Universidad Nacional de Colombia
SEDE MEDELLÍN

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y DE INFILTRACIÓN DEL "MORRO DE BASURAS" DEL BARRIO MORAVIA EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN.

DIEGO IVÁN GALEANO PARRA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA – GEOTECNIA

MEDELLÍN, 2013

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y DE INFILTRACIÓN DEL "MORRO DE BASURAS" DEL BARRIO MORAVIA EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN.

DIEGO IVÁN GALEANO PARRA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MAGÍSTER EN INGENIERÍA – GEOTECNIA

DIRECTOR

HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL. Ph.D.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA – GEOTECNIA

MEDELLÍN, 2013

Medellín / Colombia: Marzo de 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULDADE DE MINAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y DE INFILTRACIÓN DEL "MORRO DE BASURAS" DEL BARRIO MORAVIA EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN.

DIEGO IVÁN GALEANO PARRA

TESIS DE MAESTRÍA PRESENTADA AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL DE LA FACULTAD DE MINAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA COMO PARTE DE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAESTRO EN GEOTECNIA.

APROBADA POR:

_____
HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc., UnB
(ORIENTADOR)

_____
LUDGER OSWALDO SUÁREZ BURGOA, DSc., UnB
(EXAMINADOR INTERNO)

_____
GREGÓRIO LUIS SILVA ARAÚJO, DSc. UnB
(EXAMINADOR EXTERNO)

_____

CARLOS ANDRÉS ORDOÑEZ ANTE, MSC. UN
(EXAMINADOR EXTERNO)

FECHA: MEDELLIN, 11 de Marzo de 2013.

FICHA BIBLIOGRAFICA

Galeano-Parra, Diego Iván
ANÁLISIS DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y DE INFILTRACIÓN DEL "MORRO DE BASURAS" DEL BARRIO MORAVIA EN LA CIUDAD DE MEDELLIN.
Departamento de Ingeniería Civil/Minas/Universidad Nacional de Colombia, Maestro, Geotecnia, 2013
Tesis de Maestría - Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas
Departamento de Ingeniería Civil

1. Morro de Moravia	2. Geotecnia de Resíduos Sólidos Urbanos
3. Geotecnia Ambiental	4. Estabilidad de Taludes en RSU

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

GALEANO-PARRA, D.I. (2013). Análisis de parámetros geotécnicos y de infiltración del "Morro de Basuras" Del barrio Moravia en la ciudad de Medellín. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 88p.

AGRADECIMIENTOS

A mi Familia por el apoyo y gran motivación.

Agradezco al Profesor Hernán Eduardo Martínez Carvajal de manera especial, por su orientación, apoyo y disposición en mi estadía en Brasil y en el desarrollo del presente trabajo.

A los profesores del programa de Maestría en Geotecnia, en especial al profesor Oscar Echeverri y Yamile Valenacia.

A los jurados, profesores Ludger Suarez Burgoa, Gregório Luis Silva y Carlos Andres Ordoñez, por sus sugerencias para mejorar este trabajo.

Al Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá, (SIATA), y al Departamento de Hidrometría e Instrumentación de las Empresa Públicas de Medellín, por el suministro de los registros meteorológicos.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en ensayos de carga axial en micro pilotes, determinando su validez y confiabilidad a partir de la comparación de estos con los parámetros de resistencia reportados en la literatura técnica determinados en ensayos *in situ* en condiciones similares, obteniendo los parámetros de resistencia mecánica que gobiernan el comportamiento global del Morro de basuras, estableciendo un ángulo de fricción de 30° y una cohesión de 5 kPa.

Se implementó el modelo Help 3.9D (*Hydrology Evaluation Leachate Performance*) estimando las variables hidrogeológicas involucradas en balance hídrico global, cuantificando los volúmenes de lixiviados y escorrentía superficial y evaluando la eficiencia de un sistema de sellado óptimo que reduzca el volumen de lixiviados y permita un aspecto agradable.

Mediante el programa de elementos finitos Plaxis, se corrigió la formulación propuesta por Brinch - Hansen para el factor de capacidad de carga N_γ en cimentaciones superficiales, con el fin encontrar una formulación aplicable a los materiales que constituyen el morro de basuras de Moravia.

Se ejecutaron ensayos en la parcela piloto de medición infiltración – escorrentía, determinando el caudal de percolación y su influencia en el la estabilidad de las laderas del Morro de basuras, realizando el análisis de estabilidad por el Método de falla plana.

ABSTRACT

In this paper we present the results of axial load tests on micropiles, determining their validity and reliability upon the comparison of these with the strength parameters reported in the literature on certain "in situ" test in similar conditions. It was obtained the obtaining strength parameters that govern the behavior of the garbage Morro overall, setting a friction angle of 30 ° and a cohesion of 5 kPa.

It was used the Help 3.9D program to estimate the hydrogeological variables involved in the overall water balance, quantifying the volumes of leachate and surface runoff, and evaluating the efficiency of an optimal sealing system that reduces the volume of leachate and allow a pleasing appearance.

Using the finite element method program Plaxis, it was corrected the formulation proposed by Brinch - Hansen for the capacity factor Nγ in shallow foundations, in order to be used test in to the materials that conforms the nose of garbage.

Test were conducted the pilot parcel for measuring the infiltration runoff, and it was determined determining the percolation rate and its influence on the stability of the slopes of the hill of garbage, by using the planar stability method.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 GENERALIDADES 1

1.2 JUSTIFICACIÓN 2

1.3 OBJETIVOS 3

1.3.1 OBJETIVO GENERAL 3

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 3

1.4 METODOLOGÍA 3

1.4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. 3

1.4.2 OBTENCIÓN DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL MORRO DE BASURAS DE MORAVIA 4

1.4.3 DISEÑO Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE CARGA EN MICROPILOTES. 4

1.4.4 DISEÑO Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN PARCELA PILOTO 4

1.4.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS Y TALUDES EN MORAVIA 4

1.4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS 5

1.5 ORGANIZACIÓN DEL ESCRITO 5

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO 6

2.1 RECUENTO HISTÓRICO 6

2.2 ANTECEDENTES 11

2.2.1 ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACION DEL MORRO DE MORAVIA: FASE 1 (2009) 11

2.2.2 DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL ÁREA DE MORAVIA (INTEGRAL, 2000). 12

2.2.3 EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL BARRIO MORAVIA EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN (IEI, 2005). ... 12

2.2.4 ESTUDIO DE COBERTURA LOCAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN. (FERNANDES, 2012) 13

3 MARCO TEÓRICO 14

3.1 ESTABILIDAD DE TALUDES. 14

3.2 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS EN RELLENOS SANITARIOS....14

3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS....16

3.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD....16

3.3.2 PESO UNITARIO TOTAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS....17

3.3.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA....19

3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS....21

3.4.1 RESISTENCIA AL CORTE DE LOS RSU....21

4 PRUEBAS DE CARGA EN MICROPILOTES....26

4.1.1 ENSAYO DE COMPRESION AXIAL SOBRE PILOTES....26

4.2 METODOLOGIA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL EN MICROPILOTES....27

4.2.1 EQUIPO UTILIZADO....27

5 EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN....34

5.1 BALANCE HÍDRICO....36

5.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS DEL SITIO DE ESTUDIO....36

5.2.1 PRECIPITACIÓN....37

5.2.2 TEMPERATURA....38

5.2.3 RADACIÓN SOLAR....39

5.2.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN....40

5.2.5 CURVAS IDF....41

5.2.6 ESCORRENTÍA....42

5.3 MODELACIÓN HIDROLOGICA UTILIZANDO EL MODELO HELP....43

5.3.1 INFORMACIÓN REQUERIDA POR EL MODELO HELP....44

6 ESTABILIDAD DE TALUDES....46

7 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS....49

7.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA Y DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL MORRO DE BASURAS....49

7.1.1 HISTOGRAMA 53

7.2 MODELACIÓN EN HELP 3.9 D 55

7.2.1 INFORMACIÓN UTILIZADA.....55

7.2.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO. 57

7.2.3 SIMULACIÓN. 59

7.3 PARCELA PILOTO DE MEDICIÓN.....62

7.4 CALIBRACIÓN FACTOR NΥ 63

7.5 ESTABILIDAD DE TALUDES. 68

8 CONCLUSIONES 70

8.1 CONCLUSIONES SOBRE APLICACIÓN DEL MODELO HELP 3.9D. 70

8.2 CONCLUSIONES SOBRE CAPACIDAD DE CARGA 70

8.3 CONCLUSIONES SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES 71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. HUMEDADES REPORTADAD EN LA LITERATURA, MACHADO (2002) 17

FIGURA 2 PERFIL PESO UNITARIO ZEKKOS (2006).....18

FIGURA 3. MAPA DE PERMEABILIDAD MORRO DE BASURAS MORAVIA.....20

FIGURA 4. CORRELACIONES PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA, SIMAO (2011) 22

FIGURA 5 COHESIÓN CONTRA ÁNGULO DE FRICCIÓN, VALORES REPORTADOS EN LA LITERATURA. 25

FIGURA 6. ESQUEMA PRUEBA COMPRESIÓN AXIAL, DAS (2006) 27

FIGURA 7 LOCALIZACIÓN ENSAYOS DE CARGA AXIAL SOBRE PILOTES EN EL MORRO DE BASURAS DE MORAVIA. 29

FIGURA 8 REALIZACIÓN DE PERFORACIONES PARA CONSTRUCCIÓN DE PILOTES DE REACCIÓN Y PILOTES A ENSAYAR. 32

FIGURA 9 ENCAMISADO DE LAS PERFORACIONES CON TUBO SANITARIO Ø = 4" 32

FIGURA 10 VACIADO DE PILOTES A UTILIZAR EN LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL Y PILOTES LATERALES. 32

FIGURA 11 PILOTES LATERALES QUE GARANTICEN UNA ADECUADA CAPACIDAD DE REACCIÓN.....32

FIGURA 12 INSTALACIÓN DE VIGA METÁLICA SOBRE PILOTES DE REACCIÓN.....33

FIGURA 13 INSTALACIÓN DE GATO Y BOMBA HIDRÁULICA SOBRE PILOTE CENTRAL.....33

FIGURA 14 VIGA DE REFERENCIA. 33

FIGURA 15 MONTAJE FINAL DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL SOBRE PILOTES. 33

FIGURA 16 PANORÁMICA PARCELA PILOTO 34

FIGURA 17 LOCALIZACIÓN EN PLANTAPARCELA PILOTO DE MEDICIÓN. 35

FIGURA 18 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN 2001 - 2011.....37

FIGURA 19 CICLO ANUAL DE PRECIPITACIÓN.....38

FIGURA 20 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA 2008 - 2011 38

FIGURA 21 MAPA DE TEMPERATURA MEDIA, ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACIÓN DEL MORRO DE MORAVIA: FASE I (2008) 39

FIGURA 22 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA RADIACIÓN SOLAR (2008 - 2011) 40

FIGURA 23 CURVA IDF ZONA DE ESTUDIO 42

FIGURA 24 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE VOLUMEN ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.....43

FIGURA 25 FUERZAS ACTUANTES EN UN BLOQUE DE SUELO, LADE (2010). 46

FIGURA 26 FUERZAS HIDRODINAMICAS ACTUANTES EN EL TALUD. 48

FIGURA 27 CURVA CARGA CONTRA ASENTAMIENTO DE PILOTES ENSAYADOS. 49

FIGURA 28 PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA PARA DISEÑO EN RELLENOS SANITARIOS (PALMA, 1995). 51

FIGURA 29 HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE QU. 53

FIGURA 30 DIAGRAMA CUANTIL-CUANTIL 54

FIGURA 31 GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN EMPÍRICA.....55

FIGURA 32 LETURAS PIEZOMETRICAS RELACIONANDO PROFUNDIDAD Y TIEMPO, ESTUDIO PILOTO PARA LARECUPERACIÓN DEL MORRO DE MORAVIA (2008).....58

FIGURA 33 LIXIVIADOS SIMULADOS EN MODELO HELP 3.9D 59

FIGURA 34 VOLUMEN DE LIVIVIADOS SIMULADOS EN HELP 3.9D 60

FIGURA 35 VARIACIÓN VOLUMEN DE ESCORRENTIA 61

FIGURA 36 VARIACIÓN VOLUMEN DE LIXIVIADOS 62

FIGURA 37 CAUDALES DE PERCOLACIÓN VS PROFUNDIDAD. 63

FIGURA 39 COMPARACIÓN FACTOR Nγ NUMÉRICO Y ANALÍTICO.....66

FIGURA 40 COMPARACIÓN FACTOR Nγ ANALITICO Y NUMERICO CORREGIDO. 67

FIGURA 41 RESULTADOS ENSAYOS DE CARGA DE PLACA, ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACIÓN DE MORAVIA, FASE I (2008) 68

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (BOTERO 1999) 15

TABLA 2 PESOS UNITARIOS EN FUNCIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN FASSETT ET AL (1994) 18

TABLA 3. PARÁMETROS DE RESISTENCIA OBTENIDOS POR DIFERENTES AUTORES.....23

TABLA 4 INFORMACIÓN ESTACIÓN PLUVIOMETRICA.....37

TABLA 5 VALORES DE C, H Y M, ESTACIÓN MIGUEL DE AGUINAGA 41

TABLA 6 INFORMACIÓN Y RESULTADOS PILOTES ENSAYADOS A CARGA AXIAL.....50

TABLA 7 MEDIDAS ESTADÍSTICAS. 51

TABLA 8 RESUMEN MEDIDAS ESTADISTICAS.....52

TABLA 9 INFORMACIÓN CLIMATICA. 56

TABLA 10 INFORMACIÓN RELLENO SANITARIO 56

TABLA 11 VALORES INGRESADOS EN EL MODELO 59

TABLA 12 PARAMETROS COBERTURA.....60

TABLA 13 PARAMETROS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN 65

TABLA 14 CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA 66

TABLA15 FACTOR DE CORRECCIÓN.....66

TABLA 16 PROPIEDADES GEOTECNICAS. 68

TABLA 17 INFORMACIÓN DE TALUDES ANALISADOS. 69

TABLA 18 FACTORES DE SEGURIDAD CON EMPUJE HIDRODINAMICO.....69

1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En el Barrio Moravia desde el año 1977 se dispusieron de forma poco técnica desechos orgánicos y residuos sólidos de todo tipo, colocándose a cielo abierto y sin ningún tratamiento. El objetivo inicial del proyecto fue la construcción de un relleno sanitario, pero jamás se adelantaron los estudios ni los pasos pertinentes para lograrlo. Al ser arrojados allí la zona se convirtió en un foco de contaminación para la ciudad, y con el tiempo los desechos sólidos formaron una montaña la cual aumentaba progresivamente su altura con la acumulación de las casi 500 toneladas diarias, alcanzando aproximadamente 40 metros y generando un problema social de grandes proporciones en sus alrededores.

El plan de ordenamiento territorial (2006) en su artículo 30 clasifica el morro de basuras del Barrio Moravia como una zona tipo D, "*Áreas con restricciones geológicas severas (inestables no utilizables).* En virtud de lo anterior, el área Metropolitana del Valle de aburra AMVA, emprendió un proyecto que buscó mejorar las condiciones ambientales en el sector, denominado como "Recuperación ambiental del Morro de basuras de Moravia", a partir del cual surgieron una serie de estudios que contemplan el comportamiento geotécnico de los materiales constitutivos del mismo.

A nivel mundial se han presentado fallas en distintos rellenos sanitarios urbanos, entre los más destacados por Landva (2012) se encuentra la falla del Relleno Sanitario de Doña Juana, Bogotá - Colombia en 1997; Falla del relleno sanitario Ümbaniye, Estambul - Turquia en 1993; falla del Relleno Sanitario de Payatas en Manila – Filipinas en 2000; falla Relleno Sanitario de Bandung en Indonesia, en 2000, todas estas causadas principalmente por pendientes excesivas, disposición de residuos con procedimientos técnicos inadecuados o instrumentación insuficiente.

Obtener las propiedades mecánicas de los residuos sólidos que conforman el morro de basura de Moravia, al igual que sus características de infiltración, así como elaborar un retro-análisis mediante un programa de elementos finitos que permita un mejor entendimiento de dichos materiales, fue el tema a investigar del presente trabajo, lo anterior, con el propósito de entregar insumos adecuados para la ejecución de futuros proyectos de remediación de esta importante área de la ciudad y, tal como acaba de ser indicado, mejorar el

nivel de conocimiento sobre el comportamiento geotécnico de residuos sólidos urbanos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la ciudad de Medellín, específicamente en el Sector del Barrio Moravia se realizó la disposición de desecho sólidos por más de 20 años, generando que este sector se convirtiera en un sitio de asentamiento urbano principalmente de recicladores. La forma y procedimiento de acumulación de estas basuras se realizó de manera variable y aleatoria en algunos sectores, por lo cual el material generado no corresponde rigurosamente a los principios de análisis de la geotecnia tradicional, utilizada para tipos de suelos residuales o transportados. Por lo tanto se debe afrontar el problema de una manera diferente, iniciando con una identificación de parámetros básicos como si éstos fueran equivalentes a los de un suelo convencional. Posteriormente se evalúa el comportamiento mecánico del Morro mediante análisis de estabilidad de taludes y se hacen las comparaciones con los resultados de la instrumentación ya instalada en el sitio. Con retro-análisis de pruebas de campo (ensayos en micro pilotes) se calibración los parámetros encontrados. De manera complementaria se hace un estudio del comportamiento hidrogeológico del Morro relacionado con el componente de infiltración superficial, con el propósito de incorporar el efecto del flujo de agua en el comportamiento geotécnico global.

El estudio de la estabilidad de los rellenos sanitarios hace parte de la denominada geotecnia ambiental, en la cual uno de los temas de estudio es la construcción, operación y utilización de rellenos sanitarios como estructura de cimentación para estructuras livianas. En el caso de la tesis que se propone, se estudiará su estabilidad ante la generación de cortes generando taludes que se mantengan estables y se traten de una manera acorde con el medio ambiente.

Este estudio aportará datos y análisis a esta rama de la ingeniería civil y la geotecnia haciendo más comprensible el comportamiento de estos Residuos Sólidos Urbanos (RSU) para futuras disposiciones de los mismos o para tratamiento de los ya existentes. Además con él se aportará a los elementos de diseño en cuanto al entendimiento de las propiedades de los rellenos sanitarios.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener y analizar los parámetros de resistencia mecánica de los materiales del Morro de Moravia a partir de retro-análisis de ensayos de carga *in situ* en micropilotes; y parámetros de infiltración a partir de microparcelas piloto de infiltración-escorrentía.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar y monitorear ensayos de infiltración en una parcela piloto de medición de infiltración-escorrentía para obtener parámetros hidrogeológicos y eventualmente conocer el efecto de la infiltración en el comportamiento mecánico del morro de basuras.
- Estimar el caudal remanente de infiltración que se convertiría en lixiviados usando la parcela piloto de medición.
- Diseñar, ejecutar y analizar ensayos de carga *in situ* en micro pilotes con el propósito de estimar parámetros de resistencia mecánica y de deformabilidad de los materiales constitutivos del morro de basuras.
- Analizar las condiciones de equilibrio del morro de Basuras de Moravia a partir de los datos obtenidos en los ensayos de carga y ensayos de infiltración.
- Estimar los parámetros generales del comportamiento mecánico del morro de basuras de Moravia una vez estimados los parámetros de resistencia y las características de infiltración, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de campo y los resultados obtenidos del modelo ejecutado en el programa de elementos finitos PLAXIS.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología que se describe a continuación propone un procedimiento que evalúa las condiciones de estabilidad del morro de basuras de Moravia, basado en el análisis de los parámetros de resistencia e infiltración.

1.4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Revisión bibliográfica de los parámetros involucrados en los análisis de estabilidad de rellenos sanitarios y la metodología para obtenerlos. Se revisarán todas las referencias locales e internacionales de mayor relevancia sobre el tema.

1.4.2 OBTENCIÓN DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL MORRO DE BASURAS DE MORAVIA

El levantamiento topográfico del Morro de basuras se encuentra disponible en el Instituto de Estudios de Infraestructura de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Se realizó la actualización, revisión y corrección de errores de digitación, elevación y georreferenciación.

1.4.3 DISEÑO Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE CARGA EN MICROPILOTES.

Se realizaron tres ensayos de compresión axial sobre pilotes de 2,50 m. Su ejecución produjo los datos necesarios para la obtención de parámetros de resistencia y deformabilidad de los materiales constitutivos del Morro. Los ensayos se realizaron en una ladera previamente seleccionada y fueron extrapolados al resto del Morro. Lo anterior debido a la imposibilidad de realizar ensayos en otras laderas.

1.4.4 DISEÑO Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN PARCELA PILOTO.

Se construyó una parcela piloto de medición infiltración vs escorrentía, ubicadaen el costado sur oriental, en una ladera seleccionada dentro del Morro de Moravia, instrumentada con medidores de precipitación y dispositivos para medición de escorrentía en varios niveles hasta una profundidad de 0,60m. La cuantificación de la infiltración sirvió para estimar la tasa de producción de lixiviados del Morro. Debido a la imposibilidad de realizar mediciones en diferentes laderas se extrapolan los resultados a toda el área de estudio.

1.4.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS Y TALUDES EN MORAVIA

Los análisis de estabilidad de las laderas de Moravia se realizaron usando los parámetros obtenidos en los ensayos de carga, ensayos de infiltración y parámetros que se encuentren reportados en la literatura.

1.4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis crítico de los resultados obtenidos y de las limitaciones de los métodos usados. Comparación de los resultados obtenidos con los reportados en la literatura y con las observaciones de campo.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL ESCRITO

El documento que se presenta a continuación contiene el resultado del desarrollo de los objetivos planteados y se encuentra dividido en seis capítulos.

Capítulo 1: se presentan los objetivos planteados e introducción.

Capítulo 2: denominado estado del conocimiento, se presenta la revisión bibliográfica de diferentes estudios realizados en el Morro de Basuras del Barrio Moravia y estudios publicados a nivel mundial.

Capítulo 3: se exponen los procedimientos utilizados por diversos investigadores del tema para obtener los parámetros necesarios para caracterizar los residuos sólidos.

Capítulo 4, se presenta el procedimiento desarrollado y el equipo utilizado en la ejecución de ensayos de carga axial sobre pilotes.

Capítulo 5, presenta la metodología empleada en la realización de los ensayos en la parcela piloto de medición infiltración-escorrentía y el procedimiento necesario para la obtención de las variables hidrológicas involucradas.

Capítulo 6, se presenta el procedimiento utilizado para el análisis de estabilidad de taludes y las propiedades geotécnicas utilizadas.

Capítulo 7, se presentan los resultados y análisis de los ensayos realizados.

Capítulo 8, se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del trabajo.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En la búsqueda del estado del conocimiento del problema se han encontrado diferentes autores que estudiaron la estabilidad de los rellenos sanitarios urbanos, evaluando los parámetros que influyen en su comportamiento, los cuales se relacionan a continuación.

2.1 RECUENTO HISTÓRICO

A continuación se presentan los estudios publicados por diferentes investigadores que contribuyen a la adecuada selección de parámetros y el entendimiento del comportamiento geotécnico de los RSU, indispensable para el correcto análisis global de estabilidad de los rellenos sanitarios.

Reddy et al (2008) presentaron los resultados del análisis de las propiedades geotécnicas de residuos sólidos urbanos frescos en Orchard Hills, EE.UU. se realizaron ensayos de compactación, ensayos de conductividad hidráulica en condiciones de gradiente constante, ensayos de compresibilidad compactando el material en un anillo de 63 mm de diámetro y 27 mm de altura; añadiendo lixiviados para obtener diferentes contenidos de humedad, ensayos de corte directo y triaxiales consolidados no drenados. Encontraron que:

- los valores de cohesión obtenidos en las pruebas de corte directo sobre RSU frescos varían entre 31 y 64 kPa, el ángulo de fricción drenado varía de 26 a 30°, mostrando que dichos parámetros no tienen correlación con el contenido de humedad;
- los ensayos realizados en permeámetros de pared rígida muestran como la conductividad hidráulica disminuye con el aumento de la densidad seca de los RSU frescos;
- la cohesión en los RSU se debe a la presencia de materia orgánica biodegradable;
- la relación de compresión no mostró aumento o disminución respecto a la variación de humedad, lo cual concuerda con investigaciones como las realizadas por Vilar y Carvalho (2004).

Bogner et al (2011) investigaron las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos urbanos en diferentes fases de la biodegradación conformando muestras en el laboratorio, con un contenido de 40% de material biodegradable y 60% de material no biodegradable. Para acelerar el proceso de degradación se añaden lixiviados y digestores anaeróbicos y el control de la degradación se realizó midiendo el volumen y pH de los lixiviados generados.

Se realizaron ensayos de consolidación con muestras compactadas en dos capas, con pesos unitarios entre 8,6 a 16,9 kN m^{-3}, ensayos de corte directo en muestras compactadas con pesos unitarios entre 11,2 y 16,2 kN/m^{-3}, ensayo triaxial consolidado no drenado (CU) con diámetro de 50 mm y peso unitario que va desde 11,1 kN m^{-3} hasta 17,1 kN m^{-3}. Se estableció que:

- la conductividad hidráulica es inversamente proporcional al grado de descomposición de los RSU, variando de $1{,}4x10^{-5}$ cm s^{-1} para muestras frescas a $8{,}3x10^{-9}$ cm s^{-1} para muestras degradadas.
- los parámetros de resistencia al corte varían según la edad de los residuos sólidos urbanos con valores de cohesión entre 1 kPa y 40 kPa y de 34° a 28° para el ángulo de fricción interna, contrario a los datos publicados en la literatura, la razón principal de esta variación se debe a la selección del material ensayado.
- en las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU), para esfuerzos totales la cohesión varía entre 21 kPa y 57 kPa y el ángulo de fricción interna varia de 1 a 9°; para esfuerzos efectivos, la cohesión se encontró entre 18 kPa y 56 kPa, y el ángulo de fricción oscila de 1° a 11°, lo cual es contrario a datos encontrados en la literatura.

Reddy et al (2009) proponen un modelo constitutivo para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de los RSU. Realizaron ensayos de consolidación y corte sobre muestras frescas de RSU con edades de 1,5 años y composición controlada. El modelo pretende evaluar la estabilidad y deformación de los rellenos sanitarios en etapas posteriores a su clausura.

Para el desarrollo del modelo constitutivo propuesto para los RSU se desarrollaron los siguientes supuestos:

El material tiene un comportamiento elasto – plástico; la respuesta esfuerzo – deformación de los RSU se rige por la naturaleza fibrosa de los RSU, el tiempo de degradación biológica se rige por lo propuesto por Park y Lee (1997), la consolidación secundaria está gobernada por el modelo propuesto por Gibson y de Min (1961).

Los parámetros de entrada son: el índice de compresión, el índice de recompresión y coeficiente de fluencia mecánica. Los ensayos demostraron que el modelo constitutivo propuesto para RSU representa la respuesta adecuada esfuerzo – deformación de los RSU.

Zekkos et al (2012) presentan los resultados de pruebas triaxiales a gran escala en 27 muestras de diámetro igual a 300mm y altura entre 600 mm y 630mm en un relleno sanitario ubicado en la bahía de San Francisco al norte

de california (EE.UU.). Las pruebas fueron realizadas por Zekkos en el año 2005, se seleccionaron tres grupos de residuos caracterizándolos según su profundidad, porcentaje de peso menor a 20 mm, contenido de humedad, Contenido de materia orgánica y edad. Se controló la composición de los residuos, esfuerzo de confinamiento, peso específico y velocidad de carga.

Las muestras utilizadas se reconstituyeron con el fin de minimizar la incertidumbre y variabilidad de los residuos, se moldearon en capas dejando caer un peso de 100 N repetidamente desde una altura constante para conseguir un peso unitario definido. No se le dio una orientación determinada a los residuos en el molde.

Se encontró que las partículas fibrosas mayores que 20 mm tienden a alinearse con los ejes longitudinales de la muestra con una orientación casi horizontal; el ángulo de fricción varía desde 34° a 44° con un valor de 39° como la mejor estimación, tomando la cohesión igual a 0, las muestras se encontraban con humedades naturales del orden de 12% a 23%, donde el efecto de la humedad y degradación en la resistencia al corte no se investigó en aquel estudio.

Dixon et al (2005) desarrollaron un sistema de clasificación de residuos sólidos urbanos para la evaluación de las propiedades mecánicas más completo a los propuestos por Landva y Clark (1990), Grisolia et al (1995), Kolsh (1996), Manassero et al (1997), Thomas et al (1999); estos últimos que no cumplen los requisitos para una clasificación geotécnica, los elementos propuestos por Dixon y Langer para el sistema de clasificación se basa en:

- el tipo de material: orgánico, papel, madera, plástico, metales, polímeros entre otros;
- las propiedades mecánicas de los materiales: resistencia al corte, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad;
- La forma de los componentes, donde se proponen dos grupos: componente de refuerzo (2D) y componente compresible (3D).
- Del tamaño de los componentes en diferentes rangos (<8mm, 8mm-40mm, 40mm-120mm, 120mm-500mm, 500mm-1000mm y > 1000mm);
- La degradación de los componentes: fácil, difícil, muy difícil no degradable.

Se considera el estado de los materiales en diferentes estados de biodegradación.

Gabr et al (2009) analizan el efecto de la trituración de los componentes de los RSU para el uso en ensayos de laboratorio afectando los parámetros de compresibilidad y propiedades de resistencia. Se caracteriza el efecto del tamaño del equipo de laboratorio con relación al tamaño de las partículas de los residuos. Se realizaron quince ensayos de consolidación para evaluar los parámetros de compresibilidad con equipos de diferentes diámetros, 63.5 mm, 100 mm, 200 mm y 300 mm. También al igual doce ensayos de corte directo, los residuos a utilizar en los ensayos se trituraron, quedando de 50 mm y de menor tamaño, encontrando que la trituración de los materiales afecta la resistencia al corte, variando el ángulo de fricción interna de 32° para partículas de 50 mm y 27° para partículas de 25 mm, afectando igualmente los parámetros de compresibilidad.

Machado et al (2010), estudian la estabilidad general de los taludes del relleno sanitario Bandeirantes en Sao Paulo y el relleno sanitario Centro Metropolitano en Salvador, Brasil, estudiando los parámetros de resistencia y propiedades físicas que rigen el comportamiento mecánico de los RSU. En el relleno de Bandeirantes se realizaron pruebas de campo para evaluar la densidad, permeabilidad y resistencia al corte a través de ensayos de penetración estándar (SPT) y penetración de cono (CPT), en residuos de 15 años aproximadamente. Se encontró que:

- los ensayos SPT realizados corroboran los datos de la literatura, al encontrar que los residuos sólidos urbanos actúan como material friccionante; al igual que los valores medidos de Nspt tienden a disminuir con el tiempo;
- la permeabilidad es un parámetro importante debido a la influencia sobre la distribución de la presión de lixiviados en el relleno sanitario y por lo tanto en la magnitud y la distribución de esfuerzos efectivas influyendo en la resistencia al corte de los RSU;
- se realizaron dos ensayos de CPT en el relleno de Bandeirantes y tres en el relleno sanitario Centro Metropolitano, se encontró que la resistencia a la penetración aumenta con la profundidad. Los resultados del CPT fueron similares a los obtenidos en arena arcillosa, arenas y sedimentos, con una resistencia al cono menor a 4 MPa y coeficiente de fricción hasta 4%.

Kavazanjian et al (2011) realizaron 15 pruebas de corte directo a gran escala en el Relleno sanitario Tri-cities, Fremont California, sobre muestras reconstituidas, variando la composición y el esfuerzo de compactación, analizando la influencia de estas variables en las propiedades dinámicas de los residuos sólidos urbanos, encontraron que el coeficiente de amortiguamiento aumenta a mayor cantidad de material < 20mm; mayor

rigidez y velocidad de onda de corte con el aumento de la cobertura y esfuerzo de compactación; disminución de la rigidez con el aumento de la biodegradación; y que la velocidad de onda de corte y el módulo de corte están correlacionados con el peso unitario.

El boletín presentado en marzo de 2012 por la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), presenta el estudio realizado por Landva y Dickinson, en el cual analizan deslizamientos ocurridos en diferentes rellenos sanitarios urbanos. Plantean la existencia de una zona débil localizada a lo largo de la base de los RSU, resultado de la avanzada descomposición y alta humedad; al igual, errores recurrentes al ensayar muestras en estado fresco con la probabilidad que la resistencia medida no sea relevante por ser demasiado alta y por lo tanto conduce a factores de seguridad altos, pero no reales.

Analizan seis distintas fallas de rellenos sanitarios alrededor del mundo y concluyen que la porción crítica de un relleno sanitario con respecto a la estabilidad es la parte inferior. Esta zona está expuesta a altas presiones y elevadas temperaturas, tiene el mayor contenido de humedad, baja permeabilidad y un alto contenido de microorganismos anaerobios que ayudan a la actividad bacteriana.

Las fallas en rellenos sanitarios se espera sigan ocurriendo, debido al retiro de los elementos de refuerzo, dejando tan solo el material que se descompone fácilmente y con poca resistencia. Adicionalmente los rellenos sanitarios tienden a estar ubicados en suelos de fundación con propiedades geotécnicas pobres, inclinados y poco permeables en zonas de precipitaciones altas.

La influencia de los lixiviados en la estabilidad general de los rellenos sanitarios fue estudiada por Koerner y Song (2000), donde analizó la cantidad, orientación y presiones generadas por los lixiviados en el interior de la masa de residuos sólidos. La estabilidad de los taludes se analizó con el método de Bishop Modificado y encontró un aumento en las fuerzas motoras debido a los lixiviados, y por lo tanto, disminución en el factor de seguridad.

Yu y Batlle (2011) propusieron un modelo híbrido tridimensional para el análisis de estabilidad de los taludes por medio de elementos finitos en un relleno sanitario al nordeste de España, argumentando un alto nivel de lixiviados y elevadas pendientes como los factores desencadenantes de falla.

El factor de seguridad se calculó a partir del resultado individual del análisis en dos dimensiones para una serie de secciones transversales espaciadas uniformemente dentro del cuerpo de deslizamiento potencial.

Los resultados indican que el método tridimensional híbrido de análisis de estabilidad es capaz de localizar más o menos la posición espacial de la masa potencial de deslizamiento.

2.2 ANTECEDENTES

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) promovió estudios entre el año 1999 y 2008 con el propósito de rehabilitar el Morro de basuras, realizados por diferentes empresas consultoras y universidades. Estos estudios lograron cuantificar las propiedades mecánicas de los materiales constitutivos e y se instaló instrumentación geotécnica, con el fin de analizar la estabilidad global del Morro.

Algunos de estos estudios son descritos a continuación.

2.2.1 ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACION DEL MORRO DE MORAVIA: FASE 1 (2009)

Se analizó la estabilidad de los taludes del Morro de basuras, mediante la implementación de un sistema de instrumentación geotécnica. Al igual, se ejecutaron ensayos de campo convencionales con el fin de obtener los parámetros hidráulicos y geotécnicos que controlan el comportamiento mecánico de los materiales presentes en el sitio de estudio, plantearon alternativas de mitigación en la zona estudiada.

Se implementó un programa de monitoreo de la estabilidad de las laderas a partir de instrumentación geotécnica instalada, que consiste de tres inclinómetros con profundidades entre 16,5 m y 18,5 m, encontrando los desplazamientos registrados en el rango de precisión del instrumento. Se concluyó que el talud no sufrió desplazamiento en el periodo monitoreado.

Se instalaron dos piezómetros de hilo vibrante con el fin de registrar la temperatura y presión de agua y altura de lixiviados en el Morro de basuras. Con estos datos se encontró la fluctuación del nivel de agua entre 19,8 m y 20,6 m por debajo de la superficie del terreno, con presiones intersticiales de estables, lo cual no compromete la estabilidad de la zona en estudio.

Con el fin de generar un modelo físico del Morro de basuras se implementaron ensayos *In Situ*, encontrando una permeabilidad de 10^{-7} m s^{-1} para los materiales constitutivos mediante ensayos tipo Lefranc de cabeza variable.

Se encontraron cuatro niveles de rigidez (baja, intermedia, alta y nivel de rigidez superficial), luego de analizar las velocidades de onda obtenidas en los ensayos geofísicos tipo down hole.

Los parámetros de resistencia de los materiales constitutivos se encontraron mediante la realización de ensayos de carga a gran escala sobre bloques labrados sobre el material de 0.40mx0.40mx0.40m, obteniendo valores de cohesión y fricción de c= 5,2 kPa y Ø = 30° respectivamente.

2.2.2 DIAGNÓSTICO DE LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL ÁREA DE MORAVIA (INTEGRAL, 2000)

Se realizaron actividades de reconocimiento en campo para definir los sitios adecuados para la exploración del subsuelo mediante perforaciones y apiques. En total se realizaron nueve apiques de 3 m de profundidad, siete ensayos de refracción sísmica con líneas de 55 m de longitud; de los cuales sólo fue posible la interpretación de uno, debido a que en el sitio se observó una gran interferencia eléctrica.

Se consideró al morro de basuras del barrio Moravia como una zona de vulnerabilidad alta, con zonas altamente susceptibles a desgarres locales debido a las altas pendientes.

2.2.3 EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DEL BARRIO MORAVIA EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN (IEI, 2005).

De acuerdo a las características geotécnicas del material, se definieron zonas homogéneas. La exploración del subsuelo se realizó mediante catorce perforaciones, combinando el sistema de percusión con registro SPT, al igual veinte sondeos eléctricos verticales y resultados de ensayos de laboratorio.

Se establecieron los espesores probables de geomateriales y se identificó la profundidad del nivel freático.

Se concluyó que estos depósitos presentan condiciones geotécnicas no aptas para consolidaciones humanas. Se recomendó el desarrollo de espacios públicos en estos sectores, de forma que se conviertan en una referencia para la comunidad y sean identificados y respaldados de esta forma.

2.2.4 ESTUDIO DE COBERTURA LOCAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN. (FERNANDES, 2012)

El estudio presenta un análisis de la aplicación de un sistema de cobertura usando geosintéticos, con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico del sistema de sellado basado en la combinación de geomembrana y geocélula.

Se propuso una capa de geomembrana impermeable que se utiliza para aislar los residuos sólidos, evitando el contacto directo con la atmósfera. Por encima de ella, una geocélula la cual permite la revegetación de taludes en inclinaciones elevadas, evitando la erosión de la capa superior del suelo que protege la geomembrana y proporciona un aspecto paisajístico agradable.

El estudio determinó y evaluó los parámetros que controlan la estabilidad estructural del sistema de cobertura mediante el estudio de la interfaz con geocélula orgánica del suelo-geomembrana. Además, se verificó la funcionalidad del sistema de anclaje utilizado para la instalación de geocélula por encima de la geomembrana. El estudio se realizó utilizando una metodología basada en los procedimientos experimentales y analíticas, con el fin de presentar recomendaciones constructivas para la reconformación de los taludes analizados.

Los resultados del análisis de estabilidad mostraron que en algunos taludes es necesario llevar a cabo la reconformación del Morro y en otros lugares son necesarias medidas preventivas para evitar deslizamientos. Además, el sistema de cubierta por encima de la geomembrana en casi todas las secciones puede ser utilizado.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 ESTABILIDAD DE TALUDES.

Los análisis de estabilidad de taludes se definen en términos del factor de seguridad, a partir de un análisis matemático que involucra las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, las cuales están en función de las propiedades mecánicas de los RSU y son difíciles de determinar debido a la heterogeneidad de los materiales.

Con el fin de estimar los parámetros de resistencia mecánica se realizaron ensayos de carga sobre micro pilotes y análisis estadísticos de los datos encontrados en la literatura técnica, estimando parámetros geotécnicos representativos y confiables para los materiales constitutivos del morro de basuras del Barrio Moravia.

El agua infiltrada aumenta el nivel de lixiviados y genera fuerzas motoras involucradas en la estabilidad de los taludes. Esta variable propia de cada sitio y dependiente de los materiales presentes se cuantificó por medio de una parcela piloto de medición infiltración–escorrentía, se mide el flujo originado por precipitaciones a diferentes profundidades, y se cuantifican las fuerzas hidrodinámicas actuantes.

3.2 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS EN RELLENOS SANITARIOS

Las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos urbanos son de vital importancia para el diseño y mantenimiento de cualquier tipo de relleno. Diversos estudios sobre este tema se han publicado, siendo difíciles de comparar debido a la heterogeneidad en la composición de los residuos sólidos, que varían según la cultura, costumbres de la comunidad local y tecnología de procesamiento de residuos. Esto lleva a que el comportamiento geomecánico de los RSU cambia de una región a otra.

Qian et al (2002), citado por Ordoñez et al (2008), sugiere que la correcta selección de las propiedades ingenieriles de los desechos sólidos es crítica en el análisis y diseño de los rellenos sanitarios ya que se debe tener en cuenta su variación en el tiempo. La seguridad y los costos de los rellenos sanitarios son sensibles a las variaciones de estas propiedades. Desafortunadamente los rellenos sanitarios contienen a menudo materiales de variadas resistencias y ampliamente heterogéneos. Lo anterior justifica estudios y análisis que permitan conocer la evolución y el comportamiento de los rellenos sanitarios,

así como las propiedades de los residuos sólidos que los componen y su variabilidad en el tiempo.

La Tabla 1 muestra la composición de los residuos sólidos urbanos en diferentes partes del mundo.

TABLA 1 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS (BOTERO 1999)

COMPONENTE	Metal	Papel y cartón	Plástico	Caucho, cuero y madera	Textiles	Comida y desechos domésticos	Vidrio	Inorgánicos
Australia		37				45		18
Bangkok	1	25		7	3	44	1	19
Beijing	1	5	1	1		46	1	46
Berkeley California	9	45	2		1	25	11	7
Cincinati Ohio	9	42	2	3	1	34	8	1
Hong Kong	3	33		7	10	15	10	22
Yaharta Indonesio	3	3		2		60	2	30
Japón		38	8	12		18		24
Corea	3	10		4		74	7	2
Madras India		14				56		30
NY	5	22		3		20	6	43
Singapur	7	32	3	7	4	36	4	7
España		14				50		21
Taiwán	2	8		3	4	25	3	55
Reino Unido	8	30		1	2	16	8	35
EE.UU.	10	37	7	2	2	26	10	2
Wayne New Jersey	7	54	2	2	2	23	5	5
Alemania Oeste	5	31		4	2	16	13	29

La estabilidad general de los rellenos sanitarios se rige por las propiedades físicas y mecánicas de los RSU, estudiadas en campo y laboratorio por diversos autores. Estos estudios tienen el objetivo de evaluar las propiedades

físicas como: peso específico, permeabilidad, contenido de humedad y propiedades mecánicas como resistencia al corte, compresibilidad y rigidez.

Las propiedades geotécnicas de los RSU varían en las diferentes fases de biodegradación, afectadas directamente por el contenido de agua y materiales orgánicos.

Es importante resaltar que las propiedades de los RSU se deben evaluar a nivel local, sin embargo, los datos encontrados en la literatura sobre características de los RSU en regiones con condiciones similares, contribuyen a obtener datos y diferentes alternativas para el diseño de rellenos sanitarios.

3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

3.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

Machado (2010) establece que el contenido de la humedad de los residuos sólidos depende en gran medida de la edad del relleno. Los residuos sólidos frescos poseen un contenido de humedad mayor a los residuos antiguos, y es directamente proporcional al contenido de materia orgánica.

La humedad de los residuos sólidos en el laboratorio se obtiene por medio de los métodos convencionales, secando las muestras a una temperatura no mayor a 70° para evitar la quema de la materia orgánica, hasta la estabilización del peso.

Según Palma et al (2005), la humedad de los residuos sólidos urbanos, depende de varios factores: composición inicial de los residuos sólidos, condiciones climáticas locales, eficacia del sistema de manejo de lixiviados y grado de humedad producido por los procesos biológicos que ocurren dentro del relleno.

Machado (2002) recopila en la Figura 1 los datos reportados en la literatura por diversos autores. No se especifica la edad y contenido de materia orgánica.

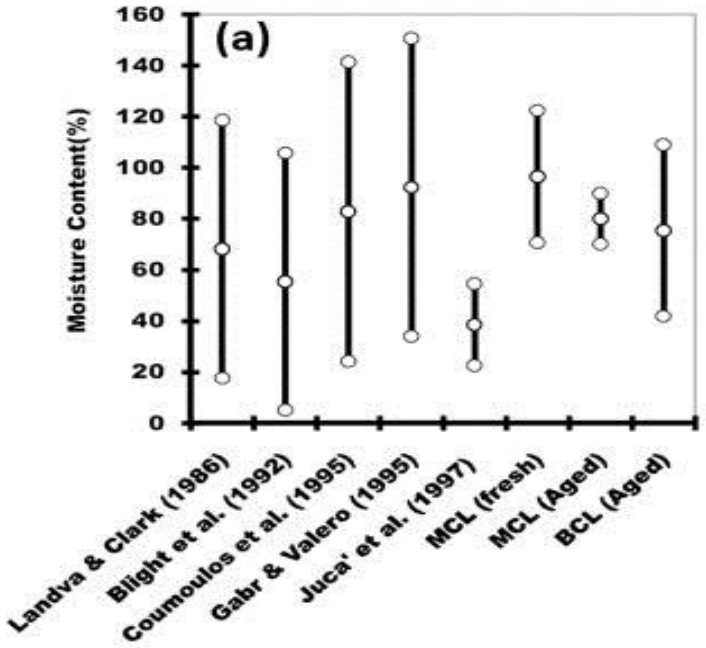


FIGURA 1. HUMEDADES REPORTADAD EN LA LITERATURA, MACHADO (2002)

3.3.2 PESO UNITARIO TOTAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

El peso unitario de los RSU varía considerablemente de una región a otra, depende en gran medida de varios factores como: componentes de los residuos (tamaño y densidad), humedad, método de construcción del relleno, grado de compactación de los residuos, profundidad y edad del relleno.

Palma et al (2005), citando a Singh y Murphy (1990), Landva y Clark (1990), Siegel et al. (1990), sitúan los valores de densidad de los residuos en un rango entre 300 kg m^{-3} a 1500 kg m^{-3}. Los distintos autores emplean estos valores para estimar la capacidad de rellenos y para estudios de estabilidad. Se puede asumir que los valores bajos corresponden a rellenos con deficientes o nula compactación de los residuos. Los valores altos se pueden asignar a residuos antiguos bajo sobrecargas relativamente altas o rellenos modernos.

En la Tabla 2, Fassett et al. (1994) proporcionan un resumen de los valores de pesos unitarios encontrados en diferentes rellenos sanitarios.

TABLA 2 PESOS UNITARIOS EN FUNCIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN FASSETT ET AL (1994)

	Pobre compactación	Moderada Compactación	Buena Compactación
Rango (kN m-^{3})	3,0 - 9,0	5,0 - 7,8	8,8 - 10,5
Promedio (kN m-^{3})	5,3	7,0	9,6
Desviación estándar (kN m-^{3})	2,5	0,5	0,8
Coeficiente de Variación (%)	48,0	8,0	8,0

Zekkos et al (2006) describen la relación entre el peso unitario de los RSU y la profundidad mediante una ecuación hiperbólica. La Figura 2 presenta los perfiles de los pesos unitarios para tres categorías, según el esfuerzo de compactación (bajo, normal y alto).

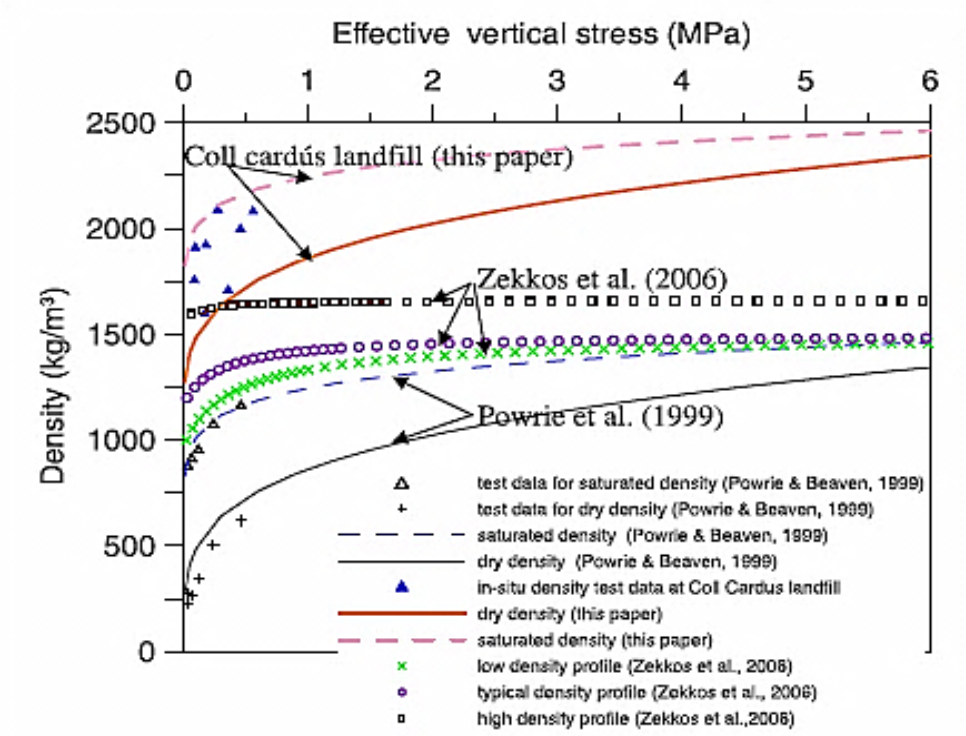


FIGURA 2 PERFIL PESO UNITARIO ZEKKOS (2006)

Sabogal (2011) determinó mediante ensayos *in situ* el valor del peso unitario de los materiales presentes en el Morro de Basuras del Barrio Moravia, con un valor que oscila entre 14 kNm^{-3} y 16 kNm^{-3}.

3.3.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La permeabilidad de los RSU influye en la distribución de las presiones de lixiviados en el relleno sanitario, por lo tanto en la magnitud y distribución de esfuerzos efectivos y resistencia al corte. Este es un parámetro importante para analizar la estabilidad global y diseñar los sistemas de extracción del lixiviado al interior del relleno sanitario.

La permeabilidad obedece a factores como estado de biodegradación de los RSU, estado de compactación, sobrecarga y composición de los RSU en especial la cantidad de fragmentos de plástico.

Debido a todos los factores que pueden afectar este parámetro y siendo difícil la reproducción de las condiciones del relleno en las pruebas de laboratorio, la medición en campo se considera el método más fiable para estimar la permeabilidad de los RSU, Sin embargo, pocos resultados han sido reportados en la literatura sobre la evaluación en campo de la permeabilidad.

Espinosa y González (2001) indican que la permeabilidad de los desechos sólidos, está sujeta a variaciones importantes que dependen del estado y forma en que se encuentren los desechos. Si estos se encuentran compactados y por tanto densificados, la permeabilidad se reduce; al darse los fenómenos de biodegradación en los desechos deben aparecer más espacios vacíos, aumentándose la permeabilidad; y la presencia de burbujas de gas son obstáculos para la circulación del agua por lo tanto la permeabilidad en este caso también debe disminuir.

En desarrollo del "Estudio Piloto para la recuperación del morro de Moravia Fase 1" se calculó la permeabilidad del mismo por 20 ensayos de campo en pozos de 60 cm de profundidad con diámetros de 11 cm, vertiendo agua a la perforación hasta alcanzar la saturación y registrando el descenso del agua con ayuda de un flotador calibrado.

En la Figura 3 se presenta el mapa de permeabilidad del Morro de basuras de Moravia, cuyo valor medio obtenido es de 65.9x10-6 ms^{-1}.

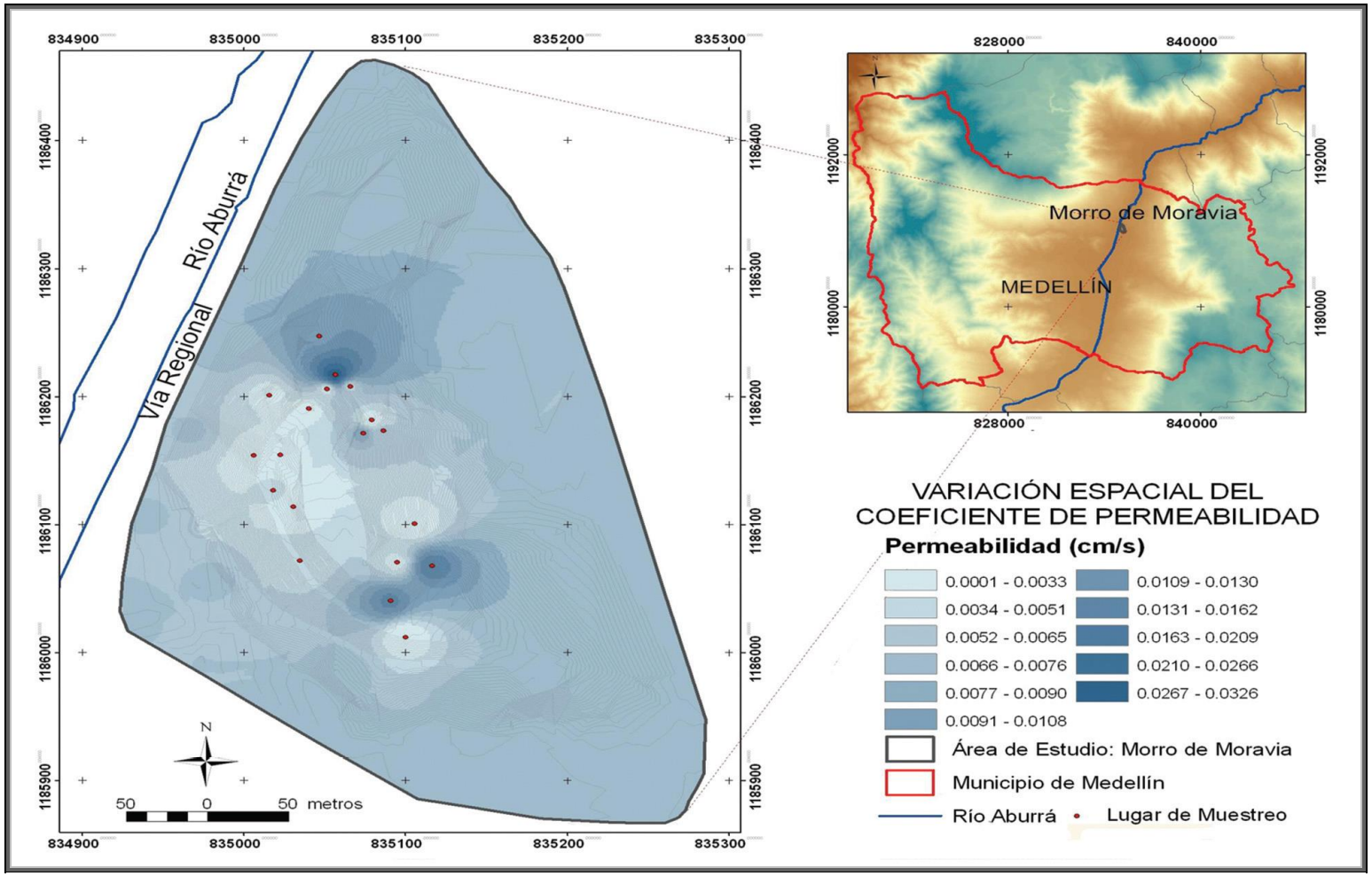


FIGURA 3. MAPA DE PERMEABILIDAD MORRO DE BASURAS MORAVIA

3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

La compresibilidad y resistencia al corte de los RSU han sido estudiadas por varios autores en pruebas de campo y ensayos de laboratorio, siendo difícil y costoso obtener parámetros representativos y a la vez confiables. Se presenta una gran dispersión en los datos encontrados en la literatura debido a la heterogeneidad de los residuos y la diversidad de ensayos utilizados.

Los parámetros de resistencia mecánica de los RSU son difíciles de determinar debido a las siguientes condiciones:

- dificultad de tomar muestras inalteradas y representativas de los RSU;
- Grado de biodegradación de la materia orgánica y edad del relleno;
- tipo de cobertura.

3.4.1 RESISTENCIA AL CORTE DE LOS RSU

Según Qian et al (2002), citado por Ordoñez (2008), los desechos sólidos son un material particulado y su comportamiento se asemeja a los suelos en muchos aspectos. Como los suelos, la resistencia de los desechos sólidos aumenta con el incremento de la carga normal; sin embargo debido al alto contenido orgánico y a la naturaleza fibrosa, los desechos sólidos tienden a parecerse más a una turba que a un suelo típico.

Palma (2005) señala los factores que se consideran afectan las propiedades de resistencia de los desechos sólidos, se incluyen los siguientes:

- el contenido de fibras y de orgánicos presentes en los desechos;
- la edad de los desechos colocados en los rellenos;
- el modo de disposición (grado de compactación, espesor de las capas dispuestas, cantidad y tipo de cobertura);

Se enuncian a continuación los ensayos utilizados por diversos investigadores y los resultados obtenidos:

Jessberger y kockel (1993) realizaron pruebas en cuerpos de prueba de 300 mm de diámetro y 600 mm de altura al igual en cuerpos de prueba de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, tomando una cohesión de 0 se encontró el ángulo de fricción entre 31° y 49°.

Reddy et al (2008) realizaron ensayos de corte directo drenados en el relleno sanitario de Orchard e Illinois EE.UU., con diferentes contenidos de humedad, con un diámetro de 63 mm y altura de 27 mm. Encontró que la cohesión varía entre 31kPa y 64 kPa y el ángulo de fricción drenado entre 26 – 30°. Ni la cohesión ni el ángulo de fricción mostraron alguna correlación con el contenido de humedad.

Landva y Clark (1990) llevaron a cabo ensayos de corte directo en grandes muestras de RSU en Edmonton Canadá, donde encontraron la cohesión igual a 23 kPa y ángulo de fricción de 24°

Kavasanjian (1999) presentó los resultados de ensayos de corte directo realizados en California, reportando la cohesión igual 43 kPa y el ángulo de fricción de 31°.

En la Figura 4, Simao (2012) presenta las correlaciones obtenidas en diferentes investigaciones con datos aportados por ensayos de laboratorio y análisis retrospectivo.

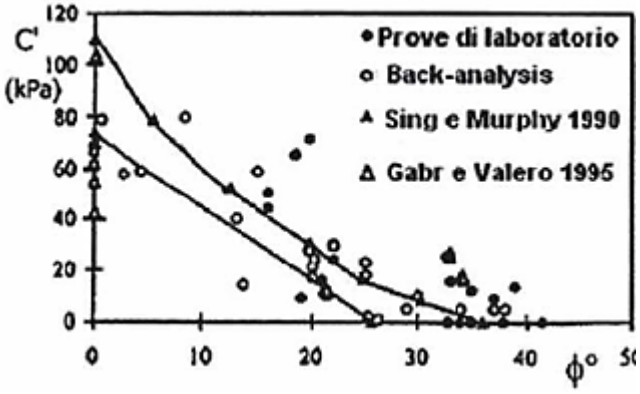


FIGURA 4. CORRELACIONES PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA, SIMAO (2011)

En la Tabla 3 se presentan los diferentes parámetros de resistencia obtenidos por diferentes autores. Se observa la amplia variación de valores que se pueden obtener, debido a la heterogeneidad de los RSU y a la dificultad en la medición en la resistencia al corte.

TABLA 3. PARÁMETROS DE RESISTENCIA OBTENIDOS POR DIFERENTES AUTORES

Referencia	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (º)	Método de estimación
Caicedo et al (2002)	67	23	Corte directo de gran escala, Picómetro de presión
Cowland et al (1993)	10	25	Back – análisis de trinchera profunda cortada en residuos
Edincliler et al (1996)	27	42	Corte directo
Eid et al (2000)	25	42	Corte directo
Gabr y Valero (1995)	17	34	CU, en pequeña escala (valores de 20% de deformación axial)
Grisolia et al (1995)	2	15	Triaxial a gran escala (10-15% de deformación axial)
	3	20	
Grisolia et al (1995)	10	35	Triaxial a gran escala (10-15% de deformación axial)
Harris et al (2006)	9	20	Corte directo simple, corte directo, CU a gran escala.
	14	29	
Houston et al (1995)	5	34	Corte directo sobre muestras inalteradas
Jessberger et al (1995)	0	31	Triaxial a gran y pequeña escala
	0	49	
Kavazanjian et al (1995)	24	0	Back analysis para esfuerzos normales hasta 30 kPa
Kavazanjian et al (1995)	0	30	Back analysis para esfuerzos normales mayores a 30 kPa
Landva y Clark (1986)	10	24	Corte directo en residuos de varios rellenos de Canadá
	23	42	
Landva y Clark (1990)	0	24	Corte directo
	23	41	
Mahler yDe Lamare Netto (2003)	3	21	Corte directo
	4	36	
Mazzucato et al (1998)	43	31	Corte directo a gran escala
Pelkey et al (2001)	0	26	Corte directo a gran escala
	0	29	
Siegel et al (1991)	0	39	Corte directo, 10% de desplazamiento de corte, cohesión asumida cero
	0	53	

Referencia	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (º)	Método de estimación
Stoll (1971)	0	24	Triaxial en pequeña escala
	0	42	
Vilar yCarvalho (2002)	39	29	Contenido de humedad natural (20% deformación)
Vilar y Carvalho (2002)	61	23	Muestra saturada (20% de deformación)
Whithiam et al (1995)	10	30	Corte directo a gran escala
Zekkos et al (2006)	0	36	Triaxial presión de confinamiento de 200kPa
	0	41	
Zwanenburg et al (2007)	0	35	Triaxial a gran escala
	0	37	

La Figura 5 en un gráfico gráficamente los valores de la Tabla 3. Se observa una gran dispersión en los parámetros de resistencia mecánica, debido a la heterogeneidad de los materiales y el método empleado para su obtención. Por lo tanto, se deben realizar análisis estadísticos para obtener datos confiables que se usaran en los análisis de estabilidad de taludes en Moravia.

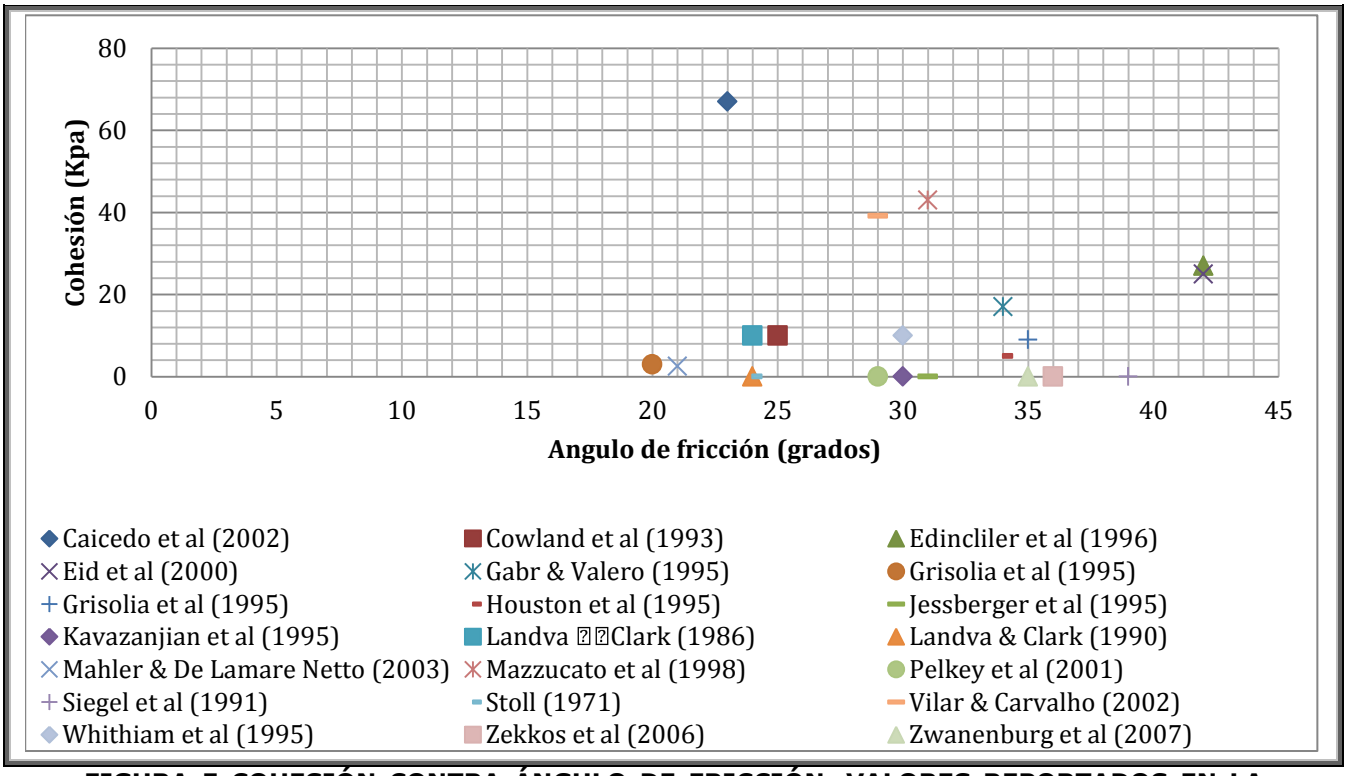


FIGURA 5 COHESIÓN CONTRA ÁNGULO DE FRICCIÓN, VALORES REPORTADOS EN LA LITERATURA.

4 PRUEBAS DE CARGA EN MICROPILOTES.

Existen tres tipos ensayos *in situ* y normalizados ASTM sobre pilotes de prueba con carga estática, compresión axial (ASTM D 1143 *Piles under static Axial Compressive Load*), esfuerzo axial (ASTM D 3689 *Individual piles under static axial tensile load*) y carga lateral (ASTM D 3966 *Standard test method for piles under lateral load*).

Las pruebas de carga estáticas de compresión axial permiten conocer el comportamiento real de los pilotes en el terreno, sometidos a cargas generalmente superiores a las de servicio. La razón principal para la realización de los ensayos es la falta de confiabilidad en los métodos de predicción, DAS (2006).

4.1.1 ENSAYO DE COMPRESION AXIAL SOBRE PILOTES.

El ensayo se desarrolla siguiendo el procedimiento indicado en la norma (ASTM D 1143); la carga axial es aplicada al pilote de 4" de diámetro y 2.50 metros de profundidad, por medio de un gato hidráulico, realizando incrementos graduales de carga con incrementos de $3kgcm^{-2}$, esperando 5 minutos después de cada aplicación para registrar los asentamientos ocurridos.

El número de pilotes a ensayar axialmente será de tres, obteniendo la capacidad de carga ultima de los pilotes, Qu, dada por la carga tomada por la punta, Qp, más la resistencia tomada por fricción o fuste, Qf.

La interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos se obtiene graficando los valores de varga contra el asentamiento, El asentamiento del pilote crece con la carga hasta cierto punto, más allá del cual la curva carga-asentamiento se vuelve vertical. La carga correspondiente al punto en que la curva se vuelve vertical es la capacidad de carga última, Qu. Das (2006).

Los ensayos de carga instrumentados han mostrado que la máxima resistencia friccionante a lo largo del fuste se moviliza completamente cuando el desplazamiento relativo entre el suelo y el pilote alcanza un valor de 5 a 10 mm, desvinculado al diámetro y longitud del pilote.

4.2 METODOLOGIA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL EN MICROPILOTES.

El procedimiento a utilizar se denomina ensayo de carga controlada, aplicando incrementos de carga por etapas sobre los pilotes midiendo los asentamientos originados; Las cargas aplicadas se calculan multiplicando la presión aplicada por el área del pistón dela Bomba hidráulica.

4.2.1 EQUIPO UTILIZADO.

La Figura 6 muestra el equipo utilizado para los ensayos de compresión axial sobre pilotes, el cual debe garantizar que la carga sea aplicada en la parte central del pilote, a continuación se mencionan los equipos e instrumentos necesarios para la realización del ensayo.

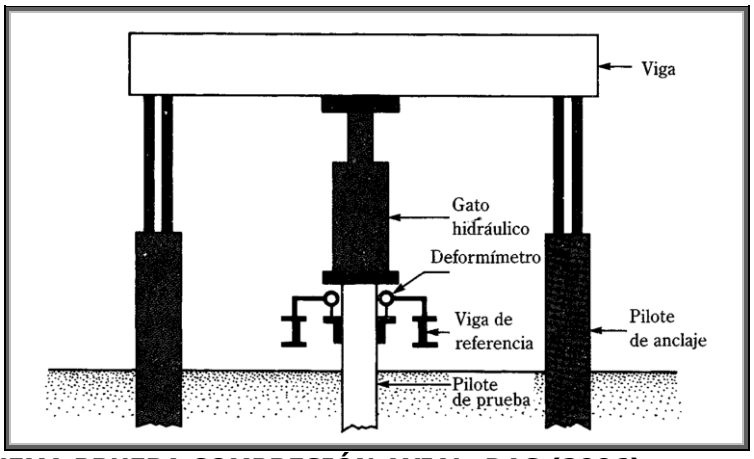


FIGURA 6. ESQUEMA PRUEBA COMPRESIÓN AXIAL, DAS (2006)

- Pilotes de anclaje: se construyen dos pilotes de anclaje que proporcionan una adecuada capacidad de reacción, a una distancia de 1.35m entre su eje y el eje del pilote central.

- Viga de reacción: con suficiente espesor y resistencia para impedir deflexión bajo la acción de las cargas, centrada sobre los pilotes de reacción, a una distancia de 50 cms entre su cara inferior y el cabezal del pilote a ensayar en la cual se instala el gato hidráulico.

- Bomba hidráulica: genera la fuerza en el gato, esta bomba está provista de un pistón de dos niveles, con un recipiente de aceite de cinco litros, la lectura de presión de la bomba se hace mediante un manómetro; con

base en ella se puede calcular la fuerza del gato y con esta la presión ejercida.

- Gato hidráulico: Con una capacidad de carga superior a la carga máxima prevista en por lo menos un 20%, Se debe alinear con el eje longitudinal del pilote para minimizar la carga excéntrica.

- Viga de referencia: Con adecuada resistencia y rigidez para apoyar la instrumentación de la prueba y minimizar las vibraciones que pueden degradar la medición de los movimientos del pilote, cuenta con apoyo independiente al sistema de carga, firmemente incrustado en el suelo a una distancia de cinco veces el diámetro del pilote a ensayar.

- Extensómetros: Se instalan dos deformímetros de precisión igual a 0.01 mm con un recorrido mínimo de 100 mm, registran el movimiento vertical del pilote central.

En la Figura 7 se observa la localización en planta de los tres ensayos realizados.

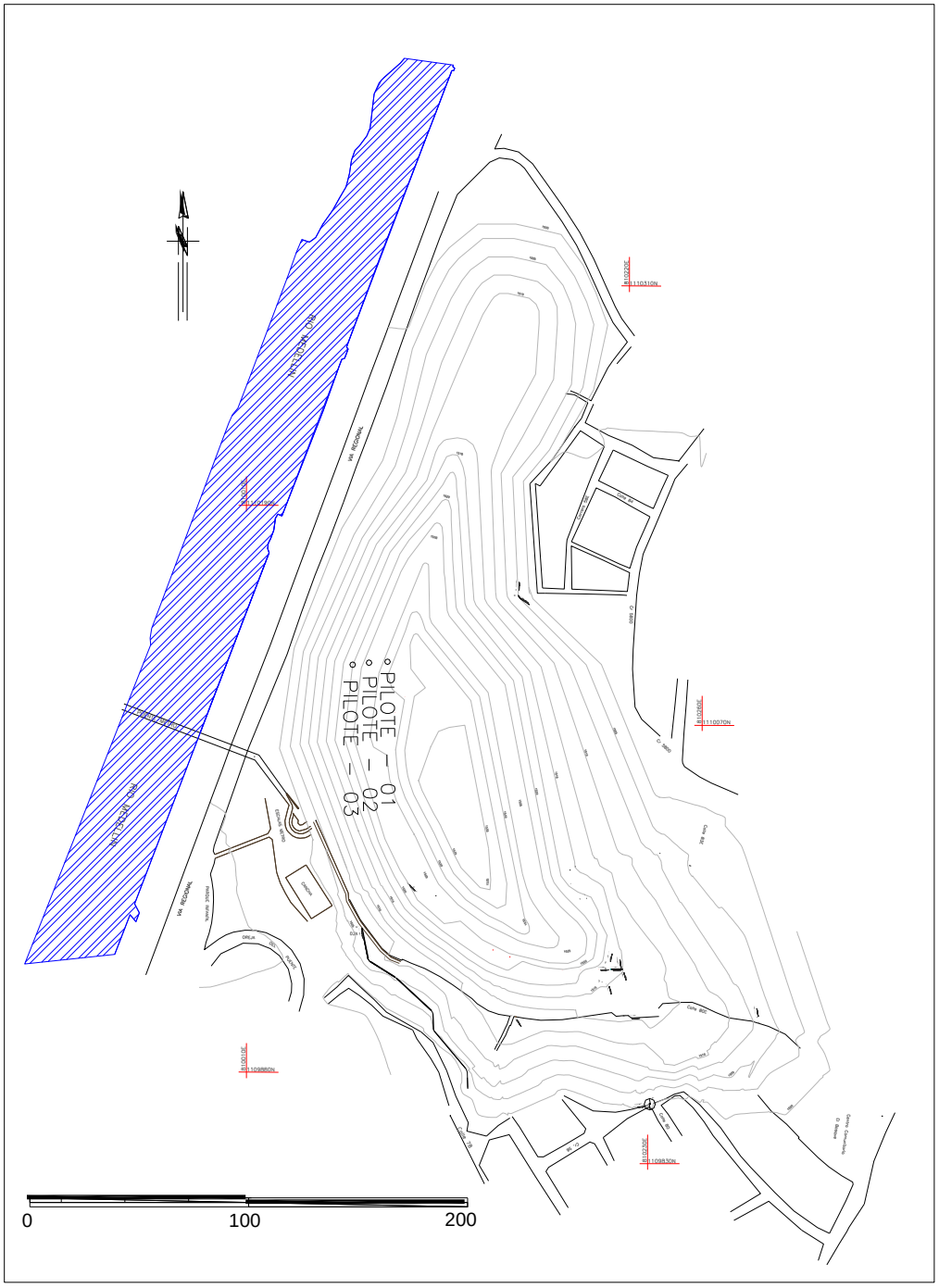


FIGURA 7 LOCALIZACIÓN ENSAYOS DE CARGA AXIAL SOBRE PILOTES EN EL MORRO DE BASURAS DE MORAVIA.

Se describe a continuación el procedimiento utilizado en el morro de basuras para la realización de los ensayos de compresión axial en pilotes, el montaje requerido se muestra de forma esquemática de la Figura 8 a la Figura 15.

- Para la construcción de los pilotes se realizan nueve perforaciones de 4" de diámetro y 2,5 metros de profundidad, seis para pilotes de reacción y tres para pilotes a ensayar a compresión axial, como se observa en la Figura 8.

- Se procede con el encamisado de la perforación con tubería sanitaria de 4", Figura 9, con el fin mantener la estabilidad en las paredes de la perforación y permitir el vaciado de los pilotes.

- Se realiza el vaciado de los nueve pilotes utilizando concreto de 21 MPa con aditivo acelerante para concreto, retirando la tubería sanitaria simultáneamente, como se observa en la Figura 10.

- Fraguado del concreto por siete días, momento en el cual se retira la tubería que servía de formaleta en la parte exterior, los pilotes de reacción se muestran en la Figura 11.

- Instalación viga de reacción metálica sobre pilotes de reacción (Figura 12), sujetada con alambre galvanizado calibre 12 a pin de 5/8".

- Después se ubica del gato hidráulico con su respectivo manómetro centrado sobre el pilote central, apoyado en la parte superior a la viga metálica que sirve de punto de reacción, como se muestra en la Figura 13.

- Se sigue con la instalación de la viga de referencia, con apoyos independientes al sistema de reacción, Figura 14.

- Instalación de dos extensómetros apoyados en viga de reacción, registrando los movimientos verticales ocurridos en los costados de la cabeza del pilote.

- Se efectúa una lectura inicial en cada extensómetro, a partir de la cual se inicia la aplicación de las cargas: se busca que el operador de la bomba, ejecute el incremento de presiones de la manera más lenta posible.

- Se realizan lecturas a los cinco minutos de la aplicación de la carga, momento en el cual el asentamiento se ha estabilizado, para cada ensayo la presión de carga se incrementa hasta el máximo posible, momento en el cual los asentamientos se incrementan rápidamente con cada carga aplicada sin estabilizarse.

FIGURA 8 REALIZACIÓN DE PERFORACIONES PARA CONSTRUCCIÓN DE PILOTES DE REACCIÓN Y PILOTES A ENSAYAR.

FIGURA 9 ENCAMISADO DE LAS PERFORACIONES CON TUBO SANITARIO Ø = 4”

FIGURA 10 VACIADO DE PILOTES A UTILIZAR EN LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL Y PILOTES LATERALES.

FIGURA 11 PILOTES LATERALES QUE GARANTICEN UNA ADECUADA CAPACIDAD DE REACCIÓN

FIGURA 12 INSTALACIÓN DE VIGA METÁLICA SOBRE PILOTES DE REACCIÓN.

FIGURA 13 INSTALACIÓN DE GATO Y BOMBA HIDRÁULICA SOBRE PILOTE CENTRAL.

FIGURA 14 VIGA DE REFERENCIA.

FIGURA 15 MONTAJE FINAL DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL SOBRE PILOTES.

5 EVALUACIÓN DE LA INFILTRACIÓN.

Con el fin de obtener el caudal de infiltración y su influencia en el comportamiento mecánico de los materiales, se ejecutaron ensayos de medición infiltración – escorrentía en la parcela piloto y se aplicó el modelo HELP (*Hydrology Evaluation Leachate Performance*), encontrando los parámetros hidrológicos necesarios para el desarrollo de un Balance hídrico global aplicado a la estimación del caudal de lixiviados y flujo sub-superficial en el Morro de basuras de Moravia.

El ensayo en la parcela piloto de medición consiste en aislar un área de 15 m^2 con pendiente uniforme, utilizando madera forrada en plástico en los costados, enterrada a 0.6 m, en la parte inferior de la parcela se instala tubería sanitaria de 4" a tres diferentes niveles (N_0=Superficie, N_1=0.30m, N_2=0.60m) llena de material triturado forrado con geotextil, en la parte inferior de cada tubo se realiza una perforación y se realiza la conexión al equipo medidor de Volumen.

En la Figura 16 se observa una vista panorámica del sitio ensayado, la localización en planta de la parcela piloto de medición se observa en la Figura 17.

FIGURA 16 PANORÁMICA PARCELA PILOTO

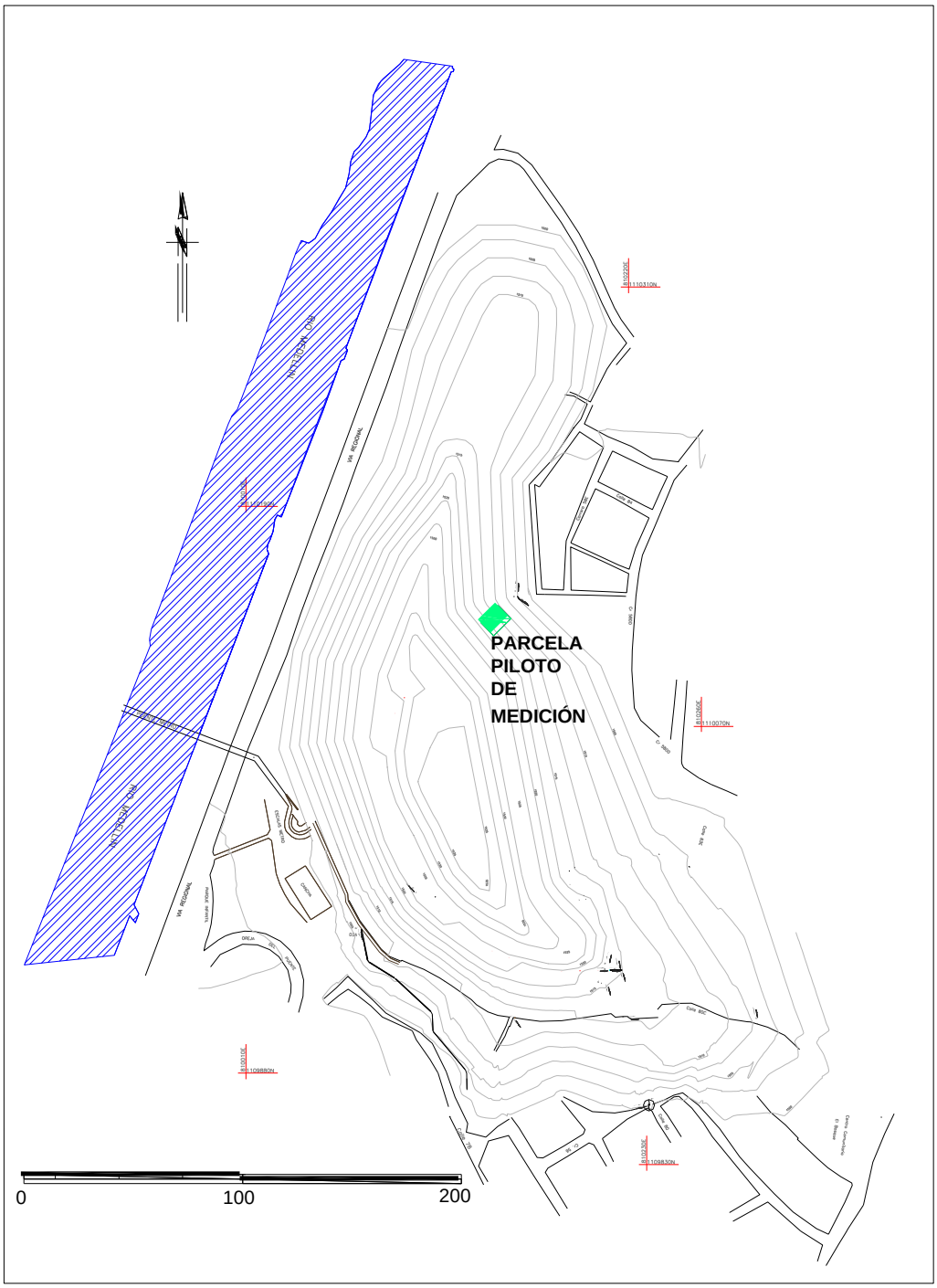


FIGURA 17 LOCALIZACIÓN EN PLANTAPARCELA PILOTO DE MEDICIÓN.

5.1 BALANCE HÍDRICO

Para cuantificar la infiltración y fuerzas hidrodinámicas en el Morro de basuras de Moravia, se emplea el balance hídrico global, el cual tiene en cuenta la precipitación, escorrentía superficial y sub-superficial, capacidad de almacenamiento y retención de los residuos, consumos y salidas de agua, estimando la cantidad de agua que percola al interior del relleno.

Del agua que cae en la capa superficial del relleno (precipitación), una fracción penetra hacia el interior del mismo (infiltración), mientras que la fracción restante queda almacenada sobre la superficie formando charcos (almacenamiento superficial), o escurre hacia otras zonas (escorrentía superficial). En caso de existir una capa vegetal en la superficie del relleno, una porción del agua infiltrada que queda retenida en las zonas menos profundas volverá a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración. De otra parte, la porción de agua infiltrada que logra llegar al interior del relleno y percolar, es la que participa en la formación de los lixiviados.

El balance hídrico de la parcela se estima con la siguiente ecuación:

$$P = E + ETR + R + I,$$

donde, P es la precipitación sobre el área superficial en mm, E el volumen de escorrentía superficial y sub–superficial en mm, R el volumen de agua retenido por las basuras, ETR el volumen de agua evapotranspirada en mm, I el Volumen de agua que se ha infiltrado o percolado en mm.

5.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS DEL SITIO DE ESTUDIO

Los registros diarios de temperatura, precipitación y radiación solar de la estación pluviométrica Miguel de Aguinaga fueron suministrados por Departamento de Hidrometría e instrumentación de las Empresas Publicas e Medellín – EPM, información representativa de la zona de estudio.

En la Tabla 4 se presenta la información de la estación Pluviométrica.

TABLA 4 INFORMACIÓN ESTACIÓN PLUVIOMETRICA

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOCALIZACIÓN		COTA (msnm)
		NORTE	ESTE	
MIGUEL DE AGUINAGA	MEDELLIN	1,184,470	834,980	1549

5.2.1 PRECIPITACIÓN

De acuerdo con los registros de precipitación de los últimos 11 años, la precipitación promedio multianual para el Morro de basuras corresponde a 1557,91 mm/año.

La Figura 18 muestra el comportamiento de la precipitación entre el año 2001 y 2011, con una media de 4,26 mm/día y el 95,4% de los registros inferiores a 20 mm/día.

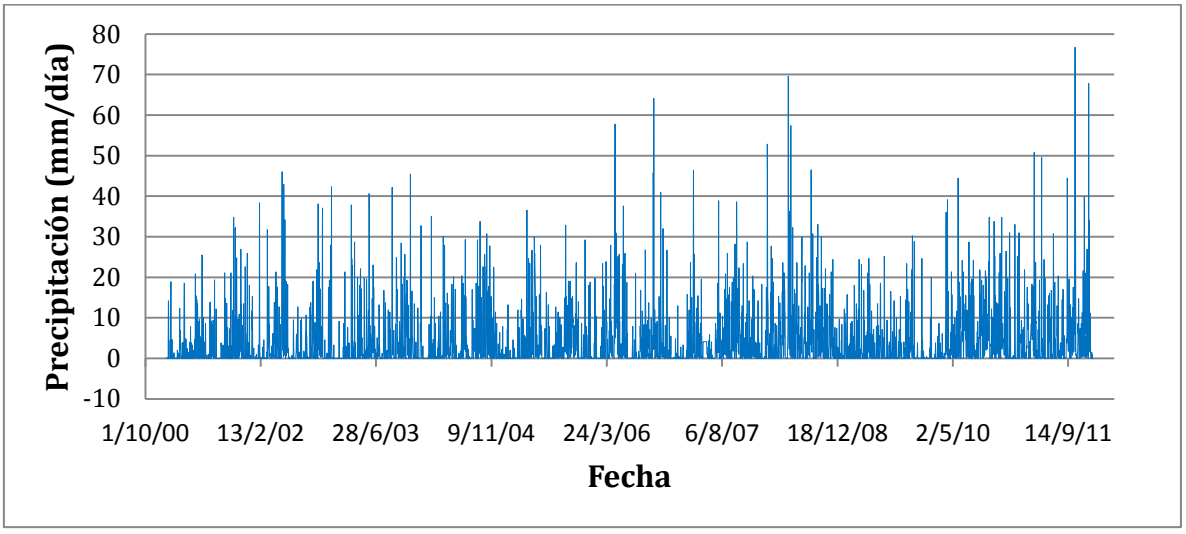


FIGURA 18 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN 2001 - 2011

En la Figura 19 se presenta el ciclo anual de precipitación del año 2011, presentando periodos de alta lluvia en los meses de Abril y Octubre y periodo de sequía en los meses de Enero, Mayo y Agosto.

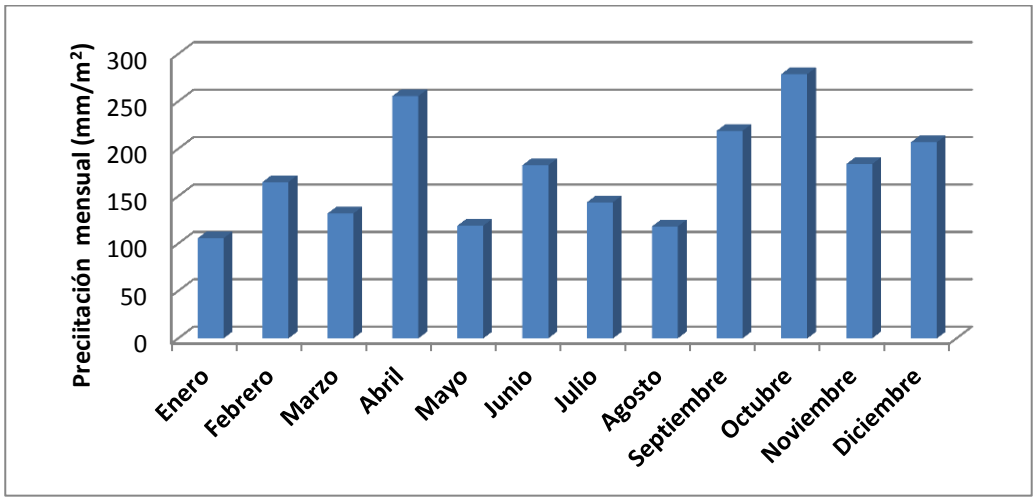


FIGURA 19 CICLO ANUAL DE PRECIPITACIÓN.

5.2.2 TEMPERATURA

Los registros diarios de temperatura entre los años 2008 y 2011 se muestran en la Figura 20, la temperatura diaria promedio es igual a 21,1°C, con valores máximos en Junio de 2009 y Enero de 2010.

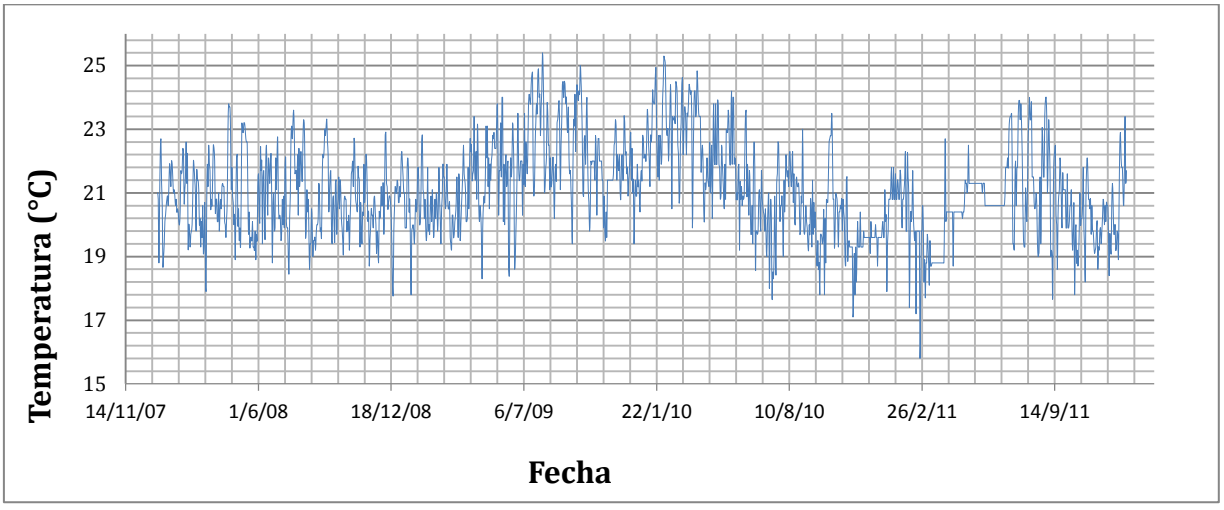


FIGURA 20 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA 2008 - 2011

En el estudio piloto para la recuperación del Morro de Moravia fase I, se construyó el mapa de temperatura media para el Morro de Basuras de Moravia, Figura 21, encontrando una temperatura medía entre 20,4 y 20,5 °C.

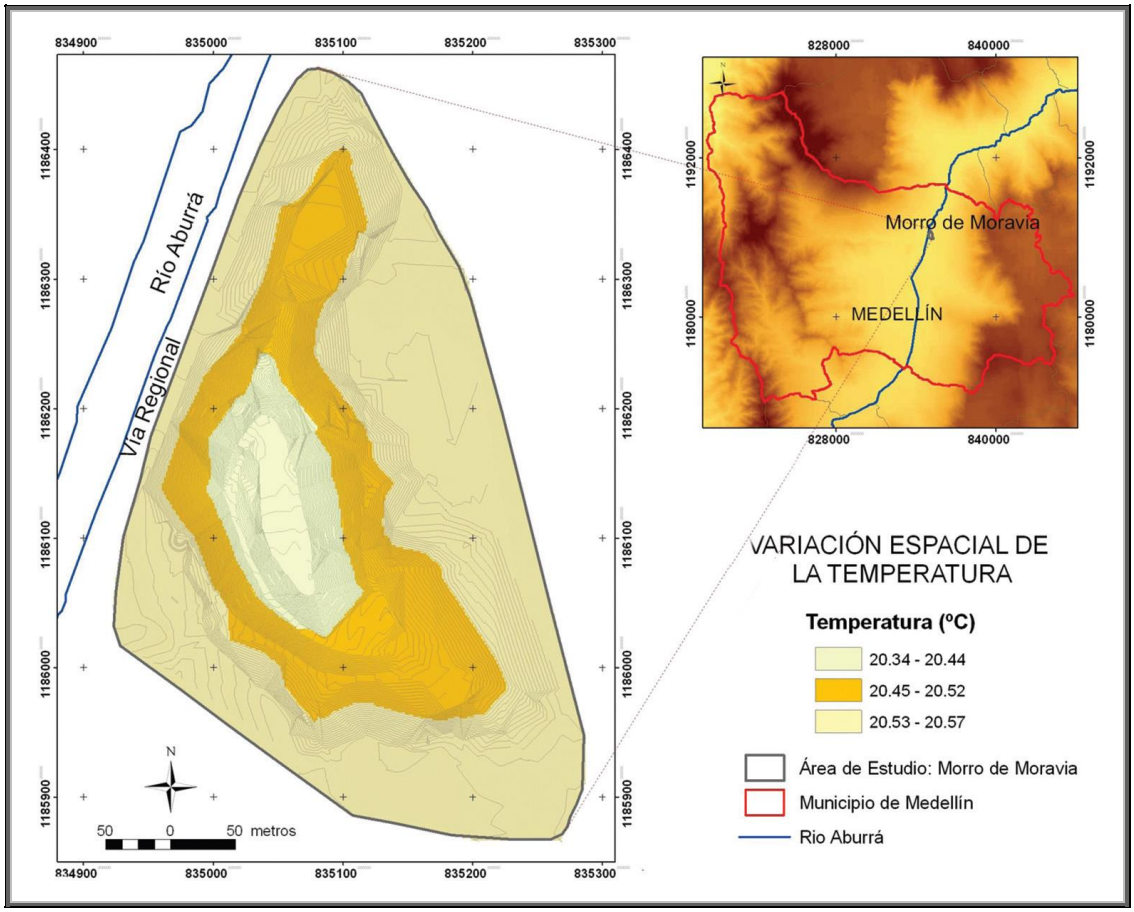


FIGURA 21 MAPA DE TEMPERATURA MEDIA, ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACIÓN DEL MORRO DE MORAVIA: FASE I (2008)

5.2.3 RADACIÓN SOLAR.

En la Figura 22 se muestran los registros diarios de radiación solar entre los años 2008 y 2011, con un valor medio diario de 10,86 Mj m^{-2}, con valores máximos en los meses de Junio de 2008 y Mayo de 2010.

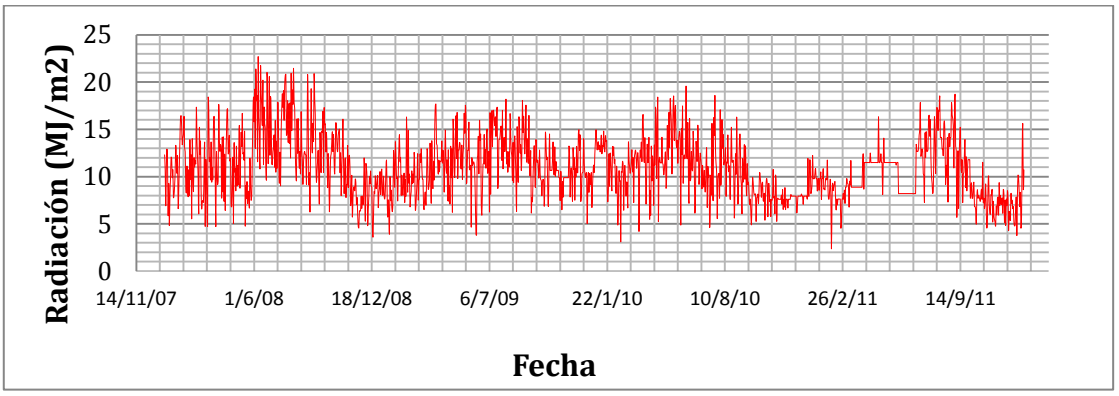


FIGURA 22 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA RADIACIÓN SOLAR (2008 - 2011)

5.2.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN.

La Evapotranspiración es una de las variables más importantes en el balance hídrico, representa la cantidad de agua saliente del sistema hacia la atmósfera en forma de vapor de agua, por medio de una combinación de la evaporación física y de la transpiración de la vegetación, para la cuenca del río aburra, zona en la cual se encuentra nuestra zona de estudio, la evapotranspiración real se estima por medio de la siguiente ecuación empírica:

$$\boldsymbol{ETR} = \frac{\boldsymbol{P}}{(\mathbf{1} + ((\frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{Rn}})^{\propto})^{\mathbf{1}/\propto}}$$

Dónde:

ETR= Evapotranspiración real en (mm/año).

P = Precipitación en la zona de estudio (mm/hora).

Rn = Equivalente en agua de la radiación neta (mm/año),

$\propto$= Parámetro que depende de la escala de estimación de la variable.

Para Antioquia la radiación neta es igual a 1172.69 mm/año y para $\propto$ se encontró un valor de 1.91, la ecuación es válida cuando la evapotranspiración no sobrepase los valores de P y Rn y la relación μ = P/Rn se encuentre en el intervalo $0.23<\mu<1.97$.

5.2.5 CURVAS IDF

Para determinar la intensidad y duración de las precipitaciones representativas para el Morro de basuras Moravia, se construyeron las curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF), a partir de los datos históricos disponibles de la estación pluviográfica Miguel de Aguinaga.

La intensidad se estima mediante la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{I = C(d + h)^n}$$

Dónde:

I: intensidad de la precipitación; d: Duración de la lluvia – Duración tormenta de diseño; m, h, c: Parámetros calculados mediante análisis de correlación lineal múltiple y están dadas para cada periodo de retorno.

Los valores c, h y m se presentan en Tabla 5 para diferentes periodos de retorno.

La variable d representa la duración de un evento extremo de lluvia, denominado tormenta de diseño (Tc), calculado en desarrollo del estudio piloto para la recuperación del Morro de Basuras de Moravia, el cual es representativo para todo el Morro de basuras, dando como resultado 25 minutos.

TABLA 5 VALORES DE C, H Y M, ESTACIÓN MIGUEL DE AGUINAGA

PERÍODO DE RETORNO EN AÑOS								
ESTACIÓN	PARÁMETRO	2.33	5	10	20	25	50	100
MIGUEL DE AGUINAGA	c	11762.0	18485.0	24290.0	30854.0	35067.0	39903.0	48618.0
	h	40	42	43	44	45	45	46
	m	-1.2843	-1.3325	-1.3586	-1.3818	-1.3987	-1.4053	-1.4253

Debido a las pocas precipitaciones ocurridas durante el periodo en el cual se ejecutó el ensayo se optó por la realización de lluvias artificiales, con intensidades obtenidas a partir de las curvas IDF (Figura 23) y la duración igual a la tormenta de diseño, para diferentes periodos de retorno (Tr), 2,33, 25 y 100 años.

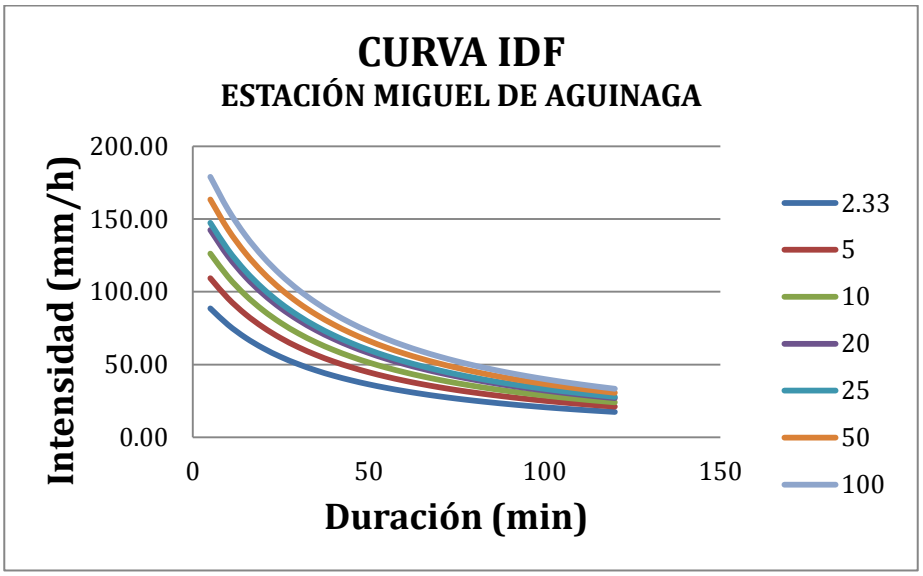


FIGURA 23 CURVA IDF ZONA DE ESTUDIO

5.2.6 ESCORRENTÍA.

La escorrentía superficial y sub-superficial está en función del tipo de cobertura, pendiente y permeabilidad de los materiales presentes en el Morro, circula por la superficie y la parte superior del terreno, originando flujos de agua que producen fuerzas hidrodinámicas en los taludes.

El volumen total de escorrentía en la parcela piloto se obtiene con mediciones directas, utilizando tres equipos de medición de volumen (Figura 24) instalados en la superficie, a 0,30 y 0,60 metros de profundidad.

Los equipos de medición de volumen fueron construidos por el taller de Mecánica fina y electrónica "mecano", adscrito a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional – Sede Medellín, fabricados con polipropileno, consta de un embudo en su parte superior que dirige el agua a una balanza con capacidad de 6 mm y un sensor de pulsos el cual registra los ciclos de la balanza, el equipo esta nivelado y apoyado sobre una base metálica la cual esta soldada a una varilla la cual se entierra a 1 m de profundidad.

FIGURA 24 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE VOLUMEN ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL

5.3 MODELACIÓN HIDROLOGICA UTILIZANDO EL MODELO HELP

El HELP es un modelo versátil desarrollado para la EPA, por el U.S. Army Corps of Engineers, para la simulación de los procesos hidrológicos en rellenos sanitarios, la evaluación de los diseños para vertederos y la estimación de las tasas de recarga de las aguas subterráneas. Este modelo ha tenido tanta aceptación que se ha convertido en un requisito para la obtención de permisos para la operación de vertederos en los Estados Unidos (Schroeder, 1993).

De acuerdo con Bou-Zeid y El-Fadel (2004), este modelo considera el relleno sanitario como un sistema de capas y aporta facilidades para analizar diariamente el comportamiento de los contaminantes generados por los residuos sólidos. Además, realiza un análisis del balance de agua en el relleno, usando aproximaciones determinísticas en un sistema bidimensional.

El modelo divide el relleno sanitario en capas, y aplica la técnica de balance de agua, para predecir la cantidad de lixiviados por generarse. Las velocidades de flujo se calculan para predecir el tiempo de aparición de los lixiviados. Los efectos de percolación son implícitamente tenidos en cuenta por la inclusión opcional de una capa de residuos con baja porosidad, baja capacidad de campo y bajo punto de marchitez. Las geomembranas y barreras de arcillas también pueden ser simuladas, al igual que escorrentía a través de las capas del relleno.

El modelo simula procesos internos y externos que influyen en los volúmenes de lixiviados, incluyendo: infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, retención de humedad del suelo, drenaje lateral subsuperficial,

recirculación del lixiviado, infiltración del agua subterránea, drenaje vertical no saturado, y escorrentía a través del suelo. Este modelo no tiene en cuenta el agua producida durante la fase inicial de descomposición aeróbica de los residuos putrescibles, ya que esta fase es de corta duración y no se espera que la generación de lixiviados por este proceso sea significativa (Schroeder et al., 1994).

5.3.1 INFORMACIÓN REQUERIDA POR EL MODELO HELP

Para la simulación hidrológica, este modelo requiere datos climatológicos diarios, las características del suelo y las especificaciones de diseño del relleno. Los datos de precipitación pueden ser suministrados por el usuario, o generados estocásticamente, a partir de un registro histórico perteneciente a la base de datos del programa.

En general, la información requerida es la siguiente:

- El estado del clima: datos de precipitación, radiación solar, temperatura y evapotranspiración.

- Suelo: porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica, humedad inicial y número de curva del SCS. El modelo, por defecto, contiene características del suelo para 42 tipos de materiales, para ser usadas cuando las mediciones o estimaciones para sitios específicos no sean posibles.

- Diseño del vertedero: capas, pendiente de la superficie, sistemas de recolección de lixiviados y escorrentías. Con estos datos, el modelo puede construir la estructura del perfil del relleno sanitario, el cual puede ser de varias capas, que consisten en una combinación de materiales naturales (suelo) y artificiales (residuos, geomembranas).

Dentro del diseño del relleno, las elevaciones del relleno se pueden fijar y los espesores de las capas se pueden variar. El modelo permite disponer de varios tipos de capas, las cuales pueden organizarse por el usuario, de acuerdo a las funciones hidráulicas que éstas poseen. Los tipos de capa son: capas de percolación vertical, capas de drenaje lateral, revestimiento en barrera de suelo, revestimientos en geomembrana y capas de geotextiles y georedes. Las capas en tierra vegetal y residuos se representan dentro del perfil como capas de percolación vertical.

El modelo permite asignar las propiedades de las capas definidas dentro del perfil. Estas propiedades corresponden a: porosidad total, capacidad de

campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica, afluentes subsuperficiales y contenido inicial de humedad. Con relación a los revestimientos en geomembrana, el modelo permite establecer características para este tipo de materiales, con relación a la calidad del producto e instalación dentro del relleno.

6 ESTABILIDAD DE TALUDES.

Los análisis de estabilidad de taludes del Morro de basuras se realizaron utilizando los parámetros geotécnicos encontrados en ensayos "*in situ*" realizados en el área de estudio, analizando los perfiles con el método de equilibrio limite, donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie.

El análisis de estabilidad se enfoca en encontrar el factor de seguridad en función de la geometría del talud, propiedades de los materiales (peso, Cohesión, ángulo de fricción) y las condiciones hidráulicas representadas como fuerzas hidrodinámicas.

El factor de seguridad se obtiene analizando las fuerzas que actúan sobre un bloque de suelo, el cual se muestra en la Figura 25, realizando la igualdad de las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes, en una determinada superficie de falla.

$$FS = \frac{\sum FUERZAS\ RESISTENTES}{\sum\ FUERZAS\ \ ACTUANTES}$$

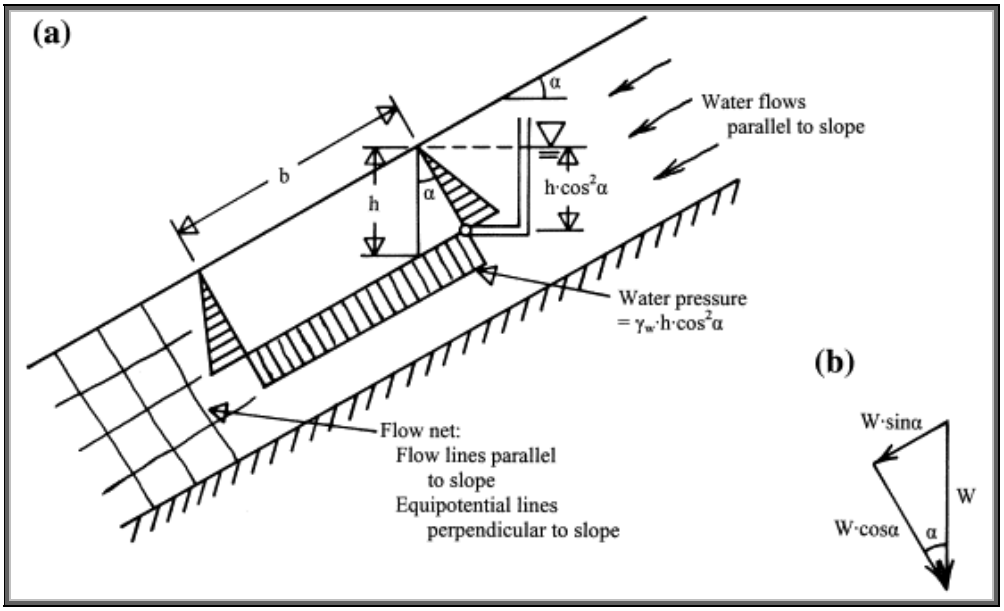


FIGURA 25 FUERZAS ACTUANTES EN UN BLOQUE DE SUELO, LADE (2010).

Las fuerza resistentes están en función de los parámetros descritos por el criterio de falla de Mohr Coulomb (ecuación 5), donde S en la resistencia a la cizalladura de los RSU, σ' es la presión efectiva, c' corresponde a la cohesión para presiones efectivas y ∅' es el ángulo de fricción efectivo.

$$S = c' + \sigma' * tg\emptyset'$$

Analizando la Figura 25, la presión efectiva es igual a:

$$\sigma' = \frac{W' * cos\alpha}{b} = \frac{\left((\gamma sat * b * h * cos\alpha) - (\gamma w * b * \mathrm{h} * cos^2 \propto)\right) * cos\alpha}{b}$$

$$= (\gamma sat - \gamma w * cos \propto) * h * cos^2\alpha$$

Donde ϒsat es el peso saturado y ϒw es el peso del agua.

Reemplazando en la ecuación 3 la resistencia al corte en el bloque "S" es igual a:

$$S = c + (\gamma sat - \gamma w * cos \propto) * h * cos^2 \alpha * tg\emptyset$$

De la Figura 25 las fuerzas actuantes "T" son iguales a

$$\tau = \frac{(W * sin\alpha)}{b} = (\gamma sat * h * cos\alpha * sin \propto)$$

Según la ecuación 4, en el bloque analizado el factor de seguridad es igual a:

$$F.S. = \frac{c + (\gamma sat - \gamma w * cos \propto) * h * cos^2 \alpha * tg\emptyset}{(\gamma sat * h * cos\alpha * sin \propto)}$$

Las fuerzas motoras en un bloque de suelo, están en función del peso de los materiales, área involucrada, pendiente del talud y las fuerzas hidrodinámicas originadas por los flujos de agua paralelos a la superficie del talud, sobre una capa impermeable, como se observa en la Figura 26.

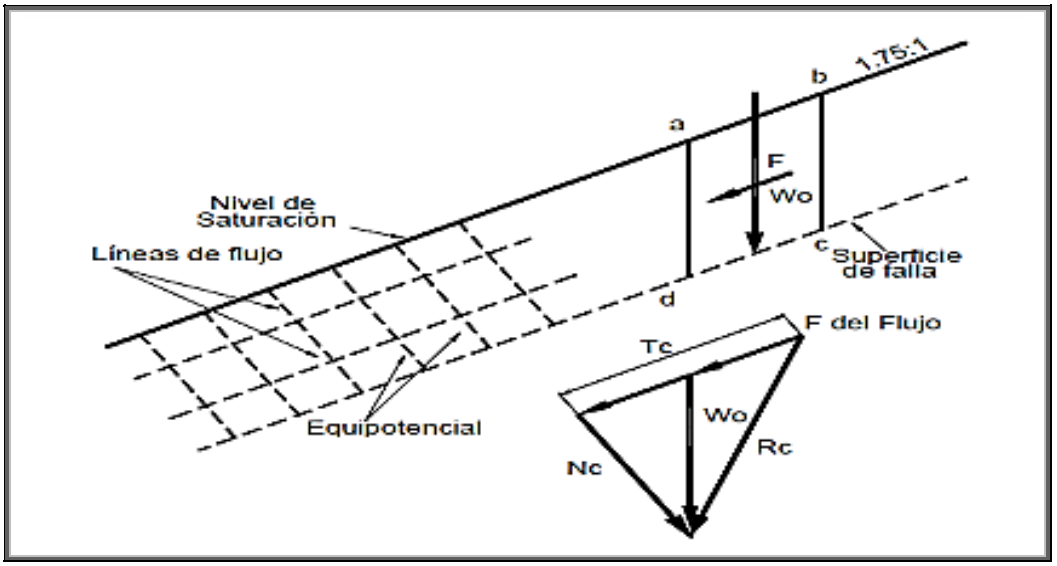


FIGURA 26 FUERZAS HIDRODINAMICAS ACTUANTES EN EL TALUD.

El empuje Hidrodinámico es igual a:

$$F = (\gamma w * \Delta h) * b$$

Donde b es la longitud analizada, igual a 1 m.

Por lo tanto el factor de seguridad involucrando las fuerzas hidrodinámicas ese calcula con la siguiente ecuación:

$$F.S. = \frac{c + (\gamma sat - \gamma w * cos \propto) * h * cos^2 \alpha * tg\emptyset}{(\gamma sat * h * cos\alpha * sin \propto) + (\gamma w * \Delta h)}$$

7 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA Y DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL MORRO DE BASURAS.

A partir de la información obtenida en las pruebas de carga en campo se elaboraron los gráficos de carga aplicada contra desplazamiento para cada uno de los pilotes ensayados, determinando la capacidad de carga última, la cual corresponde al punto en el cual la curva forma una asíntota horizontal.

En la Figura 27 se puede observan los gráficos carga contra asentamiento para los tres pilotes ensayados.

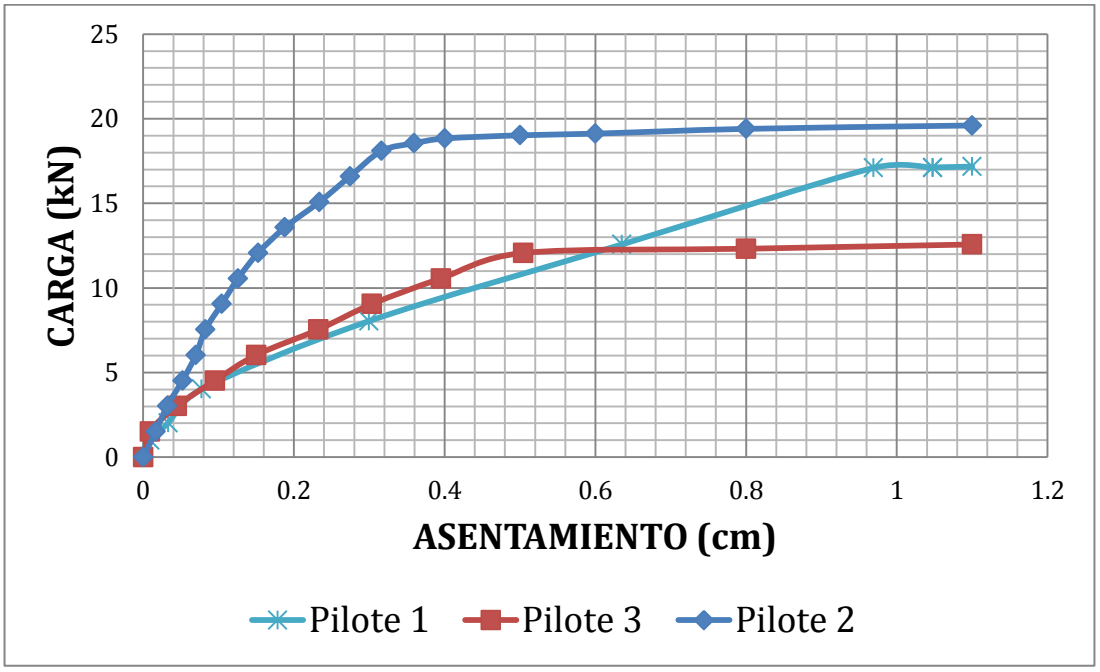


FIGURA 27 CURVA CARGA CONTRA ASENTAMIENTO DE PILOTES ENSAYADOS.

La Tabla 6 muestra las dimensiones de los pilotes, asentamientos y capacidad de carga última de cada uno de ellos.

TABLA 6 INFORMACIÓN Y RESULTADOS PILOTES ENSAYADOS A CARGA AXIAL

	Diámetro (m)	Longitud (m)	Asentamiento (mm)	Carga Última Qu (kN)
Pilote 1	0,1016	2,5	1,05	17,17
Pilote 2	0,1016	2,5	0,40	19,60
Pilote 3	0,1016	2,5	0,50	12,32

La valides y confiabilidad de los datos encontrados en los ensayos de carga axial se realiza a partir de la comparación de éstos con los parámetros de resistencia registrados en la literatura técnica, determinados en ensayos *in situ* realizados en condiciones similares.

Se realizó un análisis estadístico utilizando la teoría de la aleatoriedad, la cual analiza la variabilidad en las propiedades geotécnicas mediante una simulación estadística. En general se considera que todas las propiedades geotécnicas que intervienen en cualquier estudio corresponden a variables aleatorias que se pueden describir mediante funciones de distribución de prueba.

Inicialmente a la base de datos conformada por 29 valores de cohesión y ángulo de fricción, se le realiza un remuestreo, el cual consiste en la obtención de muestras aleatorias extraídas a partir del conjunto inicial de datos, mediante el Programa estadístico R, conformando 8000 combinaciones, es decir, se constituyen parejas de cohesión y ángulo de fricción extraídos de la base de datos aleatoriamente, momento en el cual la media y desviación estándar se estabilizan, no varían respecto a la base de datos de 7000 parejas, por lo cual no es necesario un número mayor de datos.

Las combinaciones resultantes deben estar dentro del área propuesta por Palma, Figura 28, la cual representa los parámetros de resistencia recomendados para rellenos sanitarios, obtenidos a partir de los resultados publicados en la literatura especializada, derivados de investigaciones en laboratorio, ensayos “in situ” y análisis posteriores,

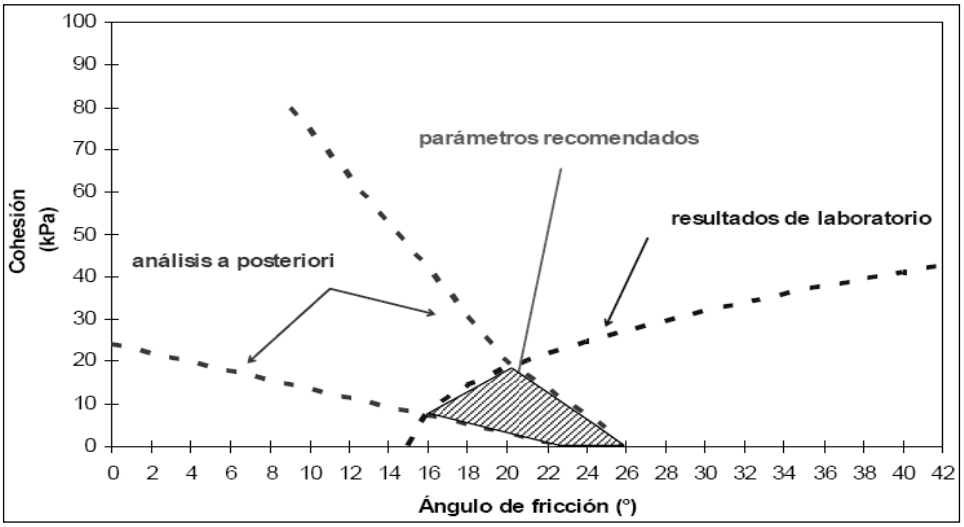


FIGURA 28 PARÁMETROS DE RESISTENCIA MECÁNICA PARA DISEÑO EN RELLENOS SANITARIOS (PALMA, 1995).

Con esta información se realiza el cálculo de la capacidad de carga por punta, utilizando las teorías clásicas para el cálculo de cimentaciones profundas de Terzaghi, Meyerhof y Brinch-Hansen y el método propuesto en la Norma colombiana sismo resistente NSR-10 para el cálculo de la resistencia por fricción superficial.

A los valores de capacidad de carga se les realiza un análisis univariado, Tabla 7, el cual se orienta a describir el tipo de distribución de frecuencias y su grado de similitud en relación con una distribución conocida (normal, log-normal). Para esto se utilizó el análisis gráfico, medidas de la amplitud, de tendencia central, de variabilidad y de estructura.

TABLA 7 MEDIDAS ESTADÍSTICAS.

Tipo de análisis	Medidas
Gráfico	Histograma y Función de Densidad
Amplitud	Mínimo, Máximo y Rango
Tendencia Central	Media y Mediana
Variabilidad	Desviación Estándar, Varianza y Coeficiente de Variación. Grado de
Estructura	Skewsnes (coeficiente de sesgo) y Kurtosis

La capacidad de carga función de las propiedades geomecanicas de los RSU es la variable analizada, los valores estadísticos se presentan en la Tabla 8.

TABLA 8 RESUMEN MEDIDAS ESTADISTICAS

CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA (kN)			
MEDIDAS	***TERZAGHI***	***BRINCH HANSEN***	***MEYERHOF***
Media	9,9	14,1	13,9
Error típico	0,0	0,1	0,1
Mediana	10,0	14,0	14,0
Moda	10,0	13,0	12,0
Desviación estándar	2,3	4,9	4,8
Varianza de la muestra	5,5	24,3	23,5
Curtosis	-0,6	-0,8	-0,8
Coeficiente de asimetría	0,1	0,2	0,2
Rango	11,0	20,0	20,0
Mínimo	4,0	4,0	4,0
Máximo	15,0	24,0	24,0
Suma	79540,0	112954,0	111565,0
Cuenta	8000,0	8000,0	8000,0
Mayor (1)	15,0	24,0	24,0
Menor(1)	4,0	4,0	4,0
Nivel de confianza (95.0%)	0,051	0,108	0,106

Se observa la similitud de resultados aplicando las teorías clásicas de capacidad de carga de Brinch-Hansen y Meyerhof, la teoría propuesta por Therzaghi es muy conservadora, arrojando valores de capacidad de carga inferiores a los encontrados en las pruebas de carga en Micropilotes, por lo tanto la función de distribución se realizará con los obtenidos con la metodología propuesta por Brinch Hansen.

De los valores presentados en la Tabla 8, el coeficiente de SESGO determina el grado de asimetría (alargamiento de la distribución hacia la izquierda o hacia la derecha) y el coeficiente de Kurtosis analiza el grado de concentración que presentan los valores alrededor de la zona central de la distribución.

Al nivel de la estructura se observa un valor de coeficiente de sesgo (skewness) de 0.2 el cual al ser menor que 1 indica un desplazamiento de la distribución hacia la derecha respecto al valor medio de capacidad de carga, 13,9 kN.

7.1.1 HISTOGRAMA

En la Figura 29 se presenta el histograma para la variable capacidad de carga última (Qu), el cual muestra tendencia de los datos a una distribución normal.

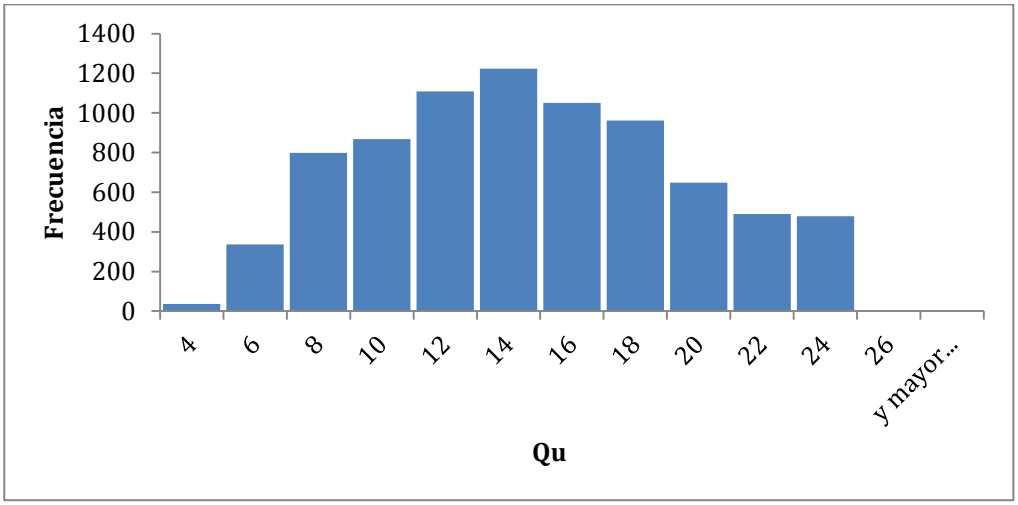


FIGURA 29 HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE QU.

Para definir la función de distribución de los datos se realiza el diagrama cuantil-cuantil el cual compara en un sistema de coordenadas cartesianas los cuantiles muéstrales (eje X) versus los cuantiles esperados bajo la hipótesis de normalidad (eje y); si la distribución de partida es normal dichos diagramas tenderán a ser rectas y pasarán por el origen, cuanto más se desvíen de una recta esta gráfica, menos normales serán los datos, el gráfico cuantil se presenta en la Figura 30.

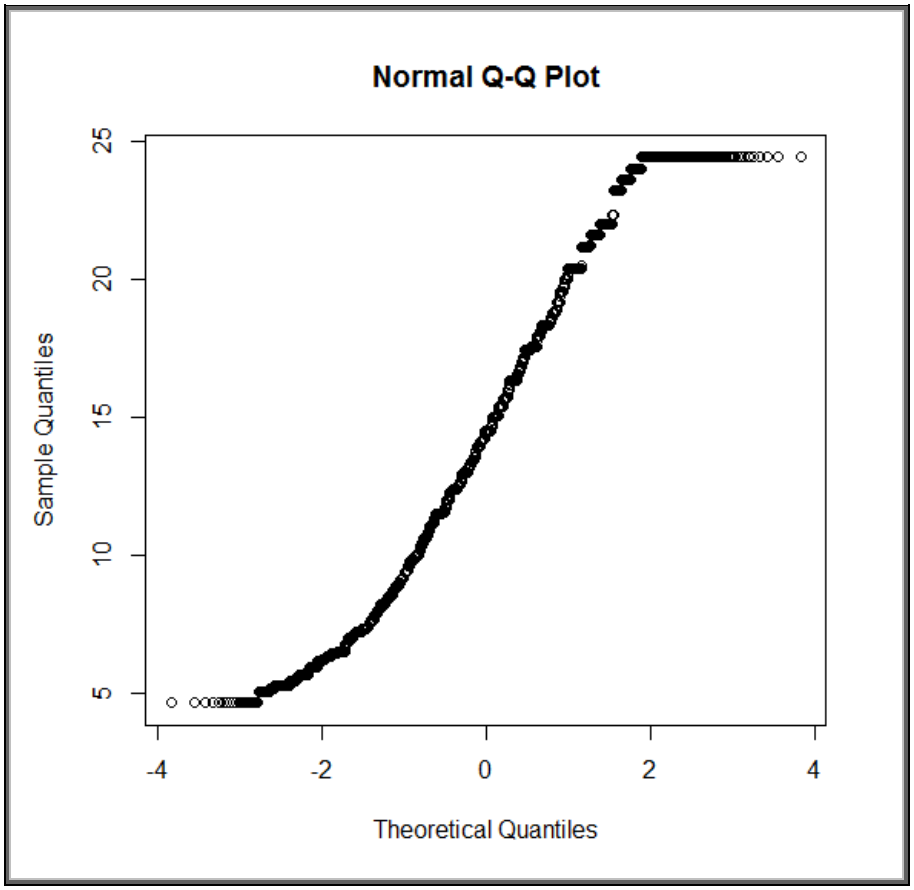


FIGURA 30 DIAGRAMA CUANTIL-CUANTIL

Esta gráfica evidencia que los datos presentan una distribución simétrica o muy cercana a la normalidad; sin embargo, hacia los extremos se presenta desviación, por lo tanto se aplicara la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para determinar numéricamente la normalidad o no de los datos, encontrando que la población analizada no se ajusta a una distribución normal, el valor de probabilidad es menor a 0,5, necesario para cumplir con la hipótesis de normalidad con una confianza de 95%, por lo tanto los datos analizados no cumplen una función conocida, se halla una función empírica mediante el programa estadístico R, la cual se muestra a continuación Figura 31.

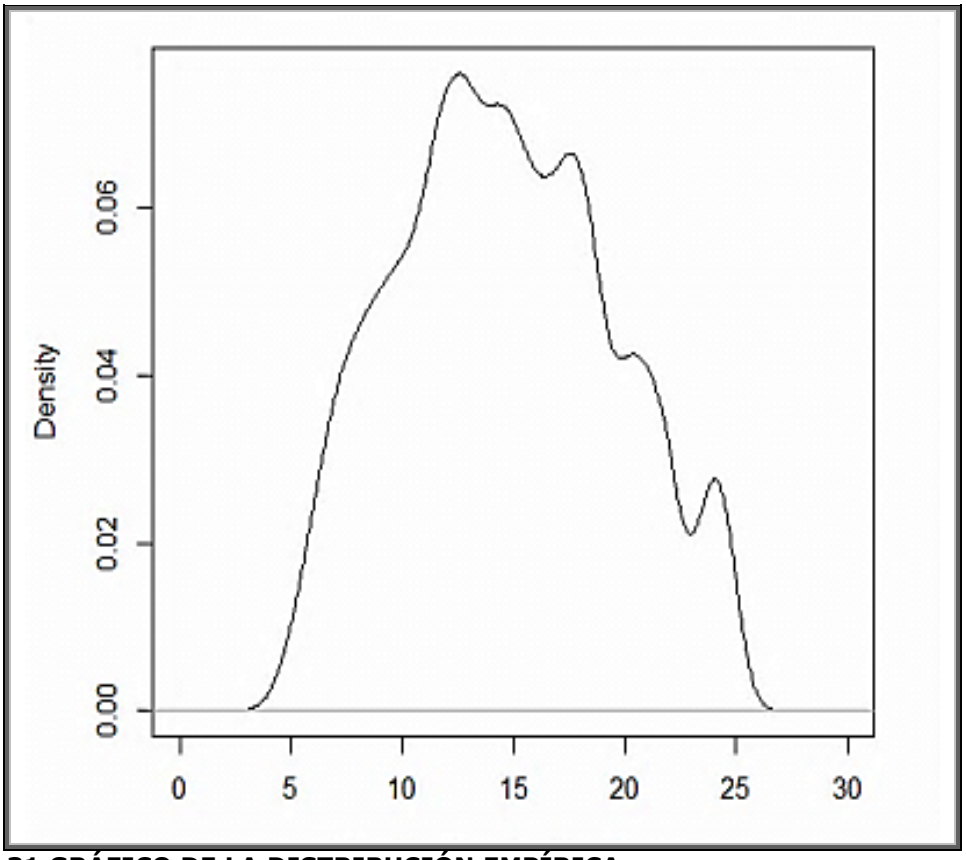


FIGURA 31 GRÁFICO DE LA DISTRIBUCIÓN EMPÍRICA

7.2 MODELACIÓN EN HELP 3.9 D

Se realizará la calibración del modelo ajustando el comportamiento del caudal de lixiviados simulados en función de las características físicas de los RSU. Se toma en cuenta los volúmenes de lixiviados que produce el Morro de basuras de Moravia entre los años 2008 y 2011, periodo con información climática disponible posteriormente se propone una alternativa de sellado eficiente que reduzca la generación de lixiviados.

7.2.1 INFORMACIÓN UTILIZADA

En la Tabla 9 y la Tabla 10 se presenta la información climática y características físicas de los RSU utilizadas en el proceso de modelación, al igual que la fuente de información de la cual se obtuvieron dichos datos.

TABLA 9 INFORMACIÓN CLIMATICA.

Información de clima	
Tipo de información	**Fuente de información**
Precipitación diaria	Estación pluviométrica Miguel de Aguinaga. Período de registro: 01/01/2001 – 31/12/2011
Temperatura diaria	Estación pluviométrica Miguel de Aguinaga. Período de registro: 01/01/2008 – 31/12/2011
Radiación solar diaria	Estación pluviométrica Miguel de Aguinaga. Período de registro: 01/01/2008 – 31/12/2011

TABLA 10 INFORMACIÓN RELLENO SANITARIO

Información de diseño del relleno sanitario	
Tipo de información	**Fuente de información**
Área del relleno sanitario	Estudio piloto para la recuperación del morro de Moravia: Fase I
% del área donde es posible la escorrentía	
Humedad inicial	Datos de ensayos de humedad
Profundidad de zona de evaporación	Se establece 5 cm.
Conductividad hidráulica	Resultado obtenido en 20 ensayos de permeabilidad en campo
Especificaciones técnicas de la geomembrana.	No aplica
Especificaciones del drenaje.	No aplica
Tipo de capa, espesor	Estudio piloto para la recuperación del morro de Moravia: Fase I
Porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez	Datos del modelo por defecto.

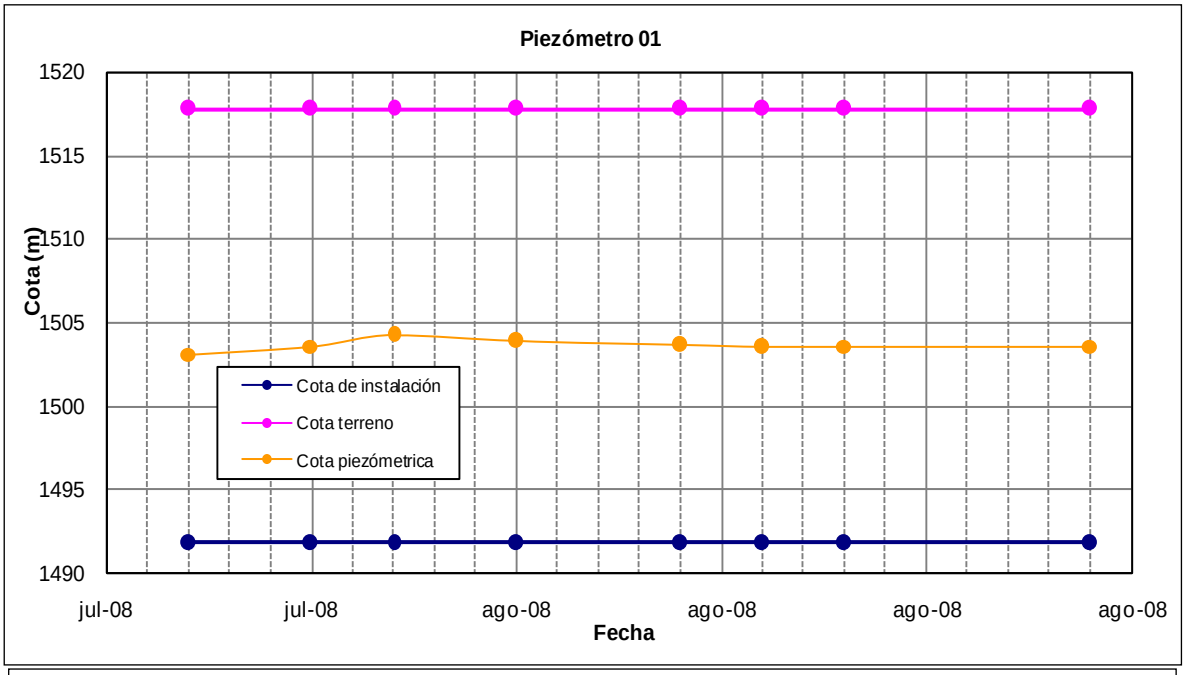
7.2.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO.

Para el proceso de calibración del modelo no se contaba con el registro de caudales de lixiviados a escala diaria necesarios para comparar los caudales simulados con el Modelo Help 3.9D y los caudales reales.

La calibración del modelo se realizó con la información disponible en el estudio piloto para la recuperación del morro de Moravia: fase 1, realizado en el año 2008, utilizando el registro de lecturas de piezometría en dos piezómetros de hilo vibrante instalados a 26 m y 30 m de profundidad respectivamente, entre el 28 de junio de 2008 y el 19 de agosto del mismo año.

La calibración consistió en validar los valores de porosidad, capacidad de campo y punto de marchitez, utilizando inicialmente los valores propuestos por el Modelo y realizando variaciones hasta lograr que el caudal de lixiviados adquiriera un comportamiento similar a los registrados en las lecturas de piezometría.

En la Figura 32 se muestran las lecturas piezométricas y en la Figura 33 se ilustran los caudales de lixiviados simulados.



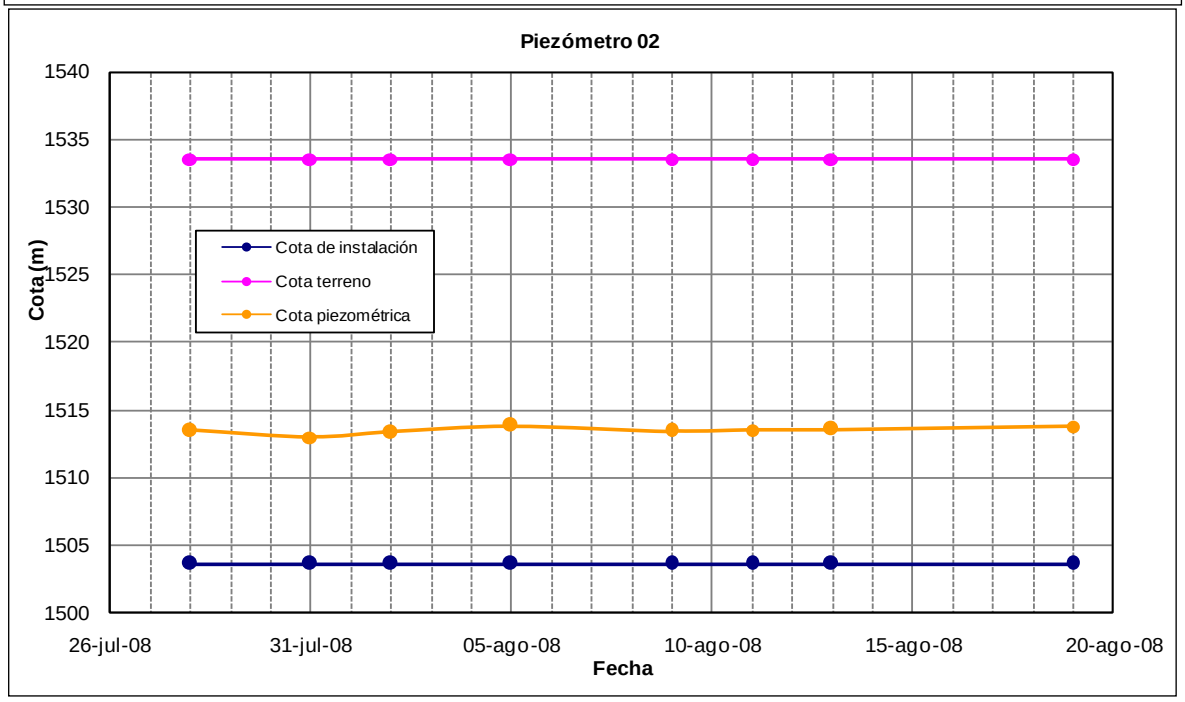


FIGURA 32 LETURAS PIEZOMETRICAS RELACIONANDO PROFUNDIDAD Y TIEMPO, ESTUDIO PILOTO PARA LARECUPERACIÓN DEL MORRO DE MORAVIA (2008).

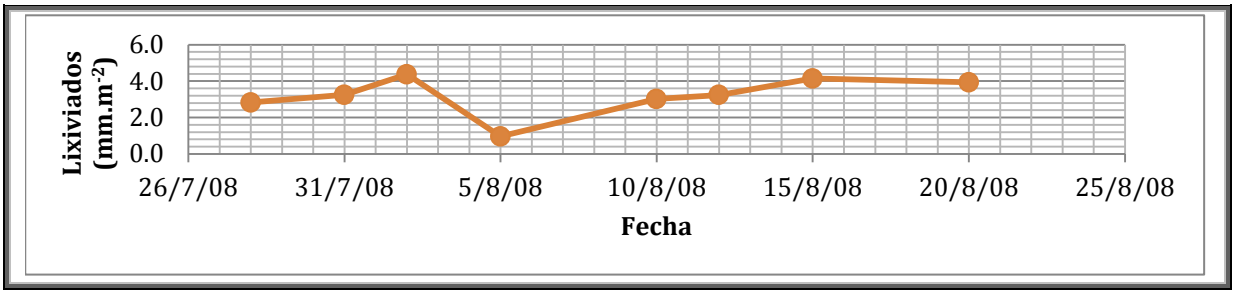


FIGURA 33 LIXIVIADOS SIMULADOS EN MODELO HELP 3.9D

Comparando el caudal de lixiviados simulados y la variación de las cotas piezométricas en el mismo periodo de tiempo, se observa que el equilibrio en la presión de poros y la variación similar de los caudales simulados presenta un pico en el tercer día de lectura y un ligero incremento en las últimas cuatro lecturas.

7.2.3 SIMULACIÓN.

Se realizó la simulación utilizando los valores para los RSU obtenidos en la calibración, Tabla 11.

TABLA 11 VALORES INGRESADOS EN EL MODELO

VALORES DE LOS RSU	
Porosidad	0,5
Conductividad hidráulica saturada (cm/s)	2,50E-05
Capacidad de campo	0,35
Punto de marchites	0,07
Contenido de humedad	0,05
Velocidad real del flujo	1,81E+03

En la Figura 34 se muestra la precipitación diaria contra el volumen de lixiviado simulado, el caudal promedio en el periodo de tiempo analizado es igual a 62,23 lt/día, el valor máximo alcanzado corresponde al día 12 de septiembre de 2011 con 204,24 lt/día, los periodos de volumen de lixiviado cercano a cero corresponden a días de baja precipitación.

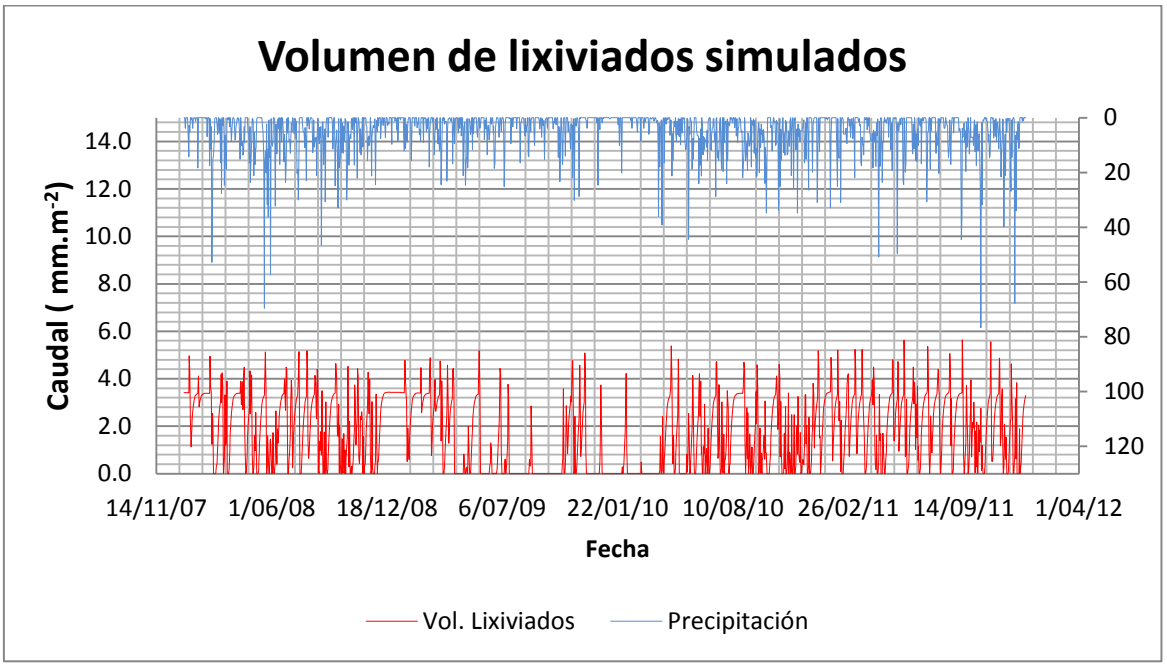


FIGURA 34 VOLUMEN DE LIVIVIADOS SIMULADOS EN HELP 3.9D

El volumen de lixiviados generados en un relleno sanitario depende en gran medida del sistema de cobertura implementado, por lo cual se realiza la simulación utilizando el modelo Help 3.9D como herramienta de ayuda para la selección de un sistema de sellado optimo, que disminuya el volumen de lixiviados generados y sea viable técnicamente.

Se propone una capa de arcilla limosa de 20 centímetros de espesor, la cual reduce la infiltración por su baja permeabilidad, los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 12.

TABLA 12 PARAMETROS COBERTURA

Arcilla limosa	
Numero de capa (base de datos HELP)	11
Porosidad	0,464
Capacidad de campo	0,31
Punto de marchitez	0,187
Conductividad hidráulica (cm/s)	$1x10^{-6}$

Los sistemas de sellado convencionales se basan en la utilización de capas cuya función es ejercer un efecto barrera para evitar la percolación de líquido hacia la capa de R.S.U. con la consiguiente generación de lixiviados.

Estas capas barrera están formadas por materiales cuya conductividad hidráulica es muy baja, como por ejemplo, geomembranas, geosintéticos o capas de arcillas muy impermeables como la utilizada en este caso para el sistema de sellado descrito.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al modelar este tipo de sellado en Help 3.9D, aplicable al morro de basuras de Moravia. Se determina la variación en el volumen de lixiviados y escorrentía superficial.

En la Figura 35 se observa que la cobertura propuesta influye en el aumento de la proporción de precipitación mensual que se convierte en escorrentía, pasando de 8,13% para el relleno sin cobertura a un 50,98% con el sellado propuesto.

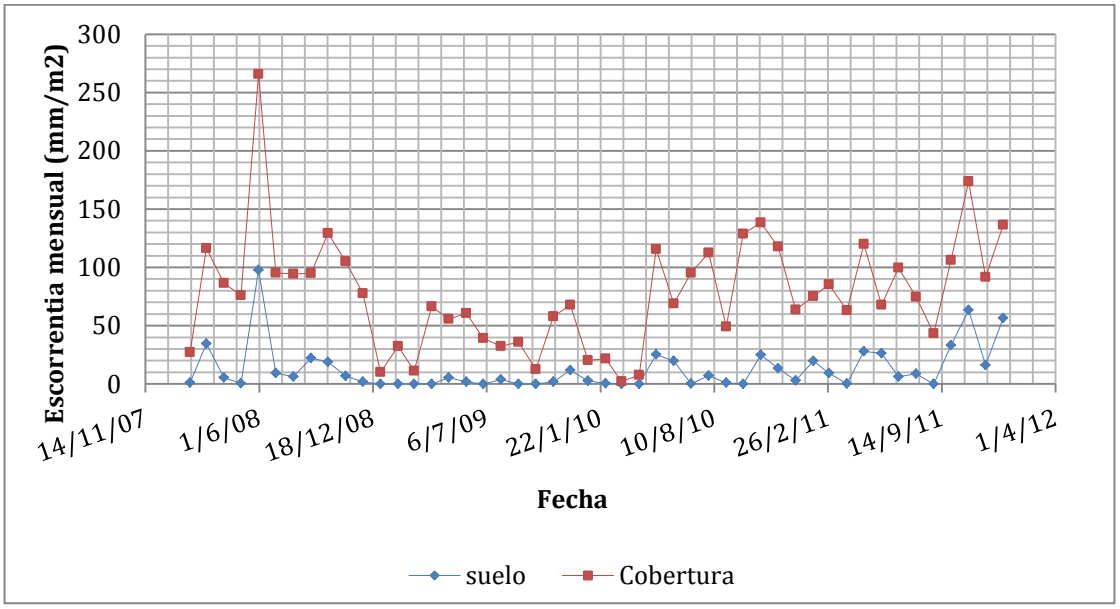


FIGURA 35 VARIACIÓN VOLUMEN DE ESCORRENTIA

En la Figura 36 se observa la variación del volumen mensual de lixiviados, mostrando la eficiencia del sistema de sellado, reduciendo el promedio de 62,23 lt/día para el morro sin ningún tipo de cobertura a 2,74 lt/día. El valor máximo diario es el 18 de marzo de 2011 con una producción de lixiviados

igual a 32 lt/día, el porcentaje de precipitación que se convierte en lixiviados disminuye de 34,37% a 1,52% implementando este sistema de cobertura.

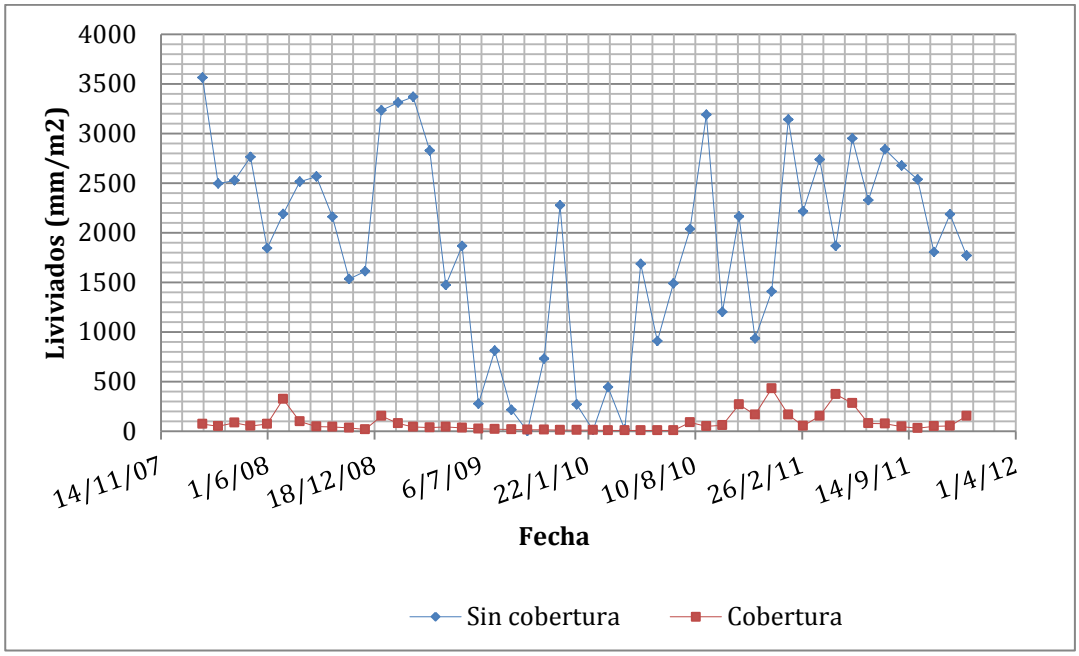


FIGURA 36 VARIACIÓN VOLUMEN DE LIXIVIADOS

7.3 PARCELA PILOTO DE MEDICIÓN

Se realizaron en total tres lluvias artificiales, obteniendo el volumen total que percoló en las tres diferentes profundidades (0m, 0,30 y 0,60m) en un periodo de tiempo de 25 minutos. En la Figura 37 se observa la disminución de la percolación con la profundidad, conclusión que se esperaba, al igual la presencia de fuerzas hidrodinámicas para taludes con pendientes cercanas al 18% a diferentes profundidades, disipándose completamente a los 70 cm aproximadamente.

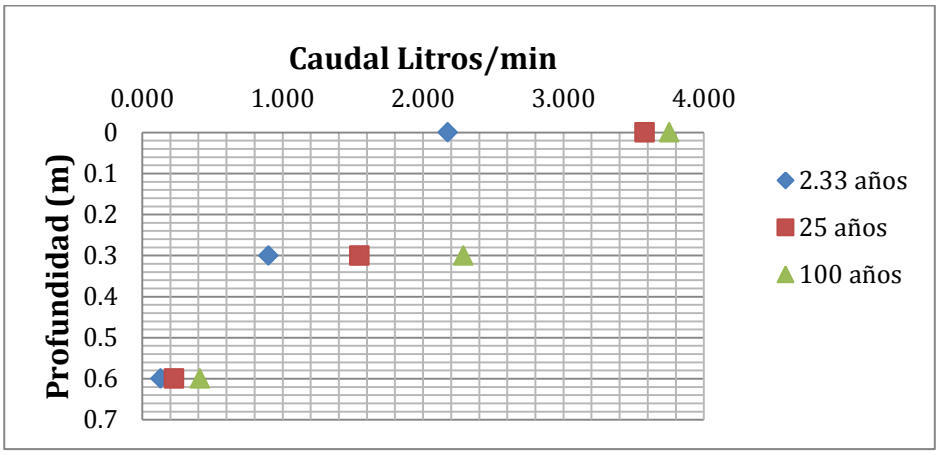


FIGURA 37 CAUDALES DE PERCOLACIÓN VS PROFUNDIDAD.

El ensayo realizado presenta las siguientes limitaciones:

Pendiente uniforme: El morro de basuras del barrio Moravia presenta diferentes pendientes, sitios poco inclinados en la parte inferior y la cima, esta tiene una área de 1280,8 m^2 aproximadamente, el área restante presenta diferentes inclinaciones, alcanzando sitios casi verticales en algunos costados, la pendiente de la parcela es de 18%, por lo tanto las mediciones realizadas no son representativas para todas las laderas.

Tipo de vegetación: La cobertura presente en la parcela representa aproximadamente el 0,1% de la vegetación presente en el morro de basuras, influye directamente en la escorrentía superficial, la tasa de evapotranspiración y por lo tanto afecta el flujo sub-superficial.

Área: El área ensayada corresponde solamente al 0.04% del área total del Morro de basura.

7.4 CALIBRACIÓN FACTOR NΥ

Se analiza el factor NΥ presente en la ecuación de capacidad de carga de Brinch Hansen para cimentaciones superficiales y se realiza la corrección utilizando el programa de elementos finitos PLAXIS, con el fin de ser aplicada en los materiales que constituyen el morro de basuras, esta corrección será corroborada con los resultados de ensayos de carga sobre placa realizados en el estudio piloto para la recuperación del morro de Moravia, fase I.

Las normas existentes que abordan los problemas de capacidad de carga se basan en una generalización realizada por Brinch Hansen a la expresión dada

por Terzaghi en la que incluye diferentes coeficientes que tienen en cuenta los posibles efectos que afectan a una zapata corrida, definida por la siguiente ecuación:

$$q_u = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot g_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot g_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \cdot d_\gamma \cdot g_\gamma$$

Donde los parámetros son debido a correcciones producto de:

Sc, s_q, s_γ: Forma del cimiento.

i_c, i_q, i_γ: Inclinación de la carga actuante.

d_c, d_q, d_γ: Profundidad de cimentación.

g_c, g_q, g_γ : Inclinación del terreno.

$N\gamma$ y N_q se definen con las siguientes expresiones:

$$N_q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)\exp^{\pi.\tan\phi}$$

$$N_\gamma = 1{,}5 \cdot \left(N_q - 1\right)\tan\phi$$

Con el fin de encontrar la capacidad de carga última de la cimentación superficial en el programa de elementos finitos, se realizan las siguientes suposiciones.

La cimentación superficial es de tipo corrida, apoyado en RSU con peso específico igual a 14 kN/m^3, asumiendo cohesión nula y sin sobrecarga que la rodee, la ecuación de capacidad de carga queda reducida a la siguiente expresión:

$$q_u = \frac{1}{2}\gamma_d b N_\gamma$$

En esta expresión $N\gamma$ es el factor que toma en cuenta la oposición del suelo a ser desplazado, en la Tabla 13se presentan los variables utilizadas en la simulación.

TABLA 13 PARAMETROS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

CIMENTACIÓN CORRIDA	
Ancho (m)	3.2
Espesor (m)	0.25
RSU	
γh (kN.m^{-3})	16
E (MPa)	15
u (relación de Poisson)	0.35
MALLA	
Ancho (m)	60
Espesor (m)	20

En Figura 38 se observa el modelo numérico utilizado, la limitación en la modelación consiste en que se utilizó el modelo constitutivo de Mohr Coulomb, se sugiere en futuros modelamientos en estos materiales, la utilización del modelo Soft soil creep.

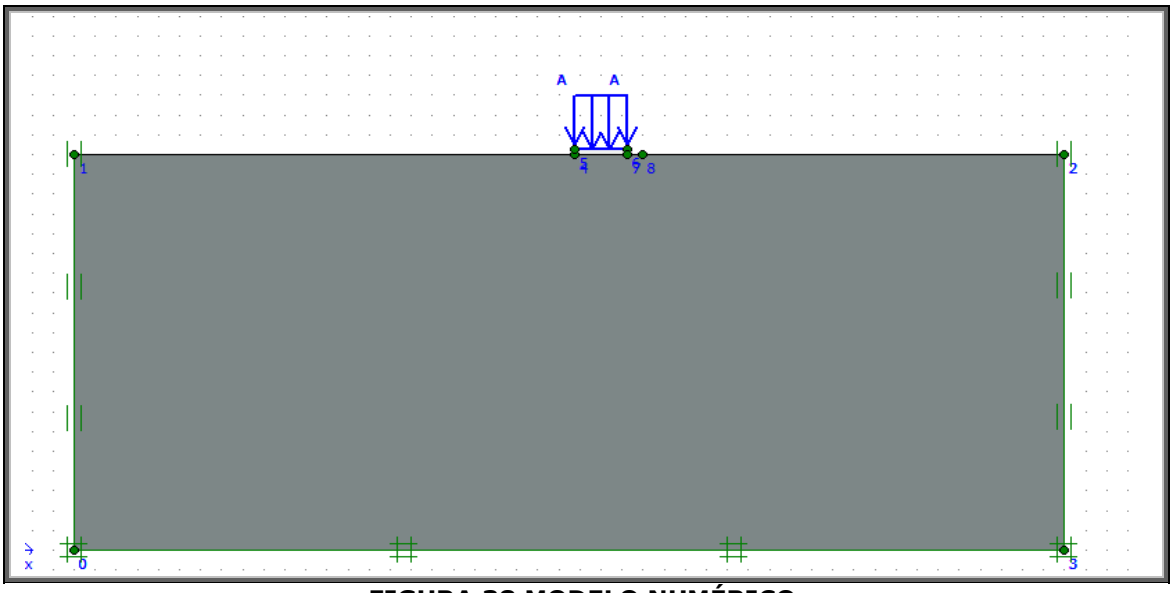


FIGURA 38 MODELO NUMÉRICO.

La capacidad de carga última de la cimentación es directamente proporcional con el incremento en el ángulo de fricción de los RSU, los resultados se

muestran en la Tabla 14, utilizando la formulación propuesta por Hansen se despeja el factor NΥ.

TABLA 14 CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA

Angulo de fricción (°)	qu (kN/m$^{2)}$	NΥ Analítico	NΥ Numérico
26	13.5	7.94	0.77
27	14.9	9.32	0.85
28	18	10.94	1.03
29	19.3	12.84	1.10
30	20.2	15.07	1.15

Se observa en la Figura 39, la diferencia del factor NΥ utilizando la formulación propuesta por Hansen y los resultados obtenidos en el modelo numérico.

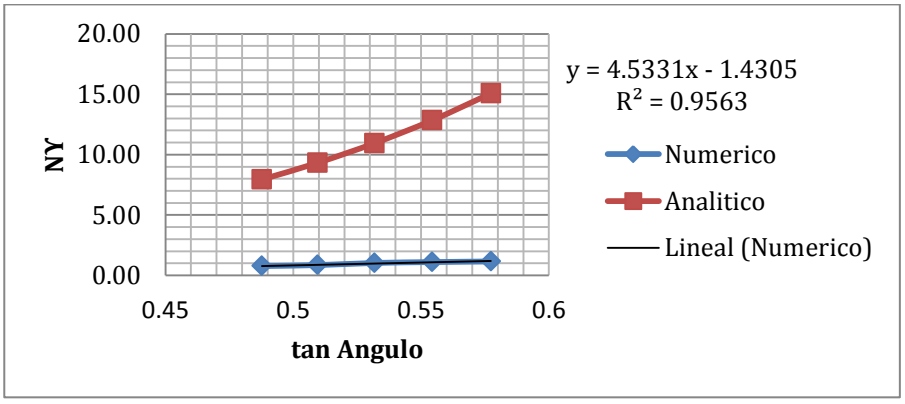


FIGURA 39 COMPARACIÓN FACTOR NΓ NUMÉRICO Y ANALÍTICO

Ajustando los resultados del modelo numérico se proponen las constantes presentadas en la Tabla15 y la Figura 40. Para la estimación del factor de capacidad de carga, estos resultados son representativos para los materiales presentes en el Morro de Basuras del Barrio Moravia.

TABLA15 FACTOR DE CORRECCIÓN

Angulo de fricción (°)	Constante	NΥ (numérico)
26	0.16	0.85
27	0.14	0.89
28	0.13	0.93

29	0.11	0.96
30	0.10	1.00

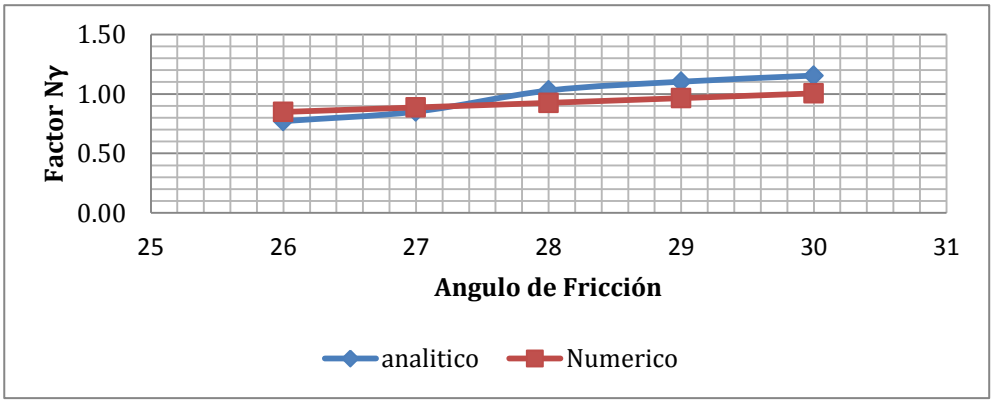


FIGURA 40 COMPARACIÓN FACTOR NΓ ANALITICO Y NUMERICO CORREGIDO.

Con la corrección propuesta para los materiales constitutivos del Morro de basuras, con un ángulo de fricción igual a 30°, el factor de carga NΥ se define según la siguiente ecuación:

$$N_{\gamma} = 0.1\left(N_{q} - 1\right) \cdot \tan\phi$$

Se utiliza la información disponible de tres ensayos de carga sobre placa realizados en el estudio piloto para la recuperación de Moravia, Fase I, Figura 41, con los cuales se contrasta el resultado de capacidad de carga ultima utilizando la formulación propuesta por Hansen con las modificaciones encontradas.

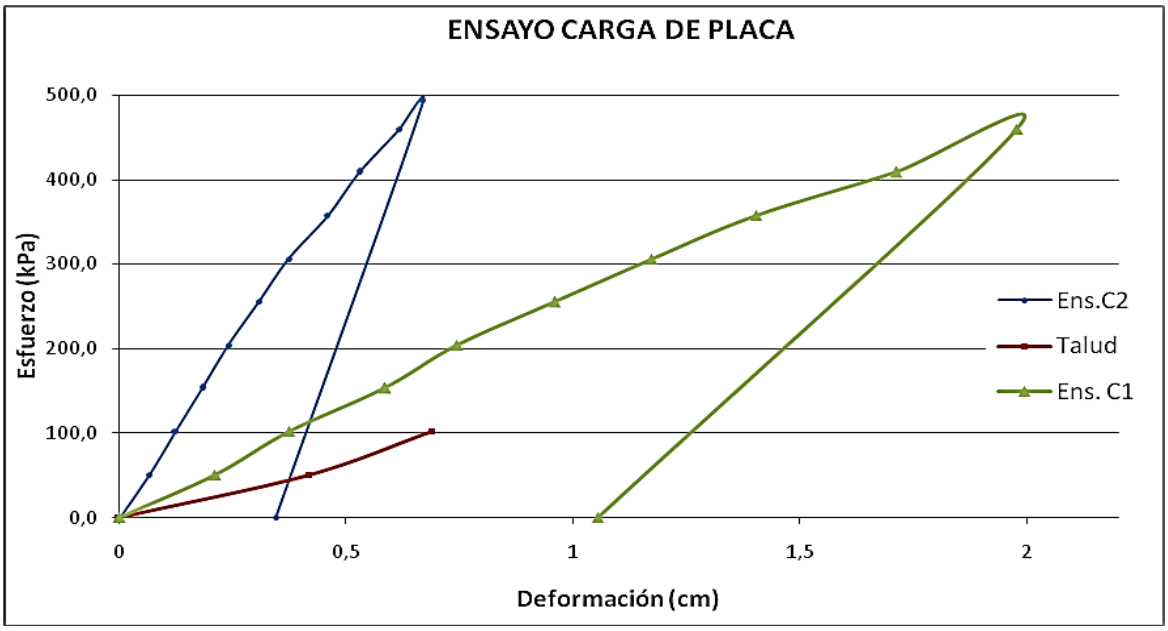


FIGURA 41 RESULTADOS ENSAYOS DE CARGA DE PLACA, ESTUDIO PILOTO PARA LA RECUPERACIÓN DE MORAVIA, FASE I (2008)

Con los RSU presentes en el Morro, con peso unitario igual a 14 kN/m^3, cohesión de 5 kPa y ángulo de fricción interna de 30°, la capacidad de carga última es igual a 472.6 kPa, coherente con los resultados de los ensayos C1 y C2, y mayor a la capacidad de carga obtenida con la formulación tradicional de Hansen.

7.5 ESTABILIDAD DE TALUDES.

Para realizar el análisis de estabilidad de taludes por el método del talud infinito se utilizaron los parámetros geomecánicos hallados en las pruebas de carga en micropilotes Tabla 16.

TABLA 16 PROPIEDADES GEOTECNICAS.

Cohesión (kPa)	Angulo de fricción (°)	ϒ (kN/m^3)	ϒsat (kN/m^3)
5	30	14	16

Se analizan los perfiles de menor confiabilidad estudiados por Fernández (2012), utilizando el método de falla plana, evaluando su estabilidad a 0,70 m de profundidad, en la Tabla 17 se muestran los resultados:

TABLA 17 INFORMACIÓN DE TALUDES ANALISADOS.

PERFIL	PENDIENTE (°)	LONGITUD (m)	F.S.
10	58	9,36	1,03
9	48	12,76	1,28
2	40	12,2	1,56
4	37	2,02	1,69
36	33	41,25	1,89
3	30	3,19	2,08
10	27	2,15	2,31
1	21	9,89	2,97
9	11	20,83	5,66
36	10	10,06	6,23

El empuje hidrodinámico se tiene en cuenta en los taludes con pendiente similar a la de la parcela piloto de medición, en la Tabla 18 se presentan los nuevos factores de seguridad, se observa una disminución considerable:

TABLA 18 FACTORES DE SEGURIDAD CON EMPUJE HIDRODINAMICO.

PERFIL	PENDIENTE (°)	F.S.
1	21	1,49
9	11	1,79
27	10	1,83

8 CONCLUSIONES

Los análisis realizados en el presente trabajo permiten concluir sobre el estado actual del morro de basuras del barrio Moravia, indicando la influencia de la precipitación en el nivel de lixiviados y su efecto en la estabilidad de las laderas, al igual los diversos procedimientos para la estimación de los parámetros geomecánicos de los RSU.

8.1 CONCLUSIONES SOBRE APLICACIÓN DEL MODELO HELP 3.9D.

- Con la aplicación del balance hídrico en el morro de Moravia, se pudo comprobar que el caudal de lixiviados y escorrentía superficial están influenciados en gran medida por los factores climatológicos de la zona y el tipo de cobertura final.

- El sellado propuesto para el morro de basuras del Barrio Moravia consiste en una capa de arcilla limosa de 20 cm de espesor, la cual reducirá el porcentaje de precipitación que se convierte en lixiviados de 34,37% a 1,52%, el porcentaje de precipitación que escurre superficialmente aumenta de 8,13% a 50,98%, este tipo de sellado en condiciones climáticas bimodales presenta agrietamiento debido a los procesos de humedecimiento y secado, por lo tanto es necesario un mantenimiento permanente con el fin de evitar su deterioro, ocasionando el aumento en la infiltración y disminuyendo la eficacia del sistema.

- Se presenta poca variación en el nivel piezométrico de lixiviados, con una tasa de infiltración promedio de 62,23 lt/día y un máximo de infiltración en el periodo analizado de 204,24 lt/día, lo cual concuerda con los registros de piezometría del año 2008. Por lo tanto la carga gravitacional producto del aumento de los lixiviados no influye considerablemente en la estabilidad global del morro de basuras.

8.2 CONCLUSIONES SOBRE CAPACIDAD DE CARGA

- Los métodos de cálculo de capacidad de carga para cimentaciones superficiales y profundas deben ser ajustados para este tipo de materiales, esto se debe a que las formulaciones fueron desarrolladas para condiciones geotécnicas ideales, las cuales no representan lo

encontrado en los rellenos sanitarios debido a la heterogeneidad de sus componentes.

- Realizando la evaluación comparativa de los resultados de capacidad de carga obtenidos mediante las teorías clásicas y los ensayos de carga "in situ", las formulaciones propuestas por Brinch Hansen y Meyerhof son similares y se ajustan a los resultados obtenidos *in situ*, el método propuesto por Terzaghi es conservador con resultados inferiores un 30% aproximadamente.

- La comparación de los ensayos de carga con los datos reportados en la literatura técnica permitió la validación de los parámetros geomecánicos estimados a partir de las pruebas de carga axial en micropilotes y los encontrados en el Estudio piloto para la recuperación de Moravia, Fase I, obteniendo una cohesión de 5kPa y un ángulo de fricción de 30°.

- Se generaliza la formulación del factor de capacidad de carga $N\gamma$, proponiéndose una expresión para los materiales constitutivos del morro de basuras del barrio Moravia, con una variación considerable a la ecuación de este factor de carga propuesta por Brinch Hansen.

- El valor de capacidad de carga promedio obtenido en los ensayos de carga en micropilotes es igual a 18,38 kN, el cual presenta un probabilidad de 18.4% de estar entre 17 y 19 kN.

8.3 CONCLUSIONES SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES

- Se observa una reducción significativa en el factor de seguridad cuando se incluye en el análisis de estabilidad de taludes las fuerzas hidrodinámicas producidas por los flujos subsuperficiales. Estos empujes fueron evaluados en los taludes con pendientes cercanas a los presentados en la parcela piloto de medición. Reduciendo el factor de seguridad hasta un 70%.

REFERENCIAS

BOTERO, J. E. (1999), Comportamiento dinámico de rellenos de desechos sólidos municipales. Tesis de Maestro en Ingeniería. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

BRAY, J.D, ZEKKOS, D, KAVAZANJIAN, E, ATHANASOPOULOS, G.A; RIEMER, M.F., (2009), "Shear strength of municipal solid waste". Journal of Geotechnical and environmental Engineering. Vol. 135, No. 6, pp. 709-722.

CAICEDO, B., YAMIN, L., GIRALDO, E., CORONADO, O. (2002). Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. Proc. 4th Environmental Geotechnics – 4th ICEG, Rio de Janeiro, de Melo e Almeida (eds), Rio de Janeiro, Vol. 1, 177-182.

CARVALHO, M.F., (1999). Comportamiento Mecánico de Residuos Sólidos Urbanos. Tesis de Doctorado. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de São Paulo.

COUMOULOS, DG; KORYALOS, TP; METAXAS, IL; GIOKA, DA (1995), Investigación geotécnica en el vertedero principal de Atenas. Actas Cerdeña 95, Quinto Simposio Internacional de Relleno Sanitario, Cagliari, Italia, pp 885-895.

DAS, B. (2001). Principios de Ingenieria de cimentaciones. 4ª edición. California State: Internacional Thomson Editores.

DIXON. N, RUSSEL. D, JONES. V., (2005), Engineering properties of municipal solid waste. Geotextiles and Geomembranes. Pp 205 – 233.

ESPINOSA A. & GONZALEZ A. J. (2001). Falla del Relleno Sanitario Doña Juana – Bogotá, Colombia. I – Las basuras acumuladas como material geotécnico. III Simposio Panamericano de Deslizamientos. Cartagena Colombia.

FERNANDEZ, L. (2013). Estudio de cobertura local de residuos sólidos en la ciudad de Medellín. Tesis para optar el título de Magíster. Universidad De Brasilia.

FERREIRA, G. (2000), Modelo para evaluación de asentamientos en Rellenos Sanitarios Urbanos. Tesis de Magíster. Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, 2000. 136 p.

FORTUNA, O. D (2002). Estabilidad de taludes de macizos de Residuos Sólidos Urbanos. Tesis de Magíster. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Facultad de Tecnología de la Universidad de Brasilia. 173 p.

GABR, M. A., VALERO, S. N. (1995). Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste.Geotechnical Testing Journal, Vol. 18, nº 2, 241-251.

GIRALDO, S., (2005). Aplicación del modelo HELP para la predicción de la producción de lixiviados en el relleno sanitario "La Esmeralda", Ciudad de Manizales - Fase III".

Hansen, J. Brinch, (1961). A general formula for bearing capacity. Geoteknisk Institut, Bulletin 11, Copenhagen.

Instituto de Estudios de Infraestructura, (2005) Evaluación Geotécnica del barrio Moravia en la ciudad de Medellín. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Alcaldía de Medellín.

INTEGRAL (2000). "Estudio para la Recuperación Ambiental de la Zona de Moravia". Corantioquia – Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Juca, JFT, Cabral, JJPS, Monteiro, VED, Santos, SM, Perrier Jr., GS, (1997)."Geotecnia de un vertedero de residuos sólidos urbanos en Recife, Brasil. Almeida (Ed.), Avances recientes en Mecánica de Suelos y Pavimentos. Balkema, Rotterdam, pp 429-436.

JESSBERGER, H.L., KOCKEL, R., (1993), Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Material. Proc. Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium. Sardinia, Italia, pp 1383-1392.

KAVAZANJIAN, E; YUAN, P; CHEN, W; SEO, B.; (2011), Compositional effects on the dynamic properties of municipal solid waste. Waste Management, Vol 31. pp 2380 - 2390.

LADE, P.V.,(201O), The mechanics of surficial failure in soil slopes. Engineering Geology, pp. –57 - 64.

Landva, A.O., Clark, J.I., (1986.) Ensayos geotécnicos de rellenos sanitarios. Actas de la 39 ª Conferencia Canadiense en Geotécnia Ottawa, Ontario, pp 371-385.

Landva, A.O., DICKINSON, J.E., (2012), Landslides in landfills. ISSMGE Boletin Volume 6, pp.10 - 18.

MACHADO, S.L; KARIMPOUR, M; SHARIATMADARI, N; (2010), "Evaluationof the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills".Waste Management.Vol 30 Pp 2579–2591.

MACHADO, S.L; VILAR, O.M; CARVALHO M.F.; (2008), "Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior".Computers and Geotechnics 35. Pp 775–790

MANOJ, K. S; JITENDRA S. S; ANDIAN R. F.; (2009), "Shear strength testing of intact and recompacted samples ofmunicipal solid waste". Canadian Geotechnical Journal. Vol. 46, pp. 1133–1145

ORDOÑEZ,C., A. (2007). Calibración de Modelos Geotécnicos para Simular el Comportamiento de los Rellenos Sanitarios Curva de Rodas y la Pradera Mediante Registros de Instrumentación. Tesis para optar el título de Magíster en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

PALMA, J. H., ESPINACE, R., Y VALENZUELA, P., (2004). Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, U. de Cantabria, Santander, España.

Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín POT (2006). Articulo Nº 30. Municipio de Medellín.

QUIAN, X; KOERNER, R; GRAY, D. (2002), Geotechnical Aspects of landfill design and construction. Prentice Hall, Inc, U.S.A.

REDDY, K. R; HETTIARACHCHI, H; PARAKALLA, N.S; GANGATHULASI, J;. BOGNER, J.E; (2008), "Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA". Waste Management 29. pp 952–959

REDDY, K. R; HETTIARACHCHI, H; PARAKALLA, N.S; GANGATHULASI, J;.BOGNER, J.E; LAGIER, T; (2009), "Hydraulic Conductivity of MSW in Landfills". Journal of Environmental Engineering, Vol. 135, No. 8, August 1, 2009. Pp 677–683

SABOGAL, L. (2011). Evaluación del comportamiento geotécnico del "Morro de Basuras" del barrio Moravia en la ciudad de Medellín. Tesis para optar el título

de Magíster en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

SCHROEDER, P. R., MORGAN, J. M., WALSKI, T. M., Y GIBSON, A. C., (1984a). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, volume I, user's guide for 114 version 1, Technical Resource Document EPA/530-SW-84-009, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.120 pp.

SCHROEDER, P. R., GIBSON, A. C., Y SMOLEN, M. D., (1984b). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, volume II, documentation for version 1, Technical Resource Document EPA/530-SW-84-010, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.256 pp.

SCHROEDER, P. R., PEYTON, R. L., MCENROE, B. M., Y SJOSTROM, J. W., (1988a). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Volume III. User's guide for version 2, Internal Working Document EL-92-1, Report 1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 87 pp.

SCHROEDER, P. R., MCENROE, B. M., PEYTON, R. L., Y SJOSTROM, J. W., (1988b). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Volume IV. Documentation for version 2, Internal Working Document EL-92-1, Report 2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 72 pp.

SCHROEDER, P. R., DOZIER, TAMSEN S., ZAPPI, P. A., MCENROE, B. M., SJOSTROM, J. W., Y PEYTON, R. L., (1994). "The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model.Engineering documentation for version 3, EPA/600/r-94/168b.Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, Estados Unidos.

SIMAO, P, (2011). Statics and seismic analysis of solid waste landfills"Evaluation of the stability of sanitary landfills.5th international conference on earthquake geotechnical engineering.

SINGH, S & MURPHY, B. (1990). Evaluation of the stability of sanitary landfills. In: Landva, A.; Knowles, D., eds. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 240-258.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN, (2006). Plan de ordenación y manejo de la Cuenca del Río Aburrá – Componente Agua.

ZEKKOS, D; ATHANASOPOULOS, G.A; BRAY, J.D; GRIZI, A; THEODORATOS, A.,(2010), Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. Waste Management 30 (2010) 1544–1555

ZEKKOS, D; BRAY, J.D; ATHANASOPOULOS, G.A; RIEMER, M.F; KAVAZANJIAN, E. JR; FOUNTA, P.A; GRIZI, A.F,(2007), Compositional and loading rate effects on the shear strenght of municipal solid waste. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. June 25-28, 2007. Paper No. 1525

ZEKKOS, D; BRAY, J.D; KAVAZANJIAN, E. JR; MATASOVIC, N; RATHJE, E.M; RIEMER, M.F; STOKE, K.H; (2006), Unit Weight of Municipal Solid Waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. October, 2006. Pp 1250-1261

ZEKKOS D (2005). Evaluation of static and dynamic properties of Municipal Solid-Waste. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, Fall.