



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

POSGRADO DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS
HIDROLÓGICOS EN RELLENOS SANITARIOS EN
MÉXICO, CASO DE ESTUDIO: TLALNEPANTLA, EDO.
DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

P R E S E N T A:

ING. RODRIGO ANTONIO AGUILAR VERA

TUTOR:

M. C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS

UNAM
POSGRADO
Ingeniería

SEPTIEMBRE 2008

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramón Domínguez Mora

Secretario: M. C. Constantino Gutiérrez Palacios

Vocal: Dra. Georgina Fernández Villagómez

1^{er}. Suplente: M. I. Gustavo Solórzano Ochoa

2^{do}. Suplente: A. Adm. Ind. Landy Irene Ramírez Burgos

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

POSGRADO DE INGENIERIA AMBIENTAL, FACULTAD DE INGENIERIA

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE

FIRMA

A mi madre

Soledad

INDICE.....	a
INDICE DE FIGURAS.....	c
INDICE DE TABLAS.....	d
RESUMEN.....	e
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Metodología.....	3
1.4.1 Recopilación y Análisis de la Información.....	3
1.4.2 Toma de muestra de residuos sólidos urbanos y caracterización de éstos.....	3
1.4.3 Construcción y monitoreo de los lisímetros (Ensayos).....	4
1.4.4 Análisis de resultados obtenidos.....	4
1.4.5 Recomendación para el diseño de rellenos.....	4
1.4.6 Resultados esperados.....	4
2 ANTECEDENTES GENERALES.....	5
2.1 Estabilización de un relleno sanitario.....	6
2.2 Biodegradación de la materia orgánica.....	7
2.2.1 Modelo para la descripción de la degradación de la materia orgánica.....	9
3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	12
3.1 Diseño y construcción de los lisímetros.....	12
3.1.1 Forma del lisímetro y características generales de los lisímetros.....	13
3.1.2 Arreglo experimental de los residuos dispuestos en los lisímetros.....	14
3.1.3 Drenaje de lixiviados.....	14
3.1.4 Características del lixiviado esperado.....	14
3.1.5 Compactación de los residuos sólidos.....	15
3.2 Metodología de experimentación.....	17
3.2.1 Caracterización de los residuos sólidos urbanos.....	17
3.2.2 Contenido de humedad de los residuos.....	18
3.2.3 Capacidad de Campo de los residuos.....	19
3.2.4 Protocolo de ensayo.....	21
3.2.5 Monitoreo de lixiviado.....	22

3.2.6	pH.....	23
3.2.7	Asentamientos.....	23
3.2.8	Presentación de los datos obtenidos en laboratorio.....	23
4	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE EXPERIMENTAL.....	25
4.1	Caracterización de los residuos sólidos.....	25
4.2	Determinación de la humedad de los residuos.....	28
4.3	Peso volumétrico “In Situ”.....	30
4.4	Preparación ensayos de capacidad de campo.....	32
4.5	Resultados de los ensayos de capacidad de campo realizados.....	34
4.5.1	Análisis de los resultados.....	36
4.5.2	Propuesta del comportamiento de la capacidad de campo.....	42
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
5.1	Conclusiones.....	45
5.2	Recomendaciones.....	47
	ANEXO A: Ejemplo de evaluación de un sistema de recirculación de lixiviados en un relleno sanitario.....	48
	Bibliografía.....	59

INDICE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema general de la descomposición de los residuos a causa del agua.....	9
Figura 3.1. Diseño de lisímetro y estructura de sujeción.....	13
Figura 3.2. Sistema de drenaje de lixiviados	15
Figura 3.3. Diseño propuesto para lisímetros.....	17
Figura 3.4. Diagrama triangular mostrando las proporciones de materiales correspondientes a la caracterización.....	19
Figura 3.5. Situación de los residuos frente a diferentes grados de humedad (Buckman y Brady, 1966).....	20
Figura 3.6. Diagrama de fases para el residuo sólido.....	20
Figura 4.1. Caracterización de subproductos para distintos estudios realizados	26
Figura 4.2. Caracterización según Grisolia para distintos estudios de caracterización.....	28
Figura 4.3. Determinación de humedad de los residuos para 1º ensayo.....	29
Figura 4.4. Determinación de humedad de los residuos para 2º ensayo.....	29
Figura 4.5. Determinación de humedad de los residuos para 3º ensayo.....	29
Figura 4.6. Determinación del peso volumétrico in situ.....	31
Figura 4.7. Pesos volumétricos para residuos según fuente generadora en el Distrito Federal.....	32
Figura 4.8. Resultados ensayos de Capacidad de Campo Práctica.....	35
Figura 4.9. Resultados ensayos Capacidad de Campo Teórica.....	35
Figura 4.10. Resultados ensayos de Porosidad.....	36
Figura 4.11. Comparativo de la Porosidad y la Capacidad de Campo Práctica.....	36
Figura 4.12. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Práctica.....	37
Figura 4.13. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Teórica.....	38
Figura 4.14. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Teórica Orta et al. (2003)	39
Figura 4.15. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Teórica Szanto et al. (2007)	41
Figura 4.16. Comparativo de tendencias de capacidad de campo de investigaciones realizadas.....	41
Figura 5.1. Posible comportamiento de la Capacidad de Campo de los residuos.....	46

Figura A.1. Foso típico de inyección de lixiviados.....	49
Figura A.2. Pozo típico de inyección de lixiviados a presión.....	50
Figura A.3. Comportamiento de la capacidad de campo según el modelo propuesto.....	57

INDICE TABLAS

Tabla 2.1. Procesos de transformación de la materia depositada en el relleno.....	8
Tabla 3.1. Arreglo experimental para lisímetros.....	14
Tabla 3.2. Composición típica de lixiviados en relleno sanitarios.....	16
Tabla 3.3. Tabla tipo para clasificación propuesta por Grisolia et al. (1995)....	18
Tabla 3.4. Contenido de humedad, capacidad de campo y porosidad en los residuos sólidos municipales.....	24
Tabla 4.1. Caracterización de los residuos utilizados en los ensayos.....	25
Tabla 4.2. 1º Caracterización, Conjunto Habitacional El Altillo.....	27
Tabla 4.3. 2º Caracterización, Relleno Sanitario Tlalnepantla.....	27
Tabla 4.4. 3º Caracterización, Relleno Sanitario Tlalnepantla.....	27
Tabla 4.5. Resultados de los ensayos de determinación de humedad de las muestras de residuos sólidos.....	30
Tabla 4.6. Peso volumétrico de residuos según fuente generadora.....	31
Tabla 4.7. Preparación 1º ensayo de capacidad de campo.....	33
Tabla 4.8. Preparación 2º ensayo de capacidad de campo.....	33
Tabla 4.9. Preparación 3º ensayo de capacidad de campo (con carga constante).....	33
Tabla 4.10. Parámetros iniciales y resultados obtenidos en los ensayos realizados.....	34
Tabla 4.11. Resultados ensayos de Capacidad de Campo Teórica.....	39
Tabla 4.12. Resultados ensayos de Capacidad de Campo Teórica.....	40

Resumen

El presente trabajo busca estimar y modelar el comportamiento hidráulico de los residuos sólidos urbanos para recirculación de lixiviados en un relleno sanitario.

Se realizó una revisión bibliográfica de varias publicaciones especializadas sobre los aspectos hidrológicos de los residuos sólidos urbanos, tanto para la realización de ensayos en laboratorio, como para establecer un modelo que se ajuste a los resultados obtenidos.

Resulta necesario tener la capacidad de predecir el comportamiento que tendrá el relleno sanitario y su relación con el agua, ya sea interna o externa. Parámetros como capacidad de campo, porosidad, humedad y peso volumétrico de los residuos sólidos, permiten diseñar rellenos sanitarios previendo el volumen de agua y su dinámica en el interior y exterior, considerando de esta manera la posibilidad de mantener la humedad óptima del relleno mediante adiciones de agua o recirculación de lixiviado durante el vertido de los residuos o durante los tiempos de déficit, y dimensionar el almacenamiento y/o tratamiento posterior que éstos líquidos percolados pudiesen necesitar.

Se analizaron muestras de residuos obtenidas del relleno sanitario Tlalnepantla y de la Comunidad el Alttillo Universidad, las cuales se caracterizaron, y realizaron ensayos de humedad, peso volumétrico in situ y capacidad de campo. Los ensayos de capacidad de campo fueron realizados en laboratorio, para lo cual se utilizaron lisímetros de 28 L. Los resultados obtenidos fueron comparados con otras investigaciones similares, obtenidas de la literatura consultada.

De los resultados obtenidos en laboratorio y otros valores observados, se realizó un análisis con el programa *Curve Expert 1.3*, encontrando la ecuación que mejor se ajusta a los datos obtenidos, proponiendo un modelo general de tipo exponencial con la finalidad de predecir el comportamiento de la capacidad de campo versus el peso volumétrico. Los parámetros del modelo propuesto deben ajustarse mediante futuros ensayos de laboratorio in situ.

De igual forma se propone un modelo para definir el comportamiento de la capacidad de campo respecto al tiempo. Para esto se asume que la capacidad de campo es proporcional a la cantidad de materia orgánica contenida en los residuos, ya que es este tipo de residuos el que retiene mayor humedad. La constante de hidrólisis requerida por el modelo depende del contenido de humedad de los residuos, por lo cual se requiere determinar tanto dicha constante como el contenido de humedad para los residuos sólidos urbanos de los cuales se quiere conocer su comportamiento.

De manera de complementar este trabajo, se realizó un ejercicio teórico para determinar la capacidad de recirculación de lixiviados que tiene un relleno sanitario, el tiempo requerido para absorber los líquidos y la incidencia de la capacidad de campo en la pérdida de la capacidad de absorción de los residuos para recircular líquidos.

Summary

The present work pretends modeling the hydraulic behaviour of the urban solid residues for the leachate recirculation in a landfill.

A bibliographical research on specialized publications of urban solid waste hydrology has been done in order to develop laboratory tests, and also to establish a model that could fit the obtained results on these tests.

It is necessary to predict the landfill's behaviour as well as its relation with internal or external water. Parameters like field capacity, porosity, humidity and density of solid waste, allow to design landfills regarding the volume and dynamics of internal and external water, in order to maintain the suitable landfill's humidity by adding water or leachate through recirculation during the initial solid waste disposal or during the humidity deficit periods. With this information, it is possible to determine the required leachate storage capacity or its treatment.

Solid waste samples were obtained from Tlalnepantla's landfill and El Attillo University dwelling and they were analyzed. These samples were characterized; humidity, density in situ and field's capacity tests were developed. Field capacity tests were realized in the laboratory, by using three 28 (L) reactors. The obtained results were compared with other similar works, obtained in the bibliographical research.

An analysis of the laboratory results and other observed values was done based on the Curves Expert 1.3 program; a mathematical model that fits better with the collected data was proposed. A general mathematical exponential type model in order to predict the field's capacity behaviour versus density was developed. Nevertheless, these parameters obtained with this model should be adjusted by future laboratory tests in situ for other field conditions.

A model to define field capacity behaviour versus time was proposed as well. To get this, it is assumed that the field capacity should be proportional to the amount of organic matter contained in the waste, because these kind of residues retain higher humidity. The constant hydrolysis required by the model depends on the humidity contained on the residues, so it is necessary to obtain this constant and also the moisture content for urban solid waste which behaviour we want to know.

To complement this work, a theoretical exercise has been made to determine: the leachate recirculation capacity of a landfill; the required time to absorb the liquids and; the incidence of the field capacity in the lost of liquid absorption capacity of the residues.

1 INTRODUCCIÓN

La disposición de los residuos sólidos urbanos mediante la técnica de vertederos controlados o rellenos sanitarios genera un líquido con un alto potencial contaminante, el cual se conoce como lixiviado. Este subproducto, peligro potencial al medio ambiente, requiere de un manejo adecuado y seguro, por lo cual es imprescindible conocer la cantidad y calidad del lixiviado generado.

Si se considera al relleno sanitario como un reactor bio-químico, cuyas entradas principales son los residuos sólidos y el agua, y sus salidas son biogás y lixiviado, podemos establecer metodologías que nos permitan optimizar la generación de metano mediante la recirculación de lixiviado, de manera de favorecer la biodegradación. Estudios realizados en países como Estados Unidos, han indicado que la recirculación de los lixiviados en un relleno sanitario, permite que los mismos mejoren en su calidad (determinada a través de análisis físico-químicos y bacteriológicos), lo que asegura un óptimo tratamiento de los mismos, evitando el riesgo de contaminación en el agua superficial entre otras cosas. (Chugh, *et.al*, 1997)

La humedad de los residuos dispuestos en el relleno y el volumen de poros disponibles para la migración de los lixiviados a través de la masa del relleno, incide directamente sobre las condiciones de biodegradación. Una humedad óptima y una adecuada distribución de ésta, tendrá como resultado una maximización en la producción de biogás en condiciones anaeróbicas.

Establecer los *parámetros hidrológicos* óptimos para el diseño de rellenos sanitarios, considerando la capacidad de almacenamiento máxima de humedad sin alcanzar la saturación y la relación de esta capacidad con diferentes grados de compactación, permitirá aumentar la velocidad de degradación de la fracción orgánica de los residuos, optimizar la generación de metano y acrecentar la viabilidad de proyectos de aprovechamiento de esta fuente de energía en los futuros proyectos de rellenos sanitarios.

1.1 Justificación

Los rellenos sanitarios mal operados, vertederos a cielo abierto, etc., provocan un gran impacto al medio ambiente, principalmente por la emisión de contaminantes a través de los líquidos lixiviados.

Es por lo anterior que resulta necesario tener la capacidad de predecir el comportamiento que tendrá este tipo de obras para disposición de los residuos sólidos urbanos y su relación con el agua, ya sea interna o externa. En la actualidad se han desarrollado una serie de modelos y metodologías para determinar y predecir la dinámica hidráulica de éste tipo de proyectos.

La presente investigación aporta los parámetros hidrológicos necesarios para el diseño de rellenos sanitarios considerando la capacidad de almacenamiento máxima de humedad sin alcanzar la saturación, y la conductividad hidráulica para estimar la velocidad máxima del flujo de agua al interior de la masa.

Estos parámetros permiten diseñar rellenos sanitarios previendo el volumen de agua y su dinámica en el interior y exterior, considerando de esta manera la posibilidad de mantener la humedad óptima del relleno mediante adiciones de agua o recirculación de lixiviado durante el vertido de los residuos o durante los tiempos de déficit, y dimensionar el almacenamiento y/o tratamiento posterior que estos líquidos percolados pudiesen necesitar.

1.2 *Objetivos*

General

Realizar la determinación de los parámetros hidrológicos en rellenos sanitarios en México empleando como caso de estudio los residuos del relleno sanitario de Tlalnepantla, Estado de México

Particulares

- Diseñar y construir lisímetros para la simulación a escala de las condiciones del relleno sanitario
- Realizar un seguimiento por un periodo de al menos 2 meses los lisímetros para la obtención de los parámetros requeridos por los modelos
- Modelar el comportamiento de los residuos sólidos urbanos considerando la información obtenida en el laboratorio y en la literatura consultada
- Realizar un ejercicio del comportamiento hidráulico complementando el procedimiento propuesto por Thomas B. Maier para el diseño de sistemas de recirculación de lixiviados.

1.3 *Alcance*

- En este proyecto se consideran como **parámetros hidrológicos** la capacidad de campo de los residuos, humedad, porosidad y peso volumétrico de éstos.
- Los datos para estimar los parámetros óptimos son obtenidos de ensayos de laboratorio y de la bibliografía consultada.
- El monitoreo de los lisímetros a construir se llevó a cabo por un plazo no mayor a 2 meses
- Los residuos y el lixiviado requeridos para los ensayos a realizar, fueron obtenidos del Relleno Sanitario Tlalnepantla y el conjunto habitacional El Altillio Universidad, comparando los resultados obtenidos en este proyecto con investigaciones similares realizadas tanto en México como en el extranjero.

1.4 Metodología

El desarrollo de la investigación se realizó considerando las siguientes etapas básicas:

1.4.1 Recopilación y Análisis de la Información.

En esta etapa se recopiló la información necesaria para establecer la base teórica que sustentará la investigación, considerando fuentes como las siguientes:

- Normatividad relacionada con el manejo y disposición de residuos sólidos urbanos, como: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), Reglamento en Materia de Impacto Ambiental de la LGEEPA, Ley Ambiental del D.F., Reglamento de Impacto Ambiental y Riesgo del D.F., Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), Ley de Residuos Sólidos del D.F. (LRSDF), PROY-NADF-007, Reglamento de Construcciones para el D.F., Código Financiero del Distrito Federal y Normas Oficiales Mexicanas aplicables.
- Estudios sobre tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos (biblioteca UNAM)
- Estudios sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México y resultados de Investigaciones Nacionales e Internacionales sobre generación de biogás en rellenos sanitarios.
- Sitios web consultando páginas especializadas y publicaciones periódicas especializadas como: Journal of Environmental Engineering, Journal of materials in Civil Engineering de la American Society of Civil Engineering, USEPA Model.

1.4.2 Toma de muestra de residuos sólidos urbanos y caracterización de éstos.

Se tomaron muestras de residuos sólidos en el relleno sanitario, para luego clasificarlas y caracterizarlas de acuerdo a las siguientes Normas Técnicas Mexicanas (NMX).

- Norma Mexicana NMX-AA-015-1985 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo Environmental Protection - Soil Pollution - Municipal Solid Residues - Sampling - Quarter Method.
- Norma Mexicana NMX-AA-016-1984 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo Residuos - Sólidos Municipales - Determinación de Humedad. Environmental Protection - Soil Pollution - Municipal Solid Residues - Humidity Determination.
- Norma Mexicana NMX-AA-019-1985 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico

"IN SITU" Environmental Protection-Soil Pollution-Municipal Solid Residues-
"IN SITU" Volumetric Weight.

- Norma Mexicana NMX-AA-052-1985 Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales- Preparación de Muestras en el Laboratorio para su Análisis. Environmental Protection-Soil Pollution Municipal Solid Residues-Preparation of Samples in Laboratory for their Analysis.

1.4.3 Construcción y monitoreo de los lisímetros (Ensayos):

De acuerdo a la literatura consultada, se definieron los factores hidrológicos de los residuos sólidos que inciden en la generación y recirculación de lixiviados, además de su relación con la biodegradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

1.4.4 Análisis de resultados obtenidos

Utilizando el software *Curve Expert 1.3*, se modelaron los factores hidrológicos de los residuos sólidos que describen el comportamiento y la generación de lixiviado por su utilización adecuada en la recirculación de este, y su implicancia en la biodegradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

1.4.5 Recomendación para el diseño de rellenos.

Con base en los resultados obtenidos se realizaron recomendaciones para el diseño de futuros rellenos sanitarios, entregando algunos parámetros de referencia para el cálculo de la generación de lixiviados.

1.4.6 Resultados esperados

Se obtuvieron datos de posible comportamiento hidrológico de un relleno sanitario, considerando la capacidad de almacenamiento máxima de humedad de los residuos sin alcanzar la saturación, y la relación de esta capacidad con diferentes grados de compactación.

Los datos de comportamiento permitirán diseñar rellenos sanitarios previendo el volumen de agua disponible para la biodegradación según el grado de compactación utilizado, considerando de esta manera la posibilidad de mantener la humedad óptima del relleno mediante adiciones de agua o recirculación de lixiviado durante el vertido de los residuos.

2 ANTECEDENTES GENERALES

Según Kiss y Mendoza (1999), la descomposición de los residuos sólidos municipales depositados en rellenos sanitarios se pueden distinguir tres procesos principales: la descomposición aerobia, la descomposición anaerobia y la lixiviación.

El factor principal de la aceleración de los procesos bio y fisicoquímicos es el agua, que generalmente proviene del agua pluvial que percola la masa de los desechos depositados a cielo abierto. Son dos los subproductos principales resultantes de la descomposición de los residuos: el biogás y el lixiviado. La cantidad y características fisicoquímicas del lixiviado generado dependen directamente de los procesos de descomposición de los residuos, los que a su vez dependen de muchos otros factores internos y externos.

La transformación de la masa de un relleno sanitario es un proceso de desintegración y degradación, dependiendo de varios factores como los propuestos por Kiss (1996):

- Factores externos ambientales (meteorología)
- Características de los residuos depositados
- Edad del relleno
- Tecnología utilizada en la planta

Dentro de los factores ambientales que inciden directamente en los procesos de degradación de los residuos están la precipitación, la temperatura y el viento. En la producción de lixiviados la precipitación juega un papel fundamental, mientras que los otros elementos inciden en la evaporación.

Respecto a la temperatura externa, su afectación solo es en las capas superiores del relleno, mientras que dentro de la masa la temperatura que domina se ajusta a los procesos bioquímicos de la degradación. La composición del lixiviado generado, y por ende el contenido de elementos contaminantes será determinada por la composición química de los residuos, su contenido de humedad, la capacidad de descomposición de los componentes y el calor de reacción de los diversos procesos de degradación.

La edad del relleno influye directamente en la capacidad de reacción de los materiales que se disponen, la que a largo plazo se irá perdiendo. Las experiencias demuestran que el contenido de elementos contaminantes o agresividad del lixiviado cambia con el tiempo; siendo alta inicialmente con un decaimiento paulatino.

De igual manera la tecnología utilizada en la disposición de los residuos influirá en los procesos de descomposición de los mismos. Es así que la altura de

las celdas, la profundidad del relleno, la tecnología de compactación utilizada y el material de cobertura influyen en el prevailecimiento de los factores ambientales. Se debe mencionar que la recirculación del lixiviado, por riego sobre la superficie de los residuos, acelera los procesos biológicos, además de la evaporación promovida, pudiendo incluso solucionar el problema del tratamiento de este percolado.

2.1 Estabilización de un relleno sanitario

“Existen diferentes tipos de rellenos sanitarios, pero todos obedecen a un esquema común, basado en la disposición de los residuos sólidos en capas sobre el terreno, que tras una mayor o menor compactación, se recubren con suelo compactado u otro material de aislamiento” (Keller, 2005)

La degradación de los residuos sólidos urbanos depositados en un relleno sanitario, se produce por cambios físicos, químicos y biológicos. La intensa actividad biológica generada en la masa de residuos produce reacciones químicas entre los materiales dispuestos y los líquidos lixiviados que circulan entre ellos.

La baja velocidad de degradación de los residuos imposibilita la utilización del terreno por largos periodos. Frente a esto, una de las técnicas más prometedoras para lograr la estabilización en un menor periodo de tiempo, es la recirculación de lixiviado.

Es importante considerar el contenido de humedad en la masa de residuos, recomendándose una humedad de entre 50 y 80% (Nyns y Gendebien, 1992), esto aceleraría la actividad microbiana y la transformación de los residuos sólidos.

“Por medio de la recirculación de los lixiviados se puede aumentar la velocidad de producción de biogás, haciendo factible económicamente su recuperación para la generación de energía” (Morelli, 1992), además de la reducción de las obras de posclausura, mantenimiento y monitoreo que deben realizarse una vez finalizadas las actividades del relleno.

El proceso de recirculación de lixiviados se lleva a cabo mediante la reinyección del líquido sobre la superficie del relleno, mediante riego con aspersores. Parte del líquido infiltra a la masa de residuos, y otra se evapora. Según Robinson (1986) la recirculación puede contribuir a estabilizar la calidad del lixiviado, mejorando la eficiencia de las plantas de tratamiento para estos efluentes.

Como ventajas de la recirculación se puede mencionar que las altas concentraciones de materia orgánica en los líquidos son reducidas, disminuyendo, además, considerablemente su volumen. Mediante la utilización de esta metodología de operación en el relleno, se logra estabilizar en menor tiempo la masa de residuos, acelerando los asentamientos y permitiendo disponer del sitio en menos tiempo para su posterior uso.

2.2 *Biodegradación de la materia orgánica*

Si se considera al relleno sanitario como un gran reactor biológico, se puede decir que tanto la fracción orgánica como la inorgánica sufren procesos de degradación. Debemos tomar en cuenta que la presencia de oxígeno, agua y temperatura adecuada, acelera los procesos oxidación y descomposición, es especial de la fracción orgánica.

La humedad necesaria para llevar a cabo el proceso de descomposición, proviene en parte de los mismos residuos y el resto de distintas fuentes de agua, como la adicionada por la precipitación e infiltración, riego o recirculación de lixiviado.

Los factores que inciden directamente en la degradación de la masa de residuos son: contenido orgánico biodegradable, temperatura ambiente, disponibilidad de oxígeno y contenido de humedad.

De manera general se puede dividir la biodegradación de la masa de residuos en dos fases: la primera, conocida como aerobia, y la segunda denominada anaerobia, donde los procesos de descomposición se llevan a cabo en ausencia de oxígeno, ya sea por consumo de los microorganismos o ha sido expulsada de los poros por procesos de compresión de la masa.

El proceso de biodegradación continuará hasta que el sustrato sea completamente degradado por las bacterias que de él se alimentan, o las condiciones ambientales (temperatura o pH) en la masa de residuos impidan la actividad de éstos.

En dicho proceso de biodegradación anaerobia los microorganismos requieren de una fuente de energía como el carbono para la síntesis de nuevo tejido celular, y de otros elementos inorgánicos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

En la primera etapa aerobia el proceso de degradación es fomentado por el aire atrapado en los poros de la masa de residuos, mientras que las capas superficiales reciben cierta aireación directamente de la atmósfera. Para un óptimo proceso es importante contar con la humedad adecuada, recomendándose un 60% (A.G.H.T.M., 1977). Si se considera que el contenido de humedad propia de los residuos sólidos municipales alcanza valores de entre 30% a 40% (Otero del Peral, 1988), el agua pluvial que cae sobre la superficie del relleno juega un papel fundamental para alcanzar la humedad necesaria que requieren los bioprocesos. En esta etapa genera productos como dióxido de carbono, amoníaco (lo que después se transformará en nitrato) y agua. Debido a las altas temperaturas que se alcanzan en esta fase (60° C aprox.) la mayor parte del contenido de humedad se evapora por lo cual se puede decir que el proceso de descomposición aerobio generalmente no genera lixiviados (Horváth, 1985).

El proceso de degradación anaerobia de desarrolla a menor velocidad que el aerobio. Este proceso se inicia una vez que se ha consumido el aire atrapado en la parte más profunda del relleno, las que están aisladas de la recarga de aire

proveniente de la atmósfera. Aunque la temperatura generada se mueve entre los 35° a 50° C (A.P.W.A, 1976) la influencia del ambiente externo aquí no prevalece, por lo cual los procesos bioquímicos pueden mantener la temperatura elevada. A diferencia del proceso aerobio, en el anaerobio si se generan lixiviados.

En la tabla 2.1 se presentan los requisitos y consecuencias de los procesos de descomposición del relleno sanitario. Se puede observar en la tabla que los tres procesos descritos tienen como denominador común el agua. Esta se encuentra presente, ya sea en los residuos o es aportada por la precipitación pluvial.

En el proceso de descomposición tanto de la materia orgánica, como de la inorgánica, el agua juega un papel fundamental, lo que produce como resultado el arrastre y reacción de compuestos, generándose finalmente lixiviado.

En la figura 2.1 se puede ver de manera general las reacciones involucradas en la descomposición de los residuos en presencia de agua.

Tabla 2.1. Procesos de transformación de la materia depositada en el relleno

Proceso	Descomposición aerobia	Descomposición anaerobia	Lixiviación
Requisitos	Oxígeno disponible; menos humedad	Falta de oxígeno; más humedad	Bastante agua pluvial; cubierta permeable
Reacciones	Oxidación, nitrificación	Reducción, desnitrificación	Disolución
Temperatura	50 - 70 °C	35 - 50 °C	- - -
Consecuencias	Mineralización, esponjamiento	Consolidación, solidificación	Acumulación, aumento de permeabilidad
Productos	CO ₂ , H ₂ O , productos de oxidación	Ácidos orgánicos, CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S , lixiviado	Lixiviado

Fuente: Kiss (1996) Lixiviados de rellenos sanitarios - variaciones temporales de la cantidad y calidad y su relación con la precipitación, Hidrológiai Közlöny (Hungría), No.2, p. 113-121

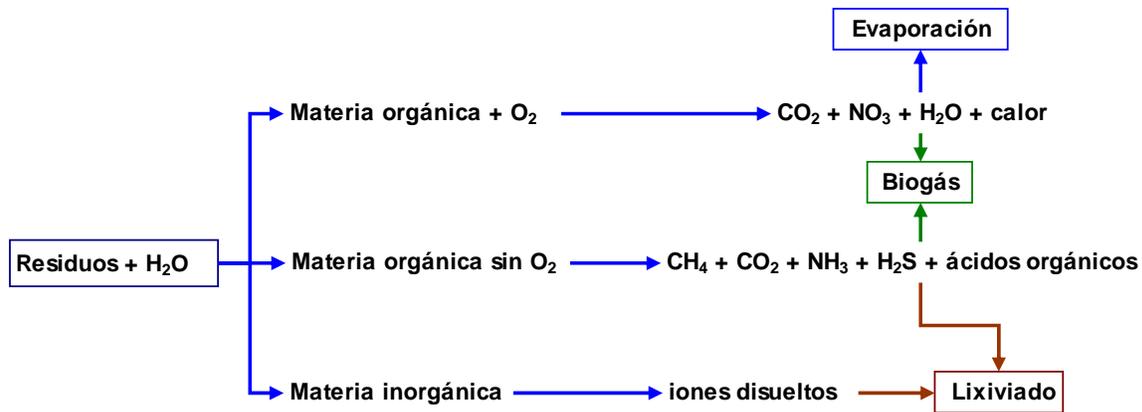


Figura 2.1. Esquema general de la descomposición de los residuos a causa del agua.

Fuente: Kiss y Mendoza (1998) Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales, Ingeniería y Ciencias Ambientales, FEMISCA A.C., México, 38: 6-9

2.2.1 Modelo para la descripción de la degradación de la materia orgánica

“Considerando el análisis para un elemento unitario de masa biodegradable (MBD), se puede suponer que toda la materia hidrolizada encontrará condiciones ambientales favorables (sustrato y microorganismos) para que sea completamente eliminada según una cierta tasa o velocidad” (Keller, 2005). Debido a este supuesto, la tasa que limita la velocidad de este proceso será la tasa de hidrólisis, ésta se puede representar mediante el modelo propuesto por Straub y Lynch (1982). En este modelo se considera que el material biodegradable se hidroliza según una constante de hidrólisis propia del material.

$$\frac{d(MBD)}{dt} = -k_h(MBD) \quad (2.1)$$

Donde:

MBD: Material biodegradable en estado sólido

k_h : Constante de hidrólisis

Los valores para k_h dependerán de las características del material depositado en el relleno sanitario, variaciones de temperatura, condiciones de pH y *fundamentalmente del agua presente en el relleno sanitario durante el periodo que dura la degradación de la fracción orgánica de los residuos depositados en él*. De acuerdo a estudios realizados a escala de laboratorio utilizando lisímetros, se ha podido situar el valor de esta constante en rangos que van de 0,1 a 0,0008 días⁻¹ (Williams, 1987)

Williams (1987) plantea en su estudio “Simulation of lechate generation from municipal solid waste”, que la velocidad del proceso se vería afectada linealmente

por el contenido de humedad de los residuos, por lo que la ecuación anterior, se podría reescribir de la siguiente manera.

$$\frac{d(MBD)}{dt} = -k_{h'}(MBD) \quad (2.2)$$

$$k_{h'} = w * k_h$$

Donde:

$k_{h'}$: Constante de hidrólisis modificada por el contenido de humedad

w: Humedad contenida en los residuos en (%)

MBD: Material biodegradable en estado sólido

Capitulo 2

Al integrar la ecuación anterior para una masa biodegradable inicial $(MBD)_0$ en el instante $t = 0$ se obtiene como resultado.

$$\ln(MBD) = -k_{h'}t + C \quad (2.3)$$

Si se aplica la condición de contorno.

$$(MBD) = (MBD)_0 \quad \text{para } t = 0 \quad (2.4)$$

$$\ln \frac{MBD_{(t)}}{MBD_{(0)}} = -k_{h'}t \quad (2.5)$$

Donde:

MBD_0 : Material biodegradable en $t = 0$

t : Tiempo

MBD_t : Material biodegradable en estado sólido al tiempo t

$K_{h'}$: Constante de hidrólisis modificada por contenido de humedad

La ecuación anterior puede ser expresada como.

$$MBD_t = MBD_0 e^{-k_{h'}*t} \quad (2.6)$$

En principio se puede estimar que el proceso de degradación de una masa inicial MBD_0 produce una masa remanente de acuerdo a la expresión anterior.

3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

En el presente capítulo se detalla la forma y características constructivas de la fase experimental de esta investigación.

En base a trabajos similares realizados en el tema, se plantea y describe una metodología para la obtención de los parámetros requeridos.

3.1 *Diseño y construcción de los lisímetros.*

Un lisímetro es un bloque de material, al cuál se le desea determinar ciertos parámetros y propiedades hidráulicas, rodeado por una cubierta. El parte inferior del lisímetro simula el fondo del relleno sanitario, con el sistema de recolección de líquidos lixiviados (Szanto, 2006)

Los lisímetros son dispositivos utilizados para medir la percolación de líquidos que infiltran a través de una muestra de suelo, o en este caso de residuos, para su posterior análisis químico. Los componentes principales de la lisimetría son un contenedor con la parte superior abierta para recolectar y medir el agua que ingresa a la muestra de suelo o residuos. El fondo debe estar conectado a una tubería desde donde se obtendrán las muestras de los líquidos percolados.

La finalidad de los lisímetros es representar las condiciones de terreno a escala de laboratorio, siendo ampliamente usados para investigar el comportamiento de líquidos en el suelo u otros materiales. La mayoría de los lisímetros incluye una capa de drenaje de material pétreo o geosintético dispuesta sobre la base de éste, con la finalidad de dirigir la percolación a un punto de medición.

Aspectos negativos de los lisímetros.

- Esfuerzos laterales pueden ser una de las principales fuentes de error experimental si la extensión real de los lisímetros es insuficiente. Lisímetros que son muy pequeños y de poca capacidad de recolección de agua, subestiman la tasa de percolación (Szanto, 2006)
- No pueden ser manejados análogamente al terreno
- El contenido de los lisímetros difiere del residuo intacto con respecto a los regímenes térmicos, hidráulicos y microbiológicos, debiendo tomarse en cuenta estos aspectos para su extrapolación a escala real
- El límite inferior del lisímetro crea un punto ciego hidráulico (sin flujo) impidiendo flujos de vapores y líquidos por la base de éste.

Aspectos positivos de los lisímetros.

- Permiten simular las condiciones de compactación, temperatura, anaerobiosis y pluviales de una celda de relleno sanitario

- La principal ventaja de la lisimetría es la medición directa de la tasa de percolación con una precisión mayor. Se ha demostrado que la tasa de percolación puede ser medida con una precisión de 1.5×10^{-10} (cm/seg) utilizando la lisimetría (Benson et. al, 2001)

Se requiere construir un prototipo que simule las condiciones internas de compactación, térmicas y anaeróbicas de una celda de relleno sanitario, considerando las condiciones pluviométricas de la Ciudad de México.

De acuerdo a la literatura y otras investigaciones realizadas se establecieron las siguientes características comunes para la construcción del lisímetro. Estas se detallan a continuación.

3.1.1 Forma del lisímetro y características generales de los lisímetros

Se construyeron 3 lisímetros con capacidad aproximada de 28 L ($0,028 \text{ m}^3$), los cuales fueron instalados en la azotea del edificio de Posgrado Bernardo Quintana, Ciudad Universitaria, México D.F.

Los lisímetros fueron construidos en acrílico e instalados sobre una estructura metálica especialmente diseñada para su sujeción. En la figura 3.1 se muestra el diseño de un lisímetro tipo para este estudio.



Figura 3.1. Diseño de lisímetro y estructura de sujeción.

De manera de facilitar el llenado y compactación de los residuos dispuestos, el lisímetro tiene forma cilíndrica, considerando un diámetro suficientemente grande, como para evitar el “efecto pared”. Este último incide directamente en los asentamientos de los residuos, ya que ejerce una fuerza paralela en sentido contrario a los asentamientos.

Las tuberías instaladas en la base consisten en un tubo de PVC de 1/2” y una llave de paso de PVC Ø1/2”, ambos hidráulicos, adheridas con pegamento especial para PVC. La tubería fue adherida al lisímetro con silicona de modo de asegurar la estanqueidad del lisímetro.

En el fondo interior del lisímetro se instaló un filtro de malla plástica (malla mosquitero, ver figura 3.2. La función de la malla plástica es permitir el escurrimiento de los líquidos percolados e impedir que el material grueso obstruya la llave de paso instalada perfil abajo.

3.1.2 Arreglo experimental de los residuos dispuestos en los lisímetros

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de esta investigación es determinar los parámetros hidrológicos de los residuos sólidos urbanos, utilizando como caso de estudio el relleno sanitario de Tlalnepantla, utilizando como factores principales la capacidad de campo, humedad, peso volumétrico y porosidad de éstos. Para esto los residuos dispuestos en los lisímetros y la recirculación de los lixiviados se lleva a cabo de la siguiente manera.

Tabla 3.1. Arreglo experimental para lisímetros

Lisímetro	Densidad de los residuos (kg/m ³)	Adición de lixiviados	Volumen de residuos a disponer (m ³)	Masa inicial de residuos sólidos dispuestos (kg)
1	600	si	0,0246	14,742
2	700	si	0,0246	17,199
3	800	si	0,0246	19,656

3.1.3 Drenaje de lixiviados

Se consideró una malla filtrante en el fondo del lisímetro, de manera de facilitar el drenaje y evacuación de los lixiviados. Esta capa fue para evitar además la obstrucción de la llave de paso por material grueso.

El diseño del sistema de captación y conducción de lixiviados se presenta en la figura 3.2.

3.1.4 Características del lixiviado esperado

La infiltración de agua a la masa del relleno, como también la humedad contenida en los residuos sólidos, genera lixiviados. El agua que escurre superficialmente y entra en contacto con los residuos expuestos, también se denomina lixiviados (Szanto, 2006). Las fuentes externas de agua que ingresan a la masa pueden ser de la precipitación, riego, infiltración subterránea o recirculación del mismo lixiviado.



Figura 3.2. Sistema de drenaje de lixiviados

Fuente: Propia

El lixiviado que ha atravesado el relleno sanitario, arrastra consigo una gran variedad de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, algunas disueltas y otras en suspensión, las cuales han sido removidas de los residuos sólidos, ya sea por arrastre mecánico, solubilización directa en el lixiviado o como producto de la solubilización biológica de los residuos.

En la tabla 3.2 se muestra la composición típica de los lixiviados generados en un relleno sanitario.

Los compuestos químicos que componen el lixiviado pueden provocar importantes impactos sobre la calidad de las aguas subterráneas o superficiales. Los elementos de mayor importancia son normalmente el plomo y el cadmio. Las fuentes de cadmio incluyen las baterías de níquel-cadmio, plásticos, envoltorios y aparatos electrónicos. Las fuentes de plomo pueden incluir baterías plomo-ácido, plásticos, latas, aceites usados, ampolletas, entre otros (Szanto, 2006)

3.1.5 Compactación de los residuos sólidos

Con la finalidad de alcanzar las compactaciones requeridas, se ha seccionado el lisímetro en 3 partes con volúmenes iguales. Cada capa es pesada y dispuesta dentro del lisímetro de manera de alcanzar igual peso volumétrico en cada una.

Tabla 3.2. Composición típica de lixiviados en relleno sanitarios

Constituyente	Valores, mg/l ^a		
	Vertederos jóvenes		Vertederos antiguos
	(<2 años)		(>10 años)
	Rango ^b	Típico	
DBO ₅	2000 - 30000	10000	100 – 200
COT	1500 - 20000	6000	80 – 160
DQO	3000 - 60000	18000	100 – 500
Sól. en suspensión total	200 - 2000	500	100 – 400
Nitrógeno orgánico	10 - 800	200	80 – 120
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200	20 – 40
Nitrato	may-40	25	5 – 10
Fósforo total	5 – 100	30	5 – 10
Ortofósforos	4 – 80	20	4 – 8
Alcalinidad como CaCO ₃	1000 – 10000	3000	200 – 1000
pH	4,5 – 7,5	6	6,6 – 7,5
Dureza total como CaCO ₃	300 – 10000	3500	200 - 500
Calcio	200 – 3000	1000	100 – 400
Magnesio	50 – 1500	250	50 – 200
Potasio	200 – 1000	300	50 – 400
Sódio	200 –2500	500	100 – 200
Cloro	200 – 3000	500	100 – 400
Sulfato	50 – 1000	300	20 – 50
Hierro total	50 –1200	60	20 – 200

(a) Excepto pH que es adimensional

(b) Valores representativos. Se han publicado valores mayores para algunos constituyentes.

(c) Los valores típicos para vertederos jóvenes variarán con el estado del metabolismo del relleno.

Fuente: Tchobanoglous G, Theisen Hilary, Vigil Samuel A (1993) Integrated solid waste management, Mc Graw Hill, primera edición internacional

Para compactar los residuos se utiliza un compactador metálico, distribuyendo los más uniformemente posible los golpes de manera de alcanzar el peso volumétrico deseada. Los golpes son distribuidos en forma de espiral desde dentro hacia afuera.

3.2 Metodología de experimentación

Una vez diseñados y contruidos los lisímetros, se comenzó con los ensayos y monitoreos de éstos, de manera de registrar los datos necesarios para determinar la influencia en la generación de lixiviados, y la interacción entre los factores considerados en esta investigación.

Los factores considerados de relevancia en esta investigación para la generación de lixiviados son:

- Características de los residuos sólidos urbanos: cantidad de materia orgánica, tamaño de los residuos y composición química,
- Humedad de los residuos
- Parámetros hidráulicos de los residuos: capacidad de campo práctica (CCP), capacidad de campo teórica (CCT) y volumen de poros.
- Peso volumétrico de los residuos
- pH del lixiviado generado

Una vez planteados los factores a monitorear en esta investigación, se describe a continuación la manera de control, seguimiento y ensayos realizados para su cuantificación.

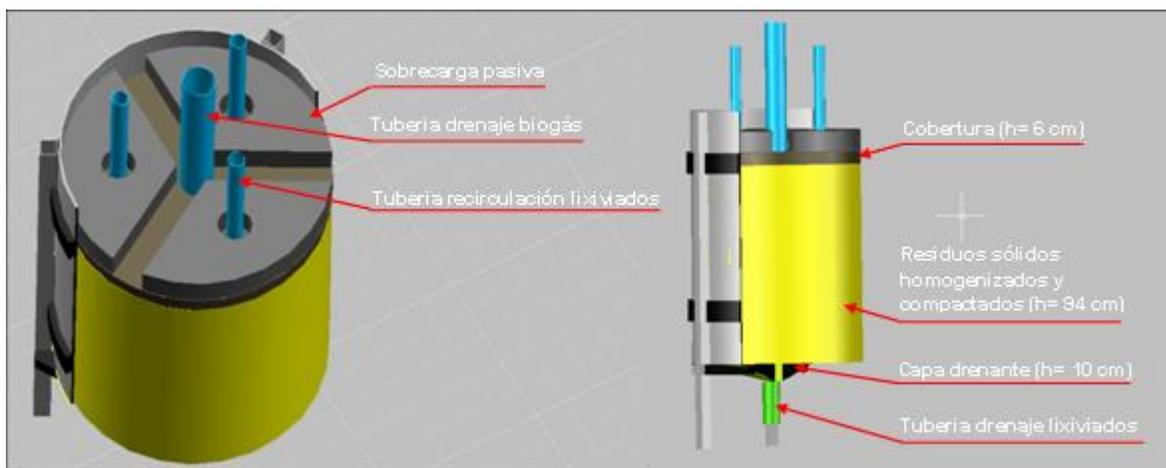


Figura 3.3. Diseño propuesto para lisímetros

Fuente: Propia

3.2.1 Caracterización de los residuos sólidos urbanos

En la caracterización de los residuos sólidos utilizados en esta investigación se utiliza la metodología planteada en la normatividad Mexicana. Las Normas

Mexicanas utilizadas para la caracterización de los residuos son las señaladas en el punto 1.5.2 de este documento.

Además se clasificaron los residuos de acuerdo a las categorías descritas por Grisolia et al. (1995). En esta clasificación, los residuos son agrupados en tres clases principales.

- Clase A. Elementos estables inertes
- Clase B. Elementos altamente deformables
- Clase C. Elementos fácilmente biodegradables

En la tabla 3.3 se muestran los elementos considerados en cada categoría.

Tabla 3.3. Tabla tipo para clasificación propuesta por Grisolia et al. (1995)

CLASE A Elementos estables inertes	Peso (g)	CLASE B Elementos altamente deformables	Peso (g)	CLASE C Elementos fácilmente biodegradables	Peso (g)	Muestra total³
Metal		Papel		Residuos de alimentos		
Vidrio y cerámicas		Cartón		Residuos de jardinería y poda		
Residuos de la construcción		Textil		Otros ¹		
Madera		Plástico		Bajo malla 1/2" ²		
		Pañales desechables				
		Caucho				
		Cuero				
Total Clase A		Total Clase B		Total Clase C		
Total Clase A (%)		Total Clase B (%)		Total Clase C (%)		

Fuente. Grisolia et al. (1995)

Obtenidos los resultados de la clasificación de acuerdo a los grupos propuestos, se representan en un gráfico triangular, en donde se busca encontrar un patrón común entre las caracterizaciones de residuos realizadas del Distrito Federal.

En la figura 3.4 se muestra el gráfico propuesto para volcar los datos obtenidos de la caracterización.

3.2.2 Contenido de humedad de los residuos

Los residuos que son finalmente dispuestos en los rellenos sanitarios contienen inicialmente cierta humedad, la cual es liberada paulatinamente. Ésta humedad inicial, o contenido inicial de agua, se define como el ratio entre la masa de agua y la masa total del residuo (Szanto et. al, 2001).

La determinación del contenido de humedad se realiza mediante secado a peso constante en horno a 105° C, durante un tiempo de 24 hrs. En muestras triplicadas (Muñoz, 2001).

$$W\%_{basepesohúmedo} = \left[\frac{MasaHúmeda - MasaSeca}{MasaHúmeda} \right] * 100 \quad (3.1)$$

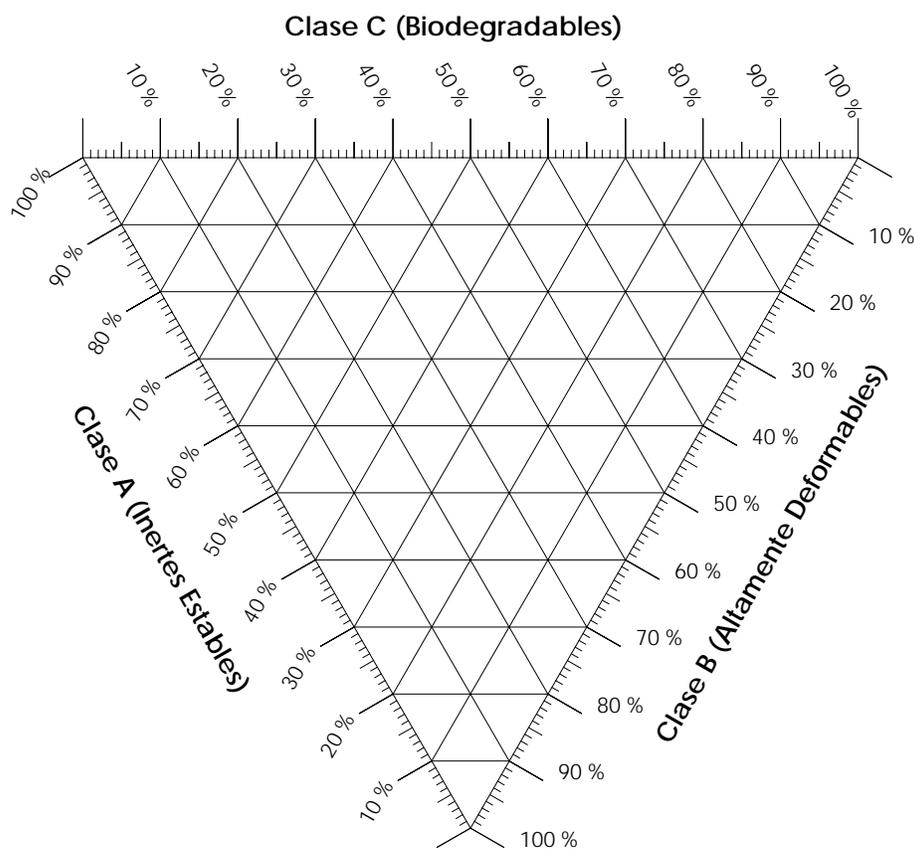


Figura 3.4. Diagrama triangular mostrando las proporciones de materiales correspondientes a la caracterización

3.2.3 Capacidad de Campo de los residuos

La humedad contenida en los residuos puede ser absorbida por residuos como papel, cartón, textiles, entre otros. Una vez alcanzada la máxima capacidad de absorción de humedad por estos materiales contenidos en los residuos, al adicionar nuevas cantidades de agua, ésta drenará libremente a través de los poros, en sentido descendente e influenciado por la fuerza de gravedad.

La cantidad de agua retenida por los residuos puede ser mayor a la capacidad de absorción debido a que los líquidos quedan atrapados en poros

aislados, incapaces de drenar libremente por gravedad. En la práctica el incremento de humedad resultante de ambos procesos se combina y se define como la capacidad de absorción total del residuo (Beaven, 1995).

La capacidad de campo se definirá como el contenido de humedad una vez que ha drenado por gravedad toda el agua libre desde la masa saturada. Adicionalmente se puede definir como la máxima capacidad de absorción total existiendo condiciones de libre drenaje (Szanto, 2001).

En la figura 3.5 se puede apreciar el fenómeno de capacidad de campo, en donde una masa (de residuos) es saturada y posteriormente sometida a un drenaje libre.

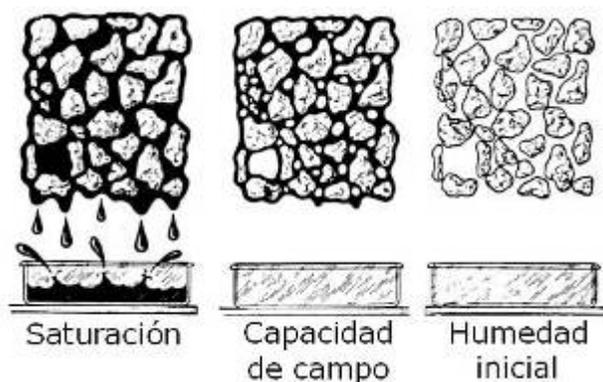


Figura 3.5. Situación de los residuos frente a diferentes grados de humedad (Buckman y Brady, 1966)

Con el fin de ilustrar de mejor manera las relaciones volumétricas y de masa fundamentales para el análisis de capacidad de campo, se presentan en la figura 3.6 las tres fases del residuo sólido.

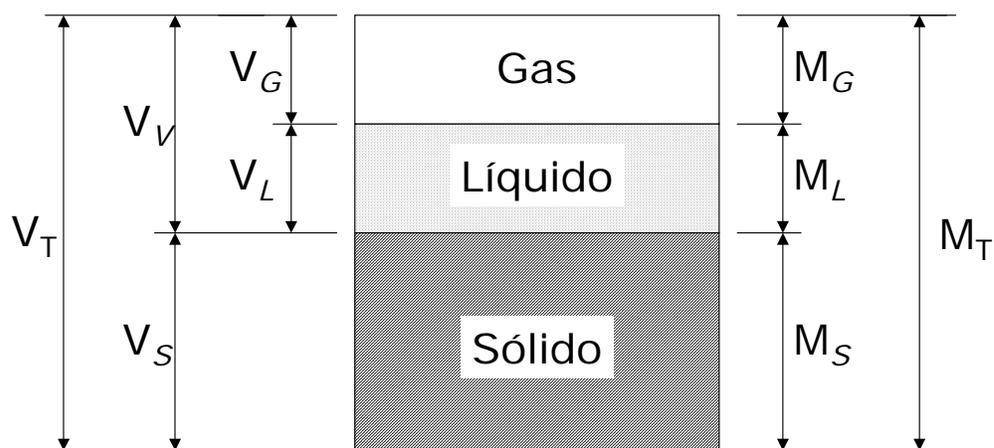


Figura 3.6. Diagrama de fases para el residuo sólido

En base a la figura 3.6 se pueden definir las siguientes relaciones volumétricas básicas.

$$\begin{aligned} \text{Porosidad:} & \quad n & = & \quad V_V / V_T \\ \text{Índice de vacíos:} & \quad e & = & \quad VV / V_S \\ \text{Grado de Saturación:} & \quad S & = & \quad VL / VV \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} V_T & = \text{Volumen total} \\ V_S & = \text{Volumen de Sólidos} \\ VV & = \text{Volumen de Vacíos} \\ VL & = \text{Volumen de Líquidos} \\ VG & = \text{Volumen de Gases} \end{aligned}$$

Relaciones máxicas básicas:

$$\begin{aligned} \text{Humedad base peso seco:} & \quad w_{bps} & = & \quad (M_L / M_S) \times 100 (\%) \\ \text{Humedad base peso húmedo:} & \quad w_{bph} & = & \quad (M_L / M_T) \times 100 (\%) \\ \text{Densidad Líquido:} & \quad \gamma_L & = & \quad M_L / V_L \\ \text{Densidad Total:} & \quad \gamma_t & = & \quad M_T / V_T \\ \text{Densidad Seca:} & \quad \gamma_d & = & \quad M_S / V_T \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} M_T & = \text{Masa total} \\ M_S & = \text{Masa de Sólidos} \\ M_L & = \text{Masa de Líquidos} \\ M_G & = \text{Masa de Gas (Despreciable)} \end{aligned}$$

3.2.4 Protocolo de ensayo

a) Capacidad de campo práctica (CCP)

El procedimiento consiste en agregar agua al lisímetro, simulando una lluvia, a una tasa controlada, hasta observar el escurrimiento del líquido por la válvula abierta en el fondo de la columna. La cantidad de agua agregada hasta ocurrido el escurrimiento es registrada, así como también la cantidad de agua recogida desde la válvula una vez iniciado el escurrimiento hasta que se detiene.

El agua retenida dentro del lisímetro se calcula como la diferencia entre el agua agregada y el agua recogida, más la humedad inicial del residuo. La capacidad de campo práctica es calculada como la relación entre el volumen de agua retenida y el volumen total de la columna de residuos en el momento que se ha recogido todo el líquido escurrido.

De acuerdo al diagrama de fases de la figura 3.5, se ha de definir la capacidad de campo como la relación entre el volumen de líquido retenido en condiciones de libre drenaje, y el volumen total de residuo, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CC = \frac{V_{L(\text{retenido})}}{V_T} \quad (3.2)$$

Donde:

CC: Capacidad de Campo (v/v)

En términos del contenido de humedad, la capacidad de campo se refiere al contenido máximo de humedad en condiciones de libre drenaje.

b) Capacidad de campo teórica (CCT)

Posterior al ensayo anterior, se abre la válvula dejando drenar libremente el lisímetro por 24 horas y registrando el agua recogida.

El agua total retenida dentro del lisímetro se calcula de la siguiente manera.

$$\text{Agua total retenida} = \text{Agua agregada}(1^\circ \text{ y } 2^\circ \text{ ensayo}) - \text{Agua recogida}(2^\circ \text{ y } 3^\circ \text{ ensayo}) + \text{Humedad residuos}$$

La CCT fue entonces calculada como la relación entre el volumen de agua retenida y el volumen total del lisímetro al momento de haber recogido todo el líquido escurrido.

El volumen de poro, se calcula como el volumen de agua retenida una vez finalizado el segundo ensayo, esto es con el lisímetro totalmente saturado.

La tasa de agua ingresada fue en todos los casos de 2371,14 ml cada ½ hora.

En la tabla 3.4 se muestran algunos valores encontrados en la bibliografía consultada.

3.2.5 Monitoreo de lixiviado

Los líquidos generados por los lisímetros deben ser constantemente monitoreados durante los ensayos hidráulicos y periódicamente a lo largo de la

investigación. En esta investigación se medirán los volúmenes de líquidos generados y el pH del mismo.

Es importante señalar que las características del lixiviado varían enormemente con la edad del relleno y eventos que se susciten. Según Salas (2001), si las muestras de lixiviado son recolectadas en la fase ácida de descomposición, el valor de pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, COT, nutrientes y metales pesados serán altas. De esta misma forma si las muestras son recolectadas en la fase de fermentación del metano, el pH se moverá entre el intervalo de 6,5 a 7,5, siendo la DBO₅, COT, DQO y los valores de concentración de nutrientes significativamente menores.

3.2.6 pH

La concentración de iones de hidrogeno es un importante parámetro de calidad para aguas naturales y aguas residuales. El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrogeno.

$$pH = -\log aH^+ \quad (3.3)$$

La determinación del pH se realizará de manera electrométrica con un equipo de campo, utilizando un electrodo de vidrio comercial.

3.2.7 Asentamientos

Al iniciar la investigación, y una vez llenadas las columnas, se medirá la altura inicial de los residuos, con la finalidad de registrar los asentamientos para las distintas densidades en que serán dispuestos los residuos en las columnas. Los asentamientos intervienen de forma directa en el cálculo del peso volumétrico de los residuos al interior de la columna haciendo variar la capacidad de campo de los ensayos.

3.2.8 Presentación de los datos obtenidos en laboratorio.

El seguimiento se realiza al total de lisímetros a construidos, presentando los resultados y análisis de éstos en el capítulo 4.

Se establece una relación entre la generación de lixiviados y la capacidad de campo de los residuos. Esto va en directa relación tanto al contenido de humedad en la masa y el peso específico de éstos. De esta manera se desea establecer cuales son las condiciones hidrológicas óptimas para la generación de biogás en un relleno sanitario.

Tabla 3.4. Contenido de humedad, capacidad de campo y porosidad en los residuos sólidos municipales

Referencia	Descripción de la muestra de residuos	Contenido de humedad	Capacidad de campo (CC)	Porosidad (n)	Capacidad de absorción
GeoSyntec and Tood, 1995	Muestra obtenida durante perforación de pozo de gas	7 a 105%, 28% prom., por % de peso seco (30%, por vol. asumido = 85 pcf)	46% prom., por vol. $fc(vol.) = -0,62z + 54$	Asumiendo $G_s = 2.3$ para los residuos, 49% prom. por vol. $n(%) = -0,046z + 55$	16% prom., por vol.
McBean et al., 1995	Resumen de la capacidad de campo y los contenidos de humedad inicial en los residuos reportada en la literatura	Contenido humedad inicial: 4 a 21 %, por vol., 15% prom., por vol.	28 a 40%, por vol. 33% prom, por vol.		10 a 29%, por vol. 18% prom, por vol.
Canziani and Cossu, 1989	Resumen de algunos valores de k , fc y humedad inicial reportada en la literatura	4 a 19%, por vol. 14% prom., por vol.	por volumen, 29 a 39% para residuos crudos 35% prom., por vol.		19 a 25%, por vol. 21% prom, por vol.
Townsend et al., 1996	Muestras del barrenado para el estudio de recirculación de lixiviados en el relleno sanitario Alachua	Contenido e humedad antes de la recirculación y residuos nuevos (% peso seco) = 38,1 a 42,2. después de recirculación (% peso seco) = 45,6 a 84,2			
Blight et al. 1992	Gráfico capacidad de campo vs. Densidad con valores de la literatura; el gráfico también muestra el efecto de la edad de los residuos en la capacidad de campo (datos del relleno sanitario de Capetown)		Para densidad de residuos = 47 pcf, $fc(vol.) = 25$ a 36%; para densidad de residuos = 62 pcf, $fc(vol.) = 25$ a 44%		
Help Model, Version 3 (Schroeder et al., 1994)	Porosidad, capacidad de campo y punto de marchites basado en el contenido de agua de los residuos sólidos municipales de Tchobanoglous et al. 1977		$fc(vol.) = 29.2\%$	$n = 67,1\%$	

Notas: prom. = promedio
 Vol. = volumen
 pcf = libras por pie cúbicos (pounds per cubic feet, en ingles). Equivalencia 1 (lb/ft³) = 16,0345 (kg/m³)

1. El contenido de humedad en porcentaje del peso seco es el peso de liquido dividido por el peso de los sólidos expresado en 100 por ciento
2. La capacidad de campo es el mínimo contenido de humedad que puede alcanzar por drenaje bajo la influencia de la gravedad
3. La porosidad es el volumen de vacíos dividido por el volumen total

Fuentes: GeoSyntec Consultants (2000) Landfill bioreactor system, King George County Landfill and Recycling Center and Maplewood Recycling and Waste Disposal Facility, Virginia Waste Management, Inc.

4 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la fase experimental de la investigación llevada a cabo para determinar los parámetros hidrológicos en rellenos sanitarios, para las condiciones de los residuos generados en México.

4.1 Caracterización de los residuos sólidos

Se realizaron 3 caracterizaciones, dos muestras del relleno sanitario Tlalnepantla y una del conjunto habitacional El Altillio Universidad, de acuerdo a la NMX-AA-022-1985, para la selección y cuantificación de subproductos, dando los siguientes resultados.

Tabla 4.1. Caracterización de los residuos utilizados en los ensayos

Nº	Subproducto	1º Caracterización Conjunto Habitacional El Altillio Universidad		2º Caracterización Relleno Sanitario Tlalnepantla		3º Caracterización Relleno Sanitario Tlalnepantla	
		Total (g)	% Peso	Total (g)	% Peso	Total (g)	% Peso
1	Algodón	130	0,38	0	0,00	55	0,07
2	Cartón	1635	4,80	2005	3,13	1513	2,04
3	Cuero	0	0,00	0	0,00	0	0,00
4	Residuos finos	0	0,00	0	0,00	0	0,00
5	Hule	200	0,59	93	0,15	171	0,23
6	Loza y cerámica	0	0,00	64	0,10	0	0,00
7	Madera	112,9	0,33	62	0,10	87,6	0,12
8	Material ferroso	726	2,13	1242	1,94	1858	2,51
9	Material no ferroso	26	0,08	588	0,92	133	0,18
10	Material de construcción	0	0,00	0	0,00	228	0,31
11	Papel	5192	15,25	10872,7	16,97	8226	11,10
12	Pañales desechables	1564	4,59	3047	4,76	3220	4,34
13	Tetrapack	707	2,08	1067	1,67	641	0,86
14	(1) Pet	1024,5	3,01	786,5	1,23	2041	2,75
15	(2) PEAD o HDPE	451,5	1,33	1064	1,66	1173	1,58
16	(3) PVC	0	0,00	0	0,00	0	0,00
17	(4) PEBD o LDPE	1817	5,34	6318	9,86	2704	3,65
18	(5) PP	432	1,27	1354	2,11	3753	5,06
19	(6) PS	732	2,15	953,5	1,49	512	0,69
20	(7) Otros	266	0,78	1019	1,59	1671	2,25
21	Peligrosos	131	0,38	422	0,66	443	0,60
22	Textiles	0	0,00	2024	3,16	4178	5,64
23	Vidrio de color	584,5	1,72	654	1,02	241	0,33
24	Vidrio transparente	748,5	2,20	680	1,06	2043	2,76
25	Organicos	17347	50,96	29706,5	46,37	38147	51,46
26	Otros	214	0,63	45	0,07	1092	1,47
Total		34040,9	100	64067,2	100	74130,6	100

Fuente: Propia

De acuerdo a la caracterización propuesta por Medina (2006) estos resultados pueden ser presentados como lo muestra la figura 4.1.

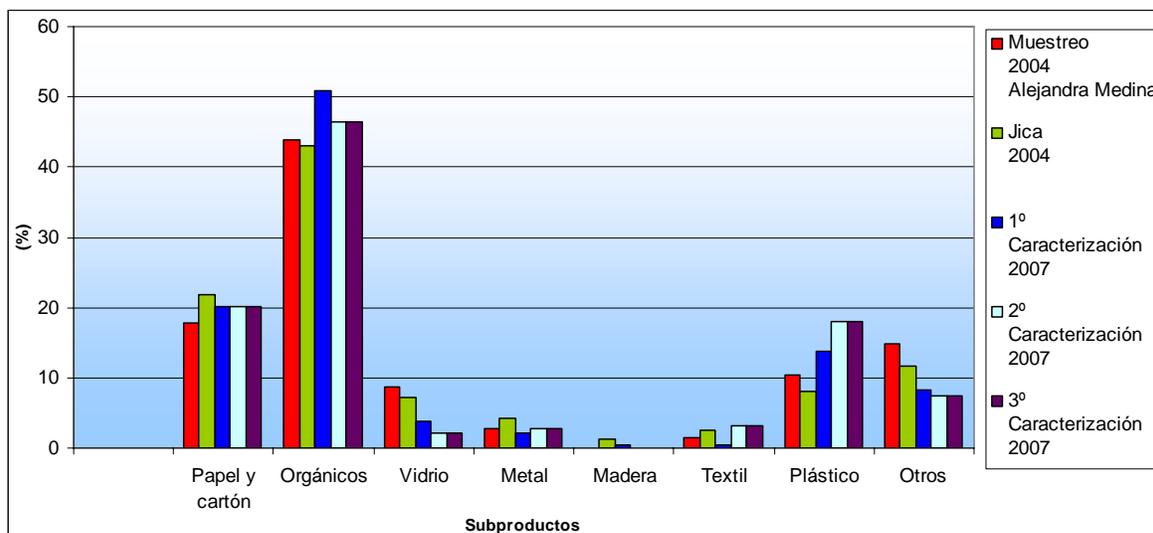


Figura 4.1. Caracterización de subproductos para distintos estudios realizados

Fuente: Propia

En la figura 4.1 se puede observar la similitud de la composición de los residuos en las distintas muestras. Cabe señalar que las muestras caracterizadas por Medina (2006) y la Cooperación Japonesa (JICA) fueron obtenidas del relleno sanitario Bordo Poniente, cuyo responsable es la Dirección General de Servicios Urbanos del Distrito Federal.

El componente predominante en las muestras es sin duda los residuos orgánicos. En segundo lugar están el papel y el cartón, seguido muy de cerca por el grupo de plásticos.

De manera de poder apreciar de mejor manera la influencia de la composición en el comportamiento del relleno sanitario, tanto para la generación de biogás, como para la estabilidad geotécnica del mismo, se realizó una caracterización de acuerdo a los propuesto por Grisolia et al. (1995), la cual se presenta a continuación.

Con base en estos resultados se puede representar en un gráfico triangular los porcentajes de cada una de las categorías antes señaladas (A, B y C). Se añadieron los resultados obtenidos de las caracterizaciones realizadas por la JICA (Cooperación Japonesa) en el año 2004 y la realizada por la M. en I. Alejandra Medina, con muestras obtenidas del relleno sanitario Bordo Poniente.

En la figura 4.2 se puede observar que en las muestras tomadas hay un alto porcentaje tanto de residuos altamente deformables; como plástico, papel y cartón, como de residuos fácilmente biodegradables; como residuos de alimentos.

Tabla 4.2. 1º Caracterización, Conjunto Habitacional El Attilo

CLASE A Elementos estables inertes	Peso (g)	CLASE B Elementos altamente deformables	Peso (g)	CLASE C Elementos fácilmente biodegradables	Peso (g)	Muestra total ³
Metal	752,0	Papel	5.192,0	Residuos de alimentos	17.347,0	
Vidrio y cerámicas	1.333,0	Cartón	2.342,0	Residuos de jardinería y poda		
Residuos de la construcción	0,0	Textil	130,0	Otros ¹	214,0	
Madera	112,9	Plástico	4.723,0	Bajo malla 1/2" ²	0,0	
		Pañales desechables	1.564,0			
		Caucho	200,0			
		Cuero	0,0			
Total Clase A	2.198	Total Clase B	14.151	Total Clase C	17.561	33.910
Total Clase A (%)	6,48	Total Clase B (%)	41,73	Total Clase C (%)	51,79	100

¹ Material Orgánico en descomposición no clasificable

² Suelo, cenizas, materia orgánica, otros

³ No se han considerado los residuos peligrosos en esta clasificación

Tabla 4.3. 2º Caracterización, Relleno Sanitario Tlalnepantla

CLASE A Elementos estables inertes	Peso (g)	CLASE B Elementos altamente deformables	Peso (g)	CLASE C Elementos fácilmente biodegradables	Peso (g)	Muestra total ³
Metal	1.991,0	Papel	8.226,0	Residuos de alimentos	38.147,0	
Vidrio y cerámicas	2.284,0	Cartón	2.154,0	Residuos de jardinería y poda		
Residuos de la construcción	228,0	Textil	4.233,0	Otros ¹	1.092,0	
Madera	87,6	Plástico	11.854,0	Bajo malla 1/2" ²	0,0	
		Pañales desechables	3.220,0			
		Caucho	171,0			
		Cuero	0,0			
Total Clase A	4.591	Total Clase B	29.858	Total Clase C	39.239	73.688
Total Clase A (%)	6,23	Total Clase B (%)	40,52	Total Clase C (%)	53,25	100

¹ Material Orgánico en descomposición no clasificable

² Suelo, cenizas, materia orgánica, otros

³ No se han considerado los residuos peligrosos en esta clasificación

Tabla 4.4. 3º Caracterización, Relleno Sanitario Tlalnepantla

CLASE A Elementos estables inertes	Peso (g)	CLASE B Elementos altamente deformables	Peso (g)	CLASE C Elementos fácilmente biodegradables	Peso (g)	Muestra total ³
Metal	1.991,0	Papel	8.226,0	Residuos de alimentos	38.147,0	
Vidrio y cerámicas	2.284,0	Cartón	2.154,0	Residuos de jardinería y poda		
Residuos de la construcción	228,0	Textil	4.233,0	Otros ¹	1.092,0	
Madera	87,6	Plástico	11.854,0	Bajo malla 1/2" ²	0,0	
		Pañales desechables	3.220,0			
		Caucho	171,0			
		Cuero	0,0			
Total Clase A	4.591	Total Clase B	29.858	Total Clase C	39.239	73.688
Total Clase A (%)	6,23	Total Clase B (%)	40,52	Total Clase C (%)	53,25	100

¹ Material Orgánico en descomposición no clasificable

² Suelo, cenizas, materia orgánica, otros

³ No se han considerado los residuos peligrosos en esta clasificación

El primero, residuos clase B, tendrían la misión de retener líquido, mientras que los residuos clase A, son los responsables de generación de biogás debido a su degradación.

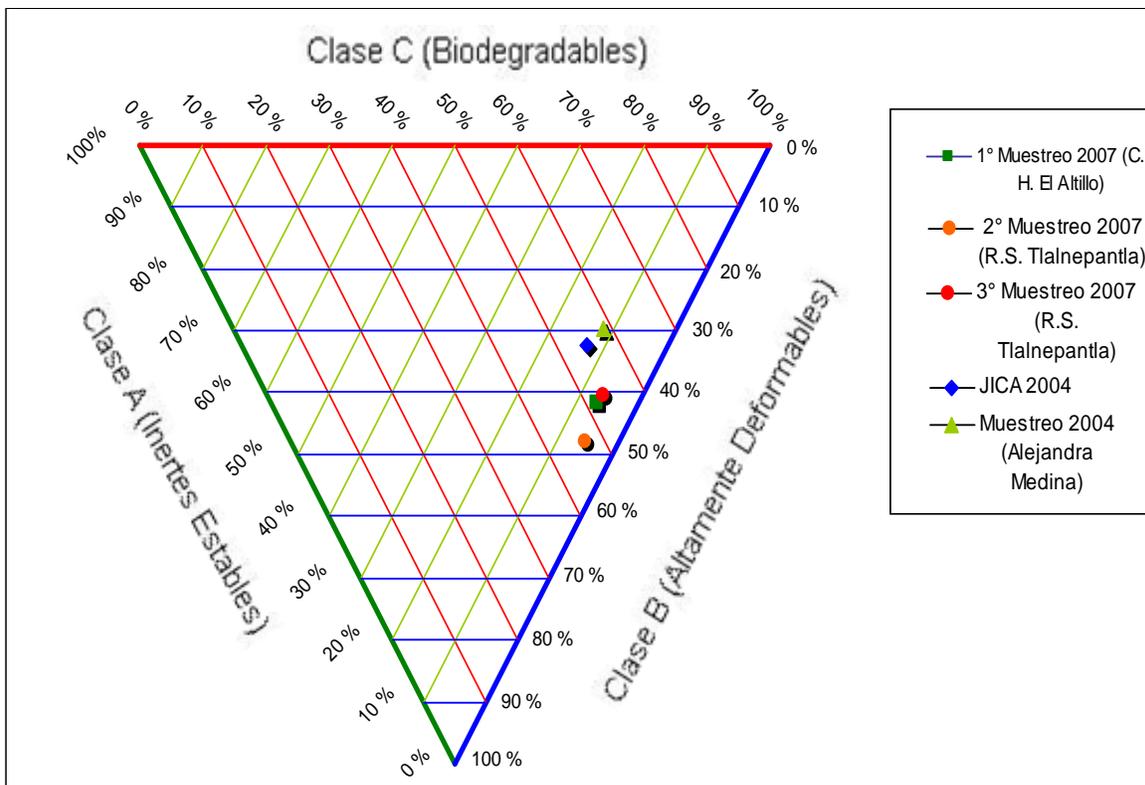


Figura 4.2. Caracterización según Grisolia para distintos estudios de caracterización

Fuente: Propia

4.2 Determinación de la humedad de los residuos

Para la determinación de la humedad de los residuos, se utilizaron las recomendaciones de la NMX-AA-016-1984. En los siguientes gráficos se puede observar la disminución de la humedad de la muestra, en duplicado, hasta alcanzar peso constante. En base a este peso final se obtuvo el porcentaje de humedad correspondiente a cada muestra.

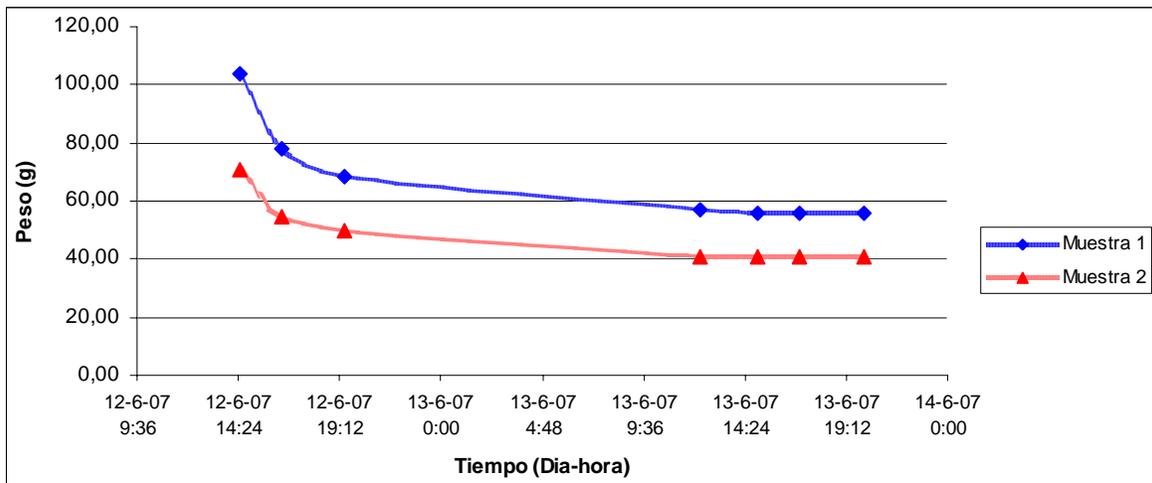


Figura 4.3. Determinación de humedad de los residuos para 1º ensayo

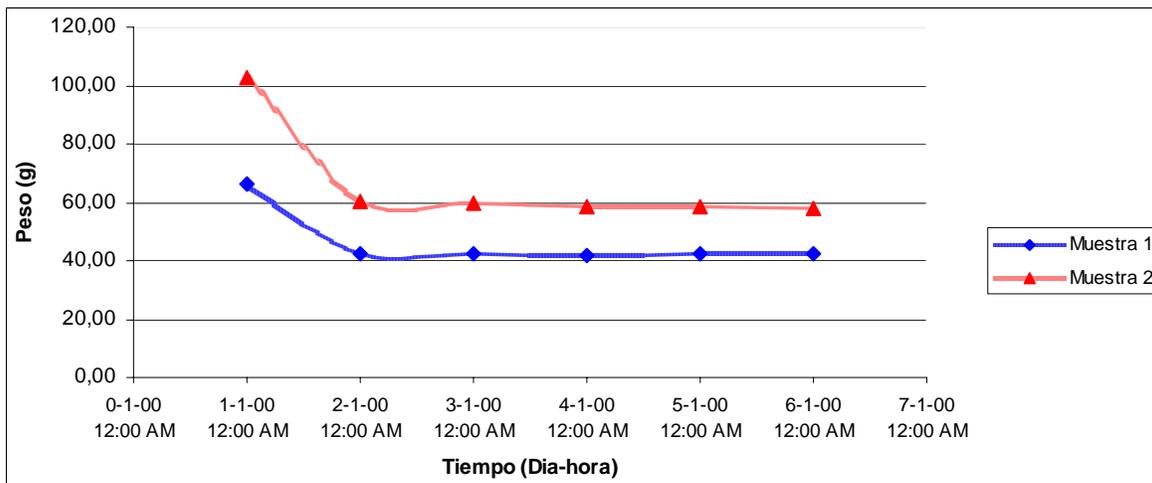


Figura 4.4. Determinación de humedad de los residuos para 2º ensayo

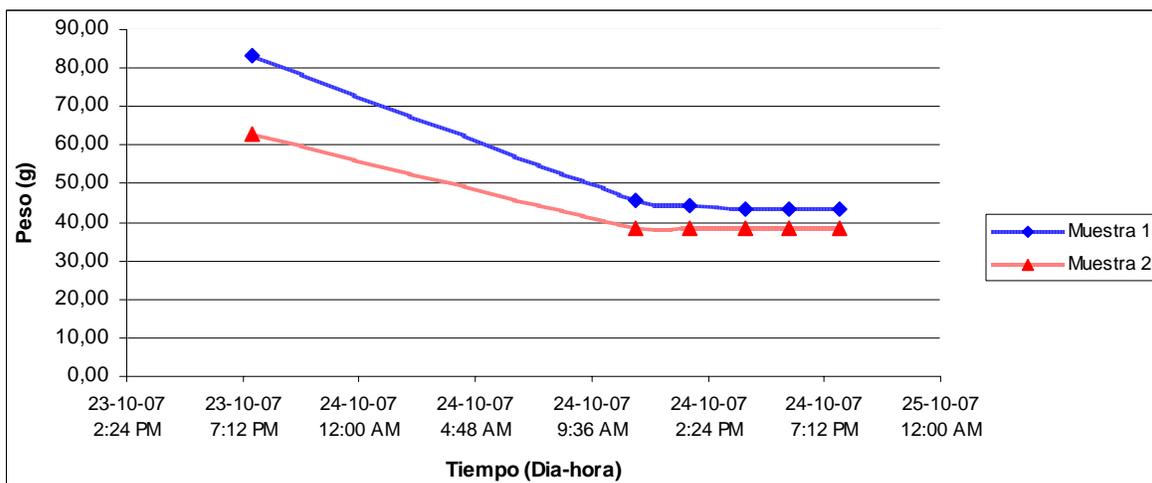


Figura 4.5. Determinación de humedad de los residuos para 3º ensayo

Los resultados finales de los ensayos de humedad se presentan en la tabla 4.5.

Se puede observar el alto contenido de humedad de los residuos, siendo el primer ensayo realizado a los residuos del Conjunto Habitacional El Altillo, y el segundo y tercero a la muestra de residuos obtenida del Relleno Sanitario Tlanepantla.

Tabla 4.5. Resultados de los ensayos de determinación de humedad de las muestras de residuos sólidos

Ensayo	Muestra	Muestra Humeda	Muestra Seca	Humedad (%)
1°	1	104,00	55,88	46,27
	2	71,10	40,70	42,76
	Promedio			44,51
2°	1	66,00	42,10	36,21
	2	102,40	57,80	43,55
	Promedio			39,88
3°	1	83,25	43,25	48,05
	2	62,90	38,25	39,19
	Promedio			43,62
Promedio final				42,67

4.3 Peso volumétrico “In Situ”

De acuerdo a lo establecido en la NMX-AA-019-1985, se realizó el ensayo de peso volumétrico “in situ” solo a la primera muestra, debido a que las muestras obtenidas en el relleno fueron compactadas dentro de los tambos para su transporte. Esto último afecta directamente el resultado de este ensayo para dichas muestras, ya que los residuos dispuestos son alterados volumétricamente con el fin de optimizar su transporte.

En la figura 4.6 se presentan las condiciones del ensayo realizado y su resultado. Se utilizó como contenedor un tambo de 200 L metálico.

Dimensiones del tambo

a	0,565	cm
b	0,87	cm
Volumen	0,218	m ³
Tara tambo	15,35	kg

Peso total (tambo + residuos)	49,5	kg
Peso residuos	34,15	kg

Peso volumetrico de los residuos	156,65	kg/m³
---	---------------	-------------------------

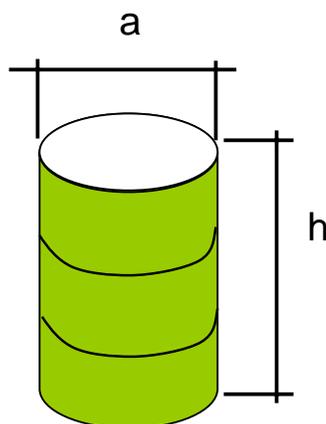


Figura 4.6. Determinación del peso volumétrico in situ

Fuente: Propia

De manera de poder comparar los resultados obtenidos se presenta a continuación la tabla 4.6, con los valores entregados por SEDESOL para este tipo de ensayo, en México.

Tabla 4.6. Peso volumétrico de residuos según fuente generadora

Tipo de fuente generadora	Peso volumétrico in situ (kg/m ³)
Domésticos	187
Comerciales	280
Servicios	169
Especiales	182
Áreas publicas	144
Otros	Variable

Fuente: SEDESOL

El resultado obtenido en el ensayo de laboratorio se puede comparar con los entregados por SEDESOL en el figura 4.7.

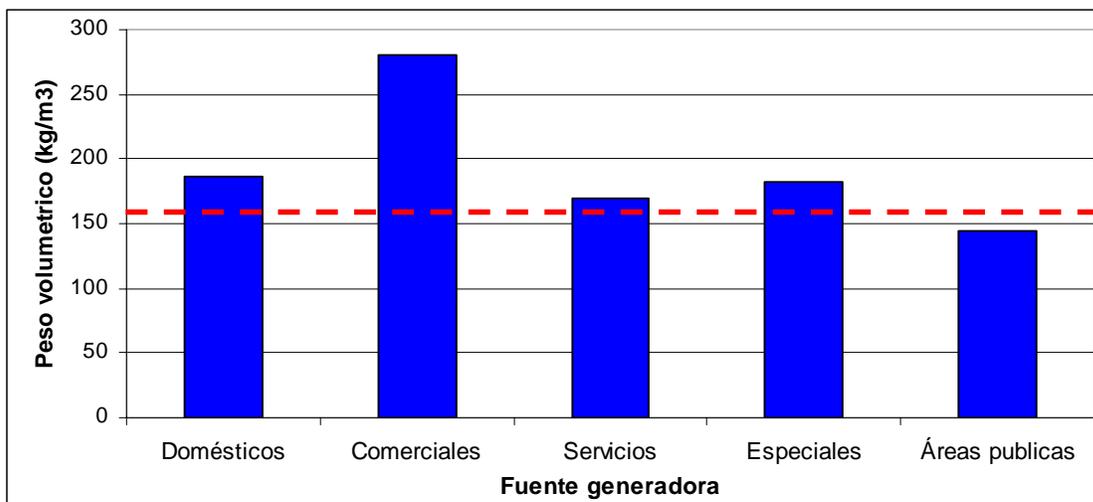


Figura 4.7. Pesos volumétricos para residuos según fuente generadora en el Distrito Federal

Fuente: SEDESOL

El resultado obtenido se encuentra por debajo de la media presentada por SEDESOL para residuos de origen doméstico, lo que podría indicar que existe una mayor generación de manejo especial (alto volumen) respecto a la media mexicana, así como envases de refresco, papel y cartón, entre otros. Esto último es respaldado por los resultados obtenidos en la caracterización de residuos, conteniendo una mayor cantidad de residuos tipo B (Altamente deformables) (Grisolia et al.), como plásticos, papel y cartón.

4.4 Preparación ensayos de capacidad de campo

Con la finalidad de determinar la capacidad de campo de los residuos, se llevaron a cabo 3 ensayos para distintas pesos volumétricos, comenzando con 269 (kg/m³) hasta llegar a 800 (kg/m³).

En cada ensayo se llevó a cabo un procedimiento similar:

- Se dividió el lisímetro en 3 partes iguales para su posterior llenado
- Se pesaron los residuos a disponer
- Se colocaron dentro del lisímetro y se compactaron al peso volumétrico requerido
- Primero se realizó el ensayo de capacidad de campo dinámica (práctica) y posteriormente se realizó el estático (teórica)

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan las condiciones y características utilizadas para la preparación y ejecución de cada ensayo.

Tabla 4.7. Preparación 1º ensayo de capacidad de campo

Lisimetro	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	Volumen de residuos (m ³)	Volumen de residuos (lts)	Peso de los residuos (kg)
2	269	0,0277	27,7	7,468
3	404	0,0277	27,7	11,202
1	472	0,0277	27,7	13,069
Total				31,739

Los residuos se dispondran en 3 capas iguales, las cuales serán compactadas hasta alcanzar el peso volumetrico deseado

Lisimetro	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	Peso por capa a disponer (kg)	Volumen requerido por capa (m ³)	Volumen requerido por capa (lts)
2	269	2,49	0,00924	9,24
3	404	3,73	0,00924	9,24
1	472	4,36	0,00924	9,24

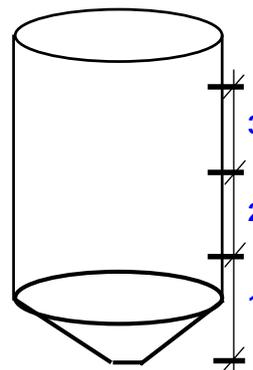


Tabla 4.8. Preparación 2º ensayo de capacidad de campo

Lisimetro	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	Volumen de residuos (m ³)	Volumen de residuos (lts)	Peso de los residuos (kg)
1	600	0,0277	27,7	16,628
2	700	0,0277	27,7	19,400
3	800	0,0277	27,7	22,171
Total				58,199

Los residuos se dispondran en 3 capas iguales, las cuales serán compactadas hasta alcanzar el peso volumétrico deseado

Lisimetro	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	Peso por capa a disponer (kg)	Volumen requerido por capa (m ³)	Volumen requerido por capa (lts)
1	600	5,54	0,00924	9,24
2	700	6,47	0,00924	9,24
3	800	7,39	0,00924	9,24

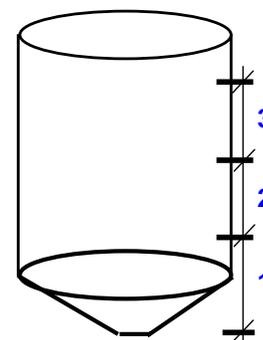
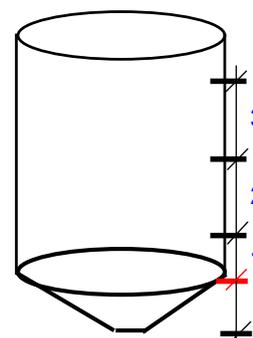


Tabla 4.9. Preparación 3º ensayo de capacidad de campo (con carga constante)

Lisimetro	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	Volumen de residuos (m ³)	Volumen de residuos (lts)	Peso de los residuos (kg)
1	600	0,0246	24,6	14,749
2	700	0,0241	24,1	17,207
3	800	0,0261	26,1	19,666
Total				51,622

Los residuos se dispondran en 3 capas iguales, las cuales serán compactadas hasta alcanzar el peso volumétrico deseado

Lisimetro	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	Peso por capa a disponer (kg)	Volumen requerido por capa (m ³)	Volumen requerido por capa (lts)
1	600	4,92	0,00819	8,19
2	700	5,74	0,00819	8,19
3	800	6,56	0,00819	8,19



4.5 Resultados de los ensayos de capacidad de campo realizados

De acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo anterior, se presenta a continuación los resultados de los ensayos de Capacidad de Campo Práctica (CCP), Capacidad de Campo Teórica (CCT) y Porosidad.

En la tabla 4.10 se presentan los datos obtenidos en la preparación del ensayo y los resultados finales de éste.

Tabla 4.10. Parámetros iniciales y resultados obtenidos en los ensayos realizados

COLUMNA N°							Capacidad de Campo en Lisímetros operando		
	1	2	3	1"	2"	3"	1	2	3
Sobrecarga (kg)	0	0	0	0	0	0	23,422	23,422	23,422
Masa inicial (kg)	13,069	7,468	11,202	16,628	19,400	22,171	14,749	17,207	19,666
Altura Inicial (cm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen inicial (L)	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	24,6	24,1	26,1
Peso volumétrico inicial (kg/m ³)	472	269	404	600	700	800	600	713	752
Humedad Inicial (%/ 60°C)	44,51	44,51	44,51	39,88	39,88	39,88	43,62	43,62	43,62
Agua recogida antes ensayo (ml)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Densidad del agua (kg/L)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso Inicial de agua (kg)	5,817	3,324	4,986	6,632	7,737	8,843			
CCP									
Humedad inicial de los residuos (%)	44,51	44,51	44,51	39,88	39,88	39,88	43,62	43,62	43,62
Agua agregada (ml)	7.116	2.372	1.186	2.371	2.371	6.452	4.792	3.600	3.950
Agua recogida (ml)	2.480,50	691,00	193,00	1.400,00	579,00	3.435,00	S/D	1.164,00	513,00
Agua retenida (ml)	4.635,50	1.681,00	993,00	971,00	1.792,00	3.017,00	S/D	2.436,00	3.437,00
Fecha inicio	12-jun	12-jun	12-jun	20-sep	20-sep	20-sep	21-nov	21-nov	21-nov
Fecha final	13-jun	13-jun	13-jun	20-sep	20-sep	20-sep	03-dic	03-dic	03-dic
Total días (días)	1	1	1	1	1	1	13	13	13
Volumen inicial (L)	27,7	27,7	27,7	26,4	28,6	29,3	24,6	24,1	26,1
Volumen final (L)	27,7	27,697	27,7	26,4	28,643	29,3	24,6	24,1	26,1
Peso volumétrico final (ton/m ³)	0,472	0,270	0,404	0,630	0,677	0,757	0,600	0,713	0,752
CCT									
Agua agregada (ml)	10.000	19.000	15.720	8.500	5.200	3.050			
Agua recogida tras abrir válvula (ml)	9811	17645	14263,5	7926	5212	2373			
Agua retenida (ml)	189	1.355	1.457	574	-12	677			
Fecha inicio	14-jun	14-jun	14-jun	21-sep	21-sep	21-sep			
Fecha final	18-jun	18-jun	18-jun	24-sep	24-sep	24-sep			
Total días (días)	5	5	5	4	4	4			
Volumen inicial (L)	27,7	27,7	27,7	28,9	30,0	28,4			
Volumen final (L)	27,7	27,7	27,7	28,9	30,0	28,4			
Peso volumétrico final (ton/m ³)	0,472	0,270	0,404	0,555	0,647	0,781			
Volumen Total (L)	27,7	27,7	27,7	26,4	28,6	29,3			
CCP (v/v)	0,377	0,181	0,216	0,288	0,333	0,405	S/D	0,101	0,131
CCT (v/v)	0,384	0,230	0,268	0,310	0,332	0,428			
Porosidad (v/v)	0,738	0,867	0,783	0,557	0,492	0,525			

Fuente: Propia

Los resultados de los ensayos de la Capacidad de Campo Práctica, Capacidad de Campo Teórica y Porosidad los podemos ver de mejor manera en las siguientes figuras.

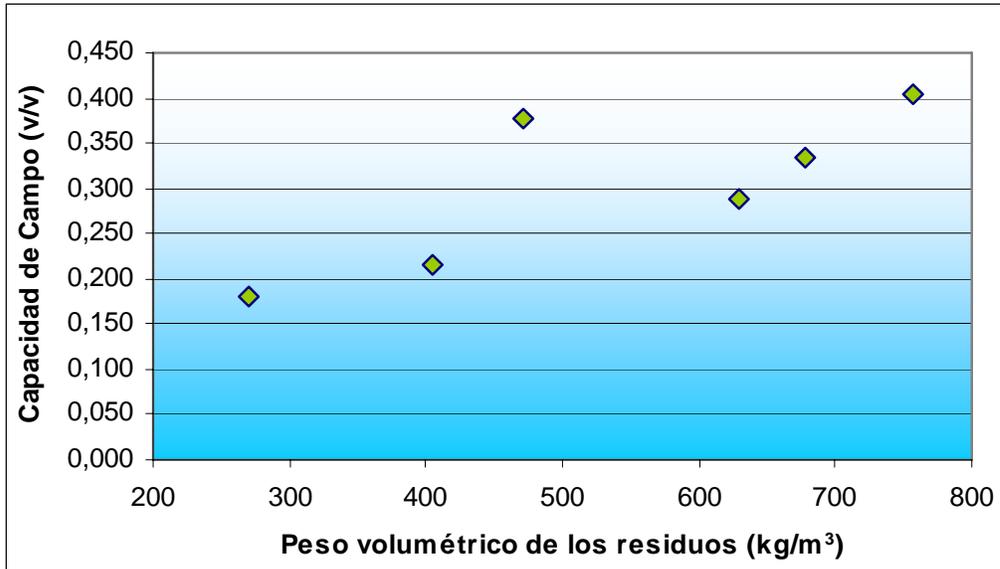


Figura 4.8. Resultados ensayos de Capacidad de Campo Práctica

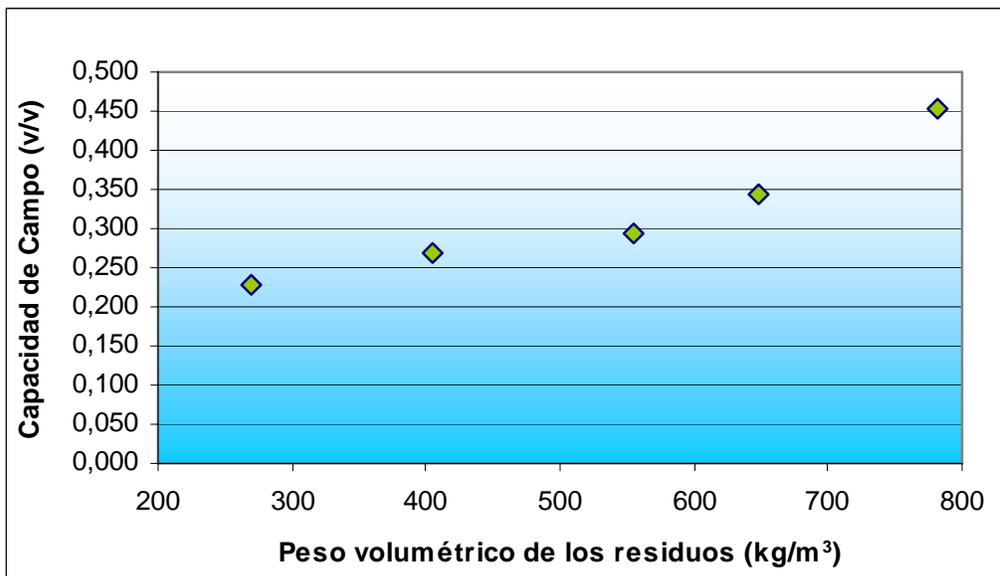


Figura 4.9. Resultados ensayos Capacidad de Campo Teórica

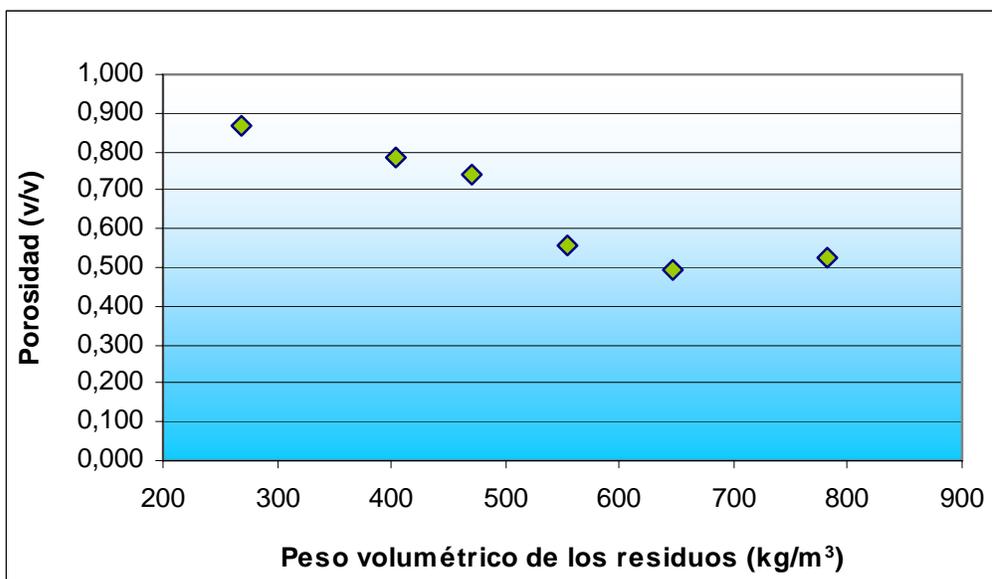


Figura 4.10. Resultados ensayos de Porosidad

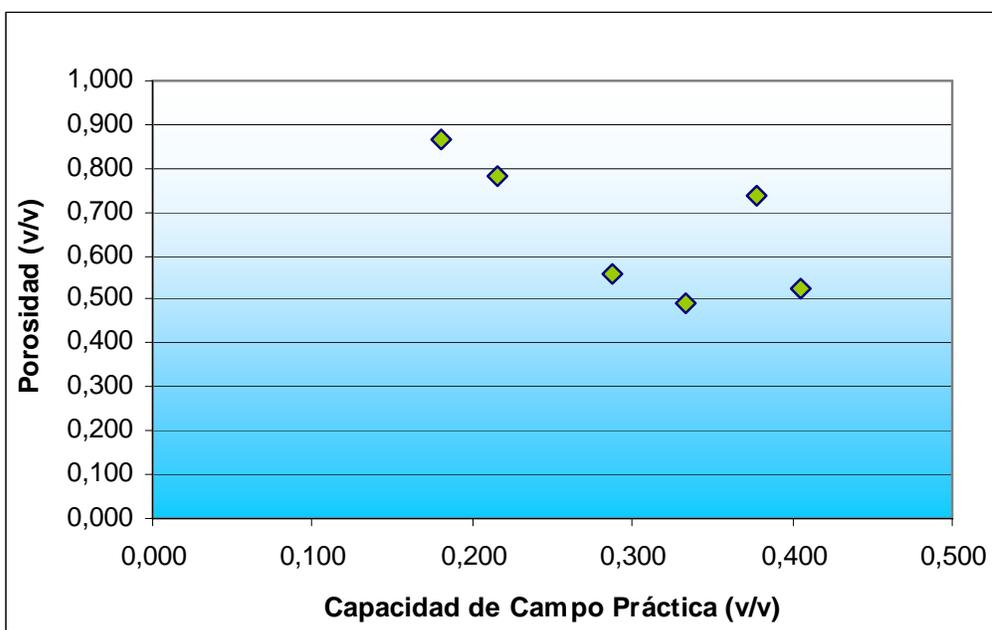


Figura 4.11. Comparativo de la Porosidad y la Capacidad de Campo Práctica

4.5.1 Análisis de los resultados

Los datos obtenidos tanto en la Capacidad de Campo Práctica como Teórica fueron analizados utilizando el programa Curve Expert, el cual busca y presenta las curvas de tendencia que mejor se adecua a los valores ingresados. De acuerdo a éste la ecuación de la curva de tendencia que mejor se ajusta a los datos tiene la forma siguiente.

$$y = ae^{bx} \quad (4.1)$$

De acuerdo a esta ecuación, la curva de tendencia para los datos de la Capacidad de Campo Práctica queda de la siguiente manera.

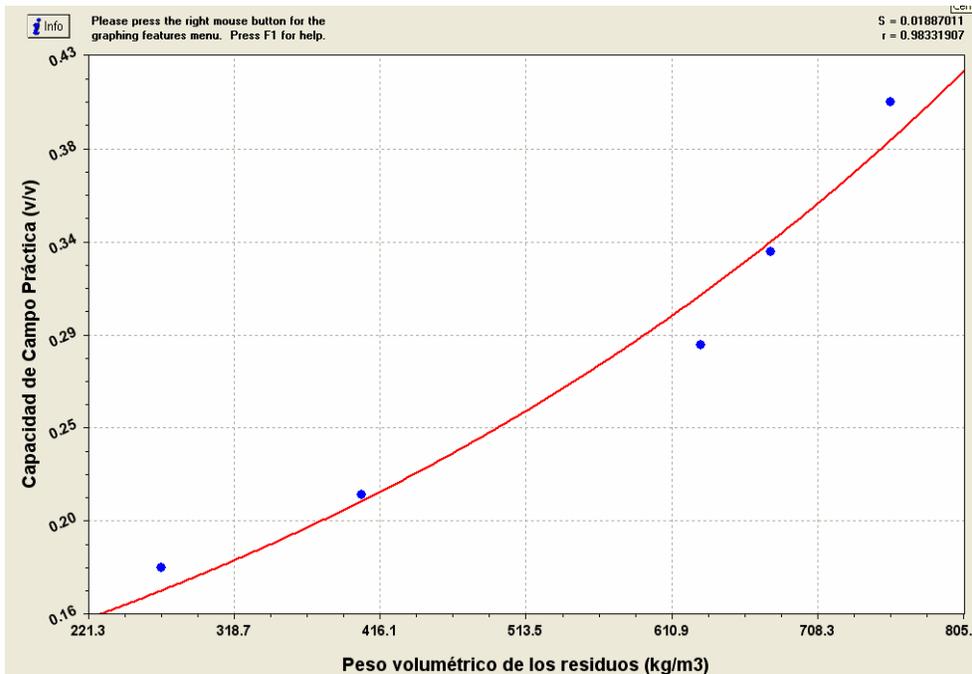


Figura 4.12. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Práctica

De este análisis se obtienen los siguientes datos:

$$S = 0,01887011$$

$$r = 0,98331907$$

$$a = 0,10781768$$

$$b = 0,001688533$$

Donde

S: Desviación estándar

r: Coeficiente de correlación lineal

a: Constante ecuación (3)

b: Constante ecuación (3)

Se puede observar el alto valor de correlación obtenido para esta curva. Del mismo modo se analizaron los datos obtenidos en los ensayos de Capacidad de Campo Teórica obteniéndose como resultado que la curva que mejor se ajusta a los datos se basa en la ecuación con forma $y = ae^{bx}$

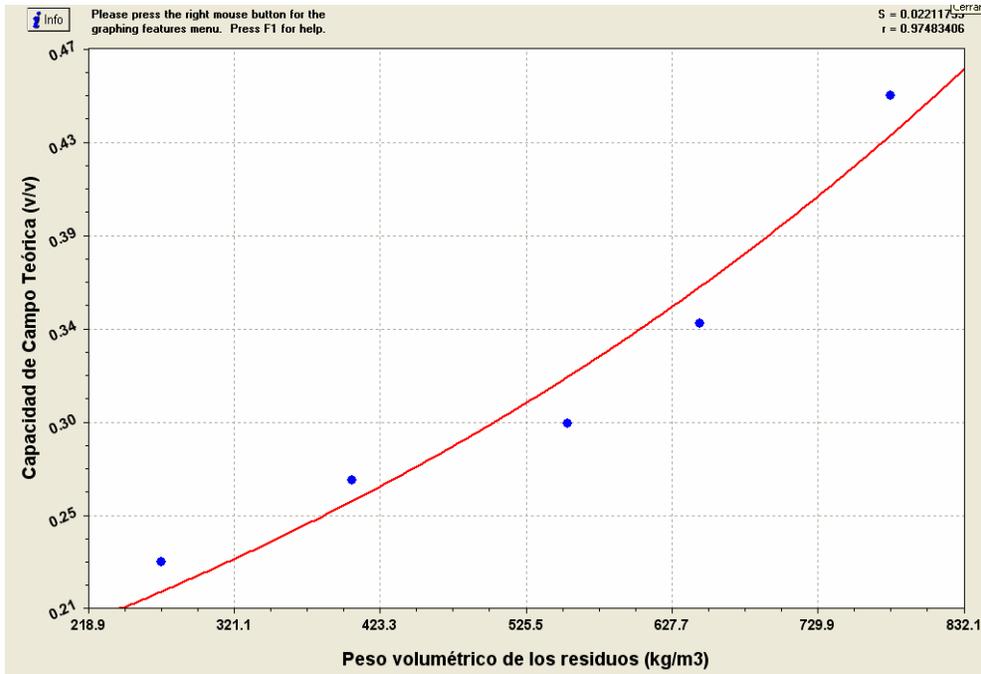


Figura 4.13. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Teórica

De este análisis se obtienen los siguientes datos:

$$S = 0,02211755$$

$$r = 0,97483406$$

$$a = 0,14836218$$

$$b = 0,0013725993$$

De manera de comprobar que este modelo describe el comportamiento de la capacidad de campo en los residuos sólidos, se han obtenido otros datos comparativos, de la literatura y se han ajustado a esta curva, obteniéndose los siguientes resultados.

a) Análisis de datos obtenidos en México por Orta de Velásquez et al. (2003)

Los datos obtenidos por Orta se presentan en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Resultados ensayos de Capacidad de Campo Teórica

Fecha ensayos	Humedad	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	CC (v/v)
sep-98	12,35	200	0,210
	12,35	350	0,389
	12,35	500	0,470
nov-98	21,31	200	0,568
	21,31	350	0,557
	21,31	500	0,275
feb-99	16,47	350	0,294
	16,47	500	0,385

Fuente: Determination of field capacity of municipal solid waste with surcharge simulation. Orta et al., 2003.

Para poder ajustar la curva de regresión se eliminaron algunos datos. El resultado de aplicar el modelo se presenta en la figura 4.14.

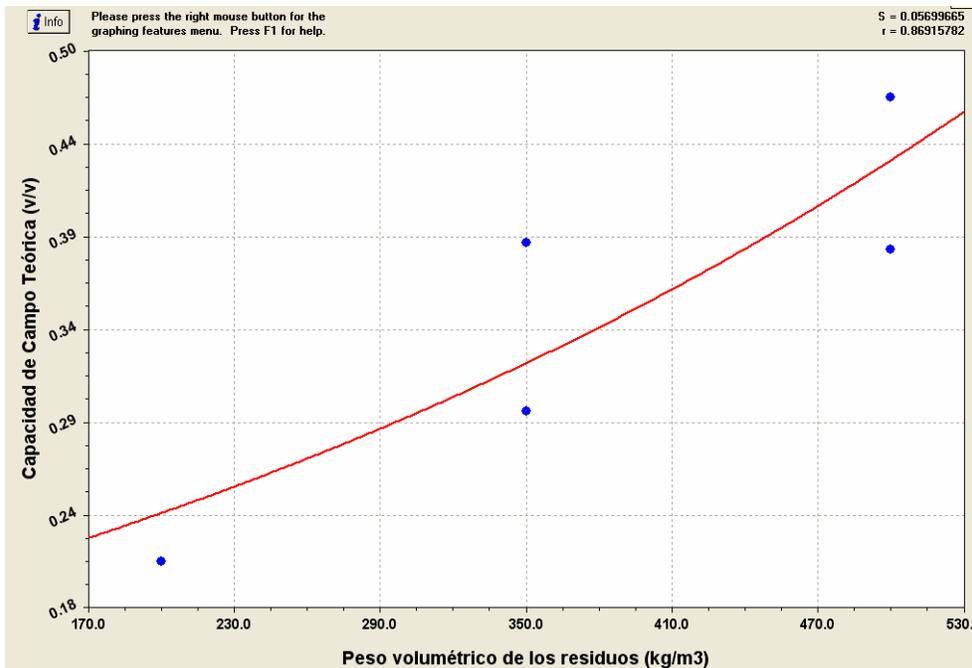


Figura 4.14. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Teórica Orta et al. (2003)

De este análisis se obtienen los siguientes datos:

$$S = 0,05699665$$

$$r = 0,86915782$$

$$a = 0,15836024$$

$$b = 0,0020205747$$

El valor de la correlación lineal de la curva de tendencia propuesta es alto, pudiendo observarse además que los valores de a y b no varían mucho respecto a los entregados por la curva de tendencia para los datos entregados en este estudio.

b) Análisis de datos obtenidos en Chile por Szanto N. et al. (2006)

Los datos obtenidos por Szanto se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.12. Resultados ensayos de Capacidad de Campo Teórica

Fecha ensayos	Humedad	Peso volumétrico de los residuos (kg/m ³)	CC (v/v)
jun-07	51,25	1250	0,594
	46,25	1250	0,549
	48,75	1250	0,572
	34	1000	0,463
	34	1000	0,426
	40	1000	0,444
	32,93	884	0,369
	31,9	884	0,335
	29,15	884	0,406

Fuente: Determinación de los parámetros hidrológicos de los residuos sólidos de la planta de celulosa Arauco (VII Región), Chile.

El resultado de aplicar el modelo se presenta en la figura 4.15.

De este análisis se obtienen los siguientes datos:

$$S = 0,05699665$$

$$r = 0,86915782$$

$$a = 0,13902204$$

$$b = 0,0011350621$$

Con la finalidad de poder observar más claramente la tendencia de los datos obtenidos en la investigación, se presenta a continuación un gráfico donde se muestran las tres tendencias de la capacidad de campo teórica.

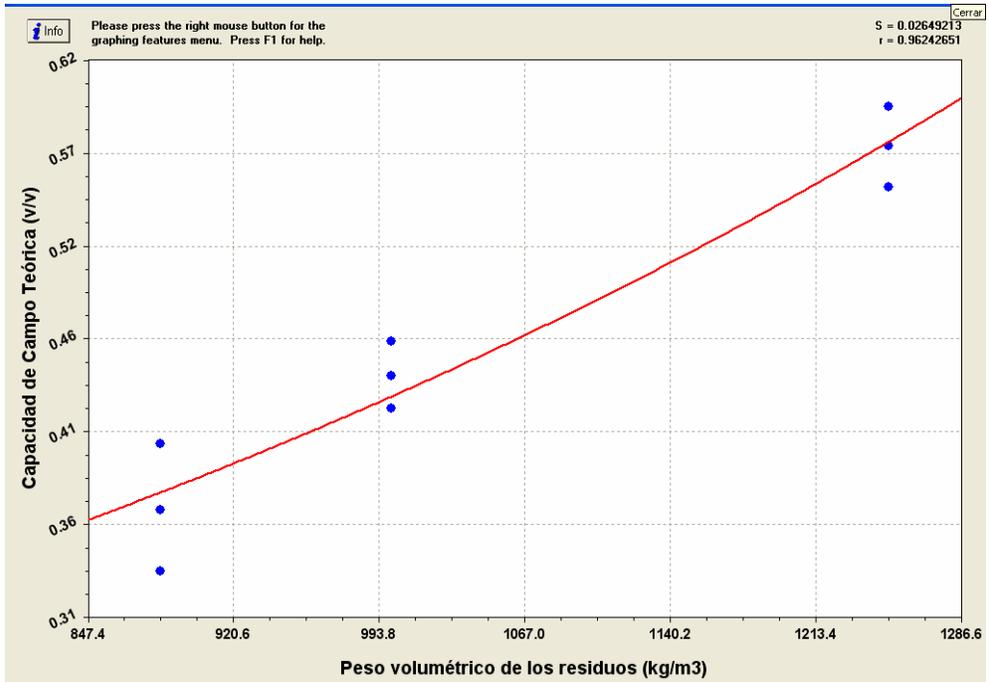


Figura 4.15. Línea de tendencia para valores de Capacidad de Campo Teórica Szanto et al. (2007)

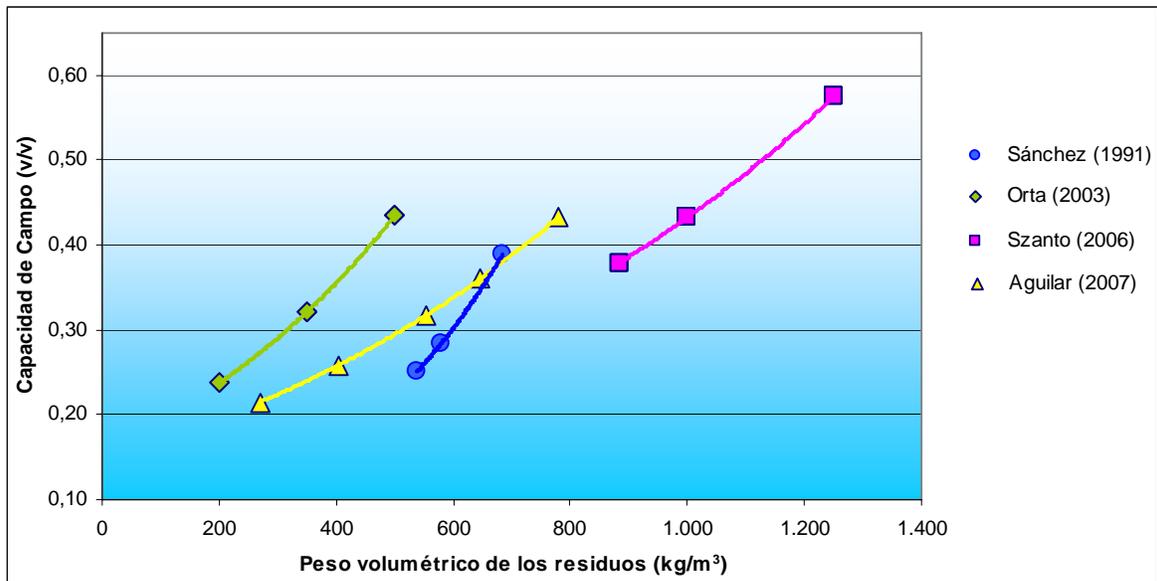


Figura 4.16. Comparativo de tendencias de capacidad de campo de investigaciones realizadas

Fuente: Propia

4.5.2 Propuesta del comportamiento de la capacidad de campo

Se debe señalar que el estudio realizado tanto por Sánchez (1991) como por Orta (2003), se utilizó una sobrecarga pasiva (constante) al llevar a cabo el ensayo. Debido a esto se podría asumir la mayor pendiente de la curva de tendencia de la capacidad de campo teórica. O sea, que en un menor rango de peso volumétrico la capacidad de campo teórica presenta un aumento mayor que en las muestras sin sobrecarga.

Este fenómeno se puede atribuir al aumento de la tortuosidad que presentan las vías para el drenaje por gravedad de líquidos. Visto de otra manera se puede decir que al disminuir en cierto grado la porosidad de los residuos, se aumenta la capacidad de retención de líquidos. Sin embargo, se estima que si la disminución de la porosidad es constante se llega a un punto en que la capacidad de campo comienza a disminuir, ya que disminuyen notablemente los espacios intersticiales que permiten la acumulación y retención tanto de la humedad contenida en los residuos, como la aportada por la lluvia y/o recirculación de lixiviados.

Las curvas realizadas por Szanto (2006) y las obtenidas en esta investigación fueron realizadas sin sobrecarga, observándose una menor pendiente en las curvas de tendencia obtenidas. El diferencial en la continuidad entre ambas curvas podría atribuirse al tamaño de partículas utilizadas (trituración de los residuos).

Se debe considerar que al disminuir el tamaño de partículas, aumenta la superficie total disponible para retener líquidos. Esto implicaría una mayor disponibilidad de humedad para llevar a cabo los procesos biológicos de degradación.

Aunque es posible conocer y alcanzar la capacidad de campo de los residuos sólidos en un relleno sanitario, se debe cuidar de no saturar la masa, ya que al aumentar la cantidad de agua retenida implica así mismo un aumento de la presión intersticial o presión de poros. Si se aumenta demasiada la presión de poros se llega a un punto en que la resistencia al corte de la masa de residuos sólidos tiende a cero, propiciando un plano de falla y por ende un posible deslizamiento. Existen casos como el del relleno sanitario Doña Juana (Colombia) en donde una falla en el sistema de captación y drenaje de lixiviados condujo a la saturación de la masa de residuos, lo que implica un aumento en la presión de poros, lo que desencadenó un enorme deslizamiento en la masa de residuos, los cuales descendieron varios metros por una quebrada, contaminando varias hectáreas de terreno hasta llegar a un río, el cual también fue contaminado.

La porosidad de los residuos va directamente relacionada con el peso volumétrico de compactación de éstos. Si se desea disminuir la porosidad de los residuos, se debe llevar a cabo una mayor compactación, lo que tiene directa implicancia con los costos de operación del relleno, ya que se requieren mayor número de pasadas por capa de residuos para alcanzar el peso volumétrico deseado o se requieren equipos más grandes, pero que a su vez tiene asociados costos de operación mayores.

Luego de realizar un análisis de sensibilidad de los factores involucrados en la ecuación (4), **a** y **b**, se puede establecer una primera aproximación al comportamiento de la capacidad de campo en base a la porosidad y sobrecarga de los residuos. Con base en lo anterior se puede decir que el factor **a** tiene relación con la porosidad de los residuos (tamaño de partículas) y el factor **b** con la sobrecarga aplicada a los residuos.

El valor del factor **a** varió entre 0,04986 y 0,15836. Así mismo el valor del factor **b** varió entre 0,00113 y 0,00300.

Respecto al comportamiento de la capacidad de campo en el tiempo se puede decir que ésta presentará variaciones respecto a sus valores iniciales. Con base en lo anterior se plantean los siguientes supuestos.

- La capacidad de campo tiene directa relación con la cantidad de materia orgánica presente en los residuos sólidos dispuestos en el relleno.
- Al degradarse la materia orgánica presente en los residuos, la cual representa el mayor porcentaje respecto al peso total de la masa, el peso volumétrico de los residuos disminuirá y con ella la capacidad de campo.
- De las etapas clásicas de biodegradación, es la anaerobia la responsable de la disminución de la capacidad de campo en los residuos a largo plazo, debido a la disminución de la materia orgánica presente en la masa.
- El ritmo de hidrolización de un elemento de masa orgánica degradable varía inversamente a la masa remanente (no degradable). La relación entre ambos viene definida por la constante de hidrólisis que se considera como tal (constante) a lo largo del proceso para condiciones ambientales constantes, y que se ha tomado únicamente como dependiente de la humedad.
- La masa hidrolizada cambia de fase y acaba transformándose en lixiviados y biogás, que filtran a través de la masa de residuos del relleno hacia los sistemas de drenaje.

En base a lo anterior se puede suponer que el comportamiento de la capacidad de campo en el tiempo estará definida por la ecuación 1.6, presentada anteriormente, pudiendo representar la capacidad de campo de la siguiente manera.

$$CC_t = CC_0 e^{-k_h * t} \quad (4.2)$$

$$k_{h'} = w * k_h \quad (4.3)$$

Donde:

CC_0 : Capacidad de campo de los residuos en el $t = 0$

CC_t : Capacidad de campo de los residuos en el $t = t$

K_h : Constante de hidrólisis modificada por el contenido de humedad

w: Humedad contenida en los residuos en (%)

t: tiempo

El comportamiento de la capacidad de campo presenta una tendencia al decaimiento a medida que la materia orgánica presente en los residuos va transformándose ya sea a una fase líquida (lixiviados) o a una fase gaseosa (biogás).

Esta primera propuesta del comportamiento de la capacidad de campo en el tiempo debe complementarse con trabajos futuros de manera de determinar, para cada caso, el valor de la constante de hidrólisis.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se logró determinar los parámetros hidrológicos de los residuos propuestos en esta investigación, en condiciones de laboratorio, para los residuos sólidos del relleno sanitario de Tlalnepantla.

Los ensayos necesarios para la determinación de la capacidad de campo y porosidad de los residuos, se llevaron a cabo en 3 lisímetros de acrílico, con capacidad de 28 litros, diseñados y construidos especialmente para este fin.

Se realizó un seguimiento del comportamiento de los lisímetros a corto plazo, para lo cual se les instaló una sobrecarga pasiva y se le realizaron ensayos de capacidad de campo práctica.

En base a los resultados obtenidos en laboratorio, y datos de la literatura consultada, se propuso un modelo general para describir la relación que existe entre la capacidad de campo y el peso volumétrico de los residuos. De igual forma, se propuso un modelo para describir a mediano y largo plazo el comportamiento de la capacidad de campo en base a la degradación de la materia orgánica, responsable de retener el mayor porcentaje de humedad en los residuos.

Como complemento a esta investigación, se anexa un ejercicio teórico, el cual tiene por objetivo complementar la metodología propuesta por Thomas B. Maier (1998), para el cálculo de sistemas de recirculación de lixiviados, tomando en cuenta la pérdida de capacidad de campo en el tiempo según el modelo propuesto en este trabajo.

Las muestras de residuos utilizados para llevar a cabo este estudio se consideran representativas, ya que presentaron grandes semejanzas con las utilizadas en otros estudios llevados a cabo en México, tanto por investigadores nacionales como por la cooperación japonesa.

De acuerdo al trabajo de campo realizado, existe una gran similitud entre los residuos dispuestos en el relleno sanitario Bordo Poniente (Distrito Federal) y los del Relleno Sanitario Tlalnepantla (Estado de México), de acuerdo a los datos obtenidos del estudio realizado por la JICA (1999) y los reportados por Medina (2005) del primero, y los obtenidos de la caracterización realizada en laboratorio de las muestras del segundo.

Respecto a la humedad contenida en los residuos, se puede decir que, de acuerdo a los ensayos realizados según la NMX-AA-016-1986, las muestras ensayadas en laboratorio presentaron un alto contenido de humedad, pudiendo mejorar las condiciones de biodegradación. Se recomienda realizar la deshidratación de los residuos en un periodo no menor a 30 hrs. para el ensayo de determinación de humedad, con la finalidad de mantener continuidad en el proceso de secado.

Los valores de capacidad de campo obtenidos en laboratorio, marcan claras tendencias a elevarse a medida que aumenta el peso volumétrico de los residuos. Este fenómeno se produce tanto para la Capacidad de Campo Teórica, como para la Capacidad de Campo Práctica.

Se observó una relación inversa entre el peso volumétrico de los residuos y la porosidad de éstos (si se aumenta el peso volumétrico disminuye la porosidad).

El fenómeno observado en la capacidad de campo de los residuos es muy similar al que se presenta en la turba. Este se debe principalmente a que en un muy bajo peso volumétrico la capacidad de retener líquidos es baja. Sin embargo, al ir aumentando su peso volumétrico, su capacidad de campo aumenta, y en el caso de los residuos, es en forma exponencial.

Es posible que esta capacidad aumente hasta punto donde se equilibra la capacidad de los poros de retener líquidos frente a la fuerza de gravedad. Pasado este punto, la capacidad de campo, comienza a disminuir debido a la disminución considerable de la porosidad de los residuos. En la figura 5.1 se muestra el posible comportamiento de la capacidad de campo a medida que el peso volumétrico de los residuos aumenta.

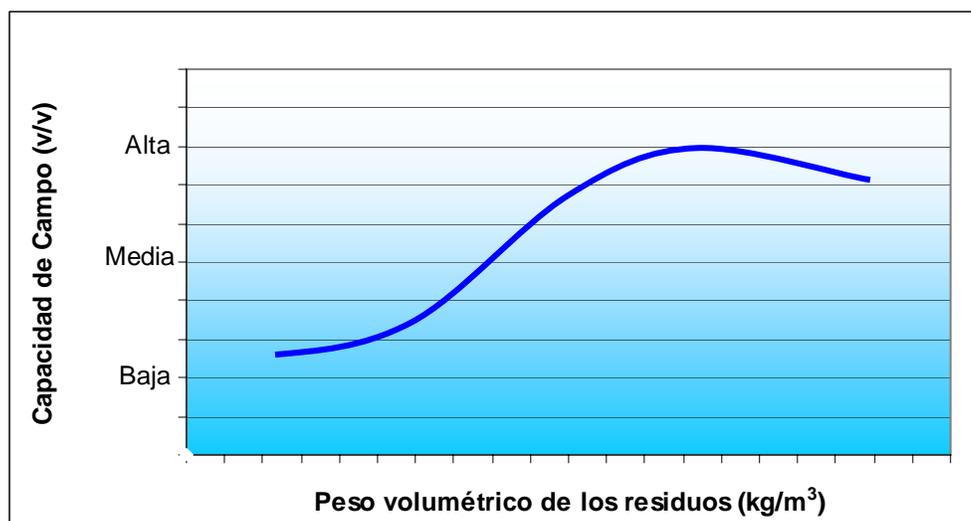


Figura 5.1. Posible comportamiento de la Capacidad de Campo de los residuos

Es posible estimar el comportamiento de la capacidad de campo en el tiempo con base en la biodegradación de la fracción orgánica de los residuos. Para esto es necesario ajustar el modelo propuesto tanto para la humedad contenida en los residuos como para la constante de hidrólisis.

A medida que se lleven a cabo los procesos de degradación de la fracción orgánica de los residuos, su peso volumétrico irá disminuyendo y por ende su capacidad de campo, ya que es la fracción orgánica la que presenta mayor masa

según la caracterización realizada. Esta disminución del peso volumétrico y capacidad de campo se ve claramente reflejada en los gráficos obtenidos. Además concuerda con el modelo propuesto para definir el comportamiento de la capacidad de campo en el tiempo.

Una reducción del tamaño de partículas permitirá un aumento de la capacidad de campo, ya que se aumenta del mismo modo la superficie total de las partículas que entran en contacto con los líquidos. Esta reducción de tamaño permitiría además acelerar el proceso de biodegradación de la fracción orgánica contenida en los residuos.

Se espera que si se crean condiciones para retener mayor cantidad de humedad por mayor tiempo, esto permita una actividad microbiológica mayor, mejorando de este modo la generación de biogás. Para lograr este objetivo se debe tomar en cuenta que a mayor peso volumétrico de los residuos la capacidad de retención de líquidos será mayor, sin embargo esta capacidad disminuirá con el tiempo debido a la degradación de la materia orgánica presente.

5.2 Recomendaciones

El gráfico propuesto para la clasificación entregada por Grisolia et al (1995), permite realizar un análisis rápido y definido de la composición de los residuos, recomendándose para otros estudios. Se recomienda incluir datos de países desarrollados de manera de poder realizar subcategorías a las propuestas en éste, como por ejemplo composición de residuos de países subdesarrollados, en vías de desarrollo y desarrollados.

Se recomienda utilizar los resultados de la capacidad de campo práctica para el cálculo de producción y recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios.

La recirculación de lixiviados es recomendable para los primeros años de operación del relleno sanitario. En esta primera etapa el lixiviado joven presenta características que dificultan su tratamiento. A mayor edad, el lixiviado presenta una disminución de la DQO y una estabilización del pH (Kulikowska - Klimiuk, 2007), lixiviado maduro, lo que permite plantear distintos tratamientos dependiendo de las cualidades particulares de cada lixiviado.

Es necesario llevar estudios a mayor escala, de manera de poder determinar la capacidad de campo práctica real de los residuos y su porosidad. Esto permitiría llevar a cabo cálculos de producción y recirculación de lixiviados con mayor precisión.

De manera de conocer cual es el comportamiento de la capacidad de campo de los residuos a mediano y largo plazo se recomienda crear una línea de investigación en esta área. De esta manera se podrá modelar con mayor exactitud el comportamiento de la generación de lixiviados de un relleno sanitario respecto al tiempo.

A. ANEXO: Ejemplo de evaluación de un sistema de recirculación de lixiviados en un relleno sanitario

Introducción

Como complemento a este trabajo de investigación, se presenta y desarrolla con un ejemplo la metodología propuesta por Maier (1998), para la determinación de la tasa a la cual el lixiviado puede ser introducido (inyectado) a la masa de residuos sólidos en un relleno sanitario.

Las estructuras comúnmente utilizadas para inyectar el lixiviado a recircular en la masa de residuos son dos: (i) drenaje por gravedad o foso horizontal presurizado; y (ii) pozo de drenaje por gravedad. Ver figuras A.1 y A.2.

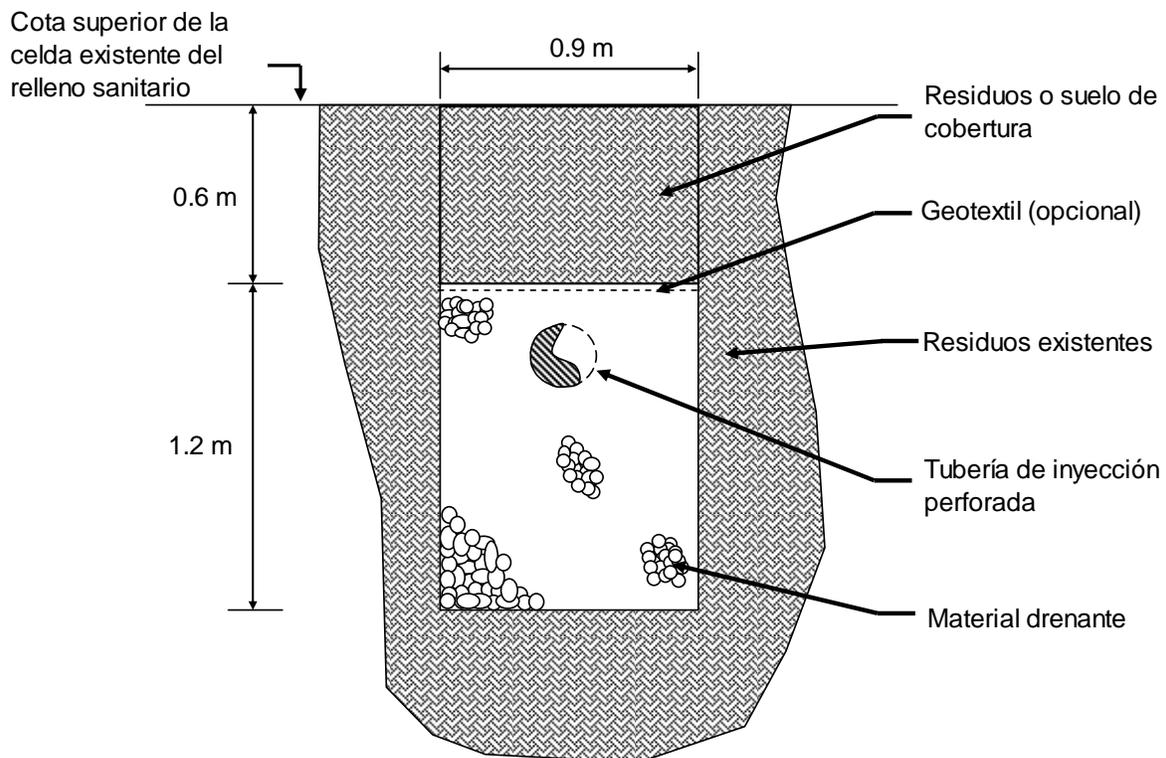


Figura A.1. Foso típico de inyección de lixiviados

En el caso que se desee inyectar el lixiviado utilizando bombas, y éstas se encuentre antes de las estructuras antes mencionadas, se considera que existe una condición de presurización. Si se desea realizar el análisis con esta condición, se debe aumentar el valor de la presión hidráulica en la ecuación que se presenta más abajo. Se supone que la inyección de líquido es realizada llenando el foso, permitiendo que drene hasta quedar vacío, para luego llenarlo otra vez.

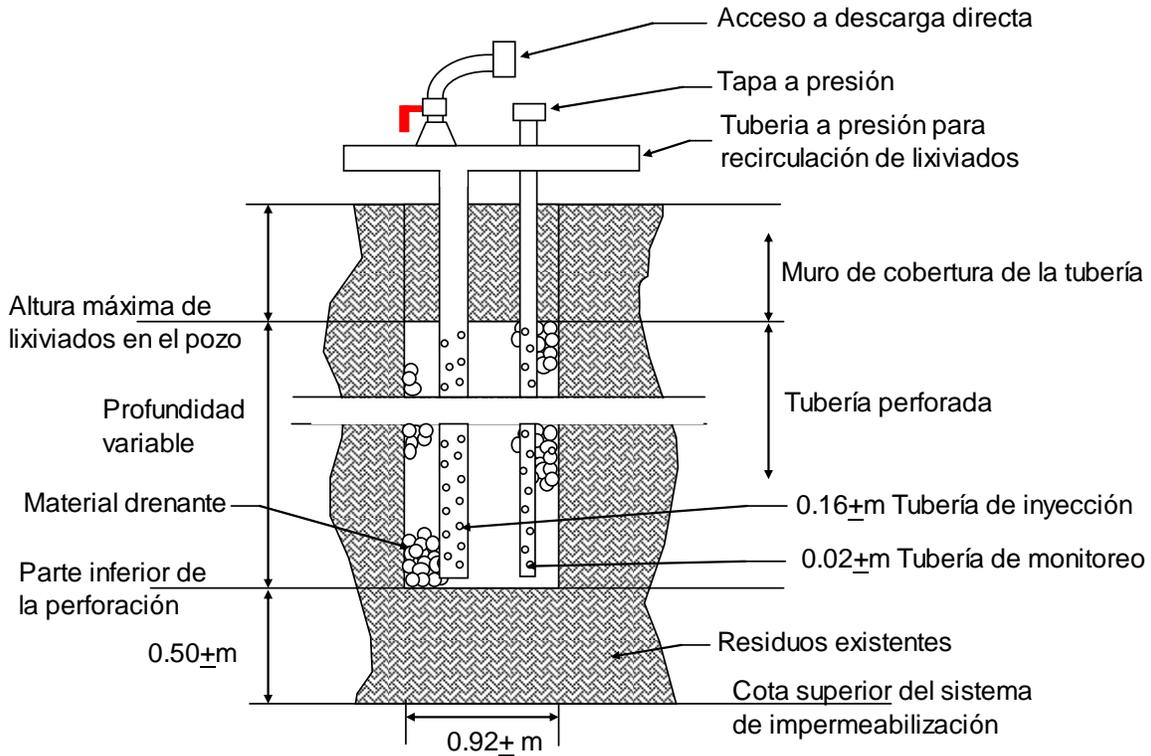


Figura A.2. Pozo típico de inyección de lixiviados a presión

Se presenta a continuación la metodología propuesta. La descripción de cómo se obtuvieron las ecuaciones es posible consultarlas en Maier (1998)

Tasa de infiltración en foso de inyección

La tasa de infiltración en foso de inyección se estima considerando la infiltración en el fondo del foso y en los lados de este. Para estimar la **tasa de infiltración en el fondo del foso** se utiliza la ecuación propuesta por Bouwer (1978)

$$q_b = k \left(1 + \frac{(h - P_0)}{z_f} \right) \quad (A.1)$$

Donde:

q_b : Tasa de infiltración en el fondo del foso (longitud/tiempo)

k : Conductividad hidráulica de los residuos (longitud/tiempo)

h : presión hidráulica en el fondo del foso (longitud)

P_0 : Succión de los residuos (longitud)

z_f : profundidad donde esta el punto húmedo mas bajo del foso (longitud)

Por lo tanto, la tasa volumétrica de infiltración en el fondo del foso por unidad de longitud de foso es calculada usando la siguiente ecuación.

$$\bar{Q}_b = q_b * B \quad (A.2)$$

Donde.

\bar{Q}_b : Tasa volumétrica de infiltración del fondo del foso por unidad de longitud (longitud³/(tiempo*longitud))

B : Ancho del foso (longitud)

Para estimar la **tasa de infiltración en los lados del foso** se considera que *el promedio de la carga hidrostática en los lados del foso es un medio de la carga hidrostática en el fondo del foso*; por lo tanto, el promedio de la tasa de infiltración en los lados del foso (q_s) puede ser estimada utilizando la siguiente ecuación.

$$q_s = \frac{q_b}{2} \quad (A.3)$$

La tasa volumétrica de infiltración para un lado del foso por unidad de longitud esta dado por:

$$\bar{Q}_s = q_s * h \quad (A.4)$$

Utilizando la ecuación (A.1) y (A.2) se elimina el q_s de la ecuación (A.4), quedando de la siguiente manera:

$$\bar{Q}_s = \bar{Q}_b \left(\frac{h}{2B} \right) \quad (A.5)$$

Por lo tanto la **tasa de infiltración volumétrica total** es la suma de la tasa de infiltración del fondo del foso y de los lados de este. Sumando ambas ecuaciones tenemos que.

$$\bar{Q}_t = \bar{Q}_b + 2\bar{Q}_s = k \left(1 + \frac{(h - P_0)}{z_f} \right) (b + h) \quad (A.6)$$

Capacidad de inyección en pozo

La capacidad de inyección del pozo la definiremos como la capacidad de infiltración por unidad de tiempo. La siguiente ecuación es una aproximación para estimar la capacidad de inyección en pozo.

$$Q_w = k \left(1 + \frac{(h - P_0)}{z_f} \right) (r + h) (\pi r) \quad (A.7)$$

Donde.

Q_w : Tasa de infiltración volumétrica del pozo (longitud³/tiempo)

Consideraciones generales de la metodología propuesta

A continuación se presentan algunas consideraciones conservadoras que permiten simplificar el procedimiento de cálculo.

a) La capacidad de succión de los residuos (P_0), la cual es muy variable y difícil de cuantificar, es despreciable.

b) Se considera que la profundidad de la pared húmeda (z_f) del foso es constante, variando solo la presión hidráulica (h)

c) La profundidad de la pared húmeda (z_f) asume igual a: (i) la distancia desde el fondo del pozo hasta la parte superior del nivel de captación de lixiviados, o (ii) la distancia vertical entre un grupo de fosos.

La distancia supuesta es efectivamente igual a la distancia máxima del perímetro húmedo (wetting front) y es representativa a largo plazo de una condición de estado constante, para el que la tasa de infiltración es menor que la condición inicial. Por lo tanto previo a la saturación de los residuos (cuando z_f alcance este máximo) la capacidad real de inyección de la estructura se espera que sea mayor que la capacidad calculada.

Utilizando las consideraciones mencionadas anteriormente, el tiempo requerido (t) para que el foso de infiltración drene puede ser calculado como sigue.

$$t = \frac{nBz_f}{k(z_f - B)} \ln \left[\frac{(h + B)(h_0 + z_f)}{(h_0 + B)(h + z_f)} \right] \quad (A.8)$$

Ejemplo de evaluación del sistema de recirculación de lixiviados

El siguiente ejemplo de cálculo está hecho para un foso de sección transversal con una profundidad de 1.2 (m) y un ancho de 0.9 (m). Se supone que la conductividad hidráulica de los residuos es de 1.8×10^{-4} (cm/s) y la porosidad del material utilizado en el relleno del foso es 0.3. Se supone también una distancia vertical entre el grupo de fosos de 6.1 (m). El tiempo requerido para que el foso drene es calculado utilizando la ecuación (6), suponiendo los valores para los parámetros mencionados anteriormente.

Primeramente se convierte la conductividad hidráulica a unidades de (m/día), dando como resultado 0.15552 (m/día), de manera que concuerde con el resto de las unidades utilizadas. Dando el siguiente resultado.

$$t = \frac{(0.3)(0.9)(6.1)}{(0.15552)(6.1 - 0.9)} \ln \left[\frac{(1.2 + 0.9)(0.03 + 20)}{(0.03 + 0.9)(1.2 + 20)} \right]$$

$$t = 1.54 \text{ (días)}$$

Basado en el cálculo del tiempo requerido para el drenaje por gravedad, el tiempo para el llenado del foso (t_{ciclo}) es de aproximadamente 2 días. Se supone que la distancia horizontal entre foso es de 30 (m) y el radio de influencia de cada uno de 15 (m).

Ahora se calcula la **capacidad de infiltración efectiva** ($q_{t,\text{efectiva}}$) por metro cuadrado para el área de influencia del foso. Con esto se obtiene cuál es la capacidad de infiltración del lixiviado por área del relleno, en un día. Para esto se utiliza la siguiente ecuación.

$$q_{t,\text{efectiva}} = \left(\frac{Bhn}{t_{\text{ciclo}}} \right) \left(\frac{L_{\text{foso}}}{A_{\text{Influencia}}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Donde.

L_{foso} : Largo del foso (longitud)

$A_{\text{influencia}}$: Área de influencia en el L_{foso} (longitud²)

$$q_{t,efectiva} = \left(\frac{(0.9 \text{ (m)})(1.2 \text{ (m)})(0.3)}{2 \text{ días}} \right) \left(\frac{0.3 \text{ (m)}}{30 \text{ (m}^2\text{)}} \right)$$

$$q_{t,efectiva} = 1.62 \times 10^{-3} \text{ (m}^3 \text{ / (día * m}^2\text{))}$$

$$q_{t,efectiva} = 1.62 \text{ (litros / (día * m}^2\text{))}$$

Evaluación de la capacidad de absorción vs la capacidad de infiltración.

Según Maier (1998) se entiende la capacidad de absorción de los residuos como la diferencia entre el contenido de humedad y la capacidad de campo de estos. O sea, la capacidad máxima que tiene la masa de residuos para absorber líquidos.

Se supone que el relleno tiene una superficie de 48,56 (hectáreas) para una vida útil de 10 años, para lo cual se opera el relleno a una tasa de 4,046.85 (m²/mes). Suponemos un acho promedio de los terraplenes del relleno de 3 (m), y el promedio de la tasa de llenado de 2.4 (ha de terraplén/mes). Se asume una tasa de generación de lixiviados promedio de 0.47 (L/m²*día).

Se supone que un grupo de fosos cubren un área de 1.6 (ha), y se asume que el área cubierta por los fosos en cualquiera de las elevaciones tiene como promedio un tercio del área bajo el terraplén (es decir, 4.9 (ha) de relleno tiene 1.6 (ha) de foso) (Nota: la capacidad de infiltración esta basada en el área del grupo de fosos y la tasa de generación de lixiviados esta basada en el área superficial del relleno sanitario). Si los fosos se construyen en cada uno de los terraplenes de residuos, entonces el **tiempo de servicio** del grupo de fosos es igual al tiempo de construcción de dos terraplenes de residuos sobre un área de 4.9 (ha).

$$\text{Tiempo de servicio}_{\text{Fosos}} = \frac{[(2(\text{terraplenes})(4.9(\text{ha})))]}{2.4(\text{terraplenes} * \text{ha} / \text{mes})}$$

$$\text{Tiempo de servicio}_{\text{Fosos}} = 4(\text{meses})$$

Ahora estimamos la cantidad de lixiviado generado durante 4 meses en un área de 4.9 (ha). Asumimos dos meses de 30 días y dos meses de 31 días.

$$V_{\text{lixiviado}} = 0.47(L/m^2 * \text{día}) * 49,000(m^2) * 122(\text{días})$$

$$V_{\text{lixiviado}} = 2,809,660(L)$$

$$V_{\text{lixiviado}} = 2,809(m^3)$$

Ahora la capacidad de infiltración del grupo de fosos para 1.6 (ha), en un periodo de 4 meses, esta dado por la siguiente ecuación.

$$V_{\text{capacidad infiltración}} = 1.62(L/día * m^2) * 122(\text{días}) * 16.000(m^2)$$

$$V_{\text{capacidad infiltración}} = 3.162(m^3)$$

Definiremos la **capacidad de absorción** de los residuos como la “diferencia entre el contenido de humedad de los residuos y su capacidad de campo” (Maier, 1998). La capacidad de campo es la cantidad máxima de líquidos que puede retener los residuos frente a la fuerza de gravedad, por lo tanto al disminuir la capacidad de campo disminuirá proporcionalmente la capacidad de absorción de los residuos.

Si consideramos que la capacidad de campo va disminuyendo con el tiempo, podemos definirla con la ecuación antes propuesta.

$$CC_t = CC_0 e^{-k_h * t}$$

$$k_{h'} = w * k_h$$

Donde

CC_t : Capacidad de campo de los residuos en el $t = t$

K_h : Constante de hidrólisis modificada por el contenido de humedad (d^{-1})

w : Humedad contenida en los residuos en (%)

t : tiempo (d)

De acuerdo con las determinaciones realizadas en laboratorio puedes decir que la humedad de los residuos es de $w=42,67\%$, suponiendo una constante de hidrólisis de $k_h=9.0 \times 10^{-3}(\text{d}^{-1})$, según lo propuesto por Ling Chen et al (2007).

El tiempo estimado para la evaluación es de 4 meses (122 días). O sea se considera una capacidad de absorción en el mes 0 y luego en el mes 4.

Si consideramos una densidad promedio de la masa de residuos de $850 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, obtendremos, de acuerdo a la curva propuesta, una capacidad de campo de $0,476 \text{ (L/L)}$.

Primero expresaremos la humedad en unidades de $(\text{volumen}_{\text{liquido}}/\text{volumen}_{\text{residuos}})$, para lo cual tomaremos $1 \text{ (m}^3\text{)}$ de residuos. La densidad del agua la tomaremos como 1 (kg/L) .

$$1(\text{m}^3)_{\text{Residuos}} \xrightarrow{\text{Pesa}} 850(\text{kg}) \xrightarrow{\text{Contiene}} 42,67\%_{\text{Humedad}} \xrightarrow{\text{Expresado en volumen}} 362.695(\text{L})_{\text{Liquidos}}$$

Ahora lo expresamos en términos de $(\text{volumen}_{\text{liquido}}/\text{volumen}_{\text{residuos}})$ tenemos que la humedad es igual a.

$$W_{\text{Residuos}} = 0.362(\text{L} / \text{L})$$

Para el año 0 de residuos, la capacidad de absorción de los residuos esta dada por la siguiente ecuación.

$$CA_{\text{residuos}} = CC_0 - W_{\text{residuos}}$$

$$CA_{\text{residuos}} = 0.476 - 0.362$$

$$CA_{\text{residuos}} = 0.114 \text{ (} L_{\text{liquidos}} / L_{\text{residuos}} \text{)}$$

Esto se entiende como la capacidad de volumen de líquido a retener por volumen de residuos. Si tomamos en cuenta el peso volumétrico de los residuos tenemos que, la capacidad de absorción de los residuos expresada en $(L_{\text{liquidos}}/\text{Kg}_{\text{residuos}})$ es igual a.

$$CA_{\text{residuos}} = 1,966(L_{\text{liquidos}} / \text{kg}_{\text{residuos}})$$

Este valor representa la capacidad de absorción en el mes 0 para los residuos depositados en el relleno. Para el calculo de la capacidad de campo en el mes 4 tenemos que.

$$CC_4 = 0.476 * e^{-(0.4267*9.0 \times 10^{-3}) * 122}$$

$$CC_4 = 0.254(L_{líquidos} / L_{residuos})$$

Si graficamos el comportamiento de la capacidad de campo a 16 meses, podemos observar su disminución de manera gradual en el tiempo, lo que implica igualmente una reducción de la capacidad de absorción de los residuos.

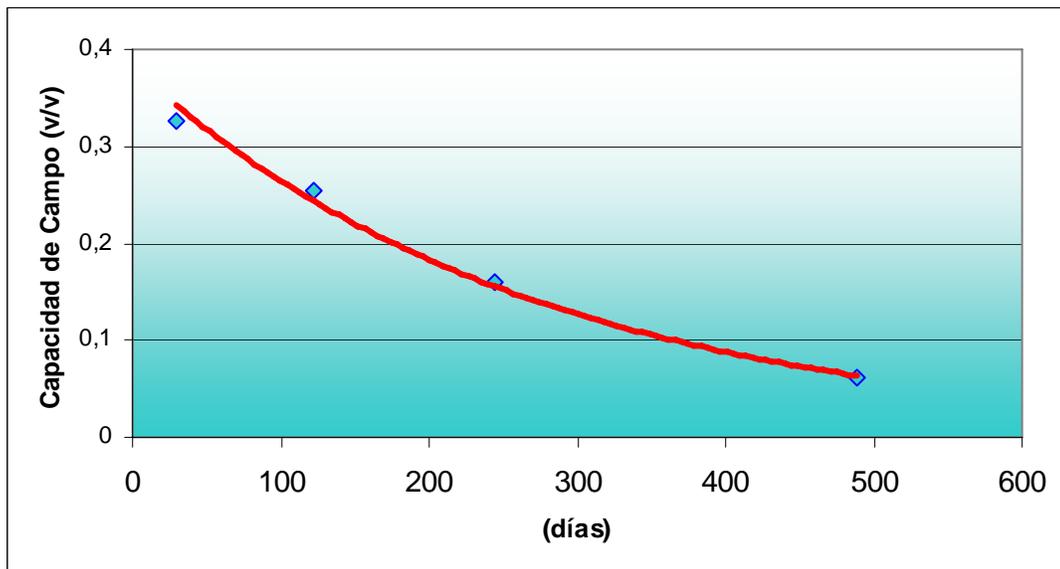


Figura A.3. Comportamiento de la capacidad de campo según el modelo propuesto

Suponemos que la capacidad de absorción disminuye proporcionalmente a la capacidad de campo. Por lo tanto la capacidad de absorción de los residuos será de 1.049 ($L_{líquidos} / kg_{residuos}$). Esto significa una reducción del 46,63% de la capacidad de absorción en 4 meses.

Con una profundidad del relleno de 6 (m) y una superficie de 1.6 (ha), suponiendo una densidad de 850 (kg/m³) tenemos una masa de residuos sobre la cual actuarán los fosos de inyección. La masa total de residuos es de 81,600 (ton).

En el mes 0 la capacidad de absorción de los residuos será de 160,425.6 (m³) de lixiviado, mientras que en el mes 4 la capacidad de absorción será de 85,598.4 (m³).

Esto demuestra la disminución de la capacidad de absorción de la masa de residuos sólidos para recirculación de lixiviados en el tiempo. Estos factores deben ser corregidos de manera que se adapten a las condiciones de cada relleno en particular.

Bibliografía

Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) (1999) Estudio sobre el manejo de los residuos sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos, resumen ejecutivo, consultor KokusaiKogyo Co Ltd, Gobierno del Distrito Federal

American Public Works Association (A.P.W.A.) (1976) Tratamiento de los residuos sólidos urbanos, Instituto de Administración Local, Madrid, España

Arias Ibarra A (1994) Modelo de asentamientos de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos, Tesis de Magister, Universidad de Cantabria, Santander, España

Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux (A.G.H.T.M.) (1977) Técnicas de Higiene Urbana. Recogida y Tratamiento de Basuras. Limpieza de las Vías Públicas, Instituto de Administración Local, Madrid, España

Beaven R P, Powrie W (1995) Hydrogeological and geotechnical properties of refuse using a large scale test compresión cell, Sardinia 1995, Fifth International Landfill Symposium S Margherita di Pula, Cagliari, Italia.

Bengtsson L, Bendz D, Hogland W, Rosqvist H, Akesson M (1994) Water balance for landfills of different age, Journal of hydrology, vol. 158, nº3-4, pp. 203-217

Benson C, Abichou T, Albrigh W, Gee G, Roesler A (2001) Field evaluation of alternative earthen final covers, International Journal of Phytoremediation, vol. 3, nº 1, pp. 105-127

Bouwer H (1978) Groundwater hydrology, McGraw Hill, New York, 480 pp.

Buckman y Brady (1966) Naturaleza y Propiedades de los Suelos, Ed. Montaner y Simon S.A., Barcelona

Buenrostro O, Cram S, Bernache G, Bocco G, (2000) La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales, Revista internacional de contaminación ambiental (UNAM), año/vol. 16, nº 001, pp. 19-26

Dixon N, Jones R (2005) Engineering properties of municipal solid waste, Geotextil and geomembranes, nº23, pp. 205-233

Gendebien A, Pauwels M, Constant M, Ledrut-Damanet MJ (1992) Landfill gas, From Environment to Energy, Commission of the European Communities (EUR-OP/OOPEC/OPOCE), primera edición, Luxembourg

Grisolia M, Napoleón Q, Tancredi G (1995) Contribution to a Technical Classification of MSW, Sardinia 1995, Fifth International Landfill Symposium S Margherita di Pula, Cagliari, Italia

Heredia Cantillana P, Sánchez Gómez J, Rodríguez Salinas M, Aguilar Vera R (2007) Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, SEMARNAT – GTZ, primera edición

Horváth Z (1985) Aspectos geológico ambientales de la disposición final de residuos sólidos municipales, Hidrológiai Közlöny (Hungría), No.2, p. 85-88

Keller H. A (2005) Evaluación del modelo Meruelo en la predicción de asentamientos en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos, Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Kiss K. Gabor (1995) Balance de Agua en Rellenos Sanitarios, Departamento de Hidrogeología e Ingeniería Geológica, Hidrológiai Közlöny, nº2, pp. 106-112, Hungría

Kiss K. Gabor, (1999) Modelos y fórmulas para la descripción del balance de agua en rellenos sanitarios, Ingeniería y ciencias ambientales (FEMISCA), nº 45, pp.14-23

Kiss K. Gabor (1996) Lixiviados de rellenos sanitarios - variaciones temporales de la cantidad y calidad y su relación con la precipitación, Hidrológiai Közlöny (Hungría), No.2, p. 113-121

Kiss K. Gabor y Mendoza F (1998) Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales. Ingeniería y Ciencias Ambientales, FEMISCA A.C., México, 38: 6-9

Kulikowska Dorota, Klimiuk Ewa (2007) The effect of landfill age on municipal leachate composition, Bioresource Technology, v. 99, Issue 13, pp. 5981-5985

Ling Chen, Wei Zhong Jiang, Baoming Li, Yutaka Kitamura (2007) Enhancement of hydrolysis and acidification of solid organic waste by a rotational drum fermentation system with methanogenic leachate recirculation, Bioresource Technology, v. 98, Issue 11, pp. 2194-2200

Maier B. Thomas (1998) Analysis procedures for design of leachate recirculation system, Proceedings of the 3rd annual SWANA (Solid Waste Association of North America) Landfill Symposium, Palm Beach Gardens, Florida

Mandal T, Kiran B. A, Mandal N. K (1999) Determination of the quality of biogas by flame temperature measurement, Energy conversion and management, vol. 40, nº 11, pp. 1225-1228

Medina Arévalo A (2006) La recirculación de los lixiviados y sus efectos en la compactación de los rellenos sanitarios, Tesis Maestría, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

Muñoz Jofré. J (2001) Diseño De Una Metodología De Caracterización De Residuos Sólidos Domésticos, Tesina de Master, Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Caminos, Canales Y Puertos, Santander, España

Norma Mexicana NMX-AA-015-1985 Protección al medio ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales - Método de Cuarteo

Norma Mexicana NMX-AA-016-1984 Protección al medio ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales - Determinación de Humedad

Norma Mexicana NMX-AA-019-1985 Protección al medio ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales - Peso Volumétrico "IN SITU"

Norma Mexicana NMX-AA-022-1985 Protección al medio ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales - Selección y Cuantificación de Subproductos

Norma Mexicana NMX-AA-052-1985 Protección al medio ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales - Preparación de Muestras en el Laboratorio para su Análisis

Orta de Vélasquez MT, Cruz Rivera R, Rojas Valencia N, Monje Ramírez I, Sánchez Gómez J (2003) Determination of field capacity of municipal solid waste with surcharge simulation, Waste management and research, vol. 21, nº 2, pp. 137-144

Otero del Peral (1988) Residuos Sólidos Urbanos - MOPU, Unidades temáticas de la Dirección General de Medio Ambiente, Centro de Publicaciones, Madrid

Palma J, Soh I (2000) Estudio a escala real del tratamiento de líquidos lixiviados mediante recirculación, para su aplicación en rellenos sanitarios de Chile, Informe final proyecto de investigación, DI202.782/2000, Universidad Católica de Valparaíso

Pichtel J (2005) Waste management practices. Municipal, hazardous and industrial, Editorial Taylor and Francis Group, primera edición, Estados Unidos

Powrie W, Hudson A P, Beaven R P (2000) development of sustainable landfill practices and engineering landfill technology, Final report to the engineering and physical sciences research council (Grant reference GR/L 16149)

Rodríguez Iglesias J, Castrillon Pelaez L, Maranon Maison E, Sastre Andres H. (2000) Biomethanization of municipal solid waste in a pilot plant, Water Research, vol. 34, nº 2, pp. 447-454 (8)

Sakurai K (1983) Método Sencillo Del Análisis De Residuos Sólidos, CEPIS/OPS, Hojas de divulgación técnica, nº17, pp. 1-13

Salas R F (2001) Generación, control y tratamiento de lixiviados y biogás en un relleno sanitario, tesis de licenciatura (Ingeniería Civil), Facultad de Ingeniería, UNAM

Sanchez Gomez J, López S F (1991) Resultados de las pruebas de capacidad de absorción y análisis de laboratorio de las celdas de control de Bordo Poniente III, Dirección General de Servicios Urbanos, S.G.O. , D.D.F., pp. 125

Straub W, Lynch D (1982) Modelo f landfill leaching: organic strength, Journal of the Environmental Engineering Division, Vol. 108, nº 2, pp. 251-268

Szanto N Marcel (1986) Optimización del aprovechamiento energético del vertedero controlado frente a la contaminación de aguas, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España

Szanto N M, Keller H A, Aguilar V R, Esparza B M (2001) Estudio a escala de laboratorio para la determinación de los parámetros hidrológicos óptimos para la generación de metano en rellenos sanitarios en Chile, proyecto de investigación DI nº 202.788/2001, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Szanto N Marcel (2006) Determinación de los parámetros hidrológicos de los residuos sólidos de la Planta de Celulosa Arauco, informe final, Grupo de Residuos Sólidos, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Tchobanoglous G, Theisen Hilary, Vigil Samuel A (1993) Integrated solid waste management, Mc Graw Hill, primera edición internacional

Williams N D, Pohland F G, McGowan K C, Saunders F M (1987) Simulation of leachate from municipal solid waste, Environmental Protection Agency, report nº EPA/600/2-87/059, Estados Unidos