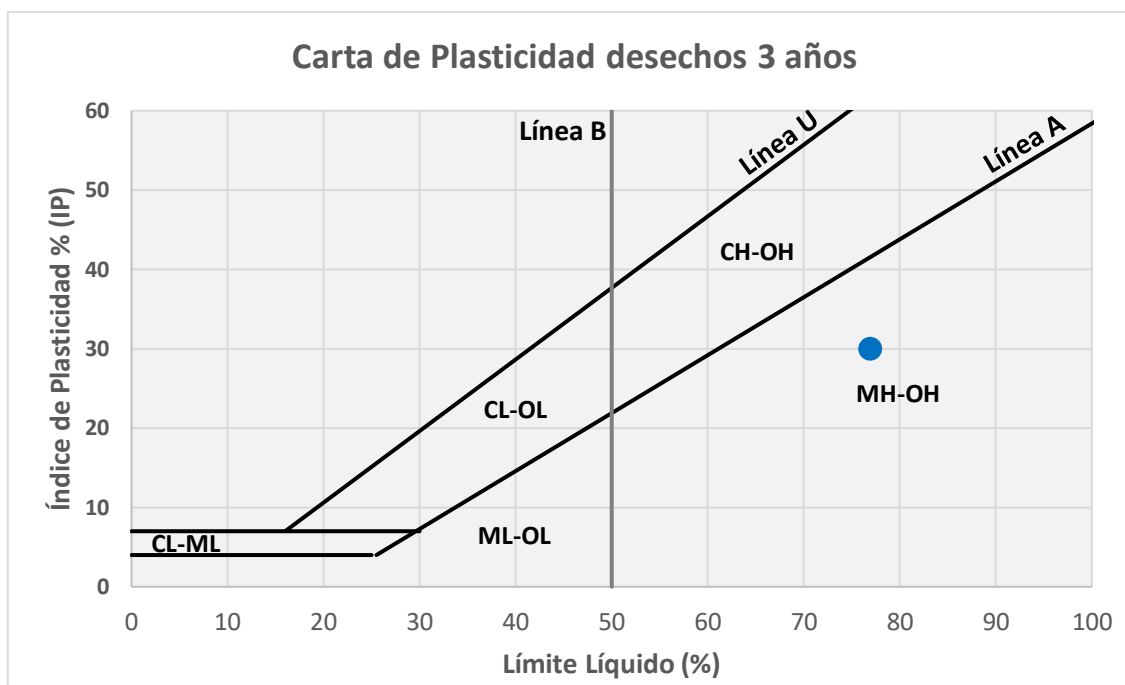


Figura 31. Carta de plasticidad desecho 3 años.

A partir de los resultados obtenidos para el análisis de la muestra de 3 años, se determina que este presenta una ubicación en la carta de plasticidad en la zona de los limos y orgánicos de alta plasticidad (MH-OH). Dado el tipo de material analizado, se considera que se clasifica como material orgánico de alta plasticidad (OH).

Por último, se analizó el suelo con desechos de 5 años siguiendo lo establecido para las anteriores muestras de manera que se tengan los mismos resultados para los materiales muestreados y así poder analizar el comportamiento de dichos materiales. Los resultados se presentan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Determinación del límite líquido y límite plástico del desecho de 5 años

Ensayo	Límite Líquido			Límite Plástico	
	1	2	3	1	2
Humedad (%)	59,8	61,9	65,0	43,8	44,2
	N° de Golpes			% Diferencia humedades	
	34	27	17	0,4	

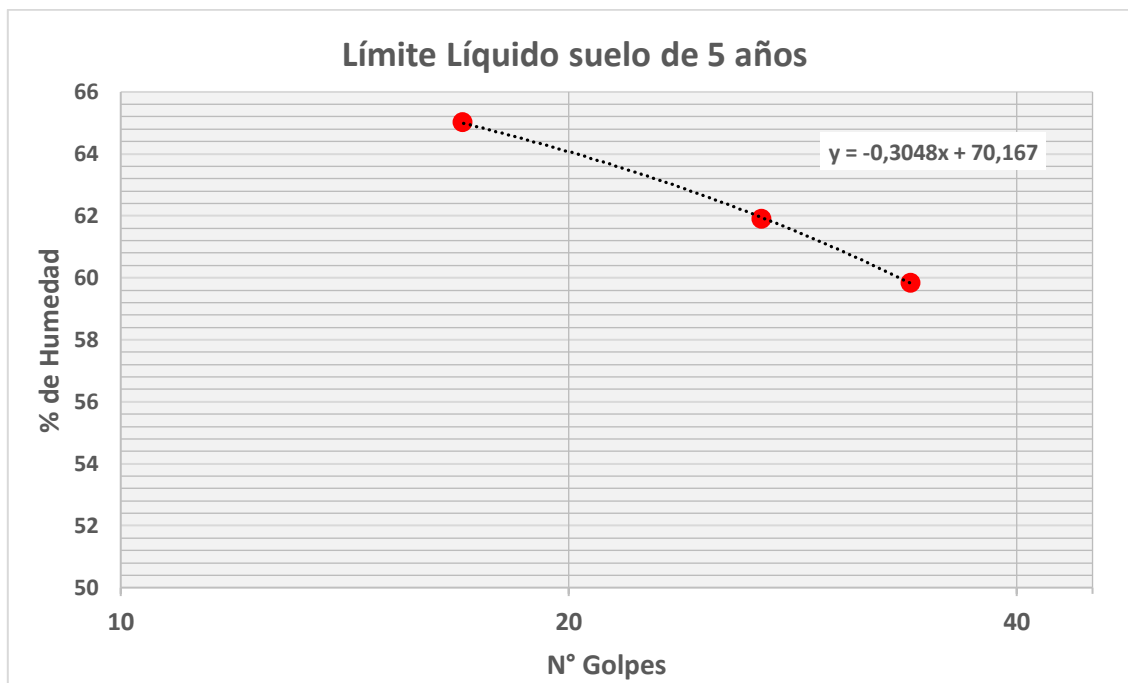


Figura 32. Determinación del límite líquido en el desecho de 5 años.

Conociendo los resultados del ensayo de límites de Atterberg para la muestra de 5 años se define el valor de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad tal y como se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Resumen de resultados desecho 5 años

Resultados	
Límite Líquido (LL)	63 %
Límite Plástico (LP)	44 %
Índice de Plasticidad (IP)	19 %

Por último, se clasifica la muestra de 5 años mediante la aplicación de la carta de plasticidad.

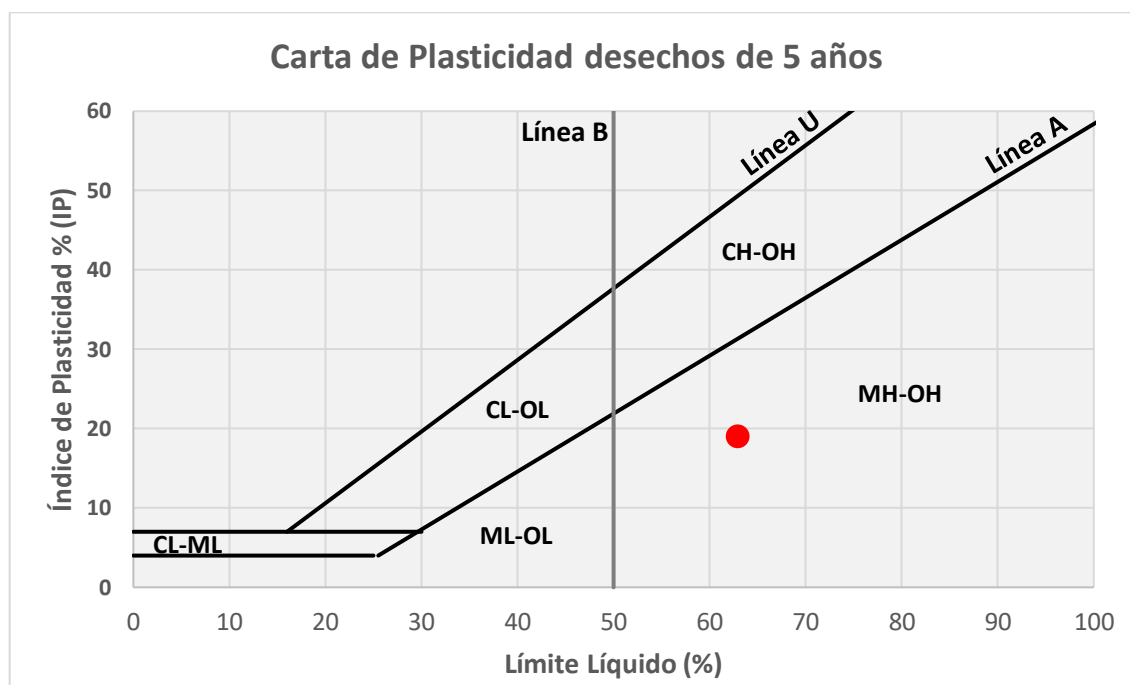


Figura 33. Carta de plasticidad desecho 5 años

En resumen y para comparar los datos obtenidos de la determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se presenta el Cuadro 16.

Cuadro 16. Resumen de datos de determinación del límite líquido y límite plástico para las muestras analizadas

Muestra	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Carta de plasticidad
Suelo de cobertura	79	53	26	MH
Desecho 1 año	69	43	26	MH - OH
Desecho 3 años	77	47	30	MH - OH
Desecho 5 años	63	44	19	MH - OH

El detalle de las determinaciones de los límites de Atterberg para los materiales analizados se muestra en el Apéndice 3.

4.2.4 Análisis granulométrico de los materiales muestreados

Como parte de los ensayos realizados para determinar las características físicas de los materiales se incluyó la ejecución del análisis granulométrico de las muestras en estudio lo cual, junto con resultados de plasticidad, permitirá clasificar las muestras analizadas.

De acuerdo con las características de los materiales muestreados, se logra apreciar que estos pueden presentar una importante cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm por lo que el análisis granulométrico se realizará a través de la vía seca (tamizado) y también la vía húmeda (hidrómetro).



Figura 34. Probeta de sedimentación utilizada en el análisis granulométrico por vía húmeda.

El análisis por tamizado consiste en pasar la muestra seca a través de una serie de tamices con diferentes aberturas siguiendo un orden descendente. Este proceso se aplica para materiales retenidos en el tamiz N° 200 por lo que resulta necesario complementar dichos resultados con el análisis con el hidrómetro. El análisis granulométrico a través del hidrómetro se utiliza principalmente para conocer la distribución de partículas de diámetro menor a 75 μm utilizando una solución de hexametáfosfato de sodio. En dicha solución se dispersan las partículas de suelo que van a depositarse en diferentes momentos del ensayo

según tamaño y peso. Para facilidad del método, se supone que todas las partículas son esféricas.

Los resultados obtenidos para el análisis granulométrico del suelo de cobertura se muestran en el Cuadro 17 y en la Figura 35.

Cuadro 17. Resultados de granulometría de suelo de cobertura

Tamiz	Tamaño de partícula (mm)	Porcentaje pasando (%)
3/8"	9,5000	100,0
N° 4	4,7500	100,0
N° 10	2,0000	97,0
N° 20	0,8500	92,6
N° 40	0,4250	88,7
N° 100	0,1500	78,9
N° 200	0,0750	70,3
-	0,0610	65,2
	0,0435	63,5
	0,0309	60,2
	0,0199	56,8
	0,0116	54,3
	0,0083	51,7
	0,0059	49,2
	0,0030	42,8
	0,0013	37,9
	0,0009	34,5

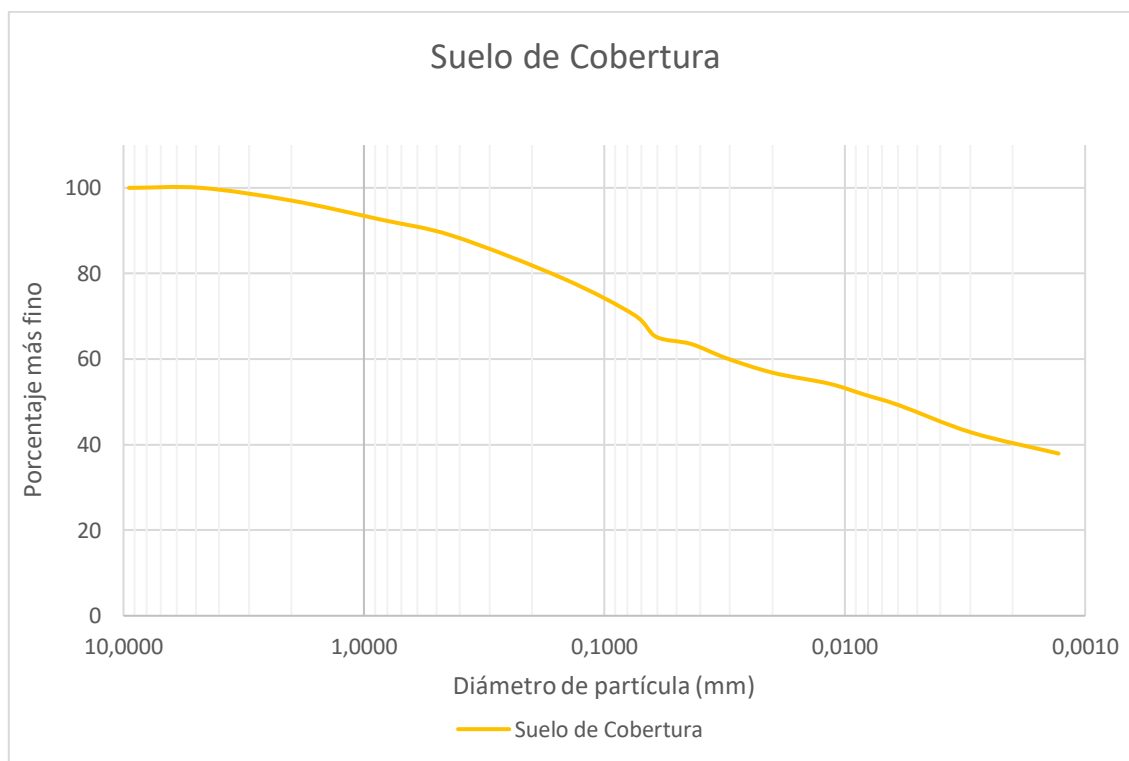


Figura 35. Granulometría de suelo de cobertura.

Los resultados para el suelo con desechos de un año se muestran en el Cuadro 18 y en la Figura 36.

Cuadro 18. Resultados de granulometría de suelo con desechos de un año

Tamiz	Tamaño de partícula (mm)	Porcentaje pasando (%)
3/8"	9,5000	98,9
N° 4	4,7500	98,0
N° 10	2,0000	95,2
N° 20	0,8500	91,7
N° 40	0,4250	87,8
N° 100	0,1500	77,4
N° 200	0,0750	67,5
-	0,0631	58,1
	0,0452	53,3
	0,0323	48,6
	0,0206	46,2
	0,0121	42,2
	0,0087	39,1
	0,0062	36,7
	0,0031	30,7
	0,0013	26,1
	0,0010	24,5

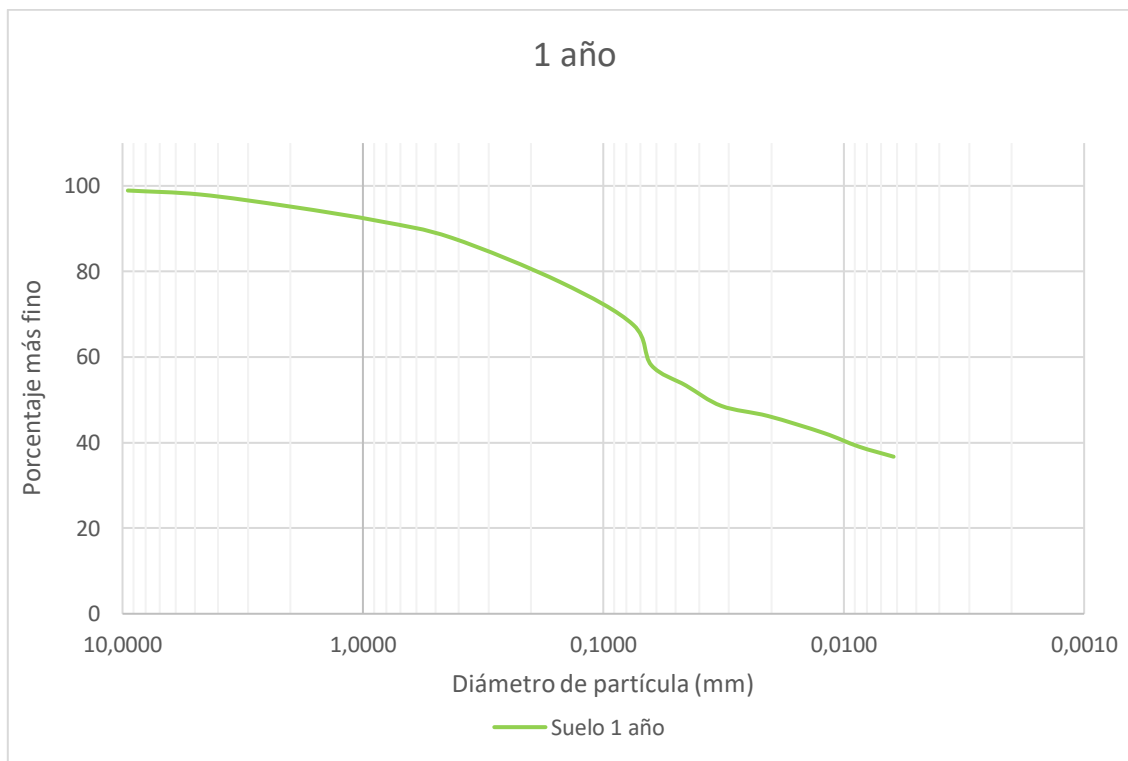


Figura 36. Granulometría desecho 1 año

Al igual que para las anteriores muestras, en el Cuadro 19 y en la Figura 37 se presentan los resultados para el suelo con desechos de tres años.

Cuadro 19. Resultados de granulometría de suelo con desechos de 3 años

Tamiz	Tamaño de partícula (mm)	Porcentaje pasando (%)
3/8"	9,5000	99,4
N° 4	4,7500	98,6
N° 10	2,0000	96,8
N° 20	0,8500	94,4
N° 40	0,4250	91,9
N° 100	0,1500	79,9
N° 200	0,0750	67,3
-	0,0657	66,0
	0,0469	64,8
	0,0333	63,5
	0,0212	62,3
	0,0124	59,1
	0,0088	53,6
	0,0063	50,4
	0,0031	42,5
	0,0013	38,3
	0,0010	36,3

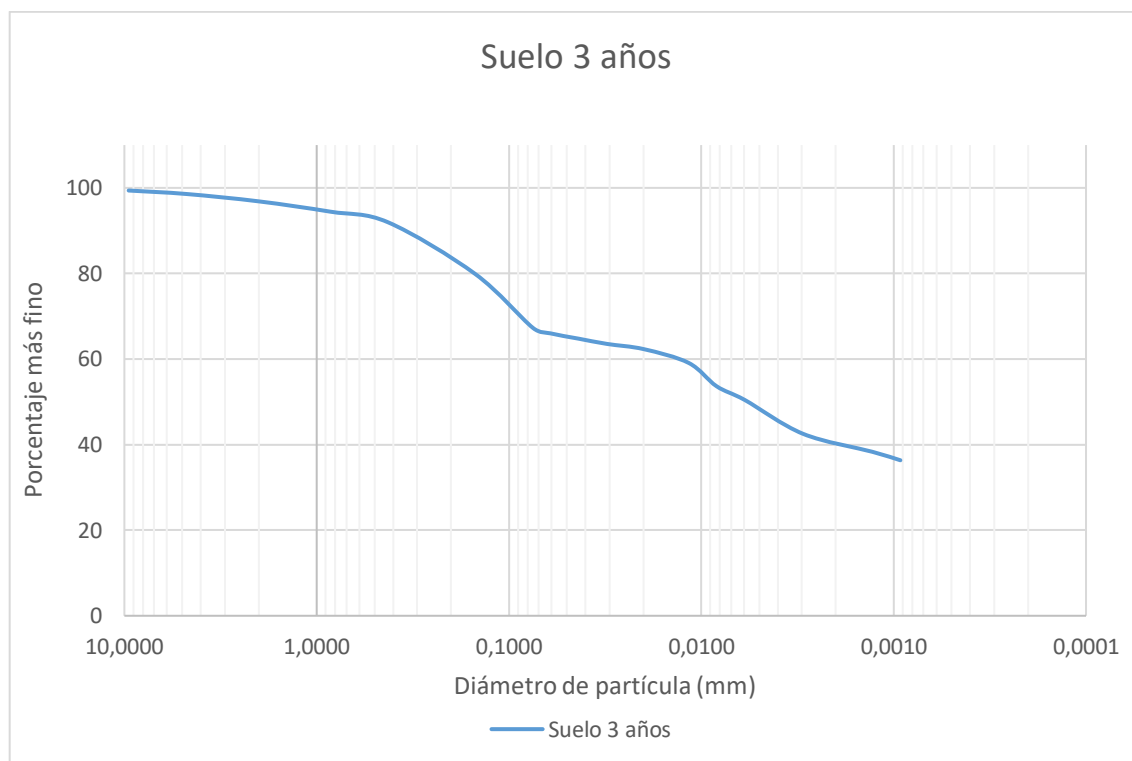


Figura 37. Granulometría de desecho 3 años

Por último, para completar el análisis del tamaño de partícula de las muestras obtenidas, en el Cuadro 20 y en la Figura 38 se presentan los resultados de la muestra con desechos de 5 años de estar en la celda del relleno sanitario.

Cuadro 20. Resultados de granulometría de suelo con desechos de 5 años

Tamiz	Tamaño de partícula (mm)	Porcentaje pasando (%)
3/8"	9,5000	100,0
N° 4	4,7500	98,7
N° 10	2,0000	97,1
N° 20	0,8500	94,7
N° 40	0,4250	92,9
N° 100	0,1500	88,5
N° 200	0,0750	81,2
-	0,0657	75,9
	0,0469	72,2
	0,0333	69,7
	0,0212	62,3
	0,0124	58,6
	0,0088	53,6
	0,0063	49,2
	0,0031	42,5
	0,0013	37,1

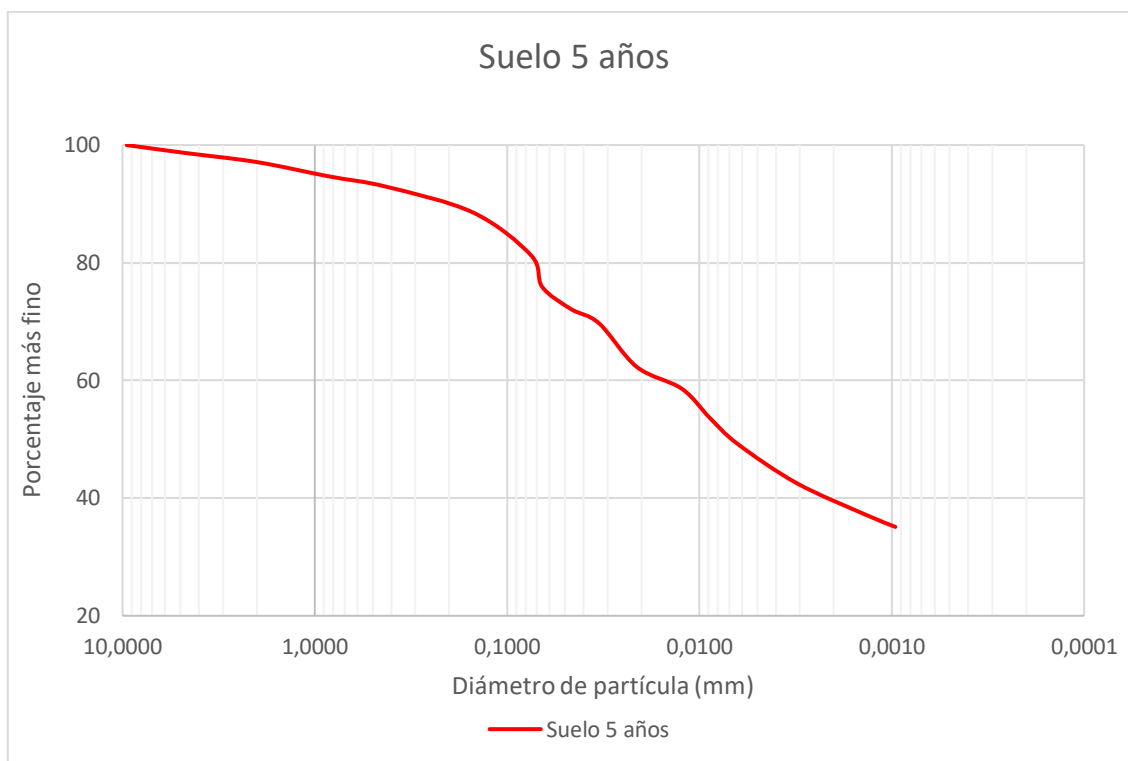


Figura 38. Granulometría de desecho de 5 años

Con el propósito de comparar el comportamiento de los materiales estudiados por medio del análisis granulométrico, se presenta la Figura 39 con los resultados obtenidos para cada análisis.

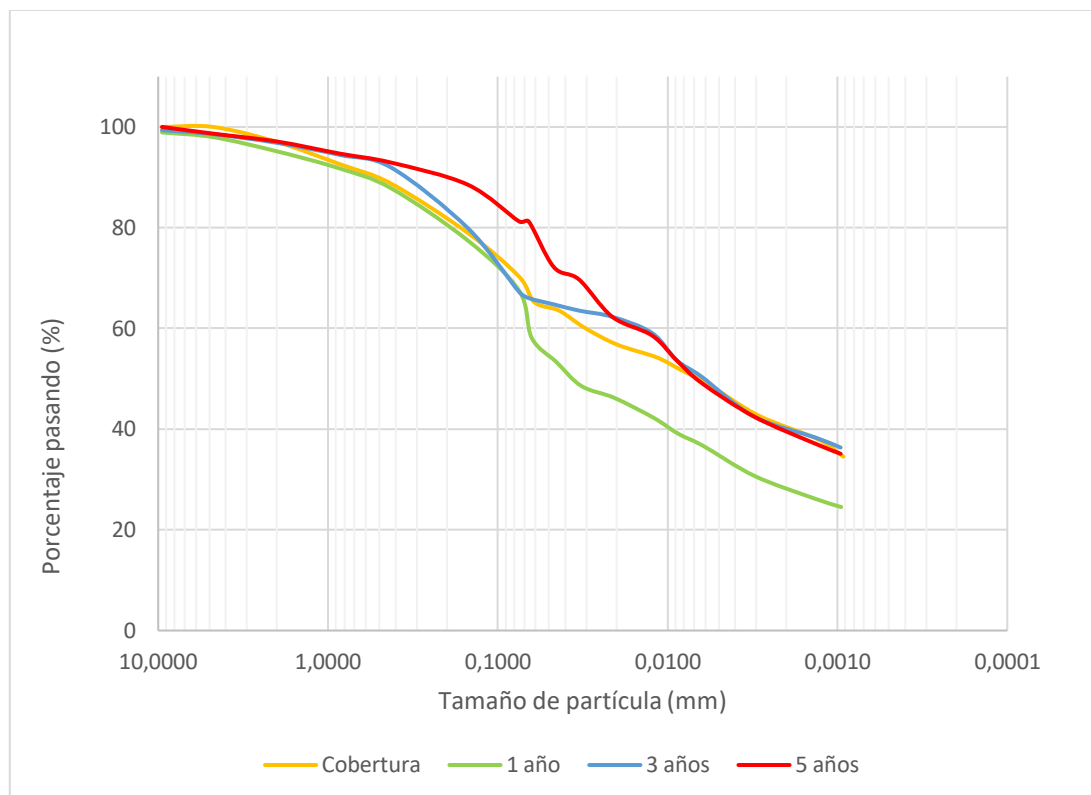


Figura 39. Comparación de granulometrías

El detalle de los cálculos para el análisis granulométrico se muestra en el Apéndice 4.

4.2.5 Gravedad específica de suelos

El último ensayo para la caracterización física de los materiales muestreados en el relleno sanitario de Miramar es el de gravedad específica. Este ensayo se realizó al suelo de cobertura, a la muestra de 1 año, muestra de 3 años y muestra de 5 años. Para la determinación de la gravedad específica se utilizó el picnómetro y de referencia la norma ASTM D854.

Para la ejecución de este ensayo mediante el uso del picnómetro, se utilizó el material más fino que el tamiz N°4. Las muestras no fueron secadas al horno para evitar posibles reacciones generadas por este proceso como podría ser la degradación de algunas partículas debido a la composición de estas y su exposición a temperaturas que generarán algún tipo de reacción no esperada.



Figura 40. Picnómetro con muestra de suelo del relleno sanitario

Los resultados promedio de cada una de las determinaciones realizadas de gravedad específica para las muestras procesadas se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Resultados de gravedad específica para muestras del relleno sanitario

Muestra	Gravedad específica
Suelo de cobertura	2,613
1 año	2,658
3 años	2,502
5 años	2,536

Para la ejecución de este ensayo se utilizaron las muestras procesadas y con el tamaño necesario para el uso del picnómetro. Se pudo observar durante la ejecución del ensayo y tal y como se aprecia en la Figura 40, algunas de las partículas presentes en las muestras flotaron en el agua debido a su densidad.

4.3 Determinación de las propiedades hidráulicas

4.3.1 Conductividad hidráulica de los materiales analizados

Anteriormente se mostraron los resultados de la caracterización física de los materiales muestreados y analizados mediante ensayos de laboratorio. En esta sección se mostrarán los resultados de ensayos realizados con el fin de determinar algunas propiedades hidráulicas requeridas para analizar el comportamiento del flujo en una celda de un relleno sanitario.

Al igual que en la caracterización física de las muestras llevadas a laboratorio, para los ensayos de propiedades hidráulicas de los materiales analizados, se realizó un proceso de selección y separación de los materiales. De esta manera se buscó retirar de las muestras aquellos materiales que podrían afectar los resultados del ensayo. Tal y como se mencionó anteriormente, se retiraron de las muestras partículas de plástico y sus derivados, vidrio, metales o trozos grandes de madera. En la Figura 25 se muestra el contenido de los materiales posterior al procesamiento para la ejecución de los ensayos.

El primer ensayo realizado fue el de conductividad de hidráulica de las muestras. Este fue llevado a cabo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica

utilizando un permeámetro en el cual se colocaron las muestras con una densidad conocida. Las muestras fueron saturadas por un periodo cercano a las 48 horas para posteriormente proceder a la toma de lecturas.



Figura 41. Determinación de permeabilidad en muestras de relleno sanitario

En el Cuadro 22 se detalla la designación de la muestra y la edad de cada una de ellas.

Cuadro 22. Muestras utilizadas en los ensayos de permeabilidad

Muestra	Edad	Punto de muestreo
Suelo de cobertura	-	Sitio de préstamo
1	Menos de un mes	Celda 4
2	6 meses	Celda 3
3	1 año	Celda 3
4	2 años	Celda 3
5	3 años	Celda 3
6	4 años	Celda 3
7	5 años	Celda 1

Posterior al proceso de saturación, se le realizaron 5 mediciones realizando variaciones en el gradiente hidráulico. De este modo se podrá estimar la conductividad hidráulica mediante la aplicación de la ley de Darcy y ver el comportamiento de la velocidad del flujo a distintos

valores de gradiente hidráulico. Adicionalmente se podrá determinar si las mediciones se dan en un régimen laminar, de transición o turbulento.

Las condiciones de las distintas muestras obtenidas para la ejecución de las pruebas de permeabilidad se muestran en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Condiciones de las muestras analizadas

Muestra	Densidad seca (kg/m³)	Contenido de humedad inicial (%)	Contenido de humedad final (%)	Saturación (%)
Cobertura	803,07	15,49	103,03	97,62
1	739,90	17,87	124,70	100,00*
2	742,91	8,71	104,84	97,02
3	742,15	13,38	110,58	96,03
4	752,90	8,39	99,77	95,94
5	754,51	8,13	98,01	94,84
6	749,57	14,81	110,91	97,51
7	769,98	16,40	108,41	97,01

Los resultados de la permeabilidad de la muestra de suelo de cobertura se muestran en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Resultados de permeabilidad para suelo de cobertura

Muestra de suelo de cobertura			
Medición	Permeabilidad	Gradiente i	Velocidad v (m/s)
1	$5,490 \times 10^{-5}$	4,168	$2,288 \times 10^{-4}$
2	$5,444 \times 10^{-5}$	4,109	$2,237 \times 10^{-4}$
3	$5,197 \times 10^{-5}$	3,228	$1,678 \times 10^{-4}$
4	$4,997 \times 10^{-5}$	3,052	$1,525 \times 10^{-4}$
5	$4,886 \times 10^{-5}$	2,289	$1,119 \times 10^{-4}$
Promedio	$5,203 \times 10^{-5}$		

A partir de los datos generados se procede a graficar el comportamiento de la velocidad de flujo para cada gradiente hidráulico, de manera que a partir de la pendiente estimar la permeabilidad de la muestra analizada.

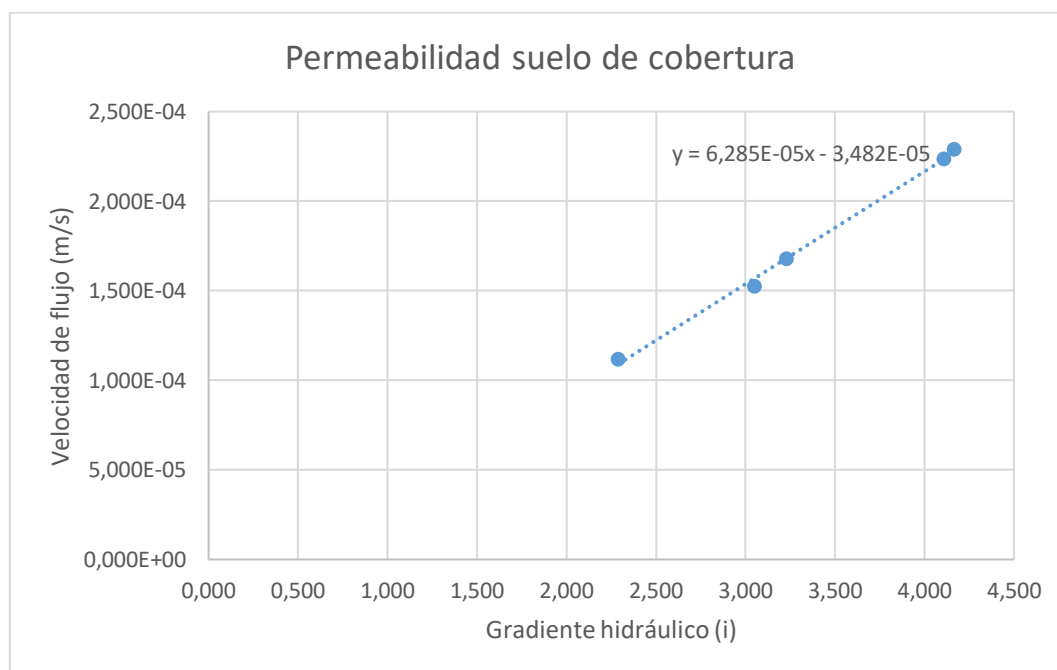


Figura 42. Resultados de ensayos de permeabilidad para el suelo de cobertura.

Para la muestra de cobertura se estima que la pendiente es de $6,285 \times 10^{-5}$ m/s.

Para la muestra 1 (menos de un mes en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Resultados de permeabilidad para muestra 1

Muestra 1 (menos de un mes)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$1,783 \times 10^{-4}$	1,996	$3,559 \times 10^{-4}$
2	$1,444 \times 10^{-4}$	1,761	$2,542 \times 10^{-4}$
3	$1,330 \times 10^{-4}$	1,644	$2,186 \times 10^{-4}$
4	$1,253 \times 10^{-4}$	1,526	$1,912 \times 10^{-4}$
5	$1,047 \times 10^{-4}$	1,409	$1,474 \times 10^{-4}$
Promedio	$1,371 \times 10^{-4}$		

Los resultados del Cuadro 25 se muestran de manera gráfica en la Figura 43.

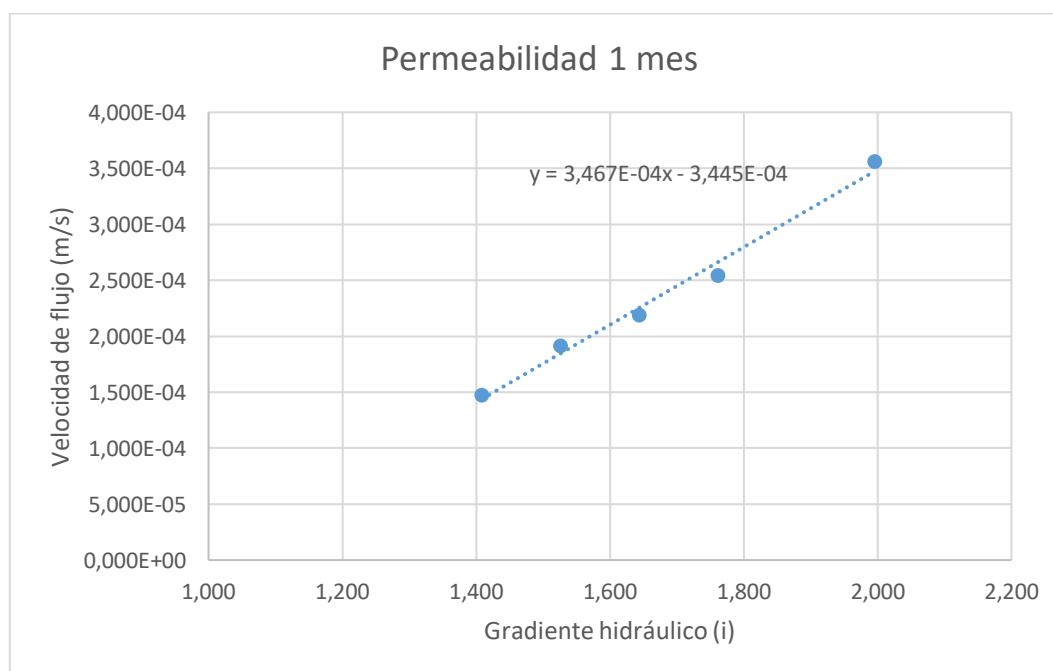


Figura 43. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 1 mes.

Para la muestra de suelo de 1 mes se estima que la pendiente es de $3,467 \times 10^{-4}$ m/s.

Para la muestra 2 (6 meses en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 26.

Cuadro 26. Resultados de permeabilidad para muestra 2

Muestra 2 (6 meses)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$1,759 \times 10^{-5}$	3,757	$6,609 \times 10^{-5}$
2	$1,703 \times 10^{-5}$	3,463	$5,898 \times 10^{-5}$
3	$1,732 \times 10^{-5}$	3,405	$5,898 \times 10^{-5}$
4	$1,624 \times 10^{-5}$	3,287	$5,338 \times 10^{-5}$
5	$1,646 \times 10^{-5}$	2,935	$4,830 \times 10^{-5}$
Promedio	$1,693 \times 10^{-5}$		

Los resultados del Cuadro 26 se muestran de manera gráfica en la Figura 44.

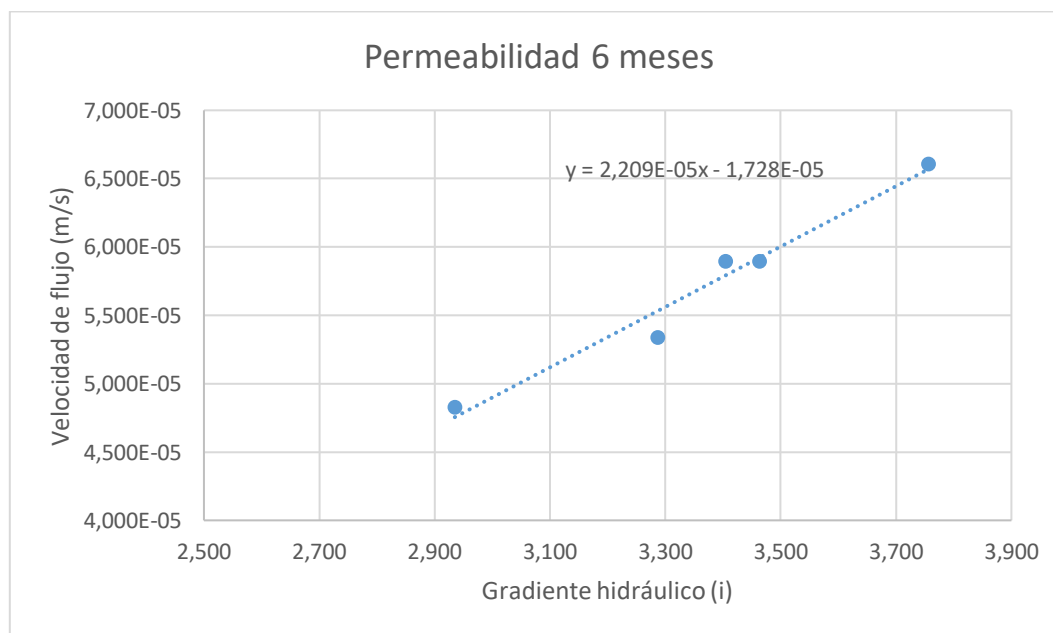


Figura 44. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 6 meses.

Para la muestra de suelo de 6 meses se estima que la pendiente es de $2,209 \times 10^{-5}$ m/s.

Para la muestra 3 (1 año en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 27.

Cuadro 27. Resultados de permeabilidad para muestra 3

Muestra 3 (1 año)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$5,900 \times 10^{-5}$	4,050	$2,390 \times 10^{-4}$
2	$6,037 \times 10^{-5}$	3,874	$2,339 \times 10^{-4}$
3	$6,123 \times 10^{-5}$	3,405	$2,085 \times 10^{-4}$
4	$5,935 \times 10^{-5}$	3,170	$1,881 \times 10^{-4}$
5	$5,890 \times 10^{-5}$	2,935	$1,729 \times 10^{-4}$
Promedio	$5,977 \times 10^{-5}$		

Los resultados del Cuadro 27 se muestran de manera gráfica en la Figura 45.

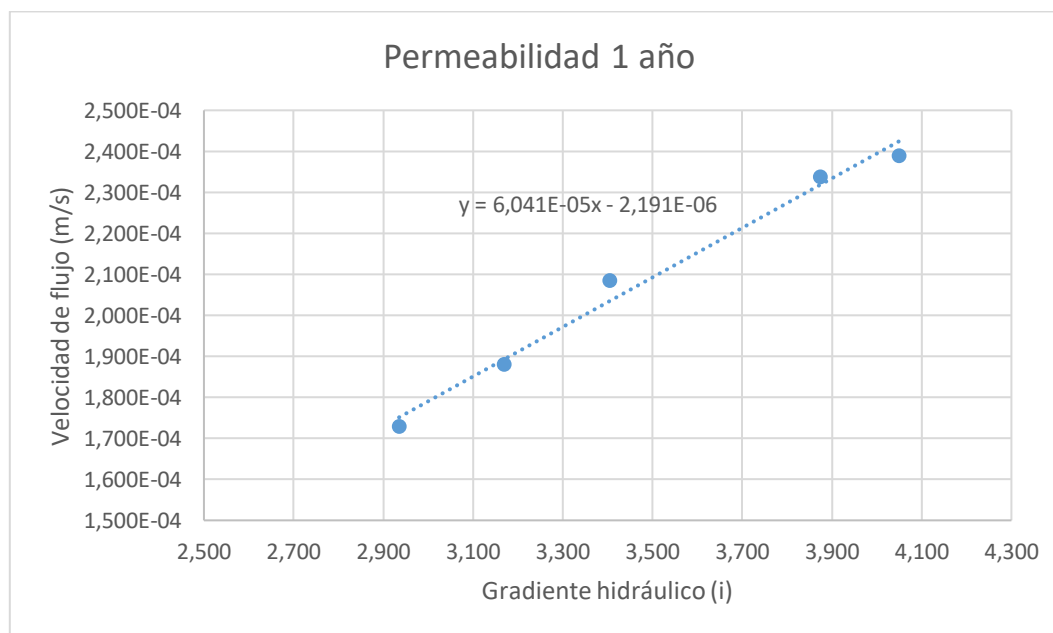


Figura 45. Resultados de ensayo de permeabilidad para desechos de 1 año.

Para la muestra de suelo de un año se estima que la pendiente es de $6,041 \times 10^{-5}$ m/s.

Para la muestra 4 (2 años en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 28:

Cuadro 28. Resultados de permeabilidad para muestra 4

Muestra 4 (2 años)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$1,127 \times 10^{-5}$	4,285	$4,830 \times 10^{-5}$
2	$1,114 \times 10^{-5}$	4,109	$4,576 \times 10^{-5}$
3	$1,050 \times 10^{-5}$	3,874	$4,067 \times 10^{-5}$
4	$9,383 \times 10^{-6}$	3,522	$3,305 \times 10^{-5}$
5	$9,161 \times 10^{-6}$	3,052	$2,796 \times 10^{-5}$
Promedio	$1,029 \times 10^{-5}$		

Los resultados del Cuadro 28 se muestran de manera gráfica en la Figura 46.

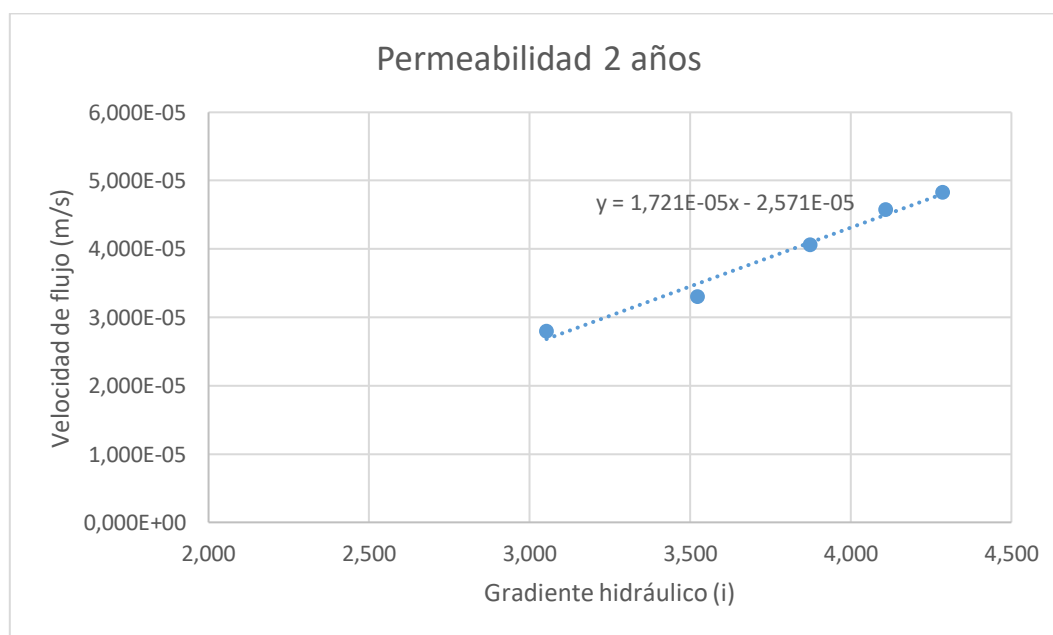


Figura 46. Resultados de ensayo de permeabilidad para desechos de 2 años.

Para la muestra de suelo de dos años se estima que la pendiente es de $1,721 \times 10^{-5}$ m/s.

Para la muestra 5 (3 años en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 29.

Cuadro 29. Resultados de permeabilidad para muestra 5

Muestra 5 (3 años)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$2,093 \times 10^{-5}$	3,522	$7,372 \times 10^{-5}$
2	$2,011 \times 10^{-5}$	3,287	$6,609 \times 10^{-5}$
3	$1,961 \times 10^{-5}$	3,111	$6,101 \times 10^{-5}$
4	$1,915 \times 10^{-5}$	3,052	$5,847 \times 10^{-5}$
5	$1,895 \times 10^{-5}$	2,818	$5,338 \times 10^{-5}$
Promedio	$1,975 \times 10^{-5}$		

Los resultados del Cuadro 29 se muestran de manera gráfica en la Figura 47.

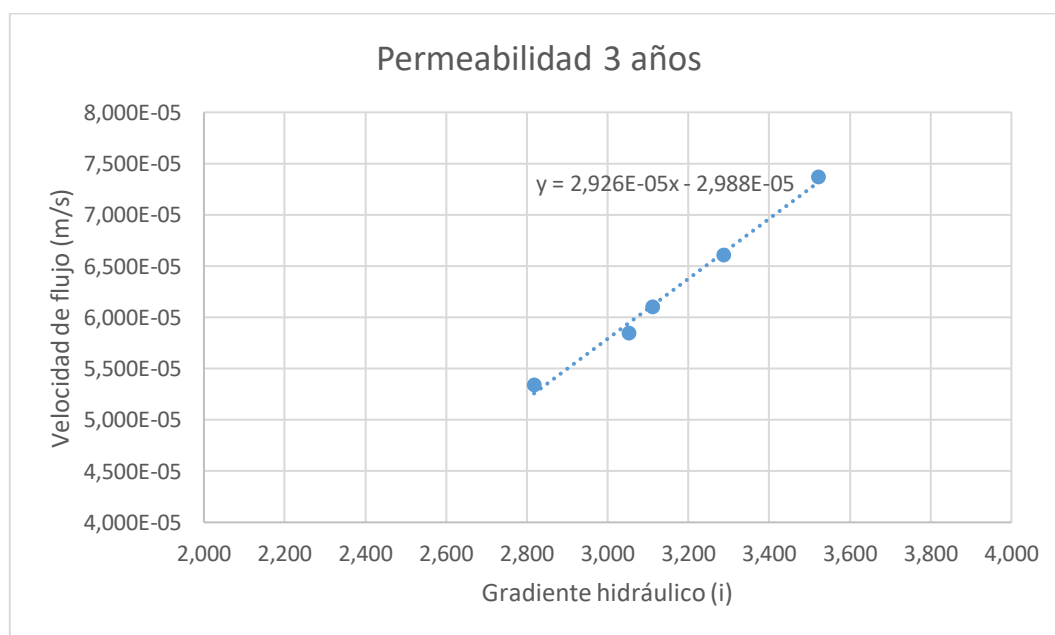


Figura 47. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 3 años.

Para la muestra de suelo de dos años se estima que la pendiente es de $2,926 \times 10^{-5}$ m/s.

Para la muestra 6 (4 años en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 30:

Cuadro 30. Resultados de permeabilidad para muestra 6

Muestra 6 (4 años)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$1,499 \times 10^{-4}$	3,052	$4,576 \times 10^{-4}$
2	$1,495 \times 10^{-4}$	2,994	$4,474 \times 10^{-4}$
3	$1,498 \times 10^{-4}$	2,818	$4,220 \times 10^{-4}$
4	$1,525 \times 10^{-4}$	2,700	$4,118 \times 10^{-4}$
5	$1,516 \times 10^{-4}$	2,583	$3,915 \times 10^{-4}$
Promedio	$1,506 \times 10^{-4}$		

Los resultados del Cuadro 30 se muestran de manera gráfica en la Figura 48.

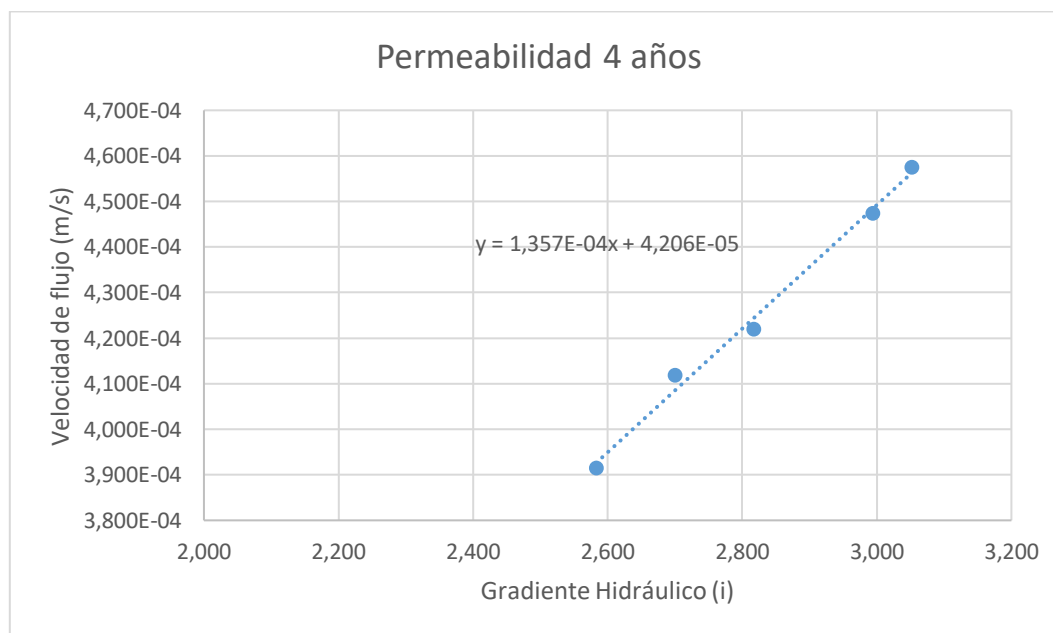


Figura 48. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 4 años.

Para la muestra de suelo de dos años se estima que la pendiente es de $1,357 \times 10^{-4}$ m/s.

Para la muestra 7 (5 años en el relleno sanitario) los resultados de la prueba de permeabilidad se muestran en el Cuadro 31.

Cuadro 31. Resultados de permeabilidad para muestra 7

Muestra 7 (5 años)			
Medición	k (m/s)	i	v (m/s)
1	$1,444 \times 10^{-5}$	4,579	$6,609 \times 10^{-5}$
2	$1,405 \times 10^{-5}$	4,344	$6,101 \times 10^{-5}$
3	$1,237 \times 10^{-5}$	4,109	$5,084 \times 10^{-5}$
4	$1,019 \times 10^{-5}$	3,992	$4,067 \times 10^{-5}$
5	$9,473 \times 10^{-5}$	3,757	$3,559 \times 10^{-5}$
Promedio	$1,210 \times 10^{-5}$		

Los resultados del Cuadro 31 se muestran de manera gráfica en la Figura 49.

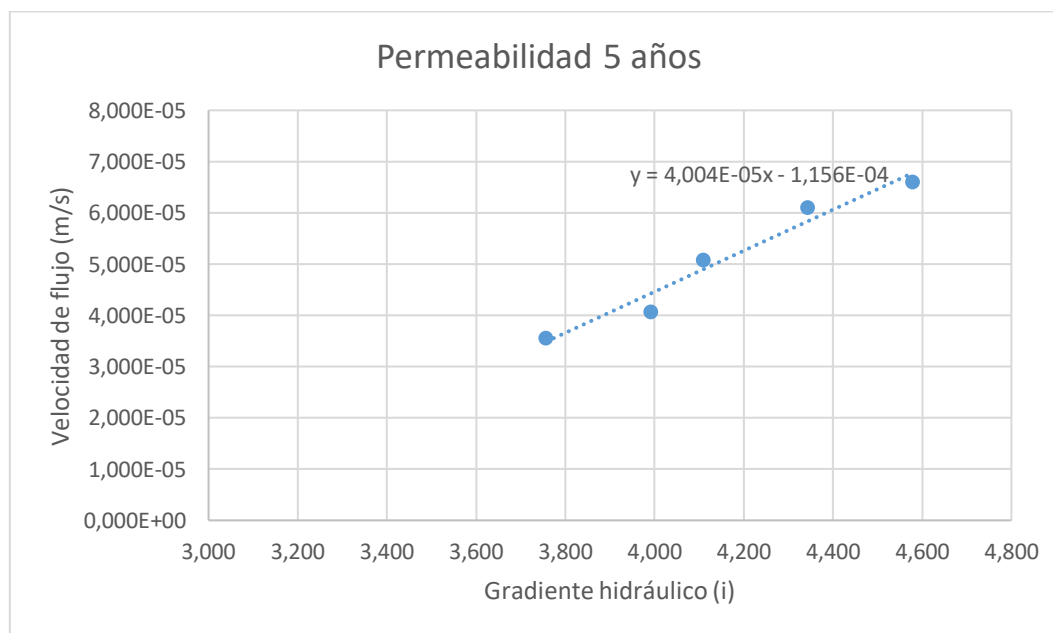


Figura 49. Resultados de ensayos de permeabilidad para desechos de 5 años.

Para la muestra de suelo de dos años se estima que la pendiente es de $4,004 \times 10^{-5}$ m/s.

Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos, se muestra el Cuadro 32 con el resumen con los principales resultados del ensayo de permeabilidad:

Cuadro 32. Resumen de resultados de ensayos de permeabilidad

Muestra	Edad	k promedio ensayos (m/s)	k gráfica (m/s)	Saturación (%)
Suelo de cobertura	-	$5,203 \times 10^{-5}$	$6,285 \times 10^{-5}$	97,62
1	Menos de un mes	$1,371 \times 10^{-4}$	$3,467 \times 10^{-4}$	100,00*
2	6 meses	$1,693 \times 10^{-5}$	$2,209 \times 10^{-5}$	97,02
3	1 año	$5,977 \times 10^{-5}$	$6,041 \times 10^{-5}$	96,03
4	2 años	$1,029 \times 10^{-5}$	$1,721 \times 10^{-5}$	95,94
5	3 años	$1,975 \times 10^{-5}$	$2,926 \times 10^{-5}$	94,84
6	4 años	$1,506 \times 10^{-4}$	$1,357 \times 10^{-4}$	98,05
7	5 años	$1,210 \times 10^{-5}$	$4,004 \times 10^{-5}$	97,01

* El resultado obtenido es superior al 100% (103,03%) sin embargo se reporta el 100% ya que el resultado original se pudo originar por alguna pérdida de las partículas sólidas de la muestra o ganancia de líquido al pasar la muestra del permeámetro al recipiente de pesaje.

El detalle de los cálculos para la determinación de la conductividad hidráulica de los materiales analizados se muestra en el Apéndice 5. Determinación de la conductividad hidráulica.

Adicional a los valores reportados, el análisis de conductividad hidráulica de los materiales del relleno sanitario permitió estimar otros parámetros que resultan importantes definir para la elaboración de esta investigación. Dentro de esas propiedades de los materiales podemos mencionar la porosidad y la relación de vacíos. En el Cuadro 33 se muestran dichos valores obtenidos a partir de la ejecución del ensayo de conductividad hidráulica mediante el uso del permeámetro.

Cuadro 33. Propiedades de las muestras obtenidas del ensayo de permeabilidad

Muestra	Edad	Relación de vacíos (e)	Porosidad (n)
Cobertura	-	2,758	0,734
1	1 mes	3,163	0,760
2	6 meses	2,824	0,738
3	1 año	3,061	0,754
4	2 años	2,602	0,722
5	3 años	2,586	0,721
6	4 años	2,884	0,743
7	5 años	2,834	0,739

4.3.2 Curva característica suelo agua

Tal y como se mencionó en la sección de metodología, para determinar la succión de los materiales analizados, se utilizó el método del papel de filtro siguiendo lo establecido por la norma de referencia ASTM D5298 (2016). Para la calibración del papel se trabajó con soluciones de NaCl y KCl a diferentes molalidades tal y como se mencionó en el Cuadro 3. El proceso de calibración se realizó durante 7 días de manera que se aseguró alcanzar el equilibrio entre el papel y la solución. Los resultados del proceso de calibración se muestran en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Resultados de calibración de papel de filtro

Solución NaCl		Solución KCl	
Humedad (%)	Log Succión (kPa)	Humedad (%)	Log Succión (kPa)
13,4615	3,9893	13,9847	3,9563
19,5857	3,8769	15,6604	3,8561
22,2846	3,4381	19,1288	3,4272
23,1801	3,2610	29,2135	3,2526
34,6743	1,9777	36,1217	1,9777
35,7143	1,3802	37,5723	1,3802

Los resultados del Cuadro 34 se grafican de manera que cuando se requiera determinar la curva característica del suelo se utilice dicho gráfico para determinar la succión de cada una de las diferentes humedades obtenidas. A partir de los datos obtenidos para la calibración se obtiene la recta de mejor ajuste que será utilizada para obtener las succiones de los suelos. Dicho gráfico se muestra a continuación.

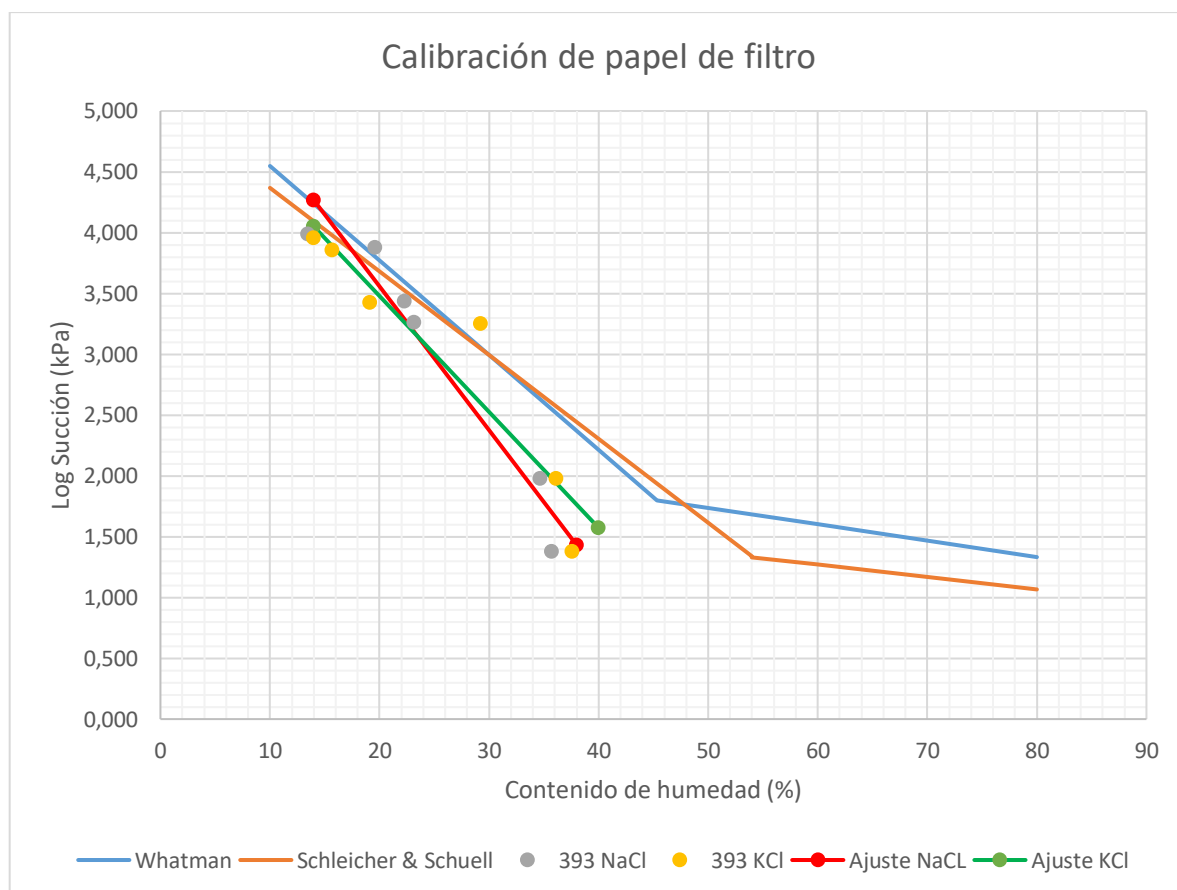


Figura 50. Gráfico de calibración de papel de filtro.

El resultado de la calibración del papel de filtro con las soluciones utilizadas se detalla en el Apéndice 6.

Posterior al proceso de calibración del papel, se determina la succión de los materiales en estudio. Para esto se sigue el procedimiento de la norma de referencia, el cual es similar al proceso para la calibración del papel con la diferencia que la solución es sustituida por el suelo en estudio. Los suelos se colocan en recipientes sellados con diferentes humedades las cuales se encuentran en el rango de humedades obtenido en la calibración del papel.

En este caso, para cada material analizado se prepararon 6 puntos con diferentes contenidos de humedad. En el Cuadro 35 se muestra la humedad natural de las muestras y las humedades utilizadas para determinar la curva característica del suelo. Los cálculos del Cuadro 35 se detallan en el Apéndice 7.

Cuadro 35. Contenido de humedad de los materiales analizados para la determinación de la curva característica

Material	Contenido de humedad de cada material (%)						
	Natural	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Cobertura	7,861	15,798	17,801	20,778	25,657	30,690	35,313
1 año	9,464	16,369	17,916	20,774	25,871	31,439	35,961
3 años	9,051	15,790	18,328	20,536	25,132	30,769	35,115
5 años	9,520	15,018	18,229	20,714	25,593	30,145	35,361

Una vez que los recipientes tienen el material analizado con las humedades requeridas, se coloca dentro del recipiente con las muestras los papeles de filtro tipo cuantitativo los cuales se dejaron equilibrar durante 7 días. Los papeles se colocaron separados del suelo de manera que se determina la succión total del suelo (osmótica y matricial). Una vez transcurrido este periodo de tiempo se determinó la humedad de los papeles de filtro de cada recipiente y la succión utilizando el gráfico de calibración de dicho papel. Los resultados de humedad de los papeles para cada recipiente se muestran en el Cuadro 36.

Cuadro 36. Contenido de humedad de papeles de filtro

Material	Contenido de humedad del papel de filtro (%)					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Cobertura	17,079	18,546	20,833	23,206	29,736	35,135
1 año	14,355	17,067	19,656	25,971	30,958	36,779
3 años	14,112	15,842	19,128	25,610	31,553	35,024
5 años	17,037	19,118	21,867	29,870	34,398	37,805

Los cálculos utilizados para determinar las humedades de los papeles de filtro presentados en el anterior cuadro se muestran en el Apéndice 8.

A partir de los resultados obtenidos del análisis realizado al papel de filtro y las humedades de los diferentes suelos, se generan los siguientes resultados para la generación de las curvas características de los suelos analizados. El resumen de dichos resultados se muestra en el Cuadro 37.

Cuadro 37. Resultados para generación de curvas características

Cobertura		Desechos 1 año	
Succión (kPa)	θ (cm ³ /cm ³)	Succión(kPa)	θ (cm ³ /cm ³)
7992,1	0,223	16774,1	0,213
5361,2	0,227	8018,3	0,231
2877,0	0,260	3963,3	0,264
1508,2	0,324	710,6	0,330
255,0	0,389	182,9	0,396
58,7	0,454	37,5	0,426
Desechos 3 años			
Desechos 3 años		Desechos 5 años	
Succión (kPa)	θ (cm ³ /cm ³)	Succión(kPa)	θ (cm ³ /cm ³)
17921,0	0,214	8084,0	0,213
11191,2	0,232	4588,3	0,231
4575,8	0,265	2171,3	0,264
784,0	0,331	245,9	0,330
155,5	0,382	71,7	0,380
60,5	0,428	28,4	0,426

Para la construcción de las curvas características de los materiales analizados, se utilizó el modelo de Van Genuchten utilizando los parámetros definidos en la investigación desarrollada por White et al (2015) los cuales se encuentran definidos en la Cuadro 4. En dicha investigación se identifica el rango de valores de los parámetros de Van Genuchten para su uso en los modelos y proponen ecuaciones para estimar cada uno de estos valores. A partir del uso de dichas ecuaciones se obtienen los siguientes parámetros.

Cuadro 38. Parámetros de Van Genuchten para la generación de curvas características

Parámetro	Suelos de cobertura	Desecho 1 año	Desecho 3 años	Desecho 5 años
θ_s	0,734	0,754	0,721	0,739
θ_r	0,160	0,160	0,160	0,160
α	2,567	2,567	2,496	2,567
n	1,900	1,900	1,900	1,900
m	0,474	0,474	0,474	0,474
k_s (m/s)	$6,285 \times 10^{-5}$	$6,041 \times 10^{-5}$	$2,926 \times 10^{-5}$	$4,004 \times 10^{-5}$

Utilizando los parámetros definidos en el Cuadro 37 y en el Cuadro 38 junto con el modelo propuesto por Van Genuchten, se procedió a construir las curvas características de cada suelo analizado mediante el uso de la aplicación RETC. Utilizando los mismos parámetros también se obtiene la variación de la conductividad hidráulica con respecto al contenido de humedad del material analizado.

Para cada material analizado se presenta la curva de succión vs. contenido de humedad volumétrico donde se presentan los datos experimentales y la curva característica generada a partir de los parámetros ingresados. De esta manera se puede apreciar el ajuste existente entre los datos experimentales y la curva construida a partir de los parámetros utilizados.

Se muestra también la curva de contenido de humedad volumétrico vs. conductividad hidráulica donde se muestra la variación de este último parámetro al aumentar la humedad de los materiales.

La primer curva característica obtenida es la del suelo de cobertura junto con los datos experimentales obtenidos de los ensayos

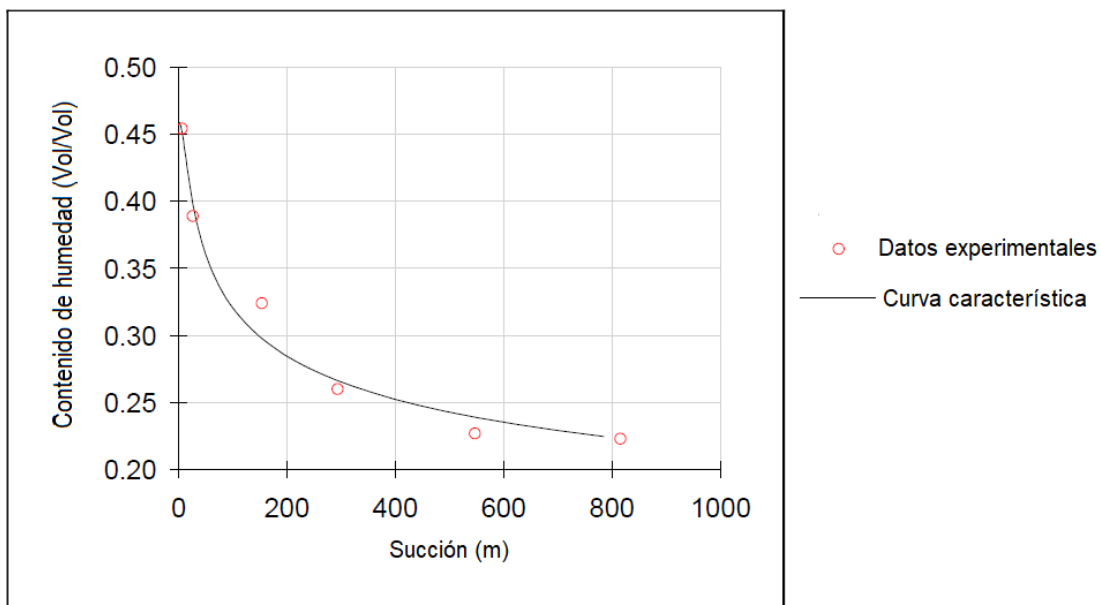


Figura 51. Curva característica suelo de cobertura

También se presenta la curva de conductividad hidráulica del mismo material.

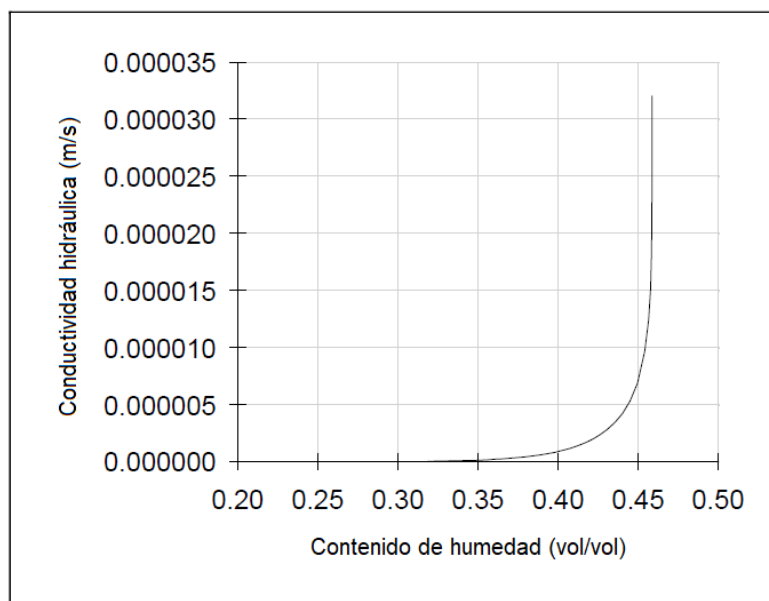


Figura 52. Conductividad hidráulica del suelo de cobertura

De igual manera se presenta la curva característica para el material con desechos de un año de estar almacenados en el relleno sanitario.

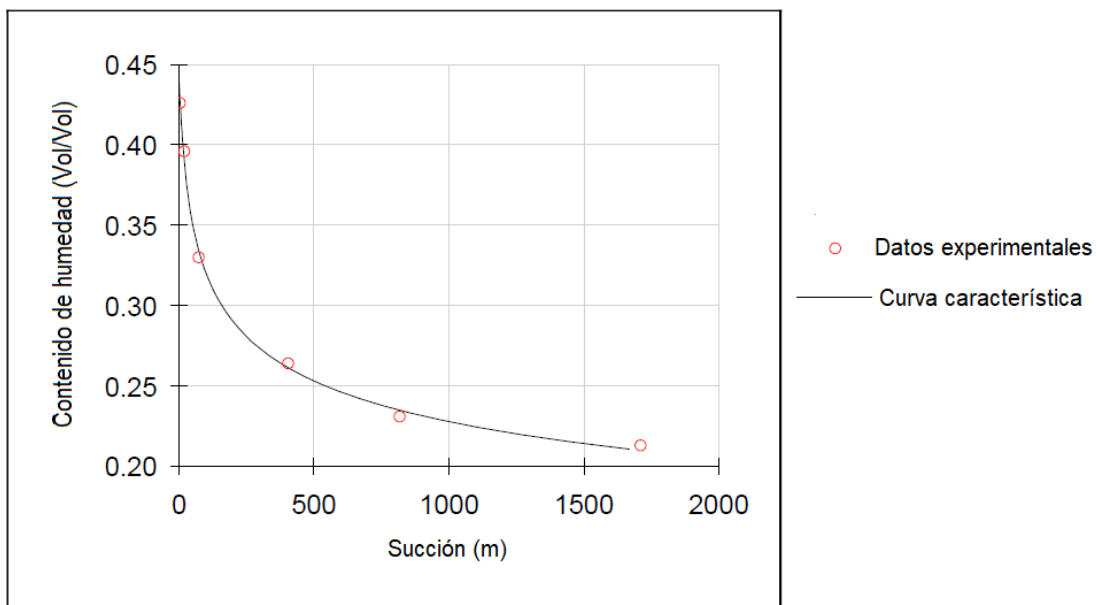


Figura 53. Curva característica desecho de 1 año

Al igual que para el material anterior, se presenta la curva de conductividad hidráulica.

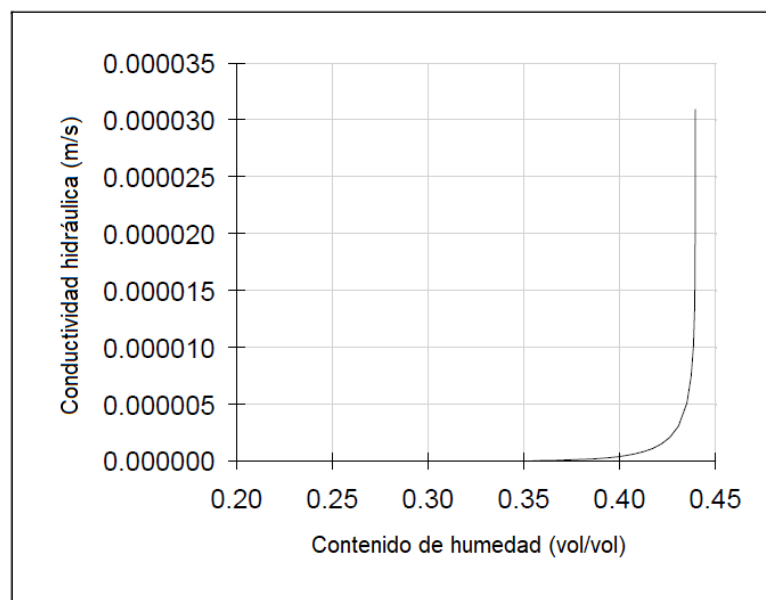


Figura 54. Conductividad hidráulica de desecho de 1 año

Para la muestra de desechos de tres años la curva característica obtenida del análisis realizado se muestra a continuación.

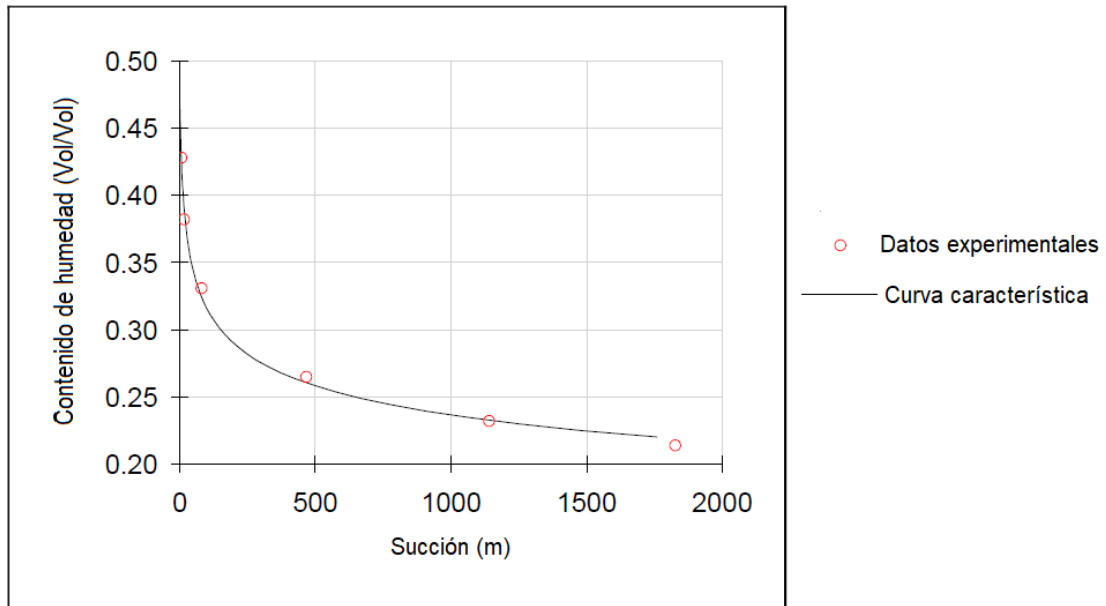


Figura 55. Curva característica desechos de 3 años

Adicionalmente se cuenta con la representación de la variación de la conductividad hidráulica con respecto al contenido de humedad.

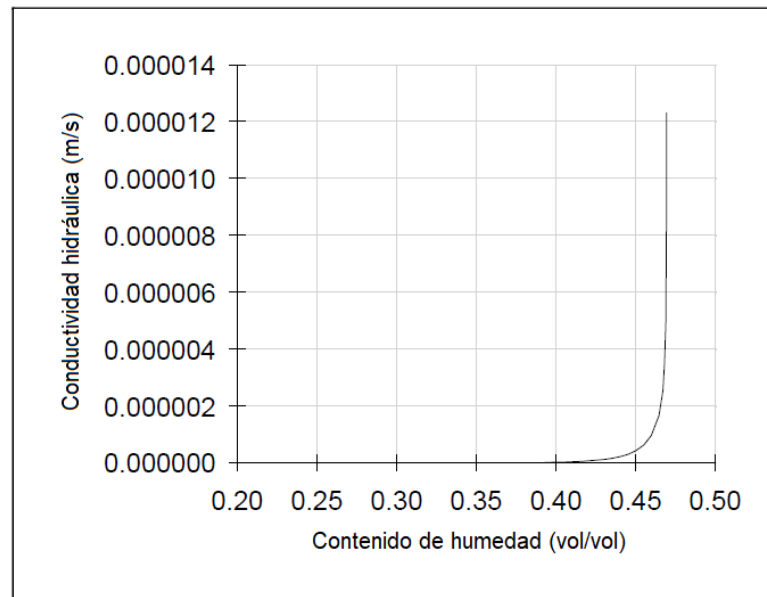


Figura 56. Conductividad hidráulica de desechos de 3 años

Por último, se desarrolló la curva característica del suelo de 5 años utilizando los parámetros mencionados anteriormente.

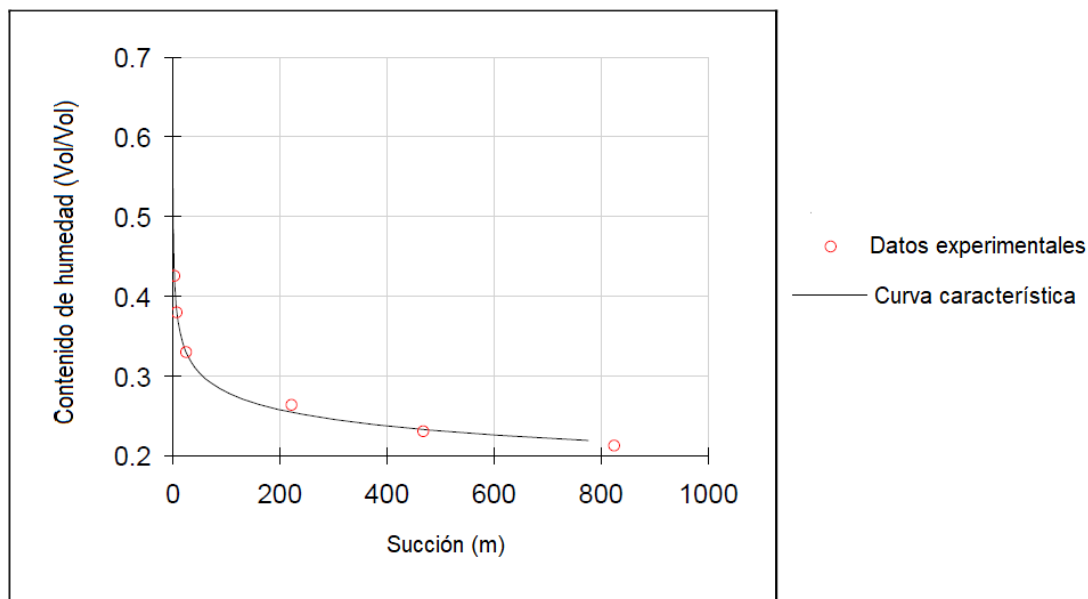


Figura 57. Curva característica desechos de 5 años

Para el suelo con desechos de 5 años la curva de la conductividad hidráulica se muestra en la Figura 58.

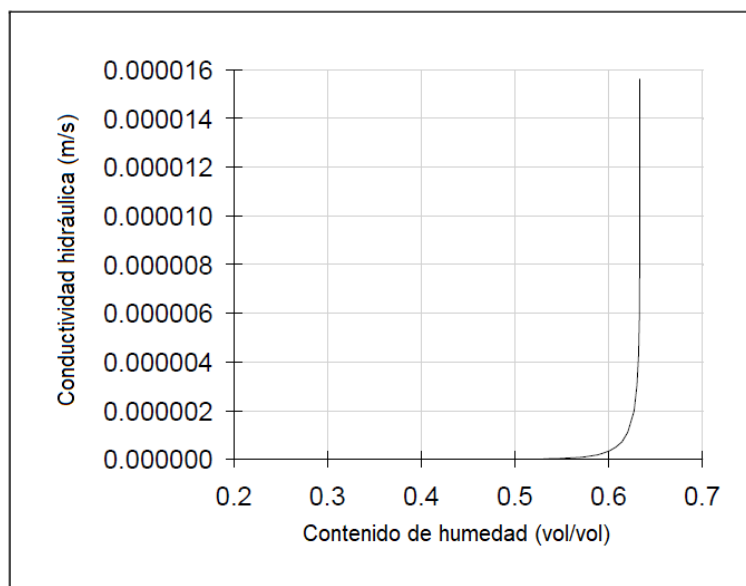


Figura 58. Conductividad hidráulica de desechos de 5 años

Se observa de los datos obtenidos que la conductividad hidráulica varía según el contenido de humedad volumétrico de las muestras analizadas. La conductividad hidráulica no saturada no se puede medir directamente por medio de métodos experimentales por lo que para determinar dicha permeabilidad se pueden utilizar métodos alternativos. Se puede analizar la conductividad hidráulica relativa (K_r) mediante la implementación del modelo fractal indicado anteriormente y mediante la implementación de la ecuación 4. Para el análisis fractal se procede a estimar la dimensión fractal (D) graficando, para cada material estudiado, el $\ln(\theta)$ con el $-\ln(\psi)$. A continuación, se presenta la estimación de la dimensión fractal para cada gráfico.

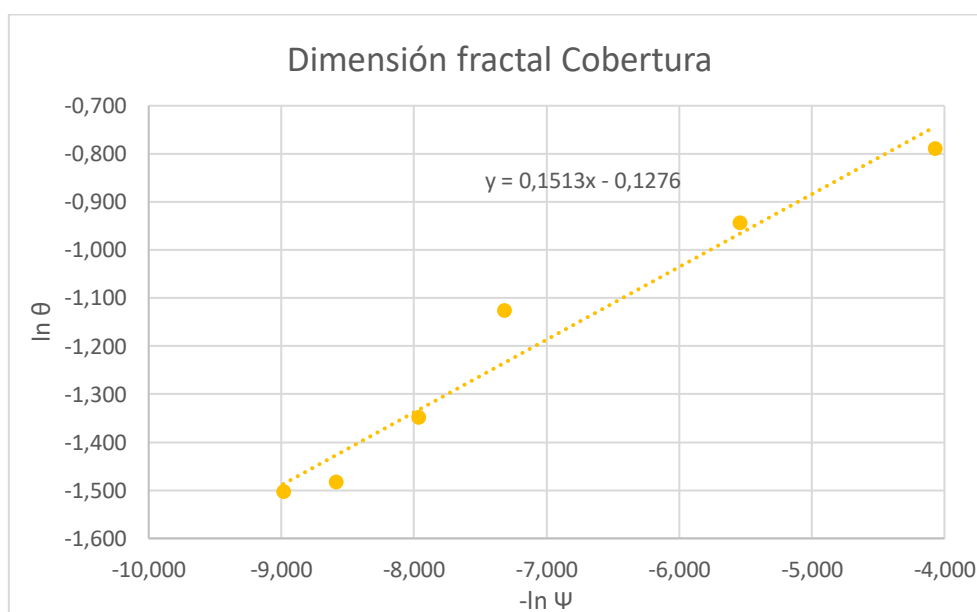


Figura 59. Dimensión fractal para suelo de cobertura

Mediante la Figura 59, se obtiene de la pendiente del gráfico, que la dimensión fractal del suelo de cobertura es de 2,849.

Seguidamente se procede a realizar el mismo análisis para los materiales de desecho, iniciando con los desechos de 1 año. Los resultados se muestran en la Figura 60.

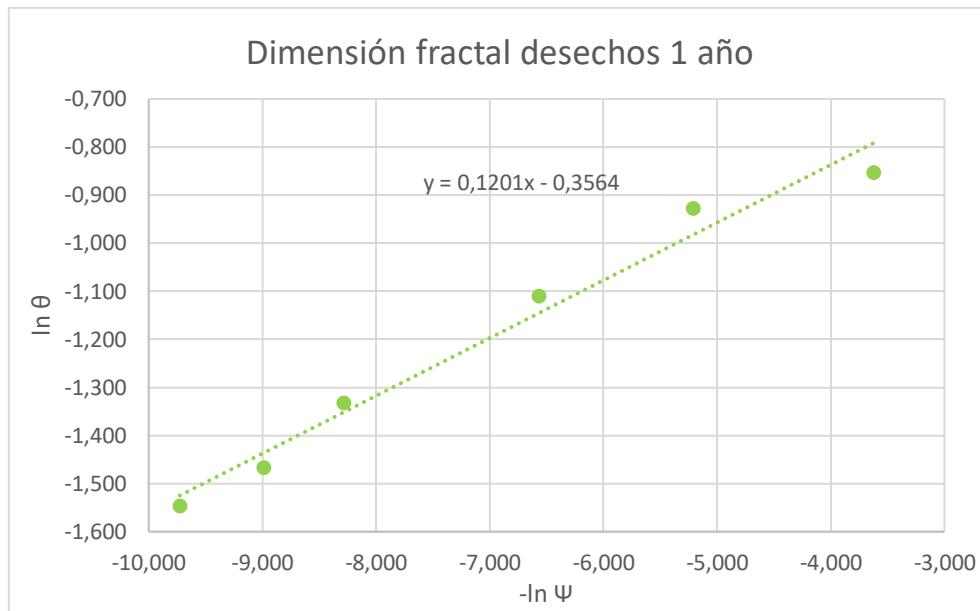


Figura 60. Dimensión fractal para desechos de 1 año

Para el desecho de 1 año, la dimensión fractal corresponde a 2,880.

Los resultados de los desechos de 3 años para la estimación de la dimensión fractal se muestran en la Figura 61.

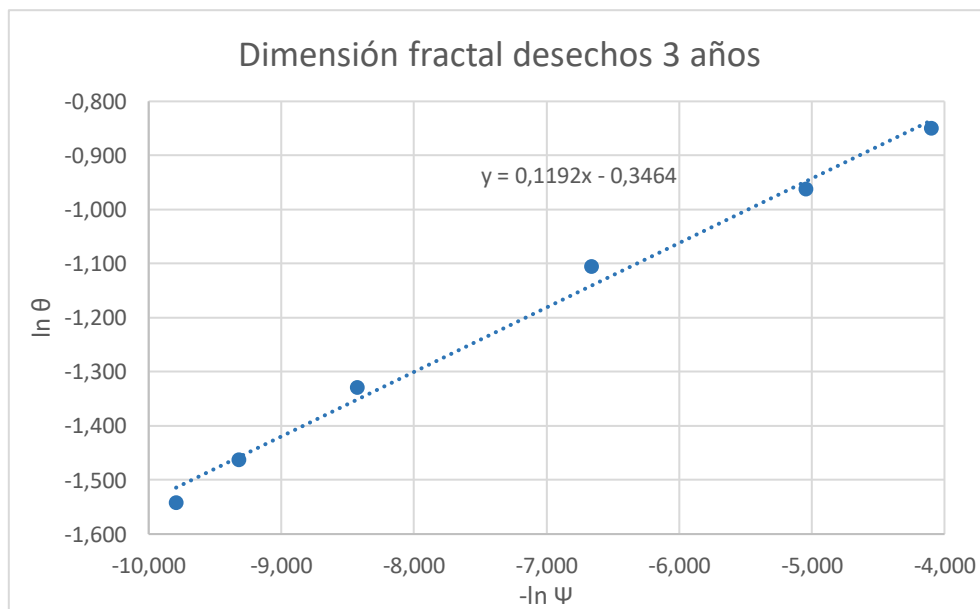


Figura 61. Dimensión fractal para desechos de 3 años

Para el desecho de 3 años la dimensión fractal es de 2,881.

Por último, para los desechos de 5 años la dimensión fractal se estimó mediante la Figura 62.

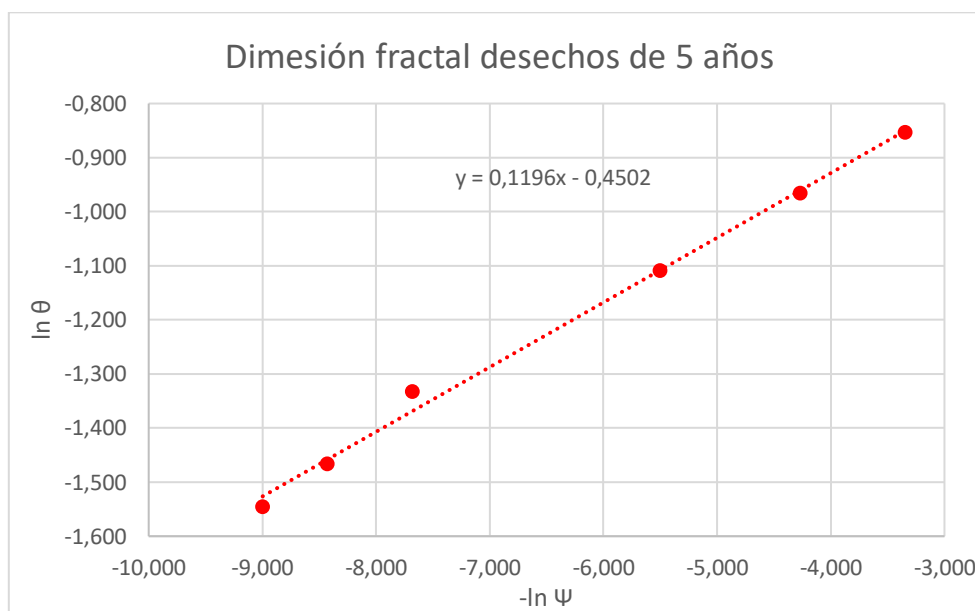


Figura 62. Dimensión fractal para desechos de 5 años

Para el material desecho de 5 años, la dimensión fractal corresponde a 2,880.

En resumen, se presenta el Cuadro 39 donde se recopilan los datos obtenidos para la dimensión fractal de los materiales analizados.

Cuadro 39. Resultados de dimensión fractal para los materiales de relleno sanitario

Material	Pendiente (m)	Dimensión fractal (D)
Cobertura	0,1513	2,8487
Desecho 1 año	0,1201	2,8799
Desecho 3 años	0,1192	2,8808
Desecho 5 años	0,1196	2,8804

Luego de definir la dimensión fractal se determina el valor de entrada de aire de los materiales estudiados. Para esta investigación, por los datos calculados y el comportamiento de las curvas características obtenidas, se considera que el valor de entrada de aire es el valor de menor succión obtenido en el ensayo de succión de los

desechos. Dichos datos se pueden obtener del Cuadro 37. En el Cuadro 40 se presenta el resumen de los datos utilizados como valores de entrada de aire.

Cuadro 40. Valores de entrada de aires para los materiales analizados

Material	Valores de entrada de aire	
	Succión (kPa)	θ (cm ³ /cm ³)
Cobertura	58,674	0,454
Desecho 1 año	37,508	0,426
Desecho 3 años	60,473	0,428
Desecho 5 años	28,369	0,426

Con dichos datos se puede predecir el comportamiento de la conductividad hidráulica relativa mediante el modelo fractal propuesto y presentado en la ecuación 4. Dicha predicción se compara con los datos experimentales obtenidos en los análisis de permeabilidad y succión. Utilizando dichos datos se puede estimar la conductividad hidráulica no saturada mediante el modelo de Van Genuchten propuesto en las ecuaciones 2 y 3.

Aplicando el modelo fractal y el modelo Van Genuchten, se procede a graficar dichos resultados de manera que se puede verificar la aplicabilidad del modelo fractal mediante el ajuste con los datos experimentales. Los datos experimentales se encuentran en el Apéndice 11. A continuación, se presenta el gráfico del modelo fractal y los datos experimentales para el suelo de cobertura.

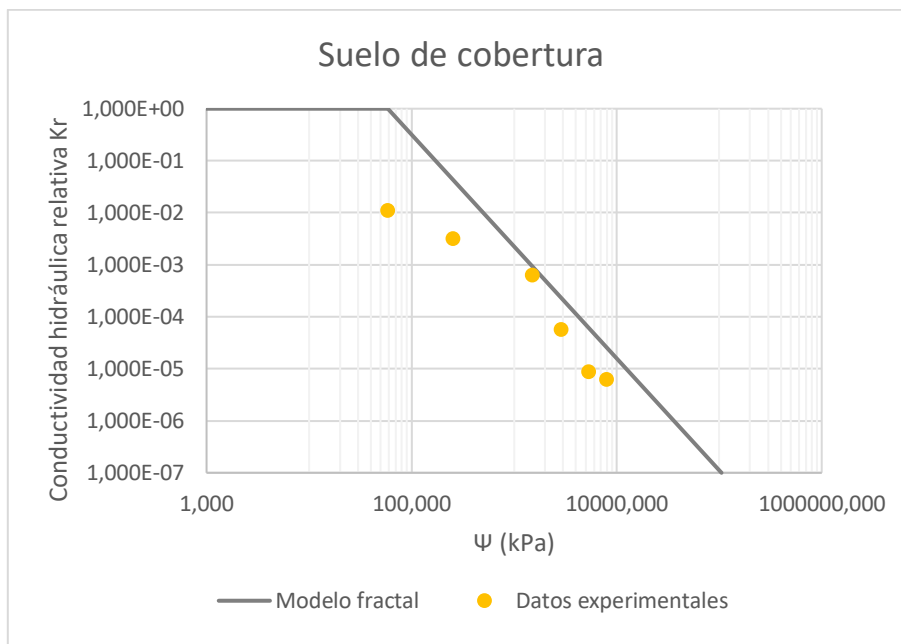


Figura 63. Modelo fractal para suelo de cobertura

El gráfico que presenta el modelo fractal y los datos experimentales para el desecho de 1 año se presenta a continuación.

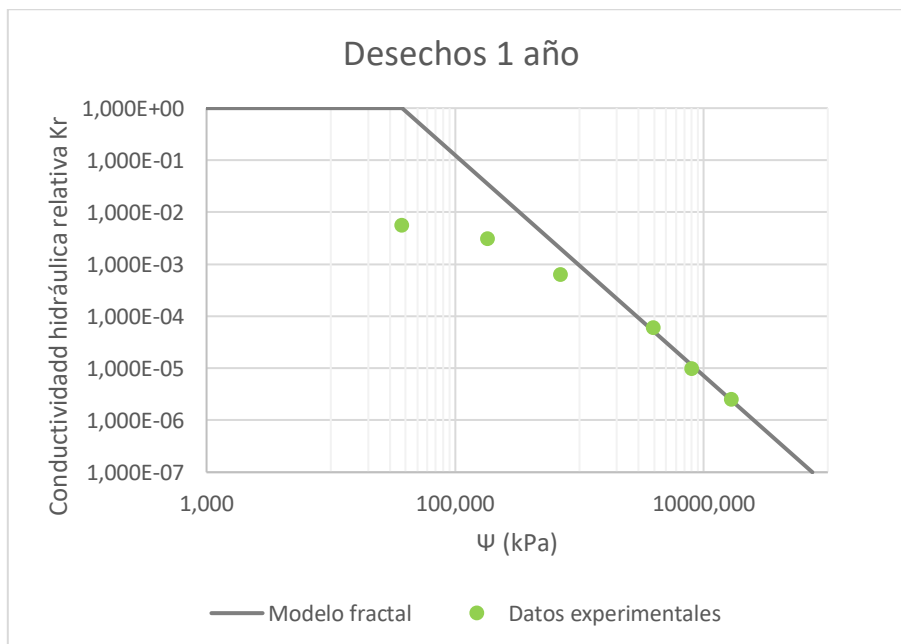


Figura 64. Modelo fractal para desechos de 1 año

Por último, se presentan los gráficos de modelo fractal para los desechos de 3 años y 5 años en las siguientes figuras.

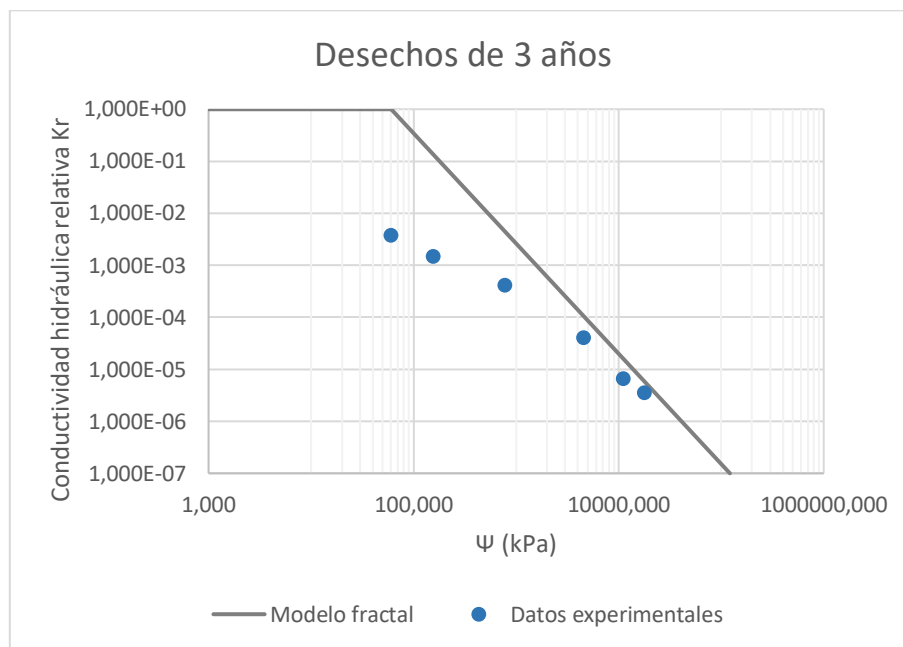


Figura 65. Modelo fractal para desechos de 3 años

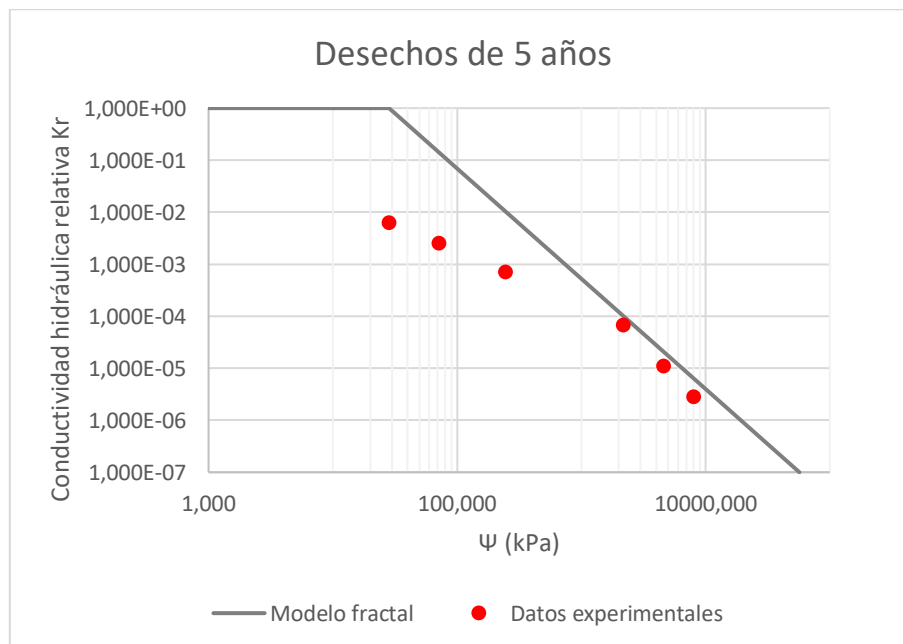


Figura 66. Modelo fractal para desechos de 5 años

4.4 Balance hídrico

El balance hídrico se realizó utilizando el modelo HELP y los datos de la estación meteorológica ubicada en relleno sanitario de Miramar. Los datos de la estación meteorológica utilizados son los de precipitación, temperatura ambiental y velocidad del viento. Para el modelo HELP también se requiere el uso de datos de radiación solar por lo cual se utilizaron los datos del sitio The National Renewable Energy Laboratory (NREL) que cuenta con datos de radiación solar para distintos puntos de Costa Rica tal y como se muestra en Figura 19.

Los datos utilizados corresponden al periodo 2020 ya que fue el periodo facilitado por la administración del relleno y que tiene los datos completos para realizar el balance hídrico. HELP requiere datos diarios de precipitación, temperatura y radiación solar a partir de los cuales estima cantidades mensuales para realizar el respectivo análisis de balance hídrico. En el Cuadro 41 se muestran los datos mensuales obtenidos para los parámetros mencionados anteriormente.

Cuadro 41. Datos mensuales ingresados al modelo HELP

Mes del año 2020	Precipitación mensual acumulada (mm)	Temperatura promedio (°C)	Radiación solar promedio (MJ/m ²)
Enero	5,0	27,3	8,2
Febrero	0,0	27,8	16,4
Marzo	0,0	28,5	17,4
Abril	14,4	28,7	22,7
Mayo	11,0	27,6	31,2
Junio	54,1	26,3	29,1
Julio	293,9	26,0	30,3
Agosto	527,0	25,8	24,8
Septiembre	405,1	25,8	21,5
Octubre	177,9	25,7	16,5
Noviembre	490,8	24,4	11,9
Diciembre	89,1	25,9	8,3

Los promedios mensuales estimados se obtienen de registros diarios ingresados a HELP que realiza la estimación de dichos valores a partir de los datos diarios ingresados.

El modelo de balance hídrico utilizó un diseño de 10 capas de diferentes materiales. La primer capa o capa más profunda es una capa de arcilla compacta de baja permeabilidad que simula una barrera entre el suelo y la celda. La segunda capa, es una geomembrana de polietileno de alta densidad y seguidamente se coloca una capa de material granular utilizado como material drenante para la evacuación de lixiviados. La cuarta capa es un geotextil que permite la filtración de los lixiviados pero que separa los desechos sólidos del material granular evitando la contaminación de este último.

Posteriormente se colocan 5 capas de materiales de desechos con edades desde los 5 años (el más profundo) hasta 1 año (el más superficial). Cada una de estas capas tiene propiedades diferentes determinadas mediante los estudios de campo y laboratorio anteriormente definidas. Por último, se coloca una capa de suelo de cobertura que cubre los desechos colocados en la celda. En el Cuadro 32 se detallan los valores de permeabilidad utilizados en la modelación del relleno sanitario.

Para cada capa de desecho se estableció un espesor de 4 m para alcanzar un total de 20 m de desecho y se definió la pendiente de los taludes en un 25%. Este dato se determinó a partir de los levantamientos topográficos realizados al relleno y a partir del reglamento de Rellenos Sanitarios de Costa Rica. Aunque no todos los taludes tienen pendientes del 25%, las mediciones realizadas oscilan alrededor de ese valor por lo que se utiliza ese dato para la modelación dado que la herramienta no permite utilizar varias pendientes.

En la Figura 67 se muestra el esquema del perfil generado del diseño de la celda planteado para el balance hídrico.






























1	Suelo de cobertura	  
2	Desechos 1 año	  
3	Desechos 2 años	  
4	Desechos 3 años	  
5	Desechos 4 años	  
6	Desechos 5 años	  
7	Drainage Net (0.5 cm)	  
8	G - Gravel	  
9	Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM)	  
10	CL - Clay Loam	  

Figura 67. Esquema de materiales utilizado en el modelo de balance hídrico.

Para estimar el balance hídrico en las celdas se cuenta con las áreas que abarcan cada una de ellas, también se cuenta con la topografía conjunta del relleno y los desechos tratados en dichas celdas. Con la información topográfica se determinarán las pendientes de los taludes y la altura de la celda lo cual es información requerida por el modelo. En el siguiente cuadro se presentan las áreas de cada una de las celdas suministradas por la administración del relleno.

Cuadro 42. Áreas de celdas del relleno sanitario

Celda	Área (m ²)
1	21 045
2	13 799
3	11 194
4	29 602
Total (Macrocela)	75 640

Una vez ingresada toda la información y verificada por parte de la herramienta HELP, se arrojan los resultados del balance hídrico para el diseño planteado y las condiciones climatológicas ingresadas. Los resultados se muestran en la siguiente información:

4.4.1 Resumen de datos anuales

Se presentan los resultados para todo el período de simulación, incluyendo la precipitación total media anual, la escorrentía, la evapotranspiración, la recolección en el drenaje y la fuga/percolación al terreno para cada una de las celdas y de la macrocelda.

Cuadro 43. Balance hídrico anual

	Balance hídrico anual (m³)				
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Macrocela
Precipitación (m ³)	43 827,0	28 800,6	23 374,4	61 775,2	158 612,0
Escorrentía (m ³)	8 414,3	5 529,4	4 487,6	11 860,2	30 068,1
Evapotranspiración (m ³)	19 214,9	12 626,9	10 247,9	27 083,8	69 468,1
<hr/>					
Recolección en capa 8 (m ³)	16 197,3	10 644,0	8 638,6	22 830,5	59 076,1
Filtración a través de capa 10 (m ³)	1,2382	0,8137	0,6604	1,7453	0,4159

4.4.2 Pico diario durante periodo de simulación

Se presenta el resumen de los resultados de todo el período de simulación, incluidos los valores máximos de las precipitaciones, la escorrentía, la recolección en el drenaje, las fugas/percolación al terreno.

Cuadro 44. Datos pico diarios de balance hídrico

	Balance hídrico datos máximos diarios (m³)				
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Macrocela
Precipitación (m ³)	1 738,8	1 142,6	927,4	2 450,9	6 292,8
Escorrentía (m ³)	541,0	355,5	288,6	762,6	1 944,7
<hr/>					
Recolección en capa 8 (m ³)	280,1	184,1	149,4	394,9	1 327,2
Filtración a través de capa 10 (m ³)	0,0091	0,0060	0,0049	0,0129	0,0042

4.4.3 Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de realizar un análisis de sensibilidad de la información generada, se cambiaron las pendientes de los taludes y la altura de la celda para corroborar si estas modificaciones causan cambios en los datos de balance hídrico. Otros parámetros como los datos meteorológicos o el área de la celda se mantienen constantes ya que son datos propios del sitio.

El Reglamento sobre rellenos sanitarios (2014) establece como pendiente máxima de los taludes un 30% por lo que se toma este como valor máximo para el análisis de sensibilidad ante el cambio de pendiente. Realizando una revisión de los levantamientos topográficos facilitados por la administración del relleno sanitario (ver Anexo 2), se determinó que las pendientes de los taludes rondan entre el 25% y el 20% por lo que se tomará este último valor como el mínimo para el análisis de sensibilidad.

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en el Apéndice 9. Datos para análisis de sensibilidad de balance hídrico. Dichos resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 68.

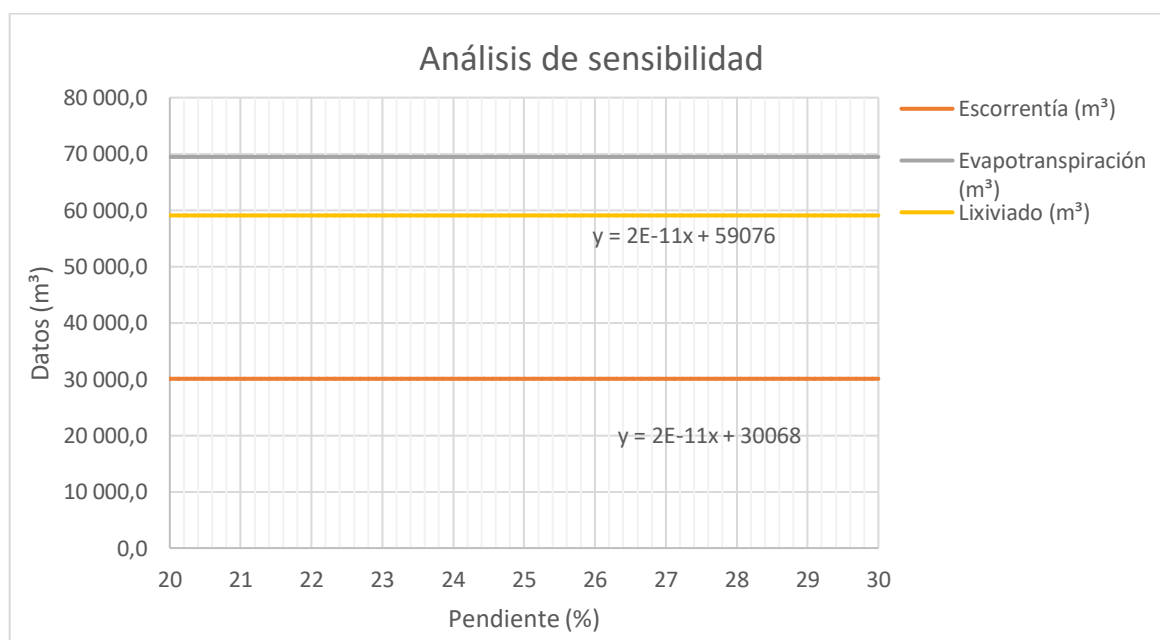


Figura 68. Análisis de sensibilidad para el balance hídrico ante variación de pendientes

Observando la Figura 68 se logra determina que el modelo HELP no sufre modificaciones ante cambios de pendientes en los taludes y en la altura de los desechos. El modelo está constituido para realizar el balance hídrico a partir de las áreas ingresadas en la interfaz. En esta se debe indicar el área del sitio en análisis y el área que presenta pendientes, esta última será considerada como el área que presenta escorrentía sin importar la pendiente de los taludes.

4.4.4 Validación de los resultados

Una vez implementado el modelo HELP para la realización del balance hídrico del relleno sanitario en estudio, se procede a la elaboración del balance hídrico mediante el uso de ecuaciones que estiman cada uno de los parámetros requeridos para dicha estimación. Para esto se toma como referencia la tesis elaborada por Delgado A. (2018) donde se procedió a calcular el balance hídrico para proponer la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados de dicho relleno sanitario.

En primera instancia, se estima la escorrentía superficial tomando como referencia la precipitación mensual del sitio. En este caso se utilizan los datos de la Cuadro 41 y un coeficiente de escorrentía entre 0,50 y 0,72 según la pendiente del relleno. Posteriormente se calcula la evaporación tomando como referencia la temperatura ambiental registrada por la estación meteorológica del sitio. Con dicha información se puede estimar la filtración al interior de la celda lo cual es insumo para la estimación de la generación de lixiviados y gases. En el Cuadro 45 se muestra el resumen de la estimación de dichos parámetros para el periodo de estudio tomando como referencia la investigación de Delgado A. (2018).

Cuadro 45. Estimación de balance hídrico superficial

Parámetro	Ecuación	Comentario	Resultado
Escorrentía R (mm)	$R = C * P$	C: Coeficiente de escorrentía. P: Precipitación.	1193,41
Evaporación E (mm)	$E_{10} = \frac{P_{10} + w}{\sqrt{1 + \frac{P_{10} + w}{L}}}$ $L = \frac{T + 2}{16\sqrt{R_s}}$	P ₁₀ : Precipitación media de 10 días. w: Cantidad máxima de agua que se puede evaporar. T: Temperatura media del aire, °C Rs: Radiación solar.	55,29
Filtración F (mm)	$F = P - R - E$	P: 2068,30 mm	819,60
Filtración (m ³)	$F = F(mm) * \text{Área}$	Área de celda (m ²): 75 640	61 994, 54

Conociendo la filtración hacia el interior de la celda, se puede estimar la cantidad de lixiviado que se genera en el interior de la celda. El lixiviado se genera debido a la filtración y cuando la humedad interna de la celda supera la capacidad de campo de los materiales presentes, liberando así el líquido. También hay que considerar que la descomposición de los desechos genera gases y esto va a tener asociado un consumo de agua que debe ser considerado en el balance interno de la celda.

En el Cuadro 46 se presenta el balance hídrico para el interior de la celda tomado en cuenta la filtración hacia el interior de esta, la generación de los gases, la capacidad de retención de los materiales y la humedad de los desechos. Para dicho análisis se considera que el valor de infiltración no se ve afectado por la capa de material de cobertura.

Cuadro 46. Balance hídrico interno

Parámetro	Ecuación	Comentario	Resultado
Generación de biogás (m ³)	$B = 2kL_oMe^{-kt}$	k: Índice de generación de metano. L _o : Generación potencial de metano. M: Masa de residuos depositados t: Número de años (edad) de los residuos	32 503 610,10
Agua consumida para generar el biogás (m ³)	$A_c = \frac{0,195 * B}{1000}$	Se considera que se genera 0,195 litros por cada metro cúbico de gas.	6 338,20
Capacidad de campo de desechos (m ³)	$CC_T = CC_r * Vol$	CC _T : Capacidad de campo total. CC _R : Capacidad de campo de residuo. Vol: Volumen de residuos.	621 965,92
Humedad de desechos (m ³)	$H = \%H * M_d$	%H: Contenido de humedad de los desechos. M _d : Masa de desechos	636 384,97
Lixiviados (m ³)	$L_x = H - CC_T - A_c$		8 080,85
Volumen total (m ³)	$V_T = L_x + F$		70 075,38

El detalle de la estimación del balance hídrico se encuentra en el Apéndice 12.

4.5 Modelo de flujo

A partir de los resultados generados en las anteriores secciones, se procede a realizar el modelo de flujo del relleno sanitario en estudio. Se realizará un modelo en condición de flujo estacionario para la estimación de los volúmenes de lixiviado durante un espacio temporal de un año y otro modelo de flujo transitorio para determinar el comportamiento de la filtración dentro de la celda del relleno a raíz de la precipitación máxima registrada en el sitio.

Para la realización de los modelos se toma como base los levantamientos topográficos facilitados por la administración del relleno sanitario. Dichos levantamientos juntos con los resultados de ensayos de caracterización de los materiales permitirán construir el perfil de una de las celdas. Para la construcción de dicho perfil se siguió los mismos principios utilizados para el balance hídrico.

Se definieron un total de 10 capas donde la más superficial corresponde al suelo de cobertura, pasando posteriormente por los desechos de distintas edades, el material drenante, la geomembrana y por último el terreno natural. Las capas de desecho propuestas, al igual que en el balance hídrico, cuentan con un mismo espesor y con las propiedades hidráulicas definidas en los análisis de laboratorio. En la Figura 69 se muestra uno de los taludes de la celda donde se aprecia el esquema del modelo utilizado para el análisis de flujo.

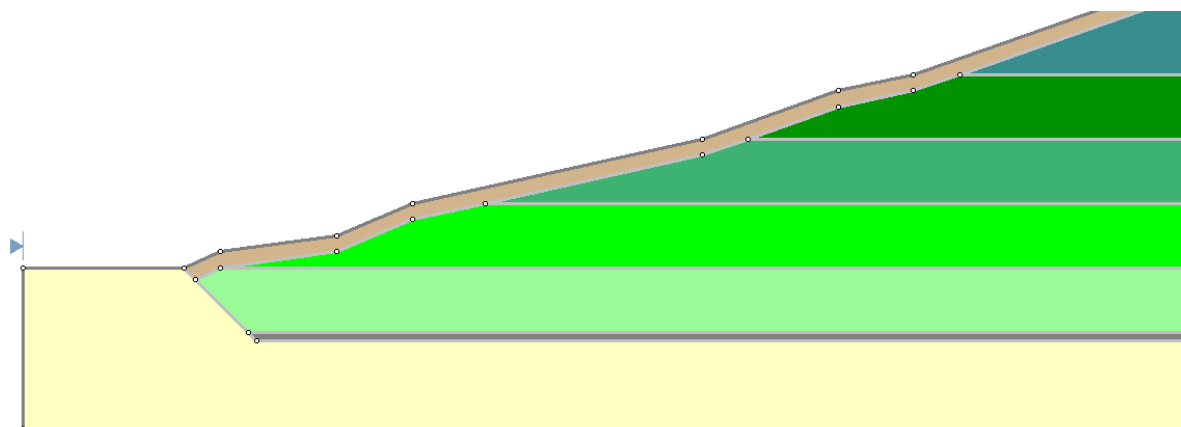


Figura 69. Perfil del modelo utilizado para el análisis de flujo

El esquema completo de los perfiles utilizados para la elaboración del modelo de flujo se presenta en el Apéndice 13.

4.5.1 Modelo de flujo estacionario

El modelo de flujo estacionario se realiza con los datos anuales obtenidos en anteriores análisis del presente trabajo. Las tasas de infiltración ingresadas al modelo se estimaron para un periodo anual, se considera que el flujo se encuentra en un estado donde las velocidades dentro de la celda no van a variar con el tiempo. Mediante esta condición se puede calcular el volumen del lixiviado que se genera en el interior de la celda.

Utilizando los datos del balance hídrico obtenido de HELP, se procede a asignar a cada una de las capas de material una tasa de infiltración, de manera que se puedan estimar los parámetros del modelo mediante la implementación del software Slide®. La asignación de la tasa de infiltración se asigna a partir del cálculo de generación de lixiviados obtenido en el balance hídrico y para el suelo de cobertura la infiltración obtenida a partir de los datos de precipitación. En la Figura 70 se muestra el esquema del modelo con las tasas de flujo asignadas a cada una de las capas de material.

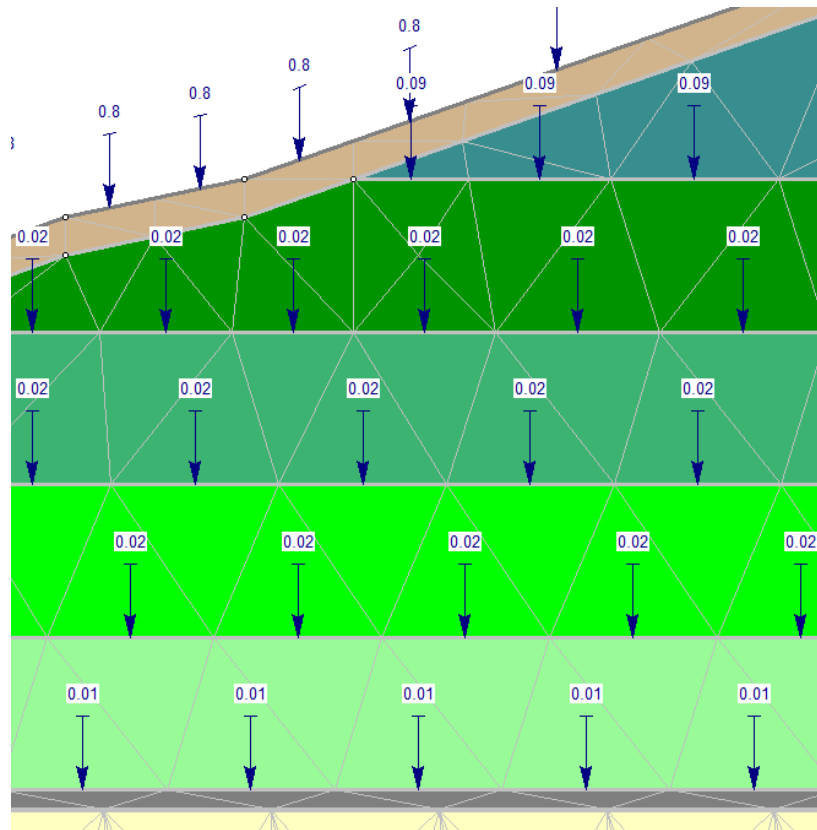


Figura 70. Tasas de flujo asignadas a cada capa de material

Adicionalmente, de dicho modelo se pueden obtener valores de presión, presiones totales, presiones de poro para otros análisis como por ejemplo análisis de estabilidad de taludes. Los resultados del modelo de flujo y los perfiles se pueden detallar en Apéndice 14. Resultados del modelo de flujo para relleno sanitario de Miramar.

Como parte del análisis, se colocan colectores de flujo en la parte inferior del modelo y en los extremos de manera que se pueda estimar el caudal generado para el modelo propuesto. Estos valores serán utilizados para compararlos con los datos de campo facilitados por la administración del relleno sanitario analizado. También se comparan con los datos obtenidos del modelo HELP y el modelo empírico implementado por Delgado A. (2018)

De los colectores de caudales colocados en el modelo se puede obtener un caudal total anual del flujo recolectado por dichas secciones. En el Cuadro 47 se muestra el resultado obtenido junto con los resultados de los demás análisis realizado o datos recopilados.

Cuadro 47. Comparación de resultado de flujos

Análisis	Caudal periodo de análisis (m³)
Datos de campo	53 572,00
Modelo HELP	59 076,10
Modelo empírico	70 075,38
Modelo de flujo Slide® Perfil 1	64 517,00
Modelo de flujo Slide® Perfil 2	60 515,00

En Cuadro 47 también se muestra el dato de campo facilitado por la administración del relleno sanitario correspondiente a la cantidad de lixiviado tratado durante el periodo 2020. Dicho valor es utilizado como parámetros de comparación con los resultados de los demás modelos implementados.

4.5.2 Modelo de flujo transitorio

La celda del relleno sanitario está sometida a procesos naturales como la precipitación de la lluvia y la evaporación de la humedad o líquidos dentro de esta debido a la acción de la temperatura del sitio. Debido a esto y para alcanzar el equilibrio interno de la celda, el flujo debe pasar por una etapa de flujo transitorio donde el líquido que se filtra se desplazará hasta alcanzar el equilibrio según las condiciones definidas.

El análisis de flujo transitorio realizado consideró un análisis diario en los cuales se ubicó el nivel freático en diferentes niveles ya que las celdas del relleno sanitario no mantienen los sistemas de recolección abiertos de manera constante. Esto implica que el nivel de los lixiviados puede variar según la época del año y según la condición en la que se encuentre el sistema de recolección. La posición de los niveles freáticos se varió en los siguientes niveles:

- Nivel 1: En el filtro de grava.
- Nivel 2: Entre desecho de 5 años y 4 años.
- Nivel 3: Entre desecho de 2 años y 3 años.

La tasa horaria de infiltración se definió a partir de los datos picos diarios obtenidos del modelo HELP. En el Cuadro 48 se muestran las tasas de infiltración estimadas.

Cuadro 48. Tasas de infiltración para modelos de flujo transitorio

Tipo de tasa	Valor	Unidades
Diaria	0,02	m/día

Para la elaboración de este análisis se tomó como referencia el perfil 1 generado para el análisis estacionario. La modelación se realizó bajo el supuesto de la ocurrencia del evento de mayor precipitación durante 5 días continuos, donde para cada día se fijó la tasa de infiltración mencionada y se obtuvo el comportamiento del flujo a lo interno de la celda.

Los resultados del modelo transitorio y las diferentes posiciones del nivel freático o de lixiviado se muestran en Apéndice 14. Resultados del modelo de flujo para relleno sanitario de Miramar. En dicho apéndice se muestra el resultado de la presión de poro ya que muestra el avance de la infiltración y como el material se va saturando.

Capítulo 5. Análisis de resultados

En este capítulo del presente documento, se procede a analizar los resultados obtenidos a partir de la serie de actividades realizadas en el relleno sanitario Parque Ecoindustrial de Miramar, administrado por la empresa Tecnoambiente. Siguiendo el mismo orden que el utilizado para obtener los resultados, se analizará en primera instancia el muestreo de materiales realizado con el propósito de obtener muestras para las diferentes pruebas de laboratorio.

5.1 Operación del relleno sanitario y muestreo de materiales

Durante las visitas al sitio de estudio se apreció que los camiones que transportan los desechos hasta el sitio son pesados al ingreso al relleno y a su salida para determinar la cantidad de desecho que es depositado durante cada visita con lo cual se lleva un adecuado control de la cantidad de desechos

Con relación a el tratamiento de los desechos, se constató que en el sitio se maneja maquinaria para la operación de los procesos que se llevan a cabo como por ejemplo la descarga de los desechos, extensión y conformación de la capa de residuos, compactación de los residuos, colocación de suelo de cobertura.



Figura 71. Operación del relleno mediante el uso de maquinaria

A partir de esto es que el relleno se puede clasificar como un relleno sanitario mecanizado por lo que tomando en cuenta esta clasificación, se espera que se cumplan ciertas características establecidas por el Ministerio de Salud de Costa Rica (2014) en el Reglamento sobre rellenos sanitarios dentro de las que se pueden destacar las siguientes:

- Taludes finales con una inclinación no mayor de 30%.
- Disposición de los desechos en capas de 60 cm de espesor para su respectiva compactación.
- Compactación de cada capa mediante un mínimo de cuatro pasadas con maquinaria pesada adecuada para esta función.
- El material de cobertura colocado y compactado debe tener un coeficiente de conductividad hidráulica no mayor de 10^{-6} m/s
- Sistema de emisión para gases con aprovechamiento o evacuación permanente previo tratamiento.

Estos parámetros fueron revisados durante el proceso de muestreo realizado ya que el relleno se encontraba en operación normal durante la extracción de las muestras. Esto permitió observar los trabajos realizados por el personal para ser tomadas en cuenta para la realización del presente análisis.

Como se mencionó anteriormente, para la realización de los muestreos se utilizó maquinaria pesada con el fin de lograr alcanzar materiales de desechos a mayores profundidades de las que se podría lograr utilizando equipo manual. Esto también permitió obtener muestras de diferentes edades también gracias a las diferentes terrazas y taludes que conforman la celda.

A partir del muestreo se logra apreciar que los desechos de menor edad presentan una menor degradación por lo cual es posible notar los diferentes materiales que conforman dicha muestra. Se logra apreciar la presencia de materiales orgánicos, papel, metales, materia vegetal, vidrio y principalmente plásticos. Aunque el plástico por su peso puede resultar liviano en comparación con otros materiales, el espacio ocupado es representativo principalmente considerando que todos los desechos o por lo menos su gran mayoría se disponen en bolsas de dicho material.

A mayor edad se torna más difícil apreciar cuáles son los diferentes materiales que se encuentran en el sitio de sondeo, llegando ser el plástico el único material apreciable en todos los puntos de muestreo. La degradación de los otros materiales, principalmente del orgánico, papel, o material de origen vegetal, hace que estos pasen a ser parte de la matriz fina del sitio uniéndose con el suelo de cobertura utilizado para conformar cada una de las distintas capas. Debido al tiempo de degradación que necesita el plástico, este es fácilmente notorio a simple vista e incluso, los trozos más grandes pueden llegar a ser retirados de forma manual.



Figura 72. Aspecto del material degradado con una edad de 5 años.

Durante el muestreo con maquinaria se observa una combinación entre los materiales degradados, siendo esta combinación de materiales lo que se utiliza principalmente para los ensayos de caracterización realizados en laboratorio. Adicionalmente se retiraron aquellos materiales que puedan interferir en la ejecución o resultados de los ensayos de laboratorio realizados. En la sección de metodología se explicó cómo se procesaron los materiales muestreados y en la Figura 25 se presenta el aspecto de las muestras ya procesadas.

5.2 Propiedades físicas de las muestras analizadas.

5.2.1 Contenido de humedad

Los resultados de contenido de humedad se muestran en la sección de resultados en el Cuadro 6, donde se evidencia que las muestras de mayor humedad son las que presentan un menor tiempo en el relleno sanitario. Lo anterior se puede dar debido a que los materiales presentan una mayor velocidad de degradación y producción de lixiviados durante sus primeras etapas en la celda por lo que al realizar el muestreo, estos materiales presentan un mayor contenido de humedad.

La muestra que presenta un mayor contenido de humedad es la muestra 1 con un contenido de humedad de 124,70% y con un tiempo de almacenamiento en el relleno sanitario menor a un mes. A partir de este valor se muestra una evidente disminución en del contenido de humedad de los materiales analizados hasta la muestra 4 (2 años en el relleno) que se determinó presenta un contenido de humedad de 47,38%.

A partir de la muestra 4 se aprecia una estabilización en los contenidos de humedad obtenidos para las demás muestras con valores que oscilan entre el 57,46% y el 47,38%. La muestra 6 (4 años) no sigue este comportamiento al tener un contenido de humedad de 82,32% lo cual podría darse debido a que en el punto de muestreo el material obtenido tenía una mayor capacidad de retención de líquidos por el tipo de desecho o en el momento del muestreo había una acumulación de lixiviado en la zona.

En la Figura 73 se muestra el comportamiento del contenido de humedad de las muestras y cómo se aprecia un comportamiento de disminución de dicho parámetro al aumentar la edad de los desechos.

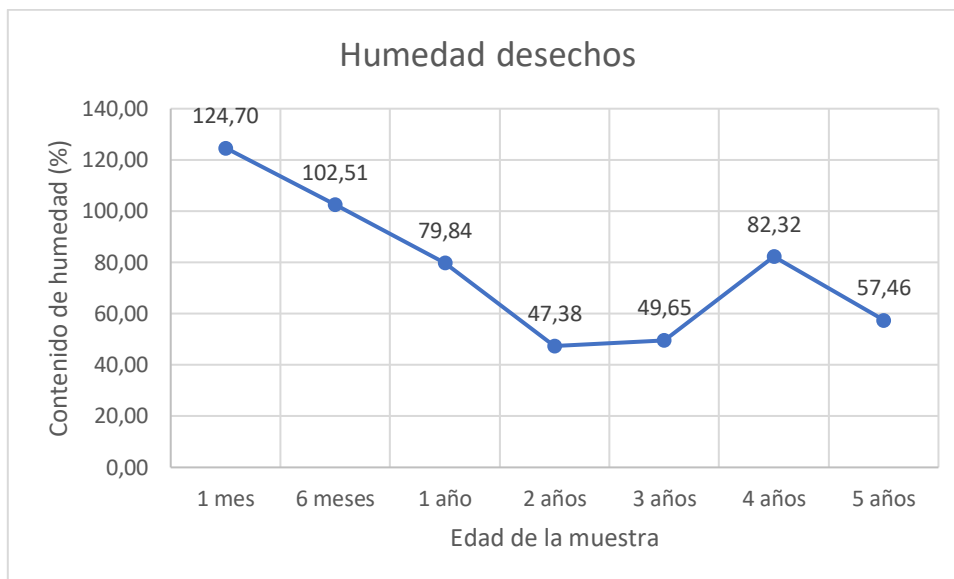


Figura 73. Comportamiento del contenido de humedad de las muestras.

Las muestras de menor edad son las que presentan un mayor contenido de humedad lo cual puede estar relacionado con la producción de lixiviado ya que a menor edad es cuando más producción de este desecho se genera. Otro aspecto por considerar es que, por ejemplo, la muestra con menos de un mes en el relleno sanitario es la que menor cobertura de suelo tenía e incluso el punto de muestreo se encontraba recibiendo desechos al momento del muestreo. Esta muestra podría estar recibiendo el aporte de producción de lixiviados de las muestras que se iban procesando en la celda con lo cual la humedad es mayor.

El suelo de cobertura, al ser un suelo fino tiene una mayor capacidad de absorber humedad por capilaridad que un suelo granular por lo que el uso de un suelo fino como cobertura puede ayudar distribuir la humedad en el medio y como se mencionó, la muestra de menos de un mes en el relleno contaba con una menor cobertura de suelo.

Es importante recalcar que los muestreos se realizaron en distintos puntos y a diferentes profundidades de las celdas por lo que esto también podría generar alteraciones en los resultados de contenido de humedad de las muestras, aspecto que no se está analizando en el presente trabajo. Para analizar la influencia de la profundidad de muestreo en el contenido de humedad se puede valorar realizar ensayos de contenido de humedad tomando muestras a distintas profundidades.

5.2.2 Contenido de material orgánico

Los resultados del contenido de orgánicos de las muestras analizadas se muestran en el Cuadro 7 donde se observa que los que los materiales analizados poseen contenidos de material que los catalogan como materiales orgánicos. Tomando en cuenta que referencias como la presentada en la Figura 2, se respalda lo indicado anteriormente ya que, en países como Costa Rica, la mayoría del material depositado en los rellenos sanitarios es de origen orgánico.

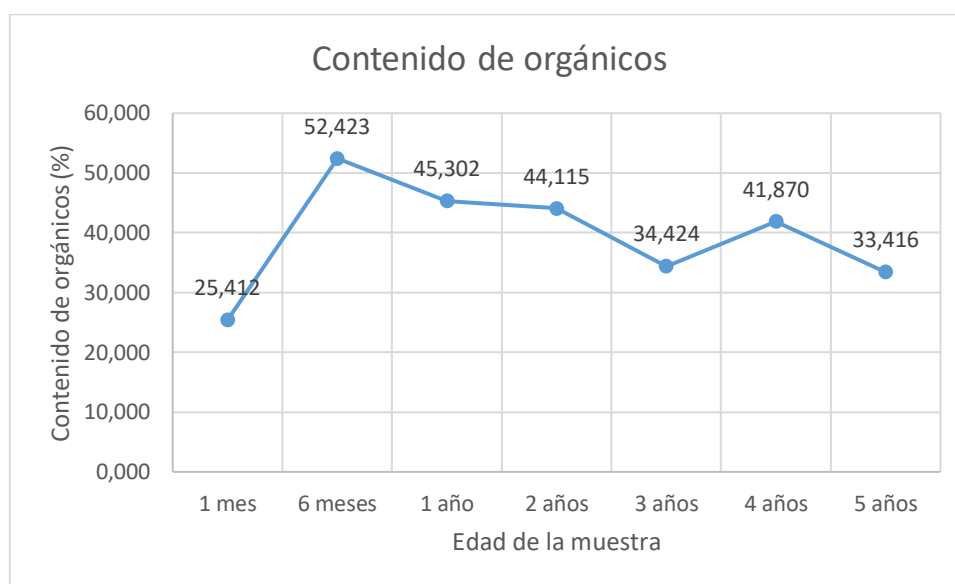


Figura 74. Cantidad de materiales orgánicos en las muestras analizadas

En el gráfico anterior se puede apreciar una tendencia a la disminución en la cantidad de material orgánico presente en las muestras conforme se aumenta la edad de la muestra. Esto se puede dar debido a que el material orgánico se descompone o se degrada al transcurrir el tiempo por lo cual las muestras de mayor edad son las que presentan una menor cantidad de contenido orgánico.

Este comportamiento no se cumple para la muestra de menor edad y la razón por la cual se puede dar esta situación es que durante el muestreo se apreció que las muestras aún se encuentran “conservadas” y poco degradadas e incluso en algunos casos y a pesar del trabajo de la maquinaria pesada, se encuentran dentro de las bolsas plásticas que las almacenaban al llegar al relleno.

5.2.3 Determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Tomando como referencia la normativa ASTM D4318 se realizó la determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, que forma parte del análisis de los materiales muestreados en la determinación de las propiedades físicas de los materiales. En el Cuadro 5 se definieron las muestras a las que se le realizó la determinación de las propiedades físicas.



Figura 75. Determinación del límite líquido de suelos de cobertura.

Los resultados de los análisis a estos materiales se presentan en la sección de resultados,

Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Se evidencian que los materiales analizados tienen un comportamiento de alta plasticidad lo cual es acorde a lo requerido con el funcionamiento de los rellenos sanitarios ya que se requieren materiales de baja permeabilidad lo cual también se puede asociar a una alta plasticidad.

De acuerdo con la carta de plasticidad, los resultados indican que los materiales se encuentran por debajo de la línea A de la carta de plasticidad y con un límite líquido superior a 50% por lo que se encuentran en la zona de limos de alta plasticidad o materiales orgánicos de alta plasticidad (MH-OH). Considerando los resultados de contenido de material orgánico, se puede dar una clasificación de materiales orgánicos de alta plasticidad (OH) a las muestras analizadas excepto al suelo de cobertura.

En la Figura 76 se muestra la carta de plasticidad con la ubicación de la clasificación de los materiales analizados.

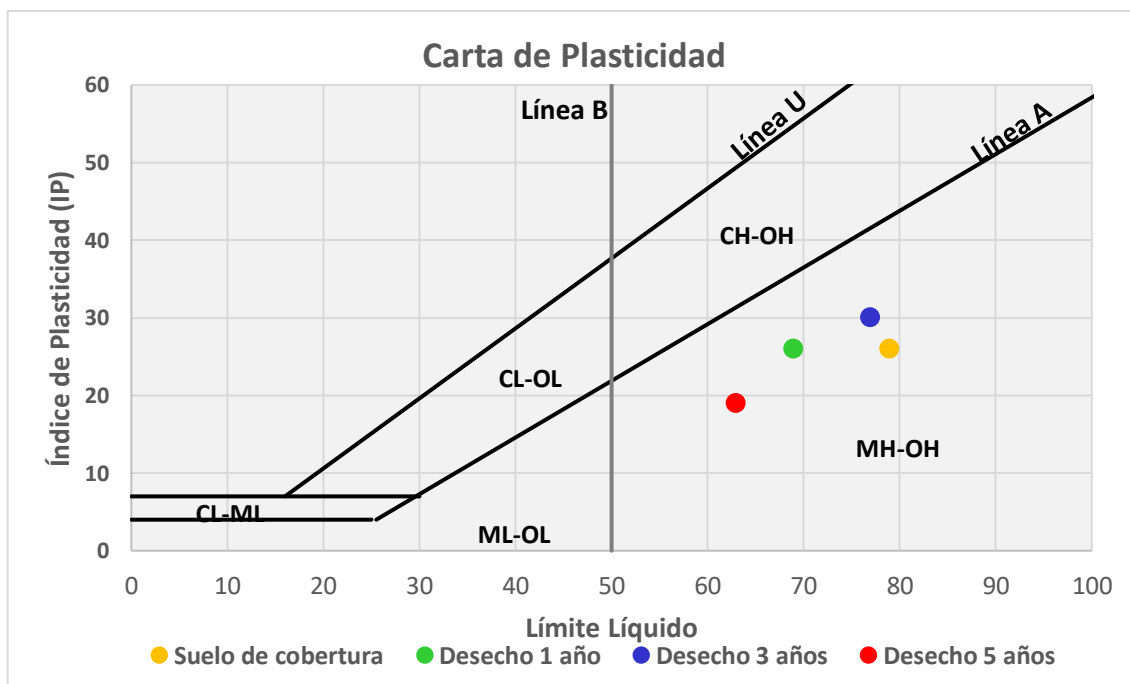


Figura 76. Carta de plasticidad para materiales analizados del relleno sanitario

Al comparar los resultados obtenidos se aprecia que el suelo de cobertura es el material que presenta un mayor límite líquido y límite plástico tal y como se muestra en el Cuadro 16 de la sección de resultados. Con excepción del material de 3 años, se observan

diferencias de hasta un 10% entre los límites líquido y plástico para el suelo de cobertura y los materiales de 1 año y 5 años.

La mayor diferencia se evidencia entre el suelo de cobertura y los desechos de 5 años ya que para este material, durante el proceso de muestreo, se evidencia una mayor degradación de los desechos. La degradación para dicha edad es tal que se da una integración entre el suelo de cobertura y los desechos pasando estos últimos a ser parte de la matriz de suelo.

Esta reducción de dichos parámetros para los desechos se puede dar debido a la presencia de partículas de desechos en los materiales analizados que no poseen la misma plasticidad del material utilizado como suelo de cobertura. Los materiales orgánicos poseen una menor capacidad de retención de agua lo cual incide directamente en la plasticidad.

En el caso del material de 3 años, los resultados son similares a los del suelo de cobertura lo cual se puede justificar a la presencia del suelo utilizado como cobertura en el punto de muestreo generando así mayores límites líquidos y plásticos que los obtenidos para los otros desechos analizados.

A nivel de reglamento nacional, no existe ninguna directriz sobre la clasificación o plasticidad del material de cobertura que se deba cumplir para los rellenos sanitarios. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la alta plasticidad de los materiales se puede asociar a conductividades hidráulicas bajas lo cual si es un parámetro para la selección del material de cobertura.

5.2.4 Análisis granulométrico de los materiales muestreados

El análisis granulométrico se realizó como parte de la caracterización física de los materiales del relleno sanitario. Para realizar este análisis se ejecutó el procesamiento de la muestra mencionado en secciones anteriores. El análisis granulométrico se realizó por vía seca y por vía húmeda, esto último con el fin de determinar el comportamiento de la fracción más fina que el tamiz N°200.

Para este ensayo resulta fundamental comparar y analizar los resultados obtenidos para los desechos donde se puede apreciar que el material que tiene un mayor porcentaje de partículas que pasan el tamiz N°200 es el de 5 años con un porcentaje de 81,25%. Los

desechos de 1 año y 3 años tienen porcentajes pasando el tamiz N°200 de 67,50% y 66,66% respectivamente.

Observando los resultados se determina que el material de mayor edad de degradación es el que presenta mayor cantidad de finos, lo cual puede estar asociado a la degradación de las muestras y como estas van reduciendo su tamaño. Los otros materiales de desecho no presentan diferencias significativas en los resultados obtenidos para el tamiz 200. En la Figura 77 se pueden comparar los resultados obtenidos mediante las curvas granulométricas.

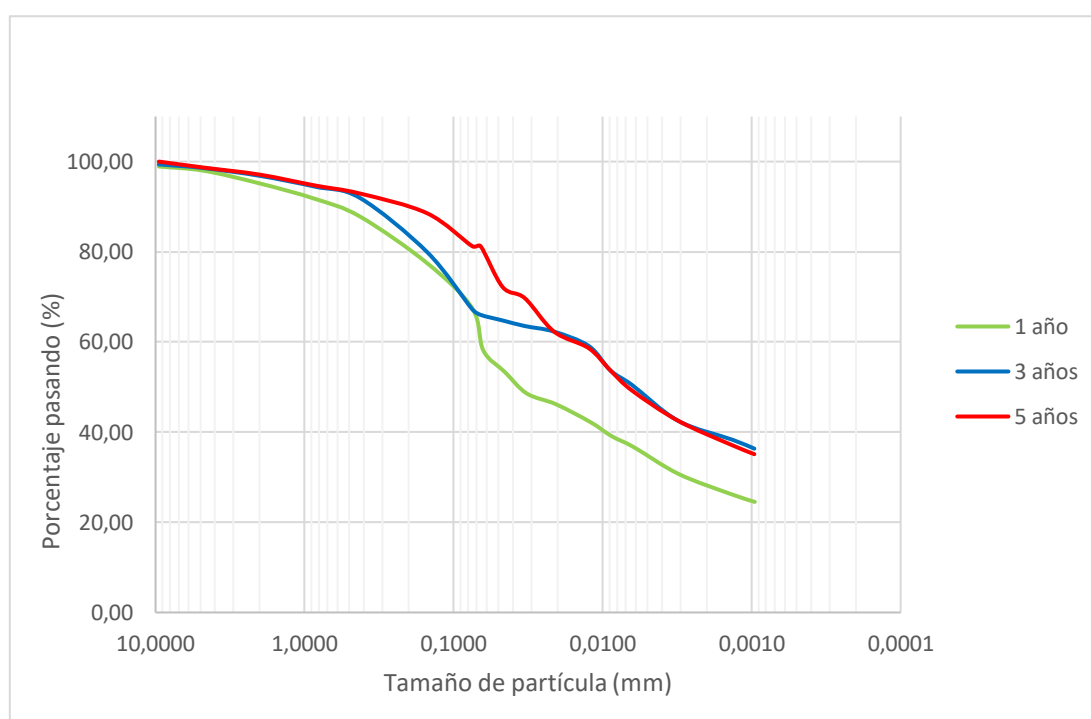


Figura 77. Comparación de granulometrías de desechos

Es importante mencionar que se aprecia que para la fracción fina o el material pasando el tamiz N°200, el material de 3 años y 5 años tienen un mismo comportamiento mientras que el material de 1 año presenta partículas de mayor tamaño a partir del tamiz N° 200. Con respecto al análisis por la vía seca, al inicio de la curva se aprecia que los materiales tienen un comportamiento inicial similar y posteriormente el material de 5 años empieza a presentar un comportamiento más fino.

Como posibles fuentes de error o desviación de este análisis se puede mencionar que, para la vía seca, al ser análisis por masa y al estar trabajando con desechos de diferentes tipos de materiales como orgánicos, plásticos o metales, se pueden presentar variaciones en los porcentajes obtenidos. Con respecto a la vía húmeda se apreció que algunas de las partículas no precipitaron al fondo de la probeta debido a que son partículas con densidades menores a la solución donde se colocó el material analizado.

Los resultados del material de cobertura no se comparan con los de los desechos como parte del análisis ya que se considera que son materiales distintos. En la Figura 39 de la sección de resultados, se muestran las 4 curvas granulométricas obtenidas.

Lo que sí se puede mencionar con respecto al análisis granulométrico del material de cobertura es que los resultados son consistentes con lo observado en otros ensayos como por ejemplo el de límites de Atterberg. Se observa que el material es fino al tener un porcentaje pasando el tamiz N° 200 de 70,28% lo cual es consistente con la clasificación obtenida por la carta de plasticidad.

También se puede correlacionar dichos resultados con los resultados de conductividad hidráulica obtenidos para dicho material. El suelo de cobertura obtuvo una conductividad hidráulica de $6,285 \times 10^{-5}$ m/s, un valor que se puede asociar a materiales finos como limos y arcillas.

5.2.5 Gravedad específica

La determinación de la gravedad específica es fundamental para la caracterización de las propiedades físicas de los materiales analizados y también para es importante para la caracterización de las propiedades hidráulicas ya que permite estimar parámetros como por ejemplo la saturación de las muestras.

Tal y como se mencionó en la sección de resultados, para la ejecución de este ensayo se trabajó con muestras que pasan el tamiz N°4, las cuales fueron procesadas previamente eliminando materiales de mayor tamaño al utilizado y otras partículas que pudieran afectar el resultado como por ejemplo metales, maderas entre otros. Otra consideración implementada fue el no secar las muestras al horno ya que esto podría generar o acelerar procesos de degradación durante el ensayo.

Los resultados del Cuadro 21 muestran que los valores están muy próximos y por lo que no se detecta una diferencia entre los resultados. Esto se puede relacionar con el procesamiento de las muestras. También es consistente con los resultados de otros análisis realizados como por ejemplo el de límites de Atterberg donde los resultados obtenidos muestran una misma clasificación para las muestras.

Con respecto a otras investigaciones realizadas, tomando como referencia el trabajo desarrollado por Yesiller N., James L. Hanson J., Cox J. y Noce D. (2014), se determinaron las gravedades específicas de distintos desechos como por ejemplo muestras de desechos preparadas, desechos sin compactar, desechos compactados y desechos obtenidos a diferentes profundidades en un relleno sanitario.

Los resultados de dicha investigación muestran una alta dispersión entre los datos obtenidos y los recopilados lo cual se debe a la alta variabilidad en los materiales analizados. Sin embargo, llama la atención que los valores más similares son los que se consiguen de muestras obtenidas a distintas profundidades de un relleno sanitario y que ya tienen cierta edad dentro de la celda. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados recopilados de dicha investigación.

Cuadro 49. Valores de G_s de referencia

Perforación	Muestras analizadas	Rango G_s	Promedio G_s
BH1	3	2,487 – 1,962	2,200
BH2	3	2,274 – 2,110	2,166
BH5	6	2,288 – 2,041	2,162
Bh6	6	2,323 – 2,208	2,276

Fuente: Yesiller, Hanson , Cox, & Noce (2014)

Adaptado: Poveda (2022)

Aunque los datos no son directamente comparables a los obtenidos para el relleno sanitario de Miramar, son los más próximos a otros valores recopilados e incluso se podría decir que el proceso de muestreo fue similar ya que las muestras del Cuadro 49 fueron obtenidas a diferentes profundidades con lo cual también se puede decir que las muestras tienen diferentes edades. En la misma investigación se muestra el aspecto de los materiales

analizados y se puede apreciar una similitud visual con las muestras obtenidas del relleno sanitario de Miramar tal y como lo muestra la siguiente imagen.



Figura 78. Comparativa entra muestras de investigación de Yesiller y otros (2014) (a) y muestras de relleno de Mirarar (b)

Fuente: Yesiller y otros (2014)

Adaptado: Poveda (2022)

5.3 Propiedades hidráulicas de las muestras analizadas.

La presente investigación tiene dentro de sus objetivos, analizar el comportamiento del flujo dentro de las celdas del relleno sanitario de Miramar por lo que la determinación de las propiedades hidráulicas de las muestras analizadas resulta un componente de suma importancia para el presente trabajo. Dichas propiedades hidráulicas son la base para la construcción del modelo de flujo por lo que el adecuado análisis de los datos es clave para la adecuada interpretación del comportamiento del flujo dentro del relleno.

Las propiedades hidráulicas de las muestras analizadas se determinaron para condiciones saturadas y no saturadas considerando que el movimiento del flujo dentro de la celda se puede dar en ambas condiciones. Dicha determinación se realizó a través de pruebas de laboratorio utilizando las muestras en las condiciones mencionadas anteriormente.

5.3.1 Conductividad hidráulica.

La determinación de la conductividad hidráulica se realizó a través de un permeámetro en el cual se colocaron las muestras dejándolas saturar por periodos de hasta 48 horas. Se analizaron un total de 8 muestras de las cuales 7 correspondieron a muestras de desechos y una muestra adicional correspondió al suelo de cobertura. Se trató de replicar la densidad de referencia de las celdas del relleno de 900 kg/m^3 , sin embargo, en ninguno de los casos se logró alcanzar dicho valor. Los resultados de las características de las muestras utilizadas para la determinación de la conductividad hidráulica se muestran en el Cuadro 23.

Se considera que no se alcanzó la densidad de referencia de las celdas ya que las muestras utilizadas fueron previamente procesadas, de manera que aquellos materiales que podrían afectar los resultados del ensayo de permeabilidad fueron removidos. Esto materiales fueron plásticos, metales, vidrios entre otros.

El periodo de saturación otorgado a las muestras permitió conseguir una saturación satisfactoria asegurando las condiciones para una adecuada ejecución de la prueba. Muchas veces en este tipo de ensayos no se logra alcanzar una adecuada saturación debido a las características de las muestras como la relación de vacíos o la densidad de estas. Sin embargo, las muestras analizadas presentan una alta relación de vacíos lo que facilita la saturación de las muestras. En el Cuadro 50 se presentan las relaciones de vacíos y porosidades calculadas para cada muestra.

Cuadro 50. Relaciones de vacíos y porosidad de las muestras de desechos analizadas

Parámetro	Muestra						
	1	2	3	4	5	6	7
Relación de vacíos (e)	3,163	2,824	3,061	2,602	2,586	2,884	2,834
Porosidad (n)	0,760	0,738	0,754	0,722	0,721	0,743	0,739

Conociendo dichos parámetros se determinaron los resultados de las distintas pruebas de conductividad hidráulica realizadas a las muestras tomadas de campo. Los resultados de dichas pruebas se muestran en el Cuadro 32. Como se muestra en dicho cuadro, se presenta la estimación de la permeabilidad como el promedio de los resultados de los

ensayos realizados para cada muestra y también se presentan los resultados de la estimación de la manera gráfica. La determinación gráfica se realizó variando el gradiente hidráulico y determinando la velocidad del flujo. Posteriormente se graficaron dichos parámetros obteniendo la pendiente que corresponde a la permeabilidad de la muestra.

La comparación entre ambos métodos se hizo para determinar si existe alguna diferencia entre la estimación vía promedio de resultados o gráfica. Los resultados obtenidos muestran que no existe una diferencia significativa entre los métodos mencionados.

Al observar los gráficos generados de las pruebas de conductividad hidráulica, se puede apreciar que los datos presentan una tendencia lineal al realizar la variación del gradiente hidráulico y por ende de las velocidades de flujo. Dicho comportamiento es sinónimo de que las pruebas en el permeámetro se realizaron bajo un flujo laminar lo cual es señal de que el aumento en el gradiente hidráulico se generó de manera gradual evitando de esta manera llegar a la zona de flujo turbulento.

La conductividad hidráulica depende de muchos factores y para un relleno sanitario se suman otros adicionales a los ya conocidos. Se puede considerar que tendrá influencia el tipo de desecho, la degradación de este, la densidad de la celda, entre otros. Estos factores hacen que no se pueda esperar un resultado determinado o que exista un valor correcto para la permeabilidad de los desechos de un relleno sanitario. Sin embargo, los datos estimados se pueden comparar con otras investigaciones de manera que se pueda observar si existe un comportamiento similar entre los resultados.

De esta manera se procedió a revisar distintas investigaciones con el fin de verificar si se da una relación entre los resultados obtenidos y los datos generados en otras investigaciones. En primera instancia, en la investigación realizada por Jain, Powell, Townsend, & Reinhart (2006) se publican datos de conductividades hidráulicas obtenidas en otras investigaciones previas mediante ensayos de laboratorio. En el Cuadro 51 se muestran los resultados recopilados de dicha publicación para las pruebas de laboratorio.

Cuadro 51. Recopilación de datos conductividad hidráulica

Referencia	Conductividad hidráulica (m/s)	Tipo de prueba
Fungaroli and Steiner (1979)	$10^{-6} - 10^{-4}$	Carga constante
Korfiatis et al. (1984)	$8,0 \times 10^{-5} - 1,3 \times 10^{-4}$	Carga constante
Noble and Arnold (1991)	$8,4 \times 10^{-7} - 6,6 \times 10^{-6}$	Carga constante
Bleiker et al. (1993)	$1,0 \times 10^{-10} - 3,0 \times 10^{-9}$	Carga variable
Chen and Chynoweth (1995)	$4,7 \times 10^{-7} - 9,6 \times 10^{-4}$	Carga constante
Landva et al. (1998)	$2,0 \times 10^{-8} - 2,0 \times 10^{-5}$	Carga constante Dirección vertical
	$4,0 \times 10^{-7} - 1,0 \times 10^{-5}$	Carga constante Dirección horizontal
Powrie and Beaven (1999)	$3,7 \times 10^{-8} - 1,5 \times 10^{-4}$	Carga constante
Jang et al. (2002)	$2,91 \times 10^{-6} - 2,95 \times 10^{-5}$	Carga constante

Fuente: Jain, y otros (2006)

Adaptado por: Poveda (2022)

Tal y como se muestra en el Cuadro 51, la mayoría de los datos se obtuvieron a partir de pruebas de carga constante lo cual también fue aplicado para la presente investigación. Las pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería ambiental mostraron un menor rango que los datos mostrados anteriormente. Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio de la presente investigación se encuentran entre $3,467 \times 10^{-4}$ m/s para la muestra de menos de un mes hasta $6,041 \times 10^{-5}$ m/s para la muestra de un año. Estos datos son los reportados para la permeabilidad obtenida de manera gráfica.

El reducido margen obtenido entre las pruebas realizadas para los desechos del relleno sanitario de Miramar se puede asociar a la búsqueda de trabajar con la misma densidad que se tenía in situ. Aunque no fue posible alcanzar la misma densidad del sitio de muestreo, la variación entre las densidades de las muestras fue poca.

Otras investigaciones consultadas, sí analizan el comportamiento de resultados obtenidos en pruebas de laboratorio para determinar la conductividad hidráulica usando diferentes pesos unitarios secos. Por ejemplo, en la publicación de Reddy, Hettiarachchi, Parakalla, Gangathulasi, Bogner y Thomas (2009) se recopilieron resultados de laboratorio de permeabilidad para diferentes pesos unitarios de manera que se analizó la variación debido a los cambios en la densidad del material. En el Cuadro 52 se muestran los datos recopilados en dicha investigación.

Cuadro 52. Datos de variación de la permeabilidad contra densidad seca (1)

Referencia	Densidad seca (ton/m³)	Conductividad hidráulica (m/s)
Korfiatis et al. (1984)	0,877	$5,0 \times 10^{-5} - 3,0 \times 10^{-5}$
Blieker et al. (1993)	0,601 – 1,203	$1,6 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-8}$
Brandl (1994)	0,917 – 1,733	$2,0 \times 10^{-5} - 3,0 \times 10^{-8}$
Beaven and Powrie (1995)	0,510 – 1,325	$1,0 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^{-7}$
Gabr and Valero (1995)	0,754 – 0,836	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-7}$
Powrie and Beaven (1999)	0,387	$1,5 \times 10^{-6} - 3,4 \times 10^{-7}$
Powrie and Beaven (1999)	0,724	$2,7 \times 10^{-8} - 3,7 \times 10^{-10}$
Jang et al. (2002)	0,795 – 1,203	$1,1 \times 10^{-5} - 2,9 \times 10^{-6}$
Penmethsa (2007)	0,652 – 0,948	$1,0 \times 10^{-4} - 8,0 \times 10^{-6}$

Fuente: Reddy, y otros (2009)

Adaptado por: Poveda (2022)

Se consultan fuentes adicionales con el fin de tener más información para el análisis de los datos generados. De esta manera se consulta la publicación de Beaven, Powrie, & Zardava (2011) donde también se recopilan datos de conductividad hidráulica y pesos unitarios secos de las muestras analizadas de manera que se puedan incluir en el análisis de la información generada. El detalle de los datos presentados en el Cuadro 53 se muestran en el Apéndice 10.

Cuadro 53. Datos de variación de la permeabilidad contra densidad seca (2)

Referencia	Densidad seca (ton/m³)	Conductividad hidráulica (m/s)
Beaven R. (2000)	0,26 – 0,60	$3,3 \times 10^{-4} - 4,8 \times 10^{-8}$
Beaven R. (2000) Desechos procesados	0,64 – 0,95	$1,5 \times 10^{-4} - 6,0 \times 10^{-8}$
Beaven R. (2000) Desechos frescos	0,36 – 0,72	$6,5 \times 10^{-4} - 2,7 \times 10^{-7}$
Staub et al. (2009) Desecho tipo A	0,39 - 0,48	$7,4 \times 10^{-5} - 3,6 \times 10^{-5}$
Staub et al (2009) Desecho tipo B	0,38 – 0,54	$7,3 \times 10^{-5} - 9,5 \times 10^{-6}$

Adaptado de: Beaven y otros (2011)

Tomando como referencia los datos de los anteriores cuadros, se puede comprobar de manera gráfica si existe una relación entre los resultados de la presente investigación y dichas recopilaciones. Para esto se proceder a graficar la información generada en los ensayos de laboratorio de la presente investigación y los datos recopilados en el Cuadro 52 y Cuadro 53. Dicha comparación se presenta en la Figura 79.

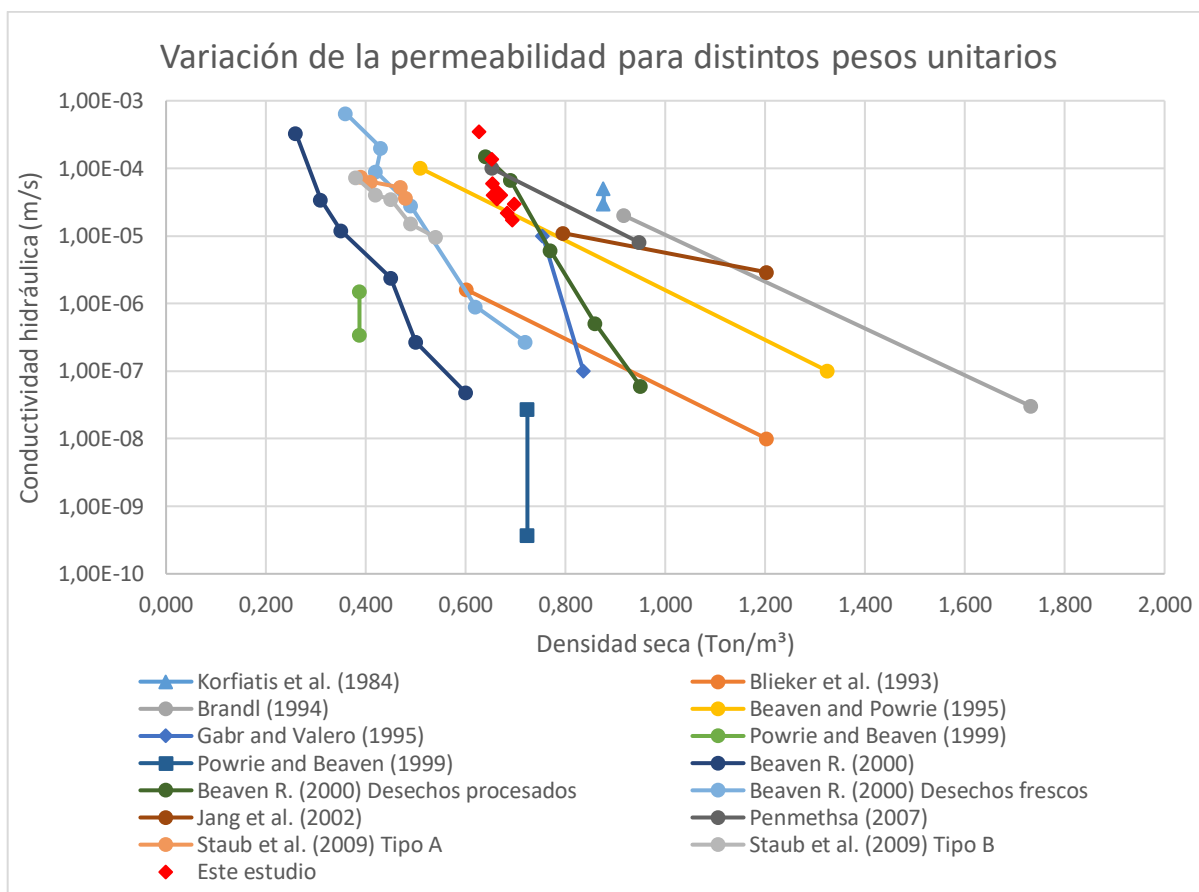


Figura 79. Gráfico comparativo de conductividades hidráulicas

Observando el gráfico comparativo se puede apreciar que los datos generados en la presente investigación se encuentran próximos a otros valores generados para pesos unitarios similares a los obtenidos para el relleno sanitario de Miramar. También es claro que en los datos recopilados se muestra una evidente disminución de la conductividad hidráulica al aumentar el peso unitario de los desechos. Esto es importante de tomar en cuenta ya que, si en algún sitio de tratamiento de desechos se desea aumentar la compactación de los desechos con el fin de poder almacenar mayor cantidad, se generarán menores permeabilidades en el medio.

Los datos generados para el relleno sanitario de Miramar se ubican en una zona del gráfico definida debido a que las muestras se analizaron bajo densidades similares por lo cual no se generó una diferencia significativa en los resultados. La principal variación entre las muestras analizadas era la edad de estas y para las pruebas realizadas, no se aprecia una influencia en los resultados ante dicha variable. Es importante recalcar que, para la

ejecución de las pruebas del presente proyecto, se consideró como hipótesis que la conductividad hidráulica estaría regida por la matriz fina de las muestras.

Con respecto al suelo de cobertura, de acuerdo con lo mostrado en el Cuadro 32, se obtuvo de manera gráfica un valor de permeabilidad de $6,285 \times 10^{-5}$ m/s. Este resultado no cumple con lo solicitado por el reglamento del Ministerio de Salud por lo que se recomienda realizar más pruebas al suelo de cobertura, incluyendo ensayos in situ ya que el reglamento indica que la permeabilidad mínima debe medirse en el material colocado.

Adicionalmente para los desechos se puede valorar la realización de más ensayos utilizando equipos distintos como permeámetros de mayor tamaño que permitan la inclusión de desechos con tamaños de partícula más grandes. También se pueden realizar pruebas de conductividad hidráulica variando aspectos como la densidad de las muestras ya que como se mencionó anteriormente, la presente investigación buscó reproducir la densidad de las celdas de Miramar.

Haciendo uso de los resultados generados en los ensayos de laboratorio y también los recopilados de otras investigaciones, se puede realizar un análisis estadístico mediante la técnica de Montecarlo la cual permite mediante iteraciones y números aleatorios, determinar el comportamiento de una variable en estudio. Para el caso de este trabajo de investigación la variable en análisis es la de conductividad hidráulica de desechos.

En primera instancia se determinan parámetros estadísticos de los datos recopilados para la variable en estudio, los cuales son utilizados como insumo para la posterior simulación. En el Cuadro 54 se muestran los resultados estadísticos de los datos recopilados para la permeabilidad de los desechos de un relleno sanitario.

Cuadro 54. Valores estadísticos de datos de permeabilidad para rellenos sanitarios

Parámetro	Valor
Promedio (m/s)	$6,219 \times 10^{-5}$
Desviación estándar	$1,125 \times 10^{-4}$
Varianza	$1,265 \times 10^{-8}$
Coefficiente de variación	1,809
Valor máximo (m/s)	$6,500 \times 10^{-4}$
Valor mínimo (m/s)	$3,700 \times 10^{-10}$

A partir de los datos recopilados y generados en el laboratorio y los valores estadísticos de estos, se procede a realizar la simulación de Montecarlo. Para esto se realizó la simulación con 15.000 iteraciones de manera que se obtienen nuevos parámetros estadísticos los cuales se pueden comparar con los obtenidos de la recopilación de datos. En el Cuadro 55 se muestran los parámetros estadísticos de las iteraciones realizadas.

Cuadro 55. Resultados obtenidos mediante la simulación Montecarlo para la variable de permeabilidad

Parámetro	Valor
Promedio (m/s)	$1,031 \times 10^{-4}$
Desviación estándar	$7,695 \times 10^{-5}$
Varianza	$5,921 \times 10^{-9}$
Coefficiente de variación	$7,466 \times 10^{-1}$
Valor máximo (m/s)	$4,805 \times 10^{-4}$
Valor mínimo (m/s)	$1,847 \times 10^{-9}$

5.3.2 Curva característica suelo agua

La curva característica del suelo de cobertura y de los desechos muestreados en el relleno sanitario de Miramar se determinó mediante el uso del papel de filtro el cual fue calibrado mediante el uso de soluciones de NaCl y KCl. El procedimiento para determinar la curva de calibración del papel de filtro y los resultados se detallan en las secciones de metodología y resultados.

El uso del papel de filtro implica que la determinación de la succión de los materiales analizados se debe realizar en el rango de humedades obtenido durante el proceso de calibración del papel. Es por esta razón que los materiales analizados se manejaron con rangos de humedades aproximadamente entre el 15% y el 36%. Utilizar materiales con mayores contenidos de humedad hubiese imposibilitado determinar la succión con el uso de la curva de calibración del papel utilizado ya que se encontraría por fuera del rango de dicha calibración.

Para obtener succiones a mayores contenidos de humedad sería necesario utilizar diferentes molalidades en las soluciones lo cual implicaría el uso de balanzas de mayor precisión y esto no fue posible debido a la capacidad de los equipos utilizados en el laboratorio de Ingeniería Ambiental.

Analizando los datos, se logró que las muestras obtuvieran contenidos de humedad que se encontraran dentro de los obtenidos en la calibración del papel de filtro por lo que se pudo determinar la succión de todas las muestras. Esto facilitó la validación de las curvas características, ya que se contó con datos que permitieron realizar el ajuste a las curvas.

Para la construcción del modelo de flujo del relleno sanitario se requirió definir los parámetros de Van Genuchten, estos van a estar en función de propiedades de los materiales como la humedad y de la conductividad hidráulica de las muestras. Los materiales analizados, por su composición resultan particulares por lo que para la definición de los parámetros de Van Genuchten es por esto, tal y como se definió en la sección de metodología, los parámetros requeridos para la elaboración del modelo de flujo se establecieron tomando como referencia la investigación desarrollada por White y otros (2015). Los resultados definidos se encuentran reportando en el Cuadro 38. Parámetros de Van Genuchten para la generación de curvas características.

Es importante observar los parámetros definidos junto con los datos de succión obtenidos mediante el papel de filtro son consistentes con lo esperado. Todos los valores de humedad volumétrica encontrados en el ensayo de succión, se encuentran por encima del valor definido para humedad volumétrica residual (θ_r). Adicionalmente, ningún valor está por debajo de los definidos para la humedad volumétrica saturada. Esto es indicativo que las humedades utilizadas y los valores de succión encontrados para los materiales analizados son adecuados para ser utilizados en el modelo de flujo.

Para el análisis de la conductividad hidráulica, al observar las predicciones a través de modelos fractal y los datos experimentales para cada uno de los materiales analizados, se considera que existe un adecuado ajuste para indicar que la aproximación es adecuada y que los datos experimentales son válidos. Se observa un ajuste principalmente en los puntos donde se obtuvo una mayor succión durante el ensayo con el papel de filtro.

Esto se relaciona con la capacidad del papel de filtro como instrumento para determinar la succión en suelos ya que se considera que este método trabaja de una manera más adecuada a menores contenidos de humedad de las muestras que corresponde justamente a los puntos donde las muestras en análisis pueden tener una mayor succión.

5.4 Balance hídrico

El balance hídrico realizado mediante la herramienta HELP permitió estimar la infiltración, evaporación y escorrentía en el relleno sanitario. Los datos de precipitación y temperatura fueron obtenidos de la estación meteorológica ubicada en el relleno sanitario. De dichos datos se deduce que el mes con mayor precipitación durante el año 2020 es el mes de agosto, seguido del mes de septiembre. También se puede deducir que el mes de abril seguido por el mes de marzo, son los meses que presentan una mayor temperatura promedio.

Para el balance hídrico el modelo HELP también solicita la radiación solar promedio mensual, parámetro que se obtuvo del sitio de The National Renewable Energy Laboratory (NREL) ya que HELP permite importar datos de radiación de dicho sitio a partir de las coordenadas del lugar en estudio. Los datos de radiación arrojan que los meses que presentan una mayor radiación solar en el relleno sanitario son mayo y julio respectivamente.

El balance hídrico anual se generó tomando como referencia el área de las celdas individuales que conforman la macrocelda, obteniendo un balance individual para cada celda y uno total que contempla todas las celdas. Al observar los resultados del Cuadro 43 se observa que los datos de las celdas individuales recolectan un total $58\,310,40\text{ m}^3$ mientras que el estudio de la macrocelda indica que se recolecta un total de $59\,076,10\text{ m}^3$. Esto da una diferencia de 1,3% lo cual es un dato considerado adecuado y demuestra que el análisis es consecuente con lo esperado.

Por otro lado, analizando los datos máximos diarios del balance hídrico, se aprecia que para las celdas individuales se obtiene una recolección total de 1 008,5 m³ mientras que, para la macrocelda, el dato de recolección es de 1327,20 m³ obteniendo una diferencia entre los datos de 24% entre los datos. Esto se puede justificar al considerar que el análisis diario realizado por HELP no considera la evaporación, lo que podría generar una mayor diferencia entre los datos.

Observando los resultados se aprecia que no se da una estimación del aporte por la generación de lixiviados en el volumen recolectado por lo que, con el fin de analizar una condición más crítica, se considera el resultado de HELP como un valor de infiltración y se realizó una estimación de los lixiviados y biogás generados durante el periodo de análisis. Dichos resultados se muestran en el Cuadro 45 y Cuadro 46. Estos datos de generación de lixiviados fueron utilizados en el modelo de flujo.

Se consideró realizar un análisis de sensibilidad con el objetivo de determinar la posible afectación de los resultados al modificar variables en el modelo. La precipitación y el área se definieron como parámetros fijos y se varió la altura de las capas de desecho y las pendientes de los taludes. Para cada variación se calculó la cantidad de escorrentía, evapotranspiración y volumen recolectado en el fondo de la celda.

Se determinó que las alturas de las capas de desecho no influyen en los cálculos del balance hídrico ya que HELP basa sus estimaciones en el área en planta del sitio en estudio. Tampoco se observó variación en los datos al realizar una modificación en las pendientes de los taludes y aunque es de esperar que ante un cambio en las pendientes se modifique al menos la escorrentía, no se observó variación para los datos ingresados. Esto debido a que el modelo HELP define la curva de escorrentía a partir del modelo SCS el cual no considera la pendiente y longitud del talud.

Otro proceso llevado a cabo con el fin de validar los resultados obtenidos por el modelo HELP, fue la estimación del balance hídrico mediante el modelo empírico utilizado por Delgado A. (2018). Se realizó un balance hídrico superficial que estimó la escorrentía, evaporación e infiltración en el cual se observa diferencias significativas entre los datos de escorrentía de HELP y el modelo empírico. Eso se da debido a las consideraciones entre ambos métodos. Sin embargo, a nivel global, considerando los resultados totales de ambos

métodos, se determina que existe una diferencia del 15,7% lo cual se puede dar a las distintas consideraciones de ambos modelos.

5.5 Modelo de flujo

Se logró construir el modelo de flujo a partir de los resultados de ensayos de campo y laboratorio junto con la estimación del balance hídrico para el relleno sanitario. Como se mencionó anteriormente, para la construcción del modelo se partió del principio que las capas de desechos tenían un mismo espesor y que las mismas fueron construidas de manera paralela a la superficie del terreno, siguiendo así la topografía del sitio.

El cálculo del balance hídrico permitió definir las tasas de infiltración para cada una de las capas, tanto para el modelo estacionario como para el modelo transitorio. Dichas infiltraciones permitieron estimar el volumen de flujo generado en un periodo de un año en el modelo estacionario y permitieron observar el comportamiento de la infiltración y el proceso de saturación de los materiales a lo interno de la celda.

Adicional a dicha información se lograron estimar las presiones a lo interno de la celda. Esta información es útil para realizar análisis adicionales como por ejemplo de estabilidad de taludes, asentamiento y esfuerzos a lo interno de la celda. Los resultados de los perfiles y el modelo de flujo se muestran en el Apéndice 14.

Observando los modelos se aprecia la zona donde la presión de poro es negativa, esto corresponde a la zona de color rojo donde el material se encuentra en un estado no saturado. Esta es la zona más cercana a la superficie demostrando así que, aunque el análisis es en una condición estacionaria donde el flujo ha alcanzado el equilibrio existen zonas que no llegan a saturarse.

Este tipo de resultados hace que se considere incluir dentro de análisis como los de estabilidad de taludes el estado no saturado de los materiales y la influencia de esto en los resultados. Es importante considerar cada caso en particular, condiciones del sitio, el estado de los materiales y las condiciones climatológicas. Estas últimas pueden tener una influencia significativa en los resultados ya que la escorrentía y la infiltración se verán afectadas y por ende condiciones como el nivel freático y la saturación de los materiales.

Con respecto al flujo transitorio, el análisis se realizó con el propósito de determinar el comportamiento del sitio ante la infiltración y saturación de los materiales ante un evento

crítico. Este evento se determinó a partir del pico diario obtenido del balance hídrico con HELP y se aplicó por 5 días consecutivos.

De los resultados obtenidos se observa como el material inicia el proceso de saturación debido a la infiltración al moverse a través de los desechos hasta llegar al nivel de lixiviado propuesto. A pesar del movimiento del fluido a través del medio poroso, no se logra saturar la totalidad del material sin embargo si se da una reducción de las presiones de poro principalmente en los niveles más cercanos a la superficial. El material más cercano al nivel definido como nivel freático es el que mantiene las mayores presiones de poro lo cual se puede deber a que es el material donde la infiltración toma más tiempo en llegar.

Comparando los resultados del modelo transitorio al variar los niveles del lixiviado, se aprecia que el nivel 3 es el que presenta una mayor disminución en la presión de poro. Esto es un comportamiento esperado ya que es el análisis en el cual el flujo tiene un menor recorrido lo que facilita aumentar el grado de saturación de los materiales. De lo anterior también se puede deducir que al mantener el nivel de los lixiviados elevado durante la época de mayor precipitación, los materiales se van a saturar de una manera más acelerada lo cual podría afectar la estabilidad de los taludes del relleno sanitario.

En el Cuadro 47 se presentan los resultados de la cantidad de flujo generado en el periodo de análisis. Se observa que para el perfil 1 y 2 existe una diferencia de 6,2% la cual se puede generar por la diferencia en alturas, longitud y pendientes de la celda. Sin embargo, dichos valores son cercanos a los obtenidos con los modelos HELP y el modelo empírico lo que demuestra la validez de los resultados obtenidos con Slide®.

Otro aspecto que le brinda respaldo a los resultados de los modelos es el dato de lixiviados tratados en la planta de tratamiento del relleno sanitario. Según la información suministrada por parte de la administración del relleno sanitario, en el periodo del 2020 se trataron un total de 53 572,0 m³ de lixiviado. La diferencia entre el dato de campo y los datos de balance hídrico realizado, se pueden dar a diversas razones como por ejemplo que parte del lixiviado producido queda almacenado dentro de las celdas debido a la capacidad de campo de los desechos de la celda. También, como se mencionó anteriormente, los sistemas de drenaje de la celda no permanecen abiertos de manera constante por lo que dicha operación puede facilitar que el lixiviado no salga de la celda hacia la planta de tratamiento.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Durante las visitas al sitio y las actividades de muestreo, se evidencia una alta variabilidad en la composición de las muestras obtenidas para el respectivo análisis. Las muestras presentan distintos tipos de materiales como plásticos, papeles y material orgánico, además del material que se encuentra degradado.

De acuerdo con lo observado en el proceso de muestreo, se determina visualmente que las muestras de menor edad presentan una evidente menor degradación que las muestras de mayor edad. En las muestras de menor edad se logra identificar materiales como el papel o partículas vegetales y no se observan las partículas finas que se generan a partir de la degradación de los materiales.

El plástico se convierte en el material que visiblemente se encuentra presente en todos los puntos de muestreo. Se aprecia que la mayor parte de este material procede de restos de bolsas plásticas que por lo general se utilizan para el manejo de los desechos.

La degradación de los materiales de desecho hace que estos se combinen con el suelo de cobertura de las diferentes capas llegando a ser parte de la matriz fina del sitio.

Se determina que el desecho con mayor contenido de humedad es el desecho de menor edad (1 mes) con un porcentaje de 124,70%. Dicho contenido se puede asociar a la mayor capacidad de producción de lixiviados de dichos desechos.

Se observa una tendencia a la disminución del contenido de humedad al aumentar la edad de las muestras analizadas. El menor contenido de humedad obtenido es de un 47,38% que corresponde al resultado obtenido para la muestra de 2 años.

Con respecto al contenido de orgánicos, se observa que la muestra de menos de un mes es la que presenta un menor contenido de orgánicos. Se considera que esto es debido al estado de la muestra obtenida y su estado de poca degradación y presencia de materiales como el plástico.

A partir de la muestra de 6 meses se evidencia una disminución del contenido de material orgánico de las muestras. Dicha disminución en el contenido de material orgánico de las muestras analizadas se puede dar debido a la degradación de dicho material.

Los porcentajes de material orgánico estimados por las muestras analizadas son consecuentes con los valores consultados en las referencias bibliográficas.

En la determinación del límite líquido de las distintas muestras, se determina que todos los análisis obtienen límites líquidos superiores a 50% por lo que los materiales se consideran de alta plasticidad.

Los resultados de clasificación por medio de la carta de plasticidad indican que los materiales analizados se encuentran en la zona de limos y materiales orgánicos de alta plasticidad (MH-OH). Relacionando los resultados de contenido de orgánicos y los límites de Atterberg, se determina que los desechos analizados se clasifican como materiales orgánicos de alta plasticidad.

A partir del análisis granulométrico, se determinó que todos los materiales son finos ya que el porcentaje de material que pasa el tamiz N° 200 es superior al 50% para todos los materiales.

Se determina que el material de desecho que tiene un mayor porcentaje de finos es el desecho de 5 años con un 81,25%. Esto se puede asociar a la degradación de los materiales ya que, a mayor edad se considera que los desechos se encuentran más degradados.

Para la fracción más fina (pasando tamiz N°200), el material de desecho de un año es el que presenta las partículas de mayor tamaño. Esto se puede asociar a que es el material que, por su edad, presenta una menor degradación de las partículas.

Para los análisis de conductividad hidráulica, se lograron alcanzar saturaciones consideradas adecuadas para el análisis realizado. La muestra que obtuvo una mayor saturación fue la muestra un con un 100% y la que obtuvo una menor saturación fue la muestra 5 con un 94,84%.

Los gráficos obtenidos de conductividad hidráulica muestran un comportamiento lineal lo cual indica que los análisis se realizaron en un flujo de comportamiento laminar. Se aprecia también que los datos obtenidos por medio del gráfico y mediante el promedio de las lecturas son consistentes y no presentan una diferencia significativa.

Con respecto a los datos de conductividad hidráulica obtenidos de los ensayos de laboratorio se presentan agrupados en valores muy cercanos. El rango de dichos resultados para los desechos oscila entre $1,721 \times 10^{-5}$ m/s y $3,467 \times 10^{-4}$ m/s.

Los resultados de los ensayos de permeabilidad son consistentes con los recopilados en otras investigaciones y se encuentran en un rango cercano a los datos obtenidos. Se pudo observar que en algunos los resultados obtenidos coinciden con los recopilados. De los datos recopilados también se observan variaciones al modificar la densidad de las muestras.

La implementación del papel de filtro permitió obtener las curvas características suelo agua de los materiales analizados. También se verificó que dicha metodología es aplicable principalmente para bajos contenidos de humedad.

Se observa un ajuste adecuado entre los datos experimentales de succión y la curva característica generada a partir de los parámetros de Van Genuchten propuestos. Esto da validez a los valores propuestos para dicho análisis.

Se logró estimar la conductividad hidráulica relativa mediante la aplicación del modelo Van Genuchten. Adicionalmente se implementó un modelo fractal que permite la estimación de dicho parámetro. A partir de lo anterior, se considera que un modelo fractal permitiría la estimación de parámetros no saturados de conductividad hidráulica no saturada en un medio poroso.

Se realizó el balance hídrico con la herramienta HELP la cual permitió estimar la infiltración, evapotranspiración y escorrentía en el relleno sanitario. Para la implementación de esta herramienta fue necesario el uso de datos meteorológicos los cuales se obtuvieron principalmente de la estación meteorológica ubicada en el sitio de estudio. Adicionalmente la herramienta HELP permite la importación de datos de precipitación, temperatura y radiación solar, aunque únicamente este último está disponible para Costa Rica.

Adicional a la herramienta HELP, se realizó un balance hídrico con un método empírico propuesto por Delgado, A. (2018) en el cual se obtuvo, de manera global, valores similares al modelo HELP, con diferencias de 15,7%. Dicha diferencia se puede generar debido a las consideraciones de los modelos utilizados.

Se logró crear el modelo de flujo mediante el uso de los datos topográficos, datos de campo y laboratorio. Dicha información se ingresó al programa Slide® para la creación de los modelos. Se implementaron modelos de flujo estacionario y transitorio para analizar la cantidad de flujo generado y las presiones al interior de la celda.

Del modelo de flujo estacionario se estima que el volumen de fluido recolectado al interior de la celda es de 64 517,0 m³/año para el perfil 1 y de 60 515,0 m³/año. Las diferencias entre los valores se pueden generar debido a las dimensiones del corte o la configuración en la que fueron colocados los materiales.

Las diferencias generadas entre los modelos de balance hídrico, el modelo generado en Slide® y la información de campo se puede dar debido a las consideraciones de cada modelo, el criterio establecido para la construcción del modelo o bien, con respecto a los datos de campo, errores en la lectura de campo. También se puede generar una diferencia con los datos de campo debido a que parte del lixiviado generado no ha salido a la planta de tratamiento quedando almacenado en el interior de la celda.

6.2 Recomendaciones

A partir de los análisis ejecutados se recomienda analizar la variabilidad del sitio en estudio mediante la realización de una mayor cantidad de muestreos. Como referencia para la cantidad de muestreos se puede utilizar el Código de Cimentaciones de Costa Rica.

Se recomienda reproducir estos análisis en otros rellenos sanitarios de Costa Rica o sitios con similares condiciones con el fin de analizar las características de otros sitios y establecer posibles similitudes entre los estudios.

Realizar estudios de permeabilidad en campo con el fin de verificar si existen diferencias significativas entre los resultados de campo y laboratorio o bien si los mismos son consistentes con lo obtenidos en la presente investigación

Construir un permeámetro con las dimensiones requeridas para analizar la permeabilidad del medio tomando en cuenta materiales de diferentes tipos y tamaños que también son depositados en los rellenos sanitarios.

Se recomienda realizar ensayos de permeabilidad en desechos variando la densidad de las muestras de manera que se analice el comportamiento de los resultados y se verifique que se obtiene el mismo comportamiento que el de los datos recopilados.

Instrumentar el relleno sanitario de Miramar o bien otro relleno con el objetivo de poder medir flujos de lixiviados, niveles freáticos a lo interno de la celda. Esto para generar información adicional de campo que permita ser utilizada en la modelación de las condiciones de flujo de un relleno sanitario.

Considerar la realización de ensayos de succión con otro tipo de metodologías para obtener curvas características adicionales a las generadas en el presente trabajo las cuales puedan ampliar la información generada con los ensayos de papel de filtro.

Proceder a la realización de modelos de flujo que contemplen la ubicación y diseño de las chimeneas de evacuación de biogás. Esta inclusión puede generar información adicional sobre el comportamiento del flujo a nivel interno de la celda.

También se puede continuar con la modelación realizada incorporando aspectos como la recirculación del lixiviado o la protección final de la celda. Este tipo de actividades se realiza

en algunos rellenos sanitarios cuando las celdas alcanzan la altura máxima y se le coloca la cobertura final.

Utilizar la información generada para la ejecución de análisis de estabilidad de taludes, asentamientos y esfuerzos de manera que se puedan generar conclusiones adicionales sobre el comportamiento de los rellenos sanitarios.

Referencias

- Alfaro, M. A. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM D5298: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper.
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM D2216: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- Beaven, R. (2000). *The hydrogeological and geotechnical properties of household*. Tesis doctoral, Queen Mary and Westfield College, Universidad de Londres.
- Beaven, R. P., Powrie, W., & Zardava, K. (2011). Hydraulic properties of MSW. En D. Zekkos, *Geotechnical Characterization, Field Measurement, and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste*.
- Bengtsson, L., Bendz, D., Hogland, W., Rosqvist, H., & Akesson, M. (1994). Water balance for landfills of different age. *Journal of hydrology*, (págs. 203-217).
- Bulut, R., Lytton, R. L., & Wray, W. K. (2001). Soil Suction Measurements by Filter Paper. *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*.
- Costa, M. d., Lemos, S., & Barbosa, M. C. (2012). An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. *Waste Management*, (págs. 471-481).
- Delgado, A. (2018). *Propuesta de optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Parque Ecoindustrial Miramar*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Demetracopoulos, A. C., Sehayek, L., & Erdogan, H. (1986). Modeling leachate production from Municipal Landfills. *Journal of Environmental Engineering*, (págs. 849-866).

- El-Fadel, M., Findikakis, A., & Leckie, J. O. (1997). Modeling Leachate Generation and Transport in Solid Waste Landfills. *Environmental Technology*, (págs. 669-686). doi:10.1080/09593331808616586
- EPA. (2010). *Municipal Solid Waste in the United States: 2009 Facts and figures*.
- Faour, A. A., Reinhart, D. R., & You, H. (2006). First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. *Waste Management*, 27, págs. 946-953.
- Fellner, J., & Brunner, P. H. (2010). Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach. *Waste Management* (págs. 2084–2095). Elsevier Ltd.
- Feng, S.-J., & Zheng, Q.-T. (2014). A two-dimensional gas flow model for layered municipal solid waste landfills. *Computers and Geotechnics*, (págs. 135-145).
- Feng, S.-J., Zheng, Q.-T., & Chen, H. (2017). Unsaturated flow parameters of municipal solid waste. *Waste Management* (págs. 107-121). Elsevier Ltd.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Gao, K.-W., Chen, Y.-X., Li, Y., Zhang, L., Chen, H., & Feng, S.-J. (2017). Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China. *Waste Management*, (págs. 354-365).
- Giri, R. K., & Reddy, K. P. (2014). Effects of Heterogeneous and Anisotropic Properties of Municipal Solid Waste on Leachate Distribution and Slope Stability of Bioreactor Landfills. *Geo-Congress*, (págs. 1483-1492).
- Hernández Barrios, C. P., Wehenpohl, G., & Heredia Cantillana, P. (2006). *Manual para la supervisión y control de rellenos sanitarios*. México.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: a global review of solid waste management*. Washington, D.C.: World Bank Urban Development Series.

- Jain, P., Powell, J., Townsend, T. G., & Reinhart, D. R. (2006). Estimating the Hydraulic Conductivity of Landfilled Municipal Solid Waste Using the Borehole Permeameter Test. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 645-652.
- Loehr, R. C., & Haikola, B. M. (2003). Long Term Landfill Primary and Secondary. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 129, págs. 1063-1067. ASCE.
- McCreanor, P. T., & Reinhart, D. R. (2000). Mathematical modeling of leachate routing in a leachate recirculating landfill. *Water Research*, (págs. 1285-1295).
- Ministerio de Salud. (2016). *Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021*. San José.
- Ministerio de Salud de Costa Rica. (2014). *Reglamento sobre Rellenos Sanitarios Nº 27378-S*. San José.
- Peyton, R. L., & Schroeder, P. R. (1993). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. (D. E. Daniel, Ed.) Londres: Chapman & Hall.
- Ramos Rivera, J. (2011). *Geotecnia de rellenos sanitarios*. Colombia.
- Reddy, K. R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N., Gangathulasi, J., Bogner, J., & Lagier, T. (2009). Hydraulic Conductivity of MSW in Landfills. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 677-683.
- Staub, M., Galiotti, B., Oxarango, L., Khire, M. V., & Gourc, J. P. (2009). Porosity and hydraulic conductivity of MSW using laboratory scale tests. *Third international conference on Hydro-Physico-Mechanics of landfills*.
- Tao, G., Zhu, X., Cai, J., Xiao, H., Chen, Q., & Chen, Y. (2019). Fractal Approach for Predicting Unsaturated Hydraulic Conductivity of Deformable Clay. *Geofluids*, 9.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management (Engineering Principles and Management Issues)*. McGraw-Hill.
- Tong Zhan, T. L., Bing Xu, X., Min Chen, Y., Fei Ma, X., & Lan, J. W. (2015). Dependence of Gas Collection Efficiency on Leachate Level at Wet Municipal Solid Waste Landfills and Its Improvement Methods in China. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

- Townsend, T., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., & Reinhart, D. (2015). *Sustainable Practices for Landfill Design and Operation*. New York: Springer.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44.
- Vargas Guerrero, M. (2009). *Modelo de balance hídrico para la estimación de los caudales de lixiviados generados en la operación del relleno sanitario del Centro Industrial del Sur - El Guacal, Heliconia – Antioquia*. Medellín.
- Vargas Monge, W. (2016). *Mecánica de suelos: Flujo de agua subterránea*. Apuntes de clase. Universidad de Costa Rica.
- White, J., Zardava, K., Nayagum, D., & Powrie, W. (2015). Functional relationships for the estimation of van Genuchten parameter values in landfill processes models. *Waste Management* 38, 222-231.
- Yesiller, N., Hanson, J., Cox, J., & Noce, D. (2014). Determination of specific gravity of municipal solid waste. *Waste Management*.
- Yuen, S., Wang, Q. J., Styles, J. R., & McMahon, T. A. (2001). Water balance comparison between a dry and a wet landfill -a full-scale experiment. *Journal of Hydrology*, (págs. 29-48). Melbourne.

Apéndices.

Apéndice 1. Contenido de humedad de los materiales muestreados

Contenido de humedad inicial								
ITEM	Suelo de cobertura	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
Masa bandeja (g)	114,76	108,73	206,35	201,4	195,5	111,84	113,81	201,56
Masa húmeda + bandeja (g)	212,56	175,33	413,48	298,82	367,96	209,68	157,11	376,28
Masa húmeda (g)	97,80	66,60	207,13	97,42	172,46	97,84	43,30	174,72
Masa seca 1+ bandeja (g)	185,82	138,39	308,71	255,52	312,42	177,16	137,54	312,6
Masa seca 1(g)	71,06	29,66	102,36	54,12	116,92	65,32	23,73	111,04
Masa seca 2+ bandeja (g)	185,89	138,37	308,63	255,57	312,52	177,22	137,56	312,52
Masa seca 2(g)	71,13	29,64	102,28	54,17	117,02	65,38	23,75	110,96
Error (%)	0,10	0,07	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07
Humedad (%)	37,49	124,70	102,51	79,84	47,38	49,65	82,32	57,46

Apéndice 2. Contenido de orgánicos de los materiales muestreados

ITEM	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
Masa bandeja (g)	35,047	22,350	30,742	35,069	30,736	22,339	24,339
Masa húmeda + bandeja (g)	56,056	43,624	65,015	66,823	62,502	31,143	39,583
Masa húmeda (g)	21,009	21,274	34,273	31,754	31,766	8,804	15,244
Masa seca + bandeja (g)	42,021	27,348	41,166	47,110	44,655	25,146	30,785
Masa seca (g)	6,974	4,998	10,424	12,041	13,919	2,807	6,446
Contenido de orgánicos (%)	25,412	52,423	45,302	44,115	34,424	41,870	33,416

Apéndice 4. Análisis granulométrico.

Datos iniciales suelo de cobertura	
Masa bandeja (g)	297,1
Masa seca+b (g)	779,36
Masa seca (g)	482,26
Masa lavada +b (g)	447,69
Masa seca lavada (g)	150,59
%error	0,345

Suelo de cobertura					
Tamiz	Tamaño de apertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret Acum	% Pasando
3/8"	9,5	0	0,00	0,00	100,00
4	4,75	0	0,00	0,00	100,00
10	2	14,33	2,97	2,97	97,03
20	0,85	21,42	4,44	7,41	92,59
40	0,425	18,54	3,84	11,26	88,74
100	0,15	47,25	9,80	21,06	78,94
200	0,075	41,25	8,55	29,61	70,28
Ch	0	7,28			
	Total (g)	150,07			

Datos iniciales suelo de 1 año	
Masa bandeja (g)	252,35
Masa seca+b (g)	848,98
Masa seca (g)	585,16
Masa lavada +b (g)	453,39
Masa seca lavada (g)	201,04
%error	0,378

Suelo con desechos de 1 año					
Tamiz	Tamaño de abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret Acum	% Pasando
3/8"	9,5	6,33	1,08	1,08	98,92
4	4,75	5,47	0,93	2,02	97,98
10	2	16,53	2,82	4,84	95,16
20	0,85	20,07	3,43	8,27	91,73
40	0,425	22,87	3,91	12,18	87,82
100	0,15	60,76	10,38	22,56	77,44
200	0,075	58,92	10,07	32,63	67,50
Ch	0	10,85	1,85	34,49	
	Total (g)	201,80			

Datos iniciales suelo de 3 años	
Masa bandeja (g)	298,76
Masa seca+b (g)	632,65
Masa seca (g)	333,89
Masa lavada +b (g)	432,72
Masa seca lavada (g)	123,86
%error	0,315

Suelo con desechos de 3 años					
Tamiz	Tamaño de apertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret Acum	% Pasando
3/8"	9,5	2,05	0,61	0,61	99,39
4	4,75	2,73	0,82	1,43	98,57
10	2	5,74	1,72	3,15	96,85
20	0,85	8,03	2,40	5,56	94,44
40	0,425	8,36	2,50	8,06	91,94
100	0,15	40,24	12,05	20,11	79,89
200	0,075	43,78	13,11	33,22	66,66
Ch	0	12,54	3,76	36,98	
	Total (g)	123,47			

Datos iniciales suelo de 5 años	
Masa bandeja (g)	316,09
Masa seca+b (g)	746,92
Masa seca (g)	430,83
Masa lavada +b (g)	406,32
Masa seca lavada (g)	90,23
%error	0,510

Suelo con desechos de 5 años					
Tamiz	Tamaño de apertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Ret Acum	% Pasando
3/8"	9,5	0	0,00	0,00	100,00
4	4,75	5,72	1,33	1,33	98,67
10	2	6,73	1,56	2,89	97,11
20	0,85	10,40	2,41	5,30	94,70
40	0,425	7,65	1,78	7,08	92,92
100	0,15	18,95	4,40	11,48	88,52
200	0,075	31,80	7,38	18,86	81,25
Ch	0	9,44			
	Total (g)	90,69			

Apéndice 5. Determinación de la conductividad hidráulica.

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo de cobertura						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	803.073	803.073	803.073	803.073	803.073
H1	cm	45	45	38	40	43
H2	cm	9.5	10	10.5	14	23.5
ΔH	cm	0.355	0.35	0.275	0.26	0.195
i		4.168	4.109	3.228	3.052	2.289
Volumen	m ³	0.000225	0.00022	0.000165	0.00015	0.00011
Tiempo	s	900	900	900	900	900
Área sección	m ²	0.001093	0.001093	0.001093	0.001093	0.001093
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	5.490E-05	5.444E-05	5.197E-05	4.997E-05	4.886E-05

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 1 mes						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	739.901	739.901	739.901	739.901	739.901
H1	cm	45	46	34	42	32
H2	cm	28	31	20	29	20
ΔH	cm	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12
i		1.996	1.761	1.644	1.526	1.409
Volumen	m ³	0.00035	0.00025	0.000215	0.000188	0.000145
Tiempo	s	900	900	900	900	900
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	1.783E-04	1.444E-04	1.330E-04	1.253E-04	1.047E-04

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 6 meses						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	742.909	742.909	742.909	742.909	742.909
H1	cm	47	45	42	40	35
H2	cm	15	15.5	13	12	10
ΔH	cm	0.32	0.295	0.29	0.28	0.25
i		3.757	3.463	3.405	3.287	2.935
Volumen	m ³	0.000065	0.000058	0.000058	0.000105	0.000095
Tiempo	s	900	900	900	1800	1800
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	1.759E-05	1.703E-05	1.732E-05	1.624E-05	1.646E-05

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 1 año						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	742.157	742.157	742.157	742.157	742.157
H1	cm	47	45	42	38	34
H2	cm	12.5	12	13	11	9
ΔH	cm	0.345	0.33	0.29	0.27	0.25
i		4.050	3.874	3.405	3.170	2.935
Volumen	m ³	0.000235	0.00023	0.000205	0.000185	0.00017
Tiempo	s	900	900	900	900	900
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	5.8998E-05	6.0367E-05	6.1227E-05	5.93466E-05	5.8897E-05

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 2 años						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	752.901	752.901	752.901	752.901	752.901
H1	cm	45	42	39	35	30
H2	cm	8.5	7	6	5	4
ΔH	cm	0.365	0.35	0.33	0.3	0.26
i		4.285	4.109	3.874	3.522	3.052
Volumen	m ³	0.000095	0.00009	0.00008	0.000065	0.000055
Tiempo	s	1800	1800	1800	1800	1800
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	1.1272E-05	1.1136E-05	1.0499E-05	9.38317E-06	9.1611E-06

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 3 años						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	754.512	754.512	754.512	754.512	754.512
H1	cm	45	40	37	45	45
H2	cm	15	12	10.5	19	21
ΔH	cm	0.3	0.28	0.265	0.26	0.24
i		3.522	3.287	3.111	3.052	2.818
Volumen	m ³	0.000145	0.00013	0.00012	0.000115	0.000105
Tiempo	s	1800	1800	1800	1800	1800
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	2.0932E-05	2.0107E-05	1.9611E-05	1.9155E-05	1.8947E-05

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 4 años						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	749.570	749.570	749.570	749.570	749.570
H1	cm	45	42	44	45	45
H2	cm	19	16.5	20	22	23
ΔH	cm	0.26	0.255	0.24	0.23	0.22
i		3.052	2.994	2.818	2.700	2.583
Volumen	m ³	0.00045	0.00044	0.000415	0.000405	0.000385
Tiempo	s	900	900	900	900	900
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	1.50E-04	1.49E-04	1.50E-04	1.53E-04	1.52E-04

Resultados de ensayos de conductividad hidráulica suelo 5 años						
Parámetro	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Densidad	kg/m ³	769.983	769.983	769.983	769.983	769.983
H1	cm	48	45	40	38	34
H2	cm	9	8	5	4	2
ΔH	cm	0.39	0.37	0.35	0.34	0.32
i		4.579	4.344	4.109	3.992	3.757
Volumen	m ³	0.000065	0.00006	0.00005	0.00004	0.000035
Tiempo	s	900	900	900	900	900
Área sección	m ²	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272	0.00109272
Longitud	m	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518	0.08518
k	m/s	1.44E-05	1.40E-05	1.24E-05	1.02E-05	9.47E-06

Apéndice 6. Resultados de calibración de papel de filtro.

Concentración (g/mol)	Previo secado			Posterior a secado			Solución NaCl		
	Masa inicial cápsula (g)	Cápsula + papel (g)	Masa papel (g)	Masa final cápsula (g)	Cápsula + papel (g)	Masa papel (g)	Humedad del papel (%)	Succión (kPa)	log Succión
2	62,277	62,867	0,590	62,265	62,785	0,520	13,462	9757	3,989
1,69	61,518	62,153	0,635	61,521	62,052	0,531	19,586	7531	3,877
0,6	62,33	62,983	0,653	62,313	62,847	0,534	22,285	2742	3,438
0,4	62,048	62,691	0,643	62,029	62,551	0,522	23,180	1824	3,261
0,02	62,42	63,123	0,703	62,404	62,926	0,522	34,674	95	1,978
0,005	61,782	62,466	0,684	61,781	62,285	0,504	35,714	24	1,380

Concentración (g/mol)	Previo secado			Posterior a secado			Solución KCl		
	Masa inicial cápsula (g)	Cápsula + papel (g)	Masa papel (g)	Masa final cápsula (g)	Cápsula + papel (g)	Masa papel (g)	Humedad del papel (%)	Succión (kPa)	log Succión
2	61,497	62,092	0,595	61,491	62,013	0,522	13,985	9043	3,956
1,69	61,721	62,334	0,613	61,714	62,244	0,530	15,660	7179	3,856
0,6	61,689	62,318	0,629	61,687	62,215	0,528	19,129	2674	3,427
0,4	61,247	61,937	0,69	61,281	61,815	0,534	29,213	1789	3,253
0,02	62,01	62,726	0,716	62,001	62,527	0,526	36,122	95	1,978
0,005	62,382	63,096	0,714	62,395	62,914	0,519	37,572	24	1,380

Apéndice 7. Propiedades de suelos utilizados para determinar curvas características.

Suelo de cobertura						
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
W inicial (g)	378,3	300	300	300	300	250
Ws inicial (g)	350,73	278,14	278,14	278,14	278,14	231,78
W h (g)	27,57	21,86	21,86	21,86	21,86	18,22
%H teórica	15,0	17,5	20	25	30	35
Wt teórico (g)	403,34	326,81	333,76	347,67	361,58	312,90
Agua agregar (g)	25,04	26,81	33,76	47,67	61,58	62,90
%H obtenido (%)	15,80	17,80	20,78	25,66	30,69	35,31
θ (cm ³ /cm ³)	0,164	0,184	0,200	0,231	0,257	0,278

Suelo 1 año						
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
W inicial (g)	350	325	325	325	325	300
Ws inicial (g)	319,74	296,90	296,90	296,90	296,90	274,06
W h (g)	30,26	28,10	28,10	28,10	28,10	25,94
%H teórica	15	17,5	20	25	30	35
Wt teórico (g)	367,70	348,86	356,28	371,13	385,97	369,98
Agua agregar (g)	17,70	23,86	31,28	46,13	60,97	69,98
%H obtenido (%)	16,37	17,92	20,77	25,87	31,44	35,96
θ (cm ³ /cm ³)	0,172	0,193	0,211	0,243	0,269	0,292

Suelo 3 años						
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
W inicial (g)	350	325	325	325	312,5	300
Ws inicial (g)	320,95	298,02	298,02	298,02	286,56	275,10
W h (g)	29,05	26,98	26,98	26,98	25,94	24,90
%H teórica	15	17,5	20	25	30	35
Wt teórico (g)	369,09	350,18	357,63	372,53	372,53	371,38
Agua agregar (g)	19,09	25,18	32,63	47,53	60,03	71,38
%H obtenido (%)	15,79	18,33	20,54	25,13	30,77	35,12
θ (cm ³ /cm ³)	0,162	0,181	0,198	0,229	0,253	0,275

Suelo 5 años						
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
W inicial (g)	350	325	325	325	312,5	300
Ws inicial (g)	319,58	296,75	296,75	296,75	285,34	273,92
W h (g)	30,42	28,25	28,25	28,25	27,16	26,08
%H teórica	15	17,5	20	25	30	35
Wt teórico (g)	367,51	348,68	356,10	370,94	370,94	369,80
Agua agregar (g)	17,51	23,68	31,10	45,94	58,44	69,80
%H obtenido (%)	15,02	18,23	20,71	25,59	30,15	35,36
θ (cm ³ /cm ³)	0,172	0,191	0,209	0,241	0,269	0,290

Apéndice 8. Resultados de succión de papel de filtro en suelos analizados.

Suelo de cobertura						
	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
W recipiente (g)	62,546	62,313	62,742	61,582	61,623	62,384
W r+papel (g)	63,019	62,786	63,235	62,097	62,164	62,934
W r+p seco (g)	62,899	62,657	63,096	61,933	61,974	62,728
W r seco (g)	62,495	62,258	62,683	61,515	61,557	62,321
Wh papel (g)	0,473	0,473	0,493	0,515	0,541	0,55
Ws papel (g)	0,404	0,399	0,413	0,418	0,417	0,407
%H	17,079	18,546	19,370	23,206	29,736	35,135

Suelo 1 año						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
W recipiente (g)	61,505	62,424	62,488	62,675	62,856	62,613
W r+papel (g)	61,975	62,911	62,975	63,194	63,389	63,182
W r+p seco (g)	61,854	62,777	62,834	63,027	62,553	62,218
W r seco (g)	61,443	62,361	62,427	62,615	62,146	61,802
Wh papel (g)	0,47	0,487	0,487	0,519	0,533	0,569
Ws papel (g)	0,411	0,416	0,407	0,412	0,407	0,416
%H	14,355	17,067	19,656	25,971	30,958	36,779

Suelo 3 años						
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
W recipiente (g)	62,399	62,1	62,149	61,27	62,294	63,158
W r+papel (g)	62,868	62,568	62,641	61,785	62,836	63,717
W r+p seco (g)	62,751	62,448	62,507	61,622	62,648	63,516
W r seco (g)	62,34	62,044	62,094	61,212	62,236	63,102
Wh papel (g)	0,469	0,468	0,492	0,515	0,542	0,559
Ws papel (g)	0,411	0,404	0,413	0,41	0,412	0,414
%H	14,112	15,842	19,128	25,610	31,553	35,024

Suelo 5 años						
	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
W recipiente (g)	61,47	62,464	61,816	62,45	62,649	62,233
W r+papel (g)	61,944	62,95	62,312	62,95	63,196	62,798
W r+p seco (g)	61,813	62,802	62,157	62,748	62,987	62,571
W r seco (g)	61,408	62,394	61,75	62,363	62,58	62,161
Wh papel (g)	0,474	0,486	0,496	0,5	0,547	0,565
Ws papel (g)	0,405	0,408	0,407	0,385	0,407	0,41
%H	17,037	19,118	21,867	29,870	34,398	37,805

Apéndice 10. Detalle de datos recopilados de conductividad hidráulica vs densidad seca.

Referencia	Densidad seca (ton/m ³)	Conductividad hidráulica (m/s)
Beaven R. (2000)	0,26	$3,30 \times 10^{-4}$
	0,31	$3,40 \times 10^{-5}$
	0,35	$1,20 \times 10^{-5}$
	0,45	$2,40 \times 10^{-6}$
	0,50	$2,70 \times 10^{-7}$
Beaven R. (2000) Desechos procesados	0,64	$1,50 \times 10^{-4}$
	0,69	$6,70 \times 10^{-5}$
	0,77	$6,00 \times 10^{-6}$
	0,86	$5,00 \times 10^{-7}$
	0,95	$6,00 \times 10^{-8}$
Beaven R. (2000) Desechos frescos	0,36	$6,50 \times 10^{-4}$
	0,43	$2,00 \times 10^{-4}$
	0,42	$8,90 \times 10^{-5}$
	0,49	$2,80 \times 10^{-5}$
	0,62	$8,90 \times 10^{-7}$
	0,72	$2,70 \times 10^{-7}$
Staub et al. (2009) Desecho tipo A	0,39	$7,40 \times 10^{-5}$
	0,41	$6,30 \times 10^{-5}$
	0,47	$5,20 \times 10^{-5}$
	0,48	$3,60 \times 10^{-5}$
	0,39	$7,40 \times 10^{-5}$
Staub et al (2009) Desecho tipo B	0,38	$7,30 \times 10^{-5}$
	0,42	$4,00 \times 10^{-5}$
	0,45	$3,50 \times 10^{-5}$
	0,49	$1,50 \times 10^{-5}$
	0,54	$9,50 \times 10^{-6}$

Apéndice 11. Resultados de análisis fractal para permeabilidad de los materiales analizados

Suelo de cobertura		
Succión (kPa)	$k\theta$ (m/s)	kr
7992,124	4,01823E-10	6,393E-06
5361,210	5,63763E-10	8,970E-06
2876,997	3,65502E-09	5,815E-05
1508,172	4,00872E-08	6,378E-04
255,038	2,00985E-07	3,198E-03
58,674	6,93325E-07	1,103E-02

Desechos 1 año		
Succión (kPa)	$k\theta$ (m/s)	kr
16774,091	1,5262E-10	2,526E-06
8018,269	5,97092E-10	9,884E-06
3963,335	3,65255E-09	6,046E-05
710,604	3,8169E-08	6,318E-04
182,879	1,87212E-07	3,099E-03
37,508	3,40577E-07	5,638E-03

Desechos 3 años		
Succión (kPa)	$k\theta$ (m/s)	kr
17920,974	1,04025E-10	3,555E-06
11191,173	4,01763E-10	6,651E-06
4575,835	2,42943E-09	4,022E-05
783,967	2,5214E-08	4,174E-04
155,538	8,93284E-08	1,479E-03
60,473	2,25978E-07	3,741E-03

Desechos 5 años		
Succión (kPa)	$k\theta$ (m/s)	kr
8084,005	1,13077E-10	2,824E-06
4588,306	4,43248E-10	1,107E-05
2171,304	2,71718E-09	6,786E-05
245,904	2,84748E-08	7,112E-04
71,706	1,01031E-07	2,523E-03
28,369	2,55293E-07	6,376E-03

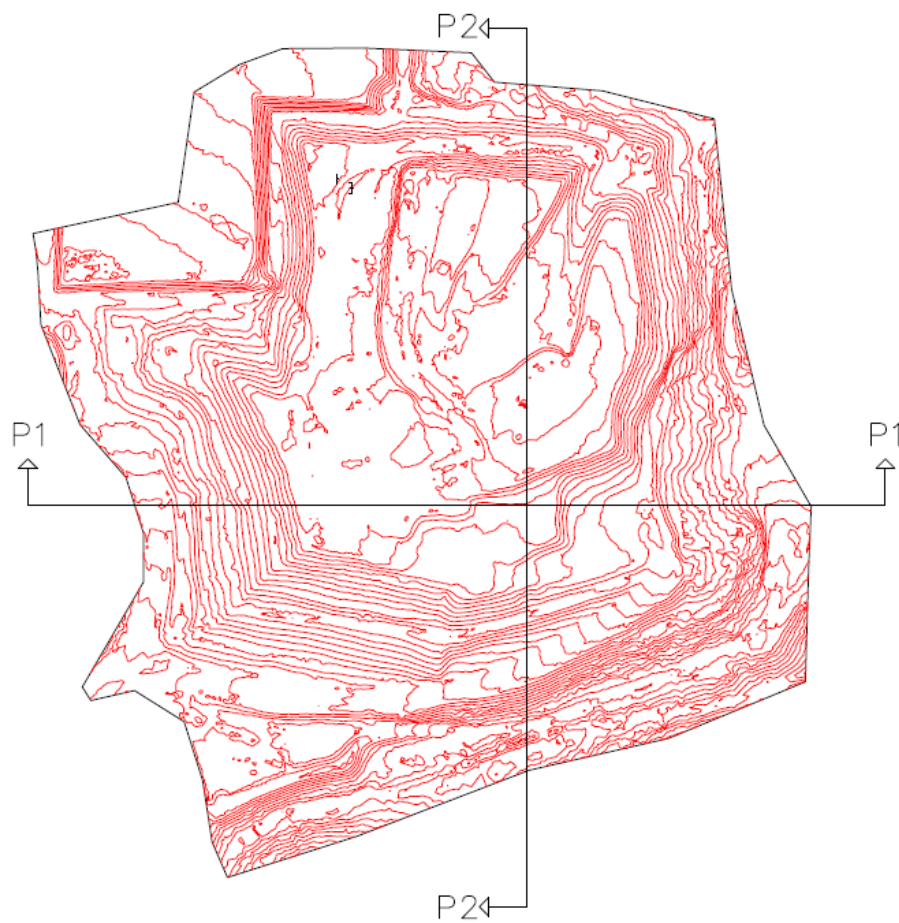
Apéndice 12. Cálculos de balance hídrico mediante la implementación de ecuaciones.

Balance hídrico superficial				
Mes del año 2020	Precipitación mensual acumulada (mm)	Temperatura promedio (°C)	Escorrentía (mm)	Evaporación (mm)
Enero	5,00	27,30	2,89	1,24
Febrero	0,00	27,80	0,00	0,74
Marzo	0,00	28,50	0,00	0,73
Abril	14,40	28,70	8,31	1,84
Mayo	11,00	27,60	6,35	1,62
Junio	54,10	26,30	31,22	3,25
Julio	293,90	26,00	169,58	7,38
Agosto	527,00	25,80	304,08	9,80
Septiembre	405,10	25,80	233,74	8,70
Octubre	177,90	25,70	102,65	6,07
Noviembre	490,80	24,40	283,19	9,64
Diciembre	89,10	25,90	51,41	4,28
Total	2068,30		1193,41	55,29

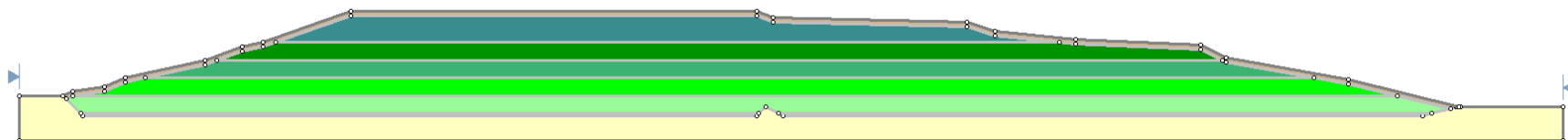
Balance hídrico interno						
Año	Biogás (m³/año)	Agua consumida (m³/año)	Volumen de desechos (m³)	Humedad de desechos (m³)	Capacidad de campo (m³)	Producción de lixiviado (m³)
2020	-	-	436668,70	168440,58	164624,10	3816,48
2019	13790220,01	2689,09	393488,73	151784,34	148345,25	750,00
2018	10088351,38	1967,23	369619,54	142577,04	139346,57	1263,25
2017	5314123,72	1036,25	250000,00	96435,00	94250,00	1148,75
2016	3310914,97	645,63	200000,00	77148,00	75400,00	1102,37
Total	32503610,08	6338,20	1649776,98	636384,97	621965,92	8080,85

Apéndice 13. Perfiles utilizados para el modelo de flujo

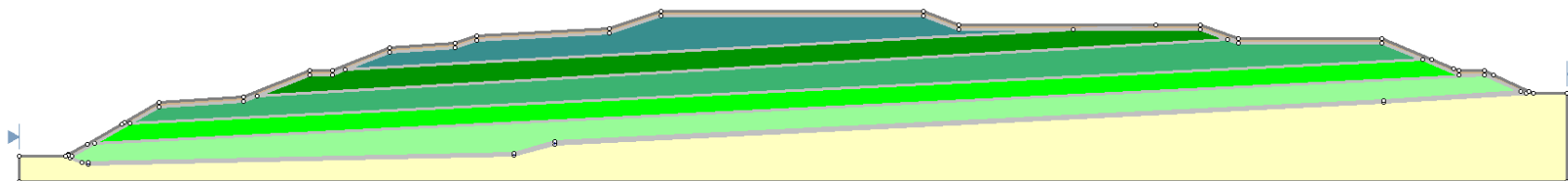
Cortes



Perfil 1



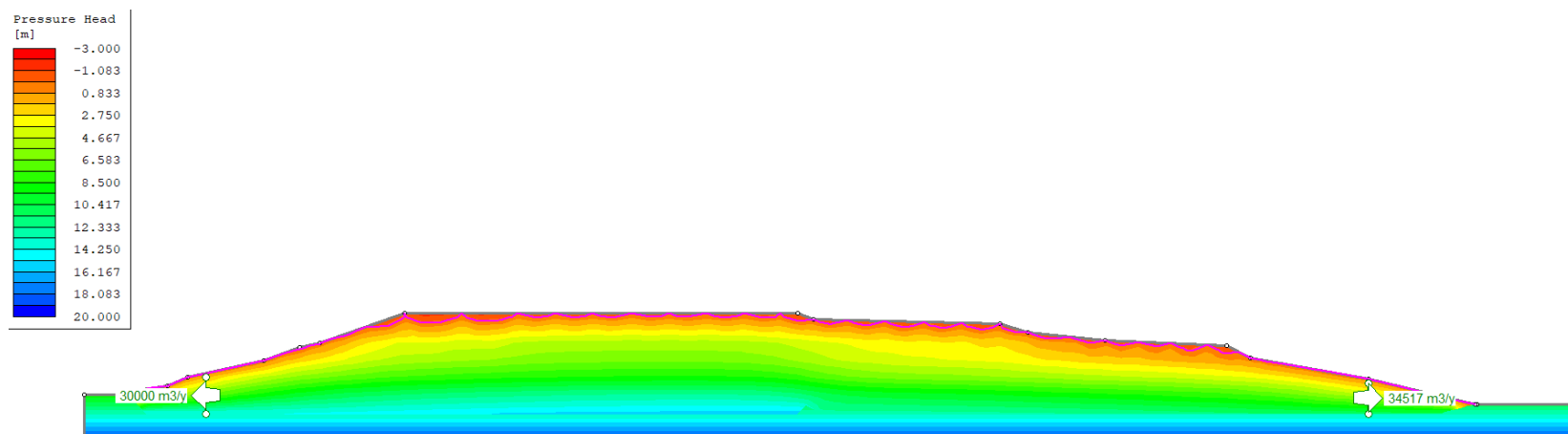
Perfil 2



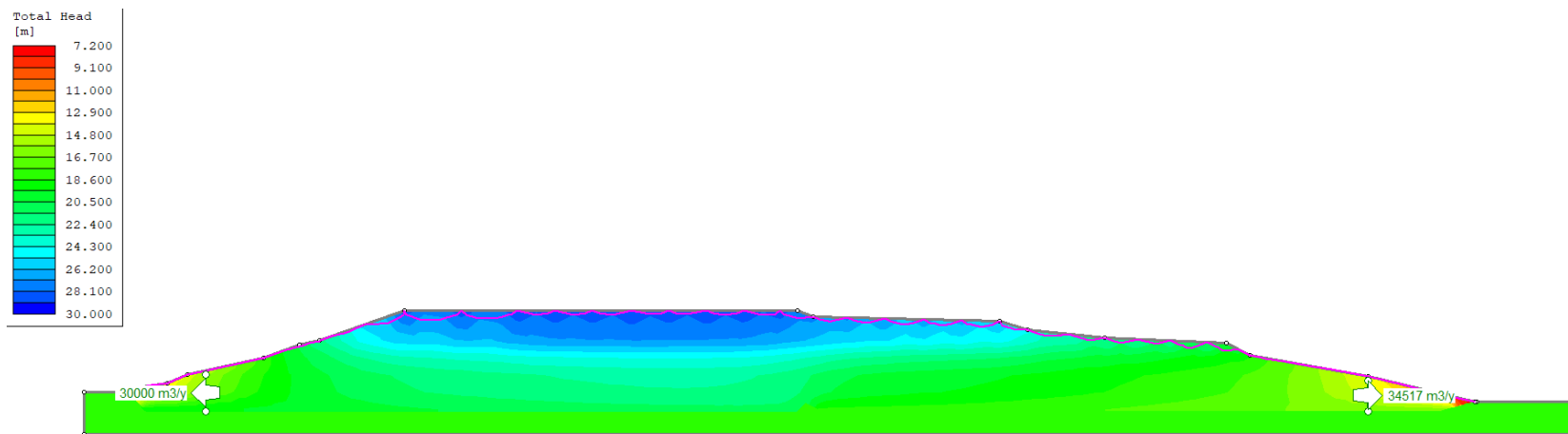
Apéndice 14. Resultados del modelo de flujo para relleno sanitario de Miramar.

Flujo estacionario de perfil 1

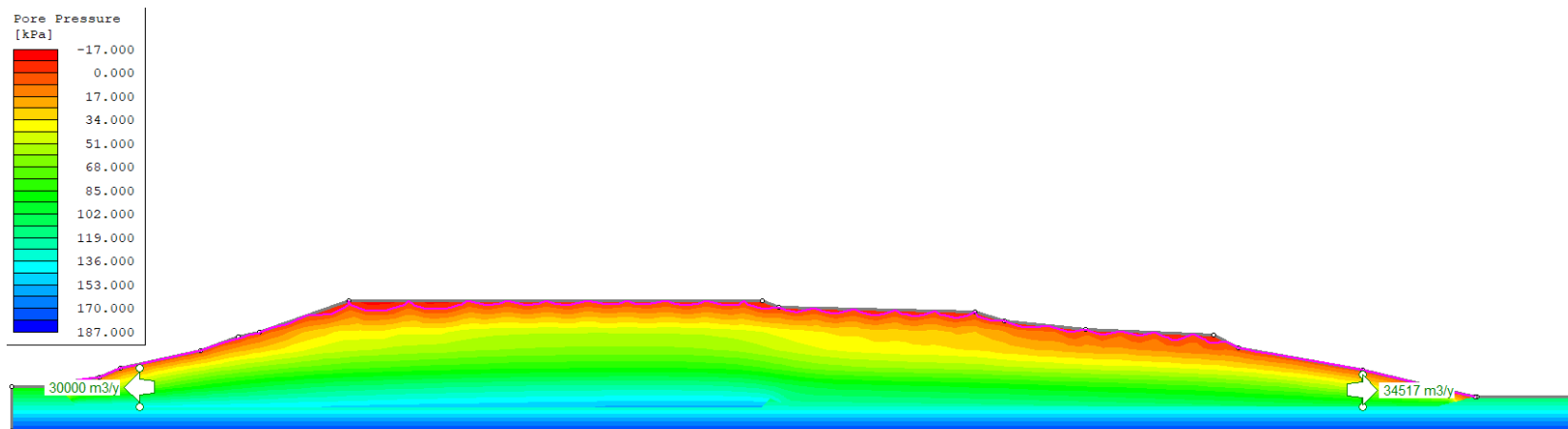
Altura de presión



Presión total

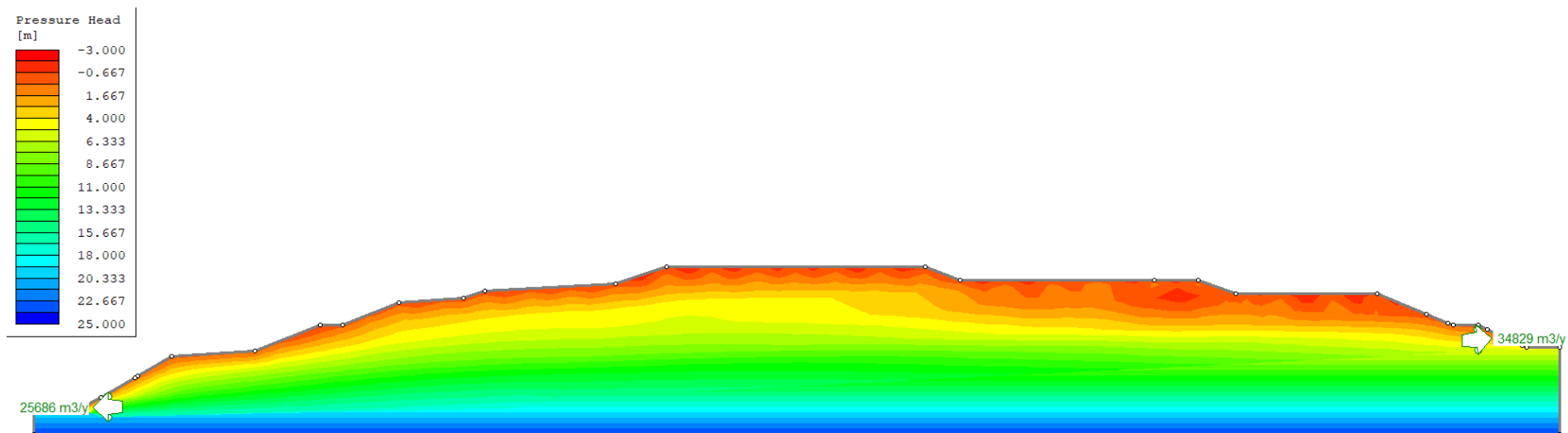


Presión de poro

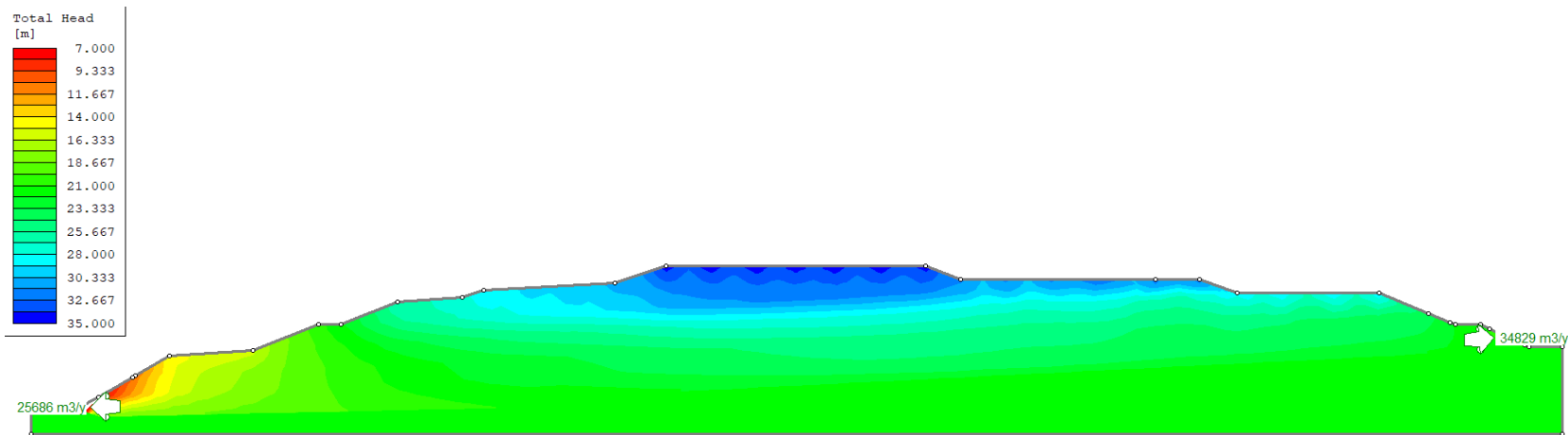


Flujo estacionario de perfil 2

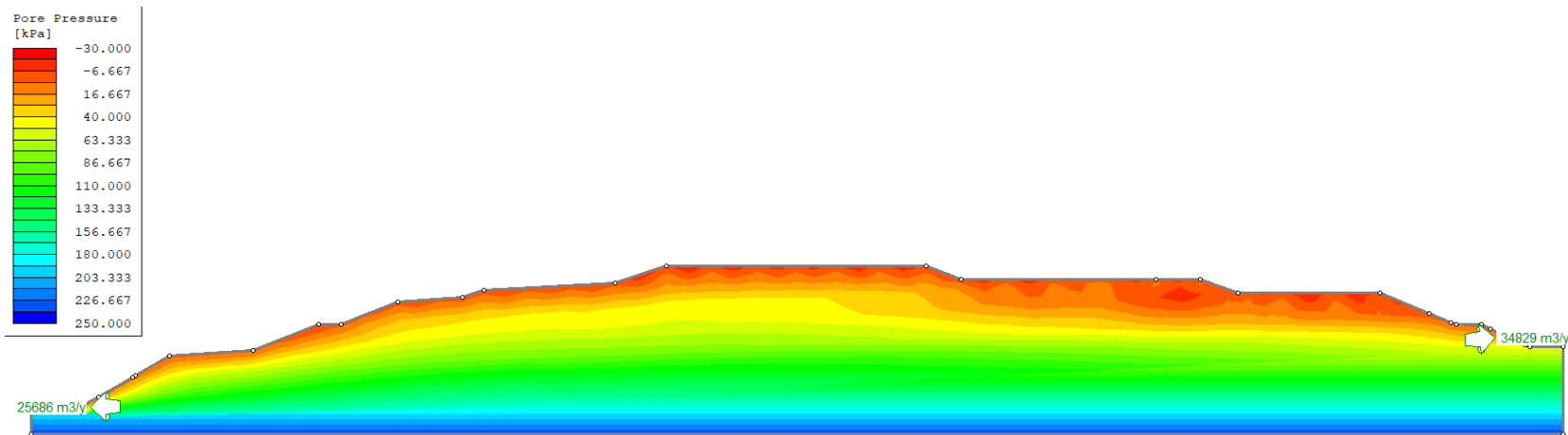
Altura de Presión



Presión total

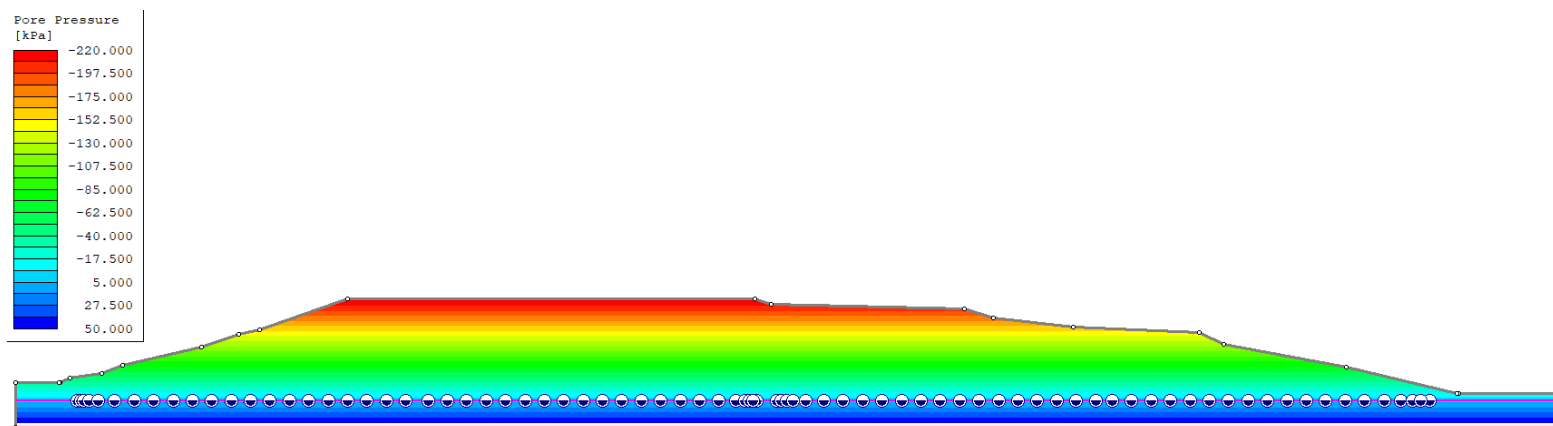


Presión de poro

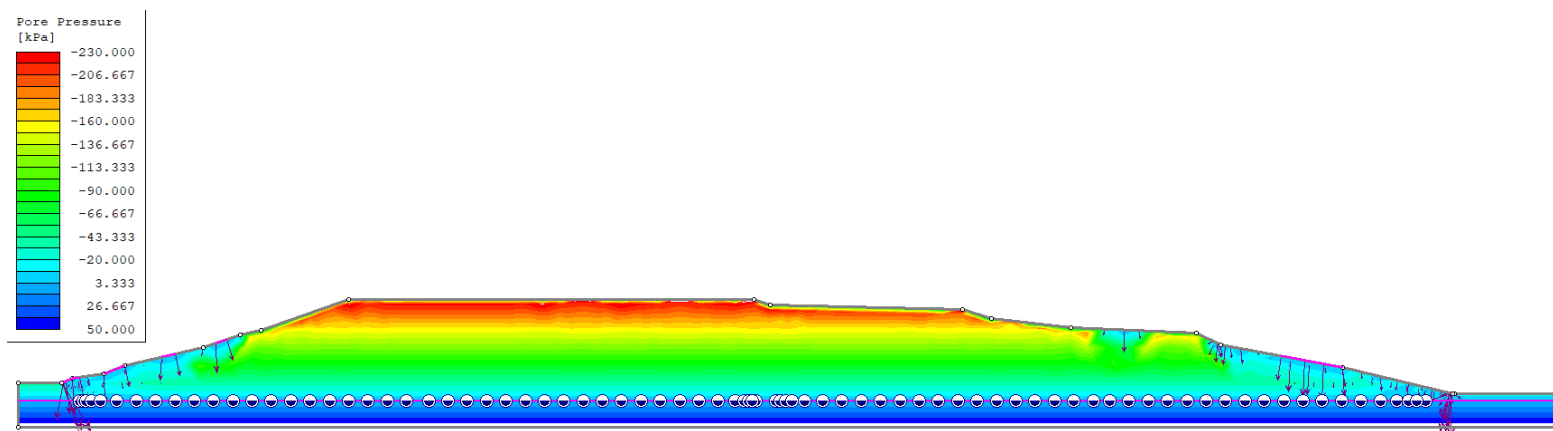


Flujo transitorio nivel 1

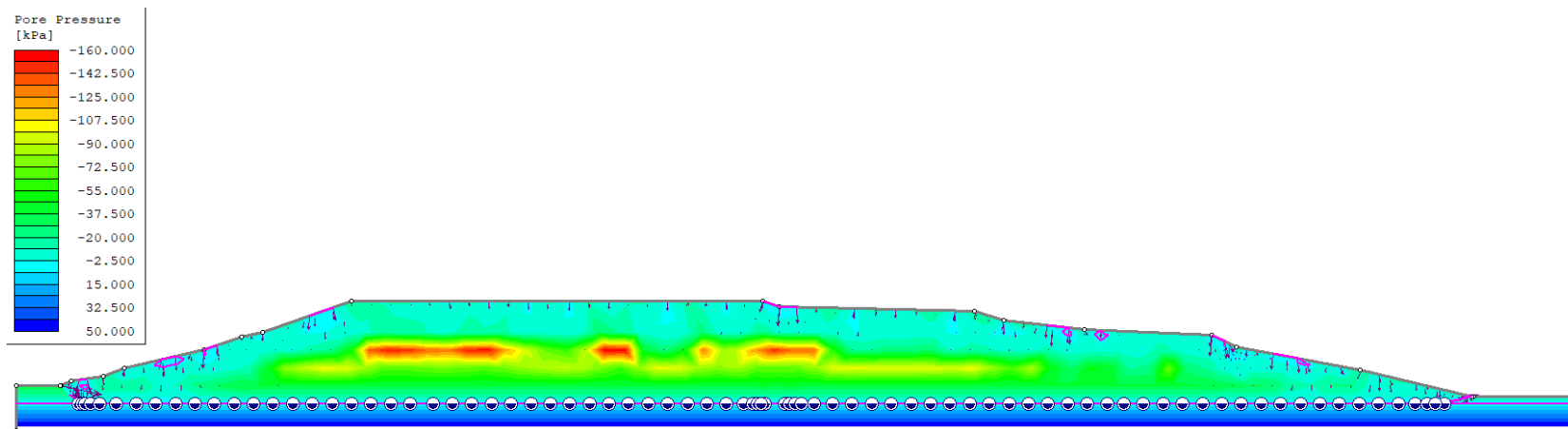
Condición inicial



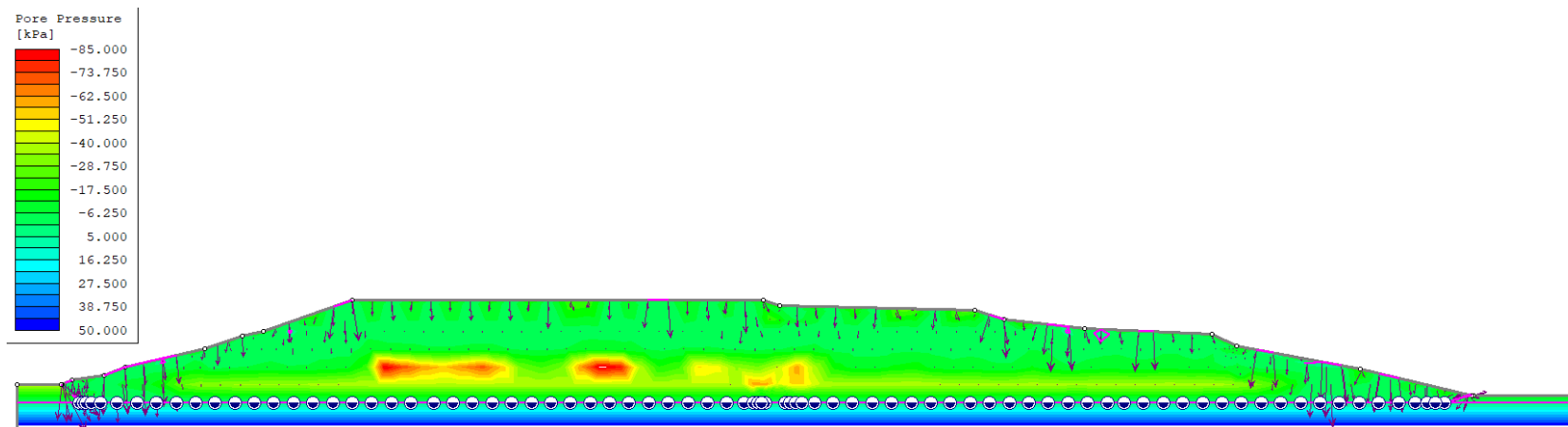
Flujo día 1



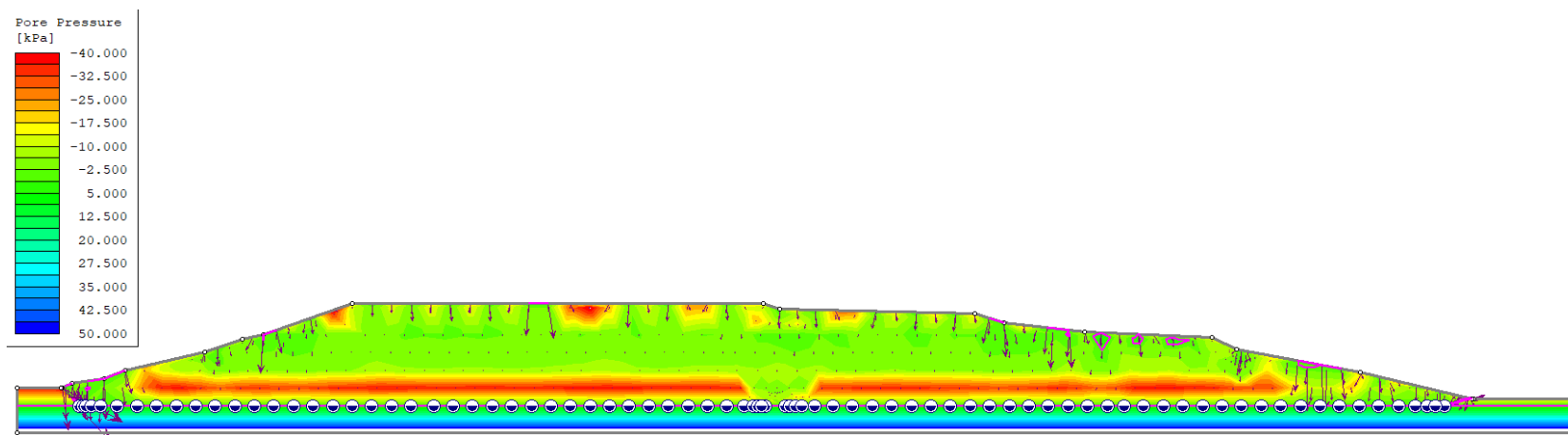
Flujo día 2



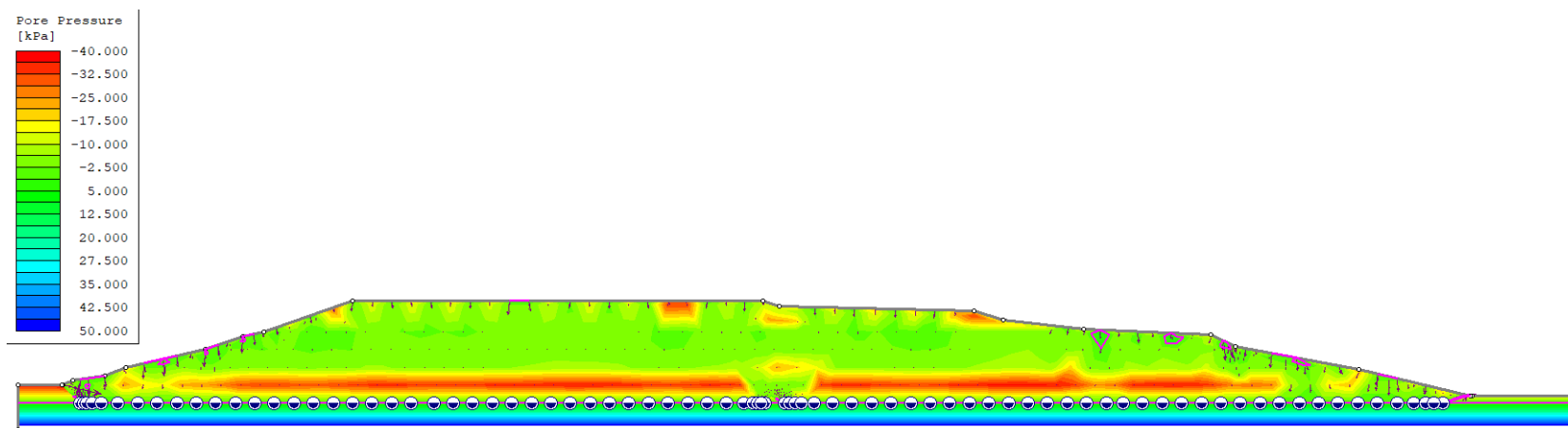
Flujo día 3



Flujo día 4

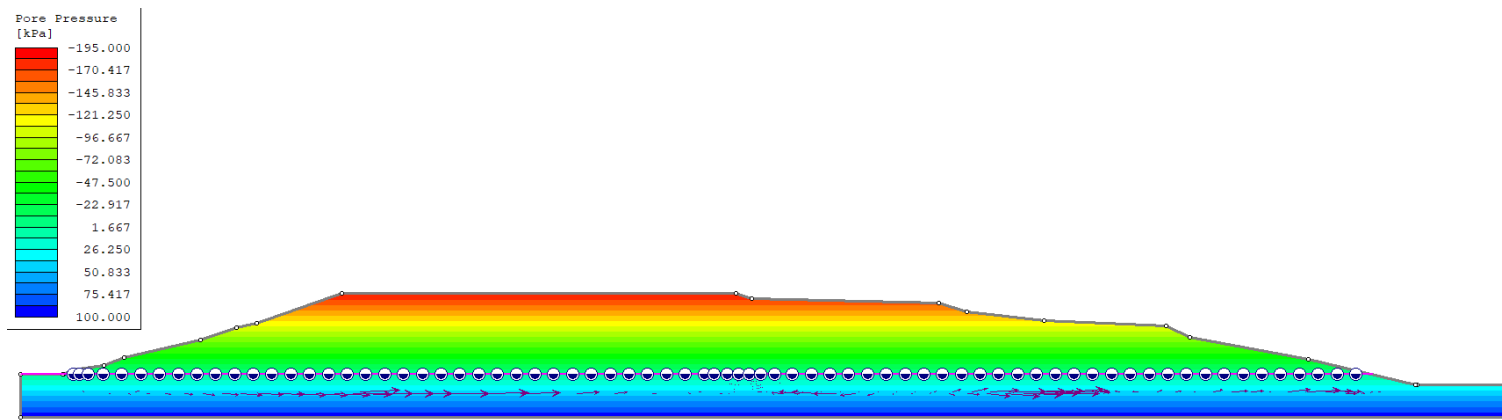


Flujo día 5

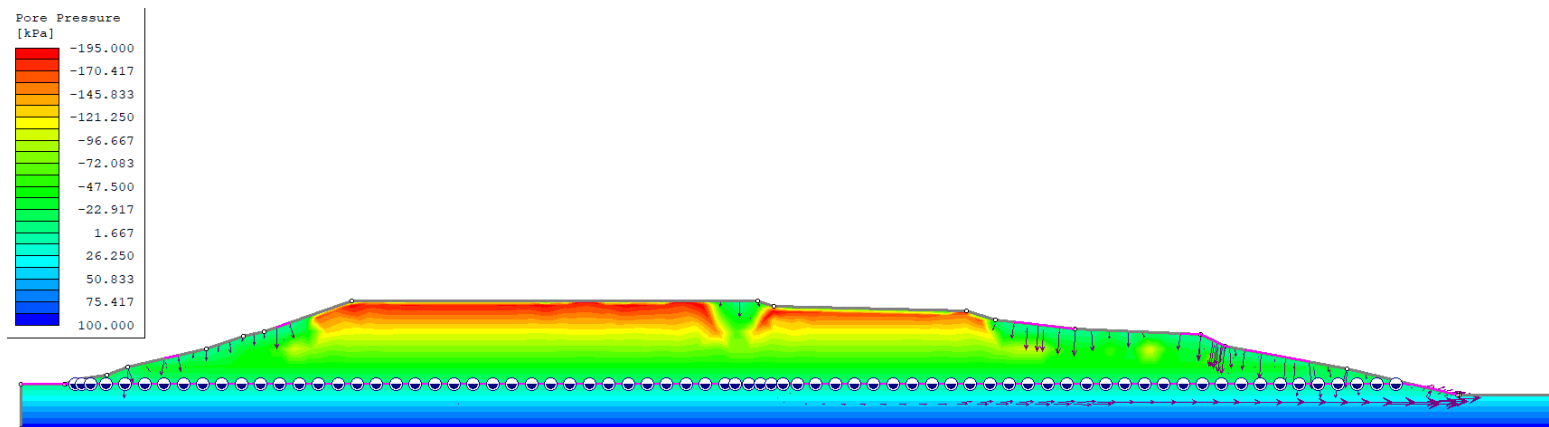


Flujo transitorio nivel 2

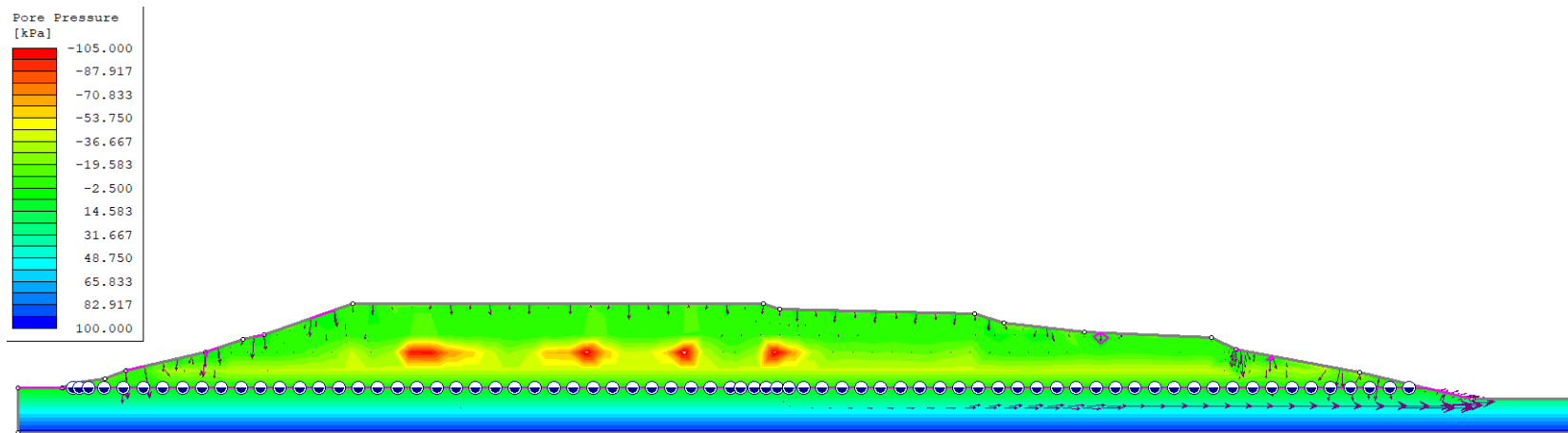
Condición inicial



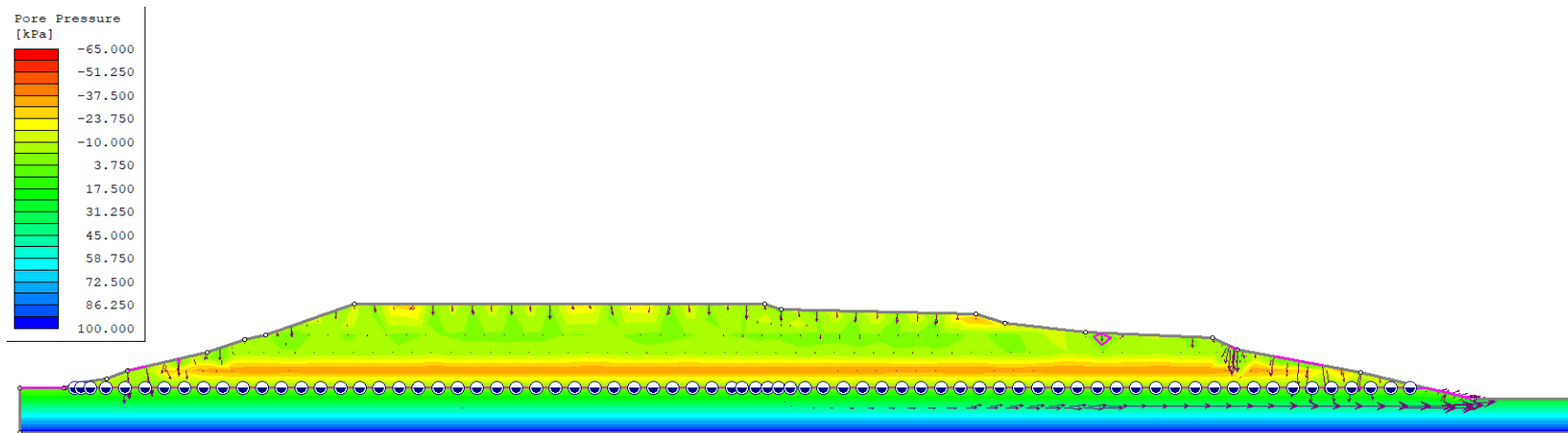
Flujo día 1



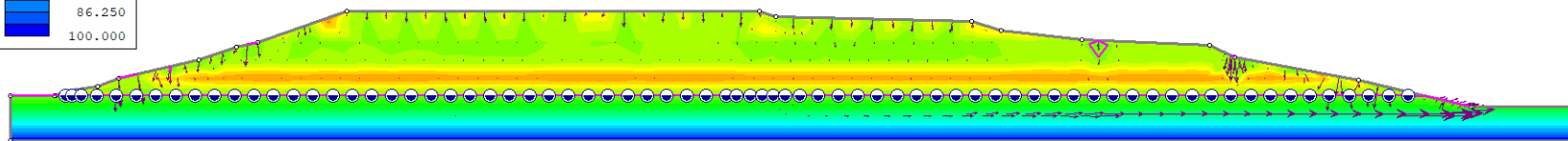
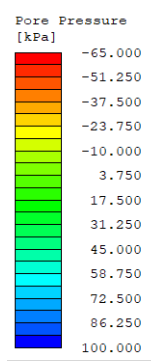
Flujo día 2



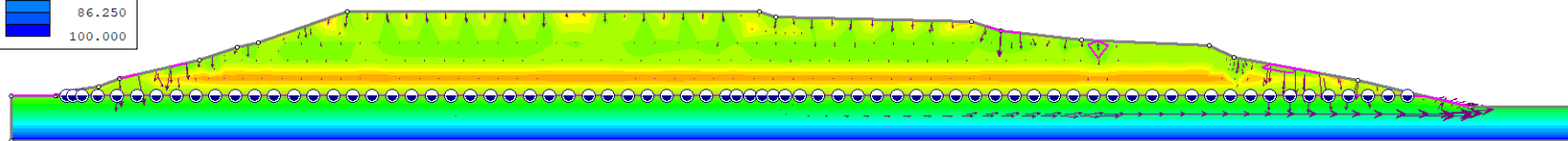
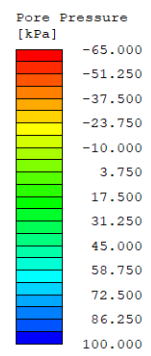
Flujo día 3



Flujo día 4

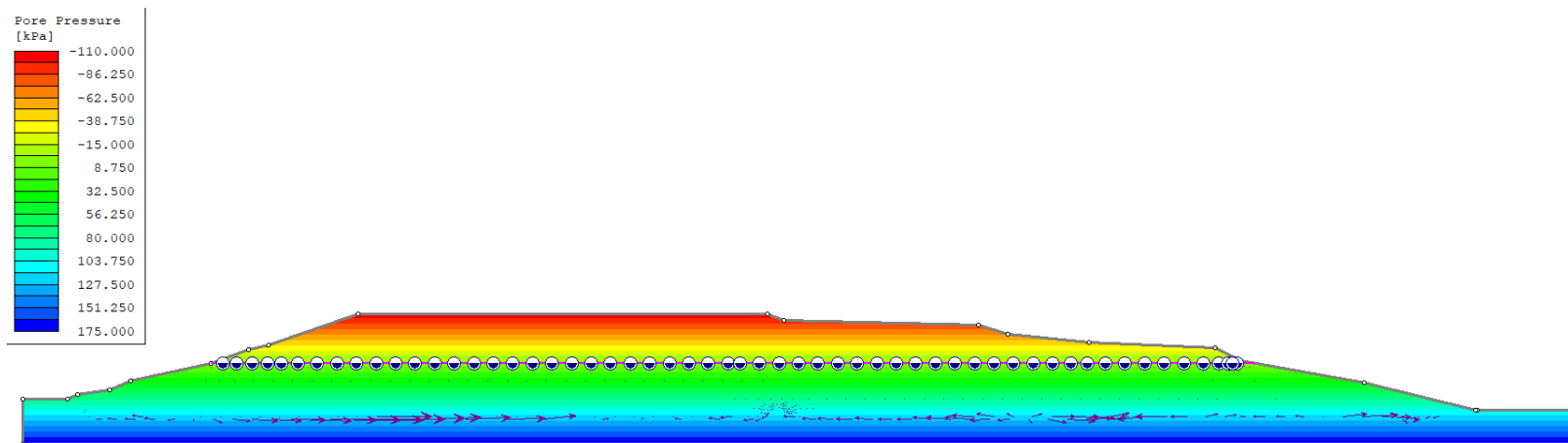


Flujo día 5

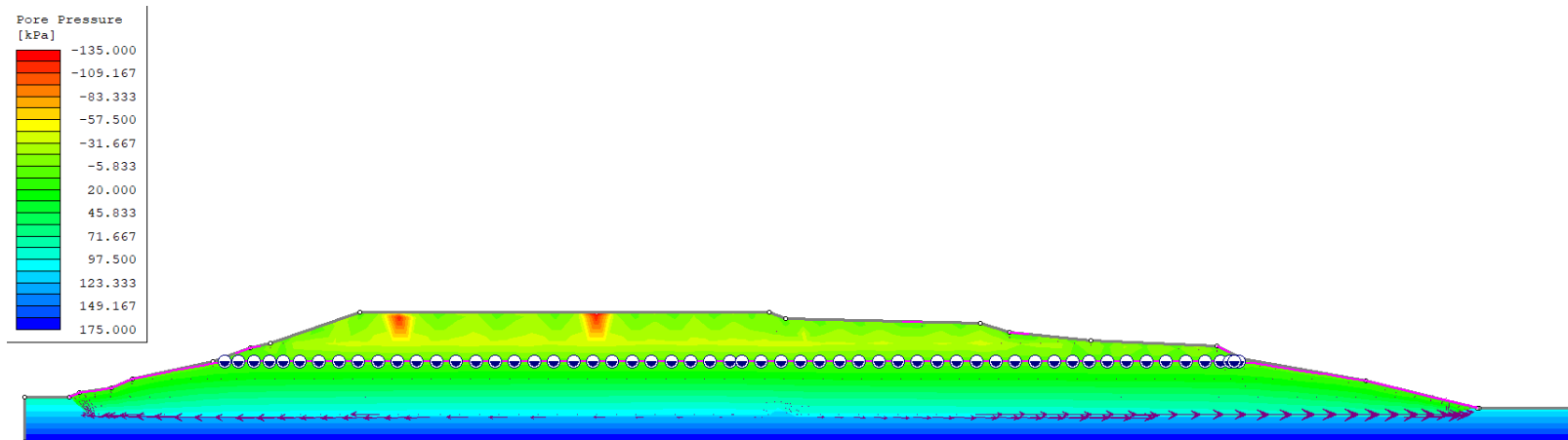


Flujo transitorio nivel 3

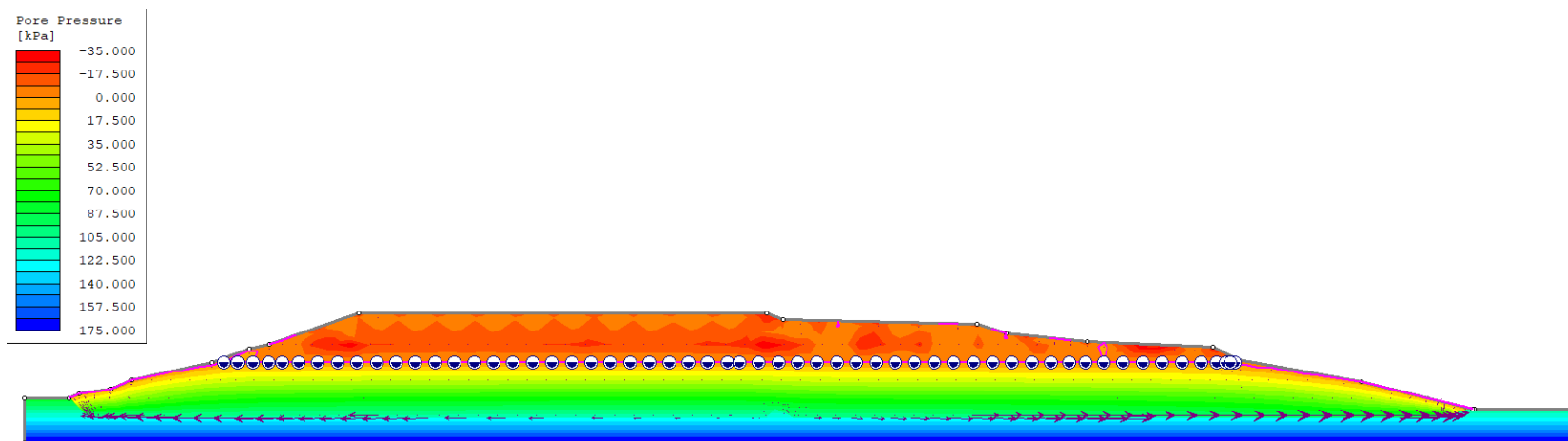
Condición inicial



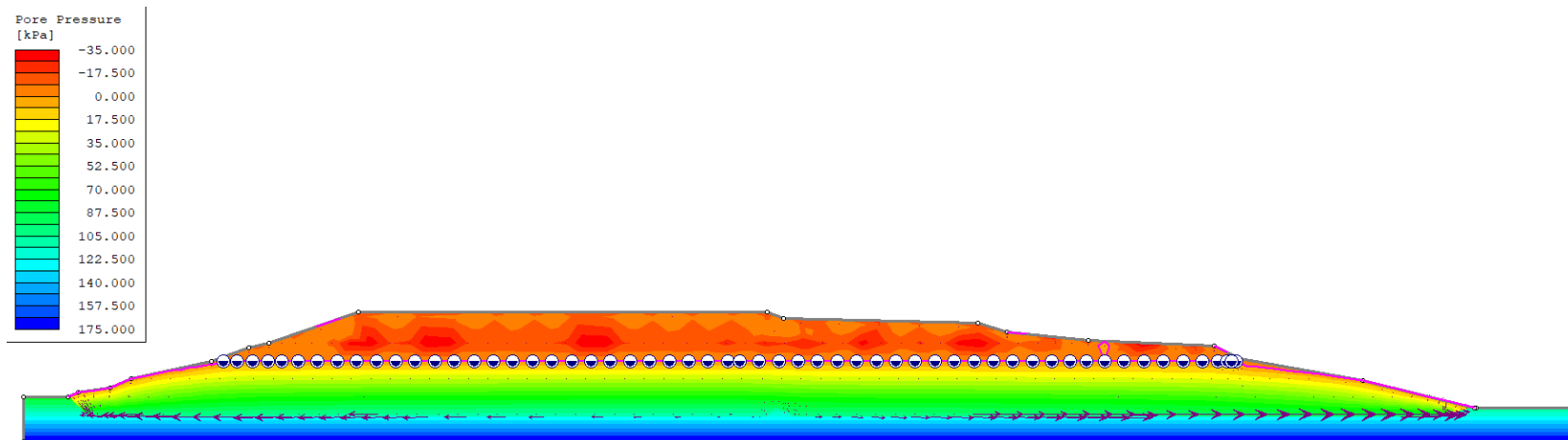
Flujo día 1



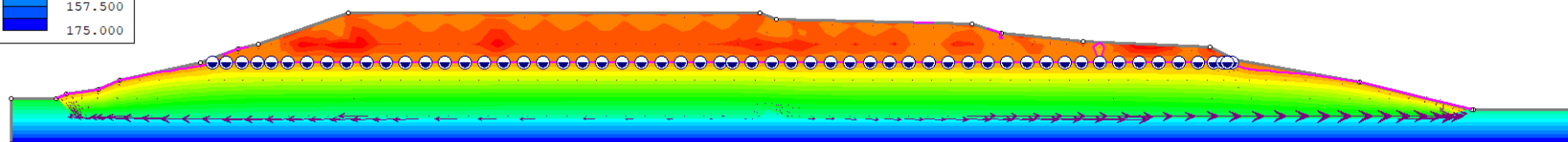
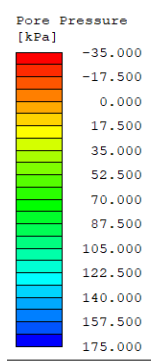
Flujo día 2



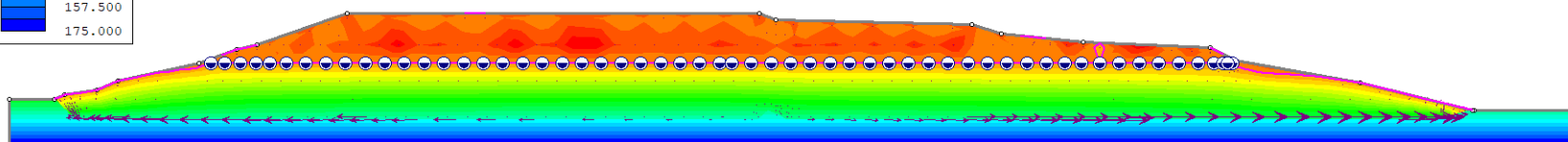
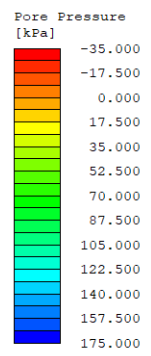
Flujo día 3



Flujo día 4



Flujo día 5



Anexos

Anexo 1. Características de materiales preestablecidos en el modelo HELP

HELP Texture No.	Description	General Material Type	USDA Texture Class	USCS Texture Class	Total Porosity (vol/vol)	Field Capacity (vol/vol)	Wilting Point (vol/vol)	Saturated Hydraulic Conductivity (cm/sec)
1	Coarse Sand	Soil - Low Density	CoS	SP	0.417	0.045	0.018	1.00E-02
2	Sand	Soil - Low Density	S	SW	0.437	0.062	0.024	5.80E-03
3	Fine Sand	Soil - Low Density	FS	SW	0.457	0.083	0.033	3.10E-03
4	Loamy Sand	Soil - Low Density	LS	SM	0.437	0.105	0.047	1.70E-03
5	Loamy Fine Sand	Soil - Low Density	LFS	SM	0.457	0.131	0.058	1.00E-03
6	Sandy Loam	Soil - Low Density	SL	SM	0.453	0.190	0.085	7.20E-04
7	Fine Sandy Loam	Soil - Low Density	FSL	SM	0.473	0.222	0.104	5.20E-04
8	Loam	Soil - Low Density	L	ML	0.463	0.232	0.116	3.70E-04
9	Silty Loam	Soil - Low Density	SiL	ML	0.501	0.284	0.135	1.90E-04
10	Sandy Clay Loam	Soil - Low Density	SCL	SC	0.398	0.244	0.136	1.20E-04
11	Clay Loam	Soil - Low Density	CL	CL	0.464	0.310	0.187	6.40E-05
12	Silty Clay Loam	Soil - Low Density	SiCL	CL	0.471	0.342	0.210	4.20E-05
13	Sandy Clay	Soil - Low Density	SC	SC	0.43	0.321	0.221	3.30E-05
14	Silty Clay	Soil - Low Density	SiC	CH	0.479	0.371	0.251	2.50E-05
15	Clay (Low Density)	Soil - Low Density	C	CH	0.475	0.378	0.265	1.70E-05
16	Liner Soil (High)	Soil - High Density	---	---	0.427	0.418	0.367	1.00E-07
17	Bentonite (High)	Soil - High Density	---	---	0.75	0.747	0.400	3.00E-09
18	Municipal Solid Waste (MSW) (900 pcy)	Waste	---	---	0.671	0.292	0.077	1.00E-03
19	MSW with Channeling	Waste	---	---	0.168	0.073	0.019	1.00E-03
20	Drainage Net (0.5 cm)	Geosynthetic drainage net	---	---	0.850	0.010	0.005	1.00E+01
21	Gravel	Soil - Low Density	G	GP	0.397	0.032	0.013	3.00E-01

HELP Texture No.	Description	General Material Type	USDA Texture Class	USCS Texture Class	Total Porosity (vol/vol)	Field Capacity (vol/vol)	Wilting Point (vol/vol)	Saturated Hydraulic Conductivity (cm/sec)
22	Loam (Moderate)	Soil - Moderate Density	L	ML	0.419	0.307	0.180	1.90E-05
23	Silty Loam(Moderate)	Soil - Moderate Density	SiL	ML	0.461	0.360	0.203	9.00E-06
24	Sandy Clay Loam (Moderate)	Soil - Moderate Density	SCL	SC	0.365	0.305	0.202	2.70E-06
25	Clay Loam (Moderate)	Soil - Moderate Density	CL	CL	0.437	0.373	0.266	3.60E-06
26	Silty Clay Loam (Moderate)	Soil - Moderate Density	SiCL	CL	0.445	0.393	0.277	1.90E-06
27	Sandy Clay (Moderate)	Soil - Moderate Density	SC	SC	0.4	0.366	0.288	7.80E-07
28	Silty Clay (Moderate)	Soil - Moderate Density	SIC	CH	0.452	0.411	0.311	1.20E-06
29	Clay (Moderate)	Soil - Moderate Density	C	CH	0.451	0.419	0.332	6.80E-07
30	High-Density Electric Plant Coal Fly Ash	Waste	---	---	0.541	0.187	0.047	5.00E-05
31	High-Density Electric Plant Coal Bottom Ash	Waste	---	---	0.578	0.076	0.025	4.10E-03
32	High-Density MSW Fly Ash	Waste	---	---	0.450	0.116	0.049	1.00E-02
33	High-Density Copper Slag	Waste	---	---	0.375	0.055	0.020	4.10E-02
34	Drainage Net (0.6 cm)	Geosynthetic drainage net	---	---	0.850	0.010	0.005	3.30E+01
35	HDPE Membrane	Geomembrane liner	---	---				2.00E-13
36	LDPE Membrane	Geomembrane liner	---	---				4.00E-13
37	PVC Membrane	Geomembrane liner	---	---				2.00E-11
38	Butyl Rubber Membrane	Geomembrane liner	---	---				1.00E-12

HELP Texture No.	Description	General Material Type	USDA Texture Class	USCS Texture Class	Total Porosity (vol/vol)	Field Capacity (vol/vol)	Wilting Point (vol/vol)	Saturated Hydraulic Conductivity (cm/sec)
39	Chlorinated Polyethylene (CPE) Membrane	Geomembrane liner	---	---				4.00E-12
40	Hypalon or Chlorosulfonated Polyethylene (CSPE) Membrane	Geomembrane liner	---	---				3.00E-12
41	Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM) Membrane	Geomembrane liner	---	---				2.00E-12
42	Neoprene Membrane	Geomembrane liner	---	---				3.00E-12

Anexo 2. Levantamiento topográfico de relleno sanitario