



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL

ANÁLISIS DE LIXIVIADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CONTENIENDO RESIDUOS
DOMÉSTICOS CONSIDERADOS COMO PELIGROSOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:
ING. ESP. KAREN HERNÁNDEZ MURILLO

TUTOR PRINCIPAL
M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios

MIEMBROS DEL COMITE TUTOR
Dra. Fernández Villagómez Georgina
Facultad de Ingeniería, UNAM

M. A. I. Ramírez Burgos Landy Irene
Facultad de Química, UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

ÍNDICE	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Justificación	4
OBJETIVOS.....	7
General.....	7
Particulares	7
ALCANCE.....	7
METAS.....	7
2. ANTECEDENTES	8
2.1. Normatividad existente en el país	16
2.2. Cantidad y composición de lixiviados.....	19
2.2.1. Cuantificación de lixiviados	19
2.2.2. Composición de lixiviados	27
2.3. Tratamiento y disposición de lixiviados	35
2.4. Lixiviados: Impacto ambiental y evaluación de su toxicidad	36
3. METODOLOGÍA	40
3.1. Estudio de generación	40
3.2. Preparación de lisímetros	48
3.3. Procedimiento experimental.....	50
3.4. Cálculo de lixiviados generados.....	69
3.5. Metodología de las pruebas en laboratorio	74
4. RESULTADOS Y SU EVALUACIÓN	81
4.1. Resultados de pH.....	81
4.2. Resultados de grasas y aceites.....	82
4.3. Resultados de DBO ₅ y DQO.....	84
4.4. Resultados de contenido de metales y metaloides.....	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
Conclusiones	93
Recomendaciones.....	94
ANEXOS	95
Consideraciones para determinación de grasas y aceites	95
Consideraciones para determinación de DBO ₅	96
Consideraciones para determinación de DQO	101
Curvas de calibración de metales y metaloides para espectrofotómetro de absorción.....	103
REFERENCIAS	108

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La contaminación del medio ambiente no sólo la causa la fabricación de sustancias y productos, sino también por su uso; muchos productos de uso frecuente en el hogar contienen sustancias químicas que cuando se arrojan como Residuos Sólidos Urbanos (RSU), contribuyen a la contaminación del ambiente y de las reservas de agua potable. (López Aguilar y de Haro Duarte, 2000)

Se calcula que una población de 100,000 habitantes arroja mensualmente al alcantarillado 3.75 toneladas de diversos productos de limpieza y 3.4 toneladas de aceites de motores y de otros productos. Estas cifras no incluyen las grandes cantidades de residuos que se entierran o arrojan sobre el terreno: patios, parques, jardines, orillas de carreteras, ríos y canales. Esta práctica es peligrosa para la salud pública, pero se sigue actuando debido al desconocimiento de que estos productos de uso común contienen sustancias químicas peligrosas. (López Aguilar y de Haro Duarte, 2000)

De manera general en el hogar se tienen las siguientes sustancias peligrosas (López Aguilar y de Haro Duarte, 2000):

1. Productos domésticos de limpieza,
2. Productos para el cuidado y aseo personal,
3. Pinturas en general,
4. Plaguicidas y
5. Productos de mantenimiento automotriz.

En la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos, en el listado número 2 "Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica", se describe que los lixiviados (líquidos que han percolado a través de residuos dispuestos en tierra) resultantes de la disposición de uno o más de los residuos peligrosos mencionados en dicha norma, también son residuos peligrosos con el código de peligrosidad tóxico crónico (SEMARNAT, 2005)

Lo que no se especifica en esta norma es si los lixiviados provenientes de los residuos sólidos domésticos son peligrosos cuando éstos, al ser dispuestos en un relleno sanitario o en un basurero a cielo abierto, no contienen residuos sólidos domésticos considerados como peligrosos.

1.2. Justificación

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) prevé la aplicación de normas sanitarias y de mecanismos adecuados para el almacenamiento, la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos. Los basureros a cielo abierto y semi-controlados son los métodos más practicados para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) en América Latina y el Caribe, instalaciones que no cumplen las especificaciones técnicas requeridas de un relleno sanitario (Pellón Arrechea y otros, 2015).

Los impactos ambientales de mayor consideración en los basureros son aquellos de consecuencias a mediano y largo plazo y están, fundamentalmente, relacionados con los gases que se desprenden y el lixiviado que se generan en ellos (Pellón Arrechea y otros, 2015).

Los lixiviados han sido identificados como una fuente potencial en la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, ya que estos se pueden infiltrar a través del suelo provocando contaminación principalmente del agua si éstos no son propiamente recolectados, tratados y llevados a una segura disposición final (Chávez Montes, 2011). La contaminación del agua subterránea debido a la infiltración de lixiviados generados en basureros a cielo abierto, puede ocurrir en alguna de las siguientes formas:

- ✓ La adición de DBO₅ y DQO, los cuales no se encuentran presentes de una forma natural en el agua subterránea.
- ✓ El agotamiento del oxígeno disuelto.
- ✓ Contaminación por virus y bacterias.
- ✓ El incremento en el contenido de minerales (cloros, sulfatos, bicarbonato, sodio y potasio).
- ✓ La adición de metales pesados.
- ✓ La adición de compuestos orgánicos complejos (plaguicidas, hidrocarburos, productos químicos industriales).
- ✓ Eutrofización (nitrógeno y fósforo).

En general, los basureros constituyen un grave problema ambiental sin resolver y requiere asignación de financiamiento para equipos y personal calificado (Pellón Arrechea y otros, 2015).

El establecimiento de un sistema adecuado de gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) en los países en vías de desarrollo ha sido bastante difícil, en parte debido a la escasez de estudios relacionados con la composición química de estos residuos, así

como de los gases y los lixiviados que éstos generan (Buenrostro e Israde, 2003). Esta información es de importancia crítica, ya que la determinación exacta de la cantidad y composición de estos residuos es un paso esencial en el desarrollo de sus sistemas de gestión (Abu Qdais y otros, 1997).

Los residuos sólidos cada día se van incrementando y con ello, su impacto ambiental. Esto se asocia al incremento de población humana, a los procesos de transformación industrial y a los hábitos de los consumos de los individuos. (Jaramillo Henao y Zapata Márquez, 2008)

La norma oficial mexicana, NOM-083-SEMARNAT-2003 y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en su artículo 5, fracción XVI de la República Mexicana, definen a los lixiviados como el "líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos". (SEMARNAT, 1988)

Desde el punto de vista de calidad, los lixiviados presentan altas cargas de DQO (Demanda Química de Oxígeno) y COT (Carbono Orgánico Total); es decir, cantidades considerables de materia orgánica y sustancias inorgánicas que tienen gran variabilidad. Entre dichas sustancias se encuentran metales pesados (con su potencial efecto sobre el ecosistema acuático), alto contenido de sólidos totales y disueltos, presencia de nitrógeno en su forma amoniacal, alta concentración de cloruros, compuestos orgánicos diversos, así como gran variabilidad de pH. Lo anterior depende de la naturaleza de los desechos (pH, edad, temperatura) y de la fase de estabilización en que se encuentre. (Méndez Novelo, y otros, 2009)

En un estudio realizado de los lixiviados provenientes de un relleno sanitario en el estado de Florida, Estados Unidos, que contenía principalmente residuos sólidos urbanos y residuos de jardín, se encontraron los compuestos químicos (cationes orgánicos) que se muestran en la tabla 1.1. (Moody y Townsend, 2017)

Tabla 1.1 Concentraciones de cationes inorgánicos en alto contenido de cenizas (HA) y los grupos de relleno sanitarios con bajo contenido de cenizas (LA) con los resultados de análisis estadístico (Moody y Townsend, 2017)

Cationes inorgánicos	LA Muestras n = 10	Muestras de HA n = 4	Diferencia estadística (P)
Aluminio	1.44 mg/L	1.09 mg/L	No (P = 0.724)
Arsénico	350 µg/L	70 µg/L	No (P = 0.477)
Boro	6040 µg/L	1600 µg/L	Si (P = 0.034)
Bario	720 µg/L	2760 µg/L	Si (P = 0.026)
Calcio	170 mg/L	4140 mg/L	Si (P = 0.006)
Cromo	180 µg/L	90 µg/L	No (P = 0.229)
Cobre	240 µg/L	260 µg/L	No (P = 0.620)
Hierro	3.9 mg/L	23.3 mg/L	Si (P = 0.006)
Potasio	355 mg/L	3710 mg/L	Si (P = 0.009)
Magnesio	60 mg/L	130 mg/L	No (P = 0.358)
Manganeso	200 µg/L	450 µg/L	No (P = 0.832)
Sodio	850 mg/L	6600 mg/L	Si (P = 0.002)
Níquel	160 µg/L	100 µg/L	No (P = 0.138)
Plomo	100 µg/L	35 µg/L	No (P = 0.827)
Antimonio	90 µg/L	35 µg/L	No (P = 0.775)
Estroncio	1.3 mg/L	28 mg/L	Si (P = 0.006)
Zinc	100 µg/L	40 µg/L	No (P = 0.776)

Los límites de las concentraciones permisibles que establece la norma, para los compuestos que constituyen el lixiviado, se presentan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT (SEMARNAT, 2005)

Constituyente inorgánico (metales)	LMP¹ (mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Cromo	5.0
Plomo	5.0

La norma indica que, al rebasar el límite, ya sea uno o más componentes, todo el compuesto químico se considerará como residuo peligroso.

Un residuo peligroso es aquel que cumple con al menos una de las características siguientes:

- ✓ Corrosividad
- ✓ Reactividad
- ✓ Explosividad

¹ Límite Máximo Permisible

- ✓ Toxicidad Ambiental
- ✓ Inflamabilidad
- ✓ Biológico-Infeciosa

Las especificaciones de cada característica mencionada anteriormente se encuentran descritas en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005. (SEMARNAT, 2005)

OBJETIVOS

General

Realizar el análisis de lixiviados de residuos sólidos urbanos conteniendo residuos domésticos considerados como peligrosos, a través de un caso de estudio.

Particulares

Investigar los porcentajes de residuos domésticos peligrosos contenidos en los residuos domésticos de otros estados y municipios de la República Mexicana, considerando bibliografía reciente de estudios de generación.

Determinar la peligrosidad de los lixiviados generados en los lisímetros conteniendo residuos domésticos, con porcentajes correspondientes de residuos domésticos peligrosos, obtenidos de casa habitación, monitoreando periódicamente su producción.

ALCANCE

Determinar el porcentaje de residuos domésticos peligrosos obtenidos en el caso estudio de generación de residuos realizado en una unidad habitacional.

METAS

Obtener lixiviados generados por residuos domésticos que contengan residuos domésticos peligrosos confinados en lisímetros

Determinar la cantidad de sustancias químicas contenidas en los lixiviados.

2. ANTECEDENTES

Con el fin de promover planes de manejo de los residuos dentro de la Ciudad de México, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales creó la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), en la cual se establece que los residuos son un material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven (SEMARNAT, 2003).

Los residuos cuentan con una clasificación de acuerdo con la generación de éstos.

- ✓ Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.
- ✓ Residuos Incompatibles: Aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales o residuos, reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos.
- ✓ Residuos Peligrosos: Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en la LGPGIR.
- ✓ Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la LGPGIR como residuos de otra índole.

Los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables (SEMARNAT, 2003).

Dentro de ésta misma Ley (LGPGIR), en su artículo 23 se menciona a los residuos peligrosos generados dentro de los hogares, aunque la clasificación formal de los residuos domésticos considerados como peligrosos se mencionan en la norma

ambiental para la Ciudad de México NADF-024-AMBT-2013, ésta se revisará con más detalle en el subcapítulo 2.1.

En una investigación realizada en Salamanca, Guanajuato; con el fin de presentar información y datos sobre los orígenes, la composición y las propiedades de los residuos, se les clasifica de acuerdo con su generación en (López Aguilar y de Haro Duarte, 2000):

- ✓ Residuos sólidos urbanos (RSU)
- ✓ Residuos peligrosos industriales (RPI)

A los que se agregan:

- ✓ Residuos peligrosos domésticos (RPD)

Los RSU incluyen todos los materiales sólidos o semisólidos que el poseedor ya no considera de suficiente valor como para ser retenidos. La gestión de estos materiales residuales es la preocupación fundamental de todas las actividades englobadas en la gestión de residuos sólidos. Por esta razón, es importante conocer tanto acerca de los residuos sólidos urbanos. (López Aguilar y de Haro Duarte, 2000)

Los RSU están regulados por la instancia municipal, mientras que los RPI están regulados por la instancia federal, no así los RPD, puesto que estos no los clasifica ningún ordenamiento (una problemática que existía en el año 2013, posteriormente surgió la norma ambiental para la Ciudad de México NADF-024-AMBT-2013 donde se pudieron clasificar éstos residuos), que bien compete a la instancia municipal ya que en términos generales las RSU y los RPD se consideran “basura”. (López Aguilar y de Haro Duarte, 2000)

Durante el año 2018, dentro de la Ciudad de México, los RPD siguen siendo recolectados en una mezcla homogénea con los residuos domésticos en general, ya que no existe una ley o norma aplicable para la gestión adecuada y separada para los RPD.

En la Ciudad de México no se cuenta con algún estudio documentado con iniciativas o propuestas a cerca de la adecuada separación de los RPD contenidos en los residuos generados dentro del hogar. Esto es un tema bastante tratado en otros países como se presenta a continuación.

Las iniciativas y propuestas actuales para el tratamiento de los RPD en Madrid se presentan en la tabla 2.1. (López y Dorado, 2008)

Tabla 2.1 Propuestas e iniciativas actuales para el tratamiento de los RPD en Madrid. Adaptada de (López y Dorado, 2008)

Producto	Propuesta e iniciativa
Aerosoles	<p>La empresa Aecosol, dedicada a la recuperación de componentes de aerosoles, realiza las siguientes acciones:</p> <p>Gases: se reutilizan dependiendo de la pureza de la mezcla.</p> <p>Líquidos: se envían a gestores autorizados.</p> <p>Chatarras: trituración de los envases donde se almacenan los aerosoles, para su posterior venta.</p> <p>Papel y plástico de los embalajes: se recoge para su venta.</p>
Medicamentos	<p>El Sistema integrado de gestión y recogida de envases de productos farmacéuticos (SIGRE), tiene como objetivo la colecta y correcta gestión de los residuos de envases de medicamentos y su contenido en caso de haberlo.</p> <p>Es una organización financiada por la industria a través del pago de una cuota por envase.</p> <p>SIGRE facilita a las farmacias contenedores específicos donde el consumidor deposita los medicamentos y sus envases, posteriormente desde los almacenes de los distribuidores se entregan a plantas de clasificación y las fracciones obtenidas a recicladores y gestores autorizados.</p>
Aceites Vegetales	<p>Las empresas privadas facilitan bidones al establecimiento y efectúan recolectas mensualmente, cargando el costo de recogida al consumidor, el contrato es de un año.</p> <p>Estas empresas tratan los aceites y realizan venta subproductos como jabones, lubricantes, compuestos para la industria del cuero, materias primas para otros procesos industriales como pinturas, detergentes, etc.</p>
Residuos eléctricos y electrónicos	<p>El flujo de estos residuos en la Unión Europea se estima en 6 millones de toneladas al año.</p> <p>Debido a esto, varios decretos serán modificados para restringir algunas sustancias en los equipos y residuos electrónicos, así como el mejoramiento para la gestión de sus residuos.</p>
Cartuchos de tinta y tóner	<p>Reducción en origen, utilizando cartuchos recargables, al realizar esto, la calidad de impresión es mala, por ello, Pelican tiene un tipo de cartucho de carcasa fija con reuso durante largos periodos y buen resultado, que reduce la cantidad de residuo generado.</p>
Detergentes (vajilla y ropa)	<p>Se recomienda la recolección selectiva y existen empresas dedicadas al tratamiento de estos envases.</p>
Pinturas y disolventes	<p>Recolección y lavado de los recipientes para su uso posterior y tratamiento del agua de lavado destilando la mezcla para eliminar las impurezas del disolvente y poder reutilizarlo.</p>
Productos fotográficos	<p>Se pueden recoger para reutilizar los envases y sustancias que ofrezcan esta posibilidad.</p> <p>El resto de residuos peligrosos de procedencia domiciliaria, son contemplados bajo dos alternativas: recolección en puntos limpios o el establecimiento de puntos o áreas especiales de entrega en centros comerciales.</p>

Algunas de las propuestas mencionadas en la tabla 2.1, se podrían adaptar a la Ciudad de México (CDMX) para una mejor gestión de los residuos.

Otra ciudad donde ya se está viendo la preocupación por los RPD es en Madrid, realizando un análisis a 51 muestras, donde 26 muestras fueron recolectadas en los contenedores donde se depositan bolsas amarillas (que contienen envases de plástico, latas y envases tipo brick) y 25 muestras de los contenedores de las bolsas de resto (donde se depositan residuos orgánicos y otros residuos), analizados en tres estaciones del año (primavera, verano y otoño) se encontraron los siguientes porcentajes de RPD mostrados en la tabla 2.2 y figura 2.1. (López y Dorado, 2008)

Tabla 2.2 Porcentaje de RPD en RSU. Adaptado de (López y Dorado, 2008)

	Primavera	Verano	Otoño	Media anual
RPD% (Bolsa envases)	5.4	3.8	4.5	4.6
RPD% (Bolsa resto)	1.0	1.4	1.2	1.2

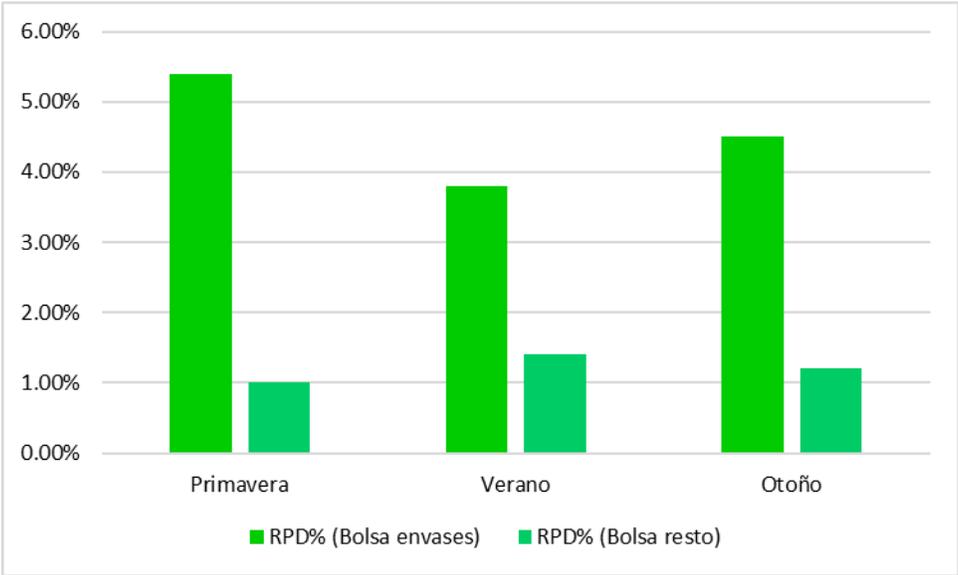


Figura 2.1 Representación gráfica de RPD encontrados en contenedores

Tabla 2.3 Componentes de RPD (%) en RSU. Adaptado de (López y Dorado, 2008)

	Metal	Vidrio	Papel/cartón	Plásticos	Otros
RPD% (Bolsa envases)	14.5	3.0	3.5	64.9	14.5
RPD% (Bolsa resto)	16.6	9.9	6.0	46.9	22.2

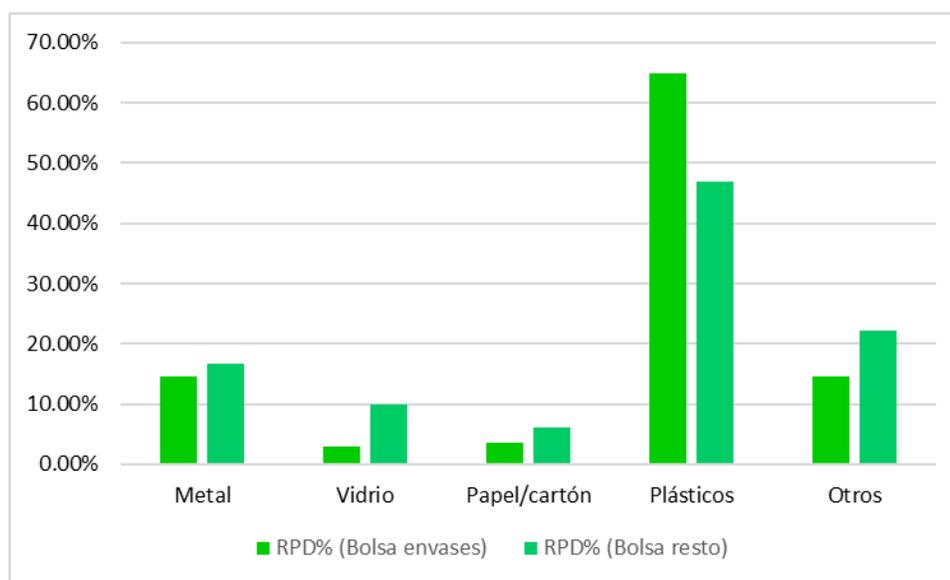


Figura 2.2 Componentes de RPD en contenedores

La composición de los RPD que se encuentran en la bolsa de envases está en un 65 % formada por plásticos, aproximadamente el 15% de metales, vidrio y papel-cartón es algo inferior al 4 % y el 15 % restante en los demás componentes, como se muestra en la tabla 2.3 y figura 2.2. (López y Dorado, 2008)

Por otro lado, en ciudades como Mexicali se utilizan los rellenos sanitarios para la disposición final de los residuos sólidos industriales y urbanos, causando un fenómeno de contrabando de residuos para disponerlos en áreas no autorizadas, la razón de este problema radica entre otros; en la carencia de programas efectivos por parte de las autoridades competentes, así como la falta de conciencia y un servicio de recolección oportuno y regular que ocasiona que todo tipo de residuos sean arrojados en lotes baldíos, calles o lugares abandonados, esperando que desaparezcan milagrosamente, siendo residuos domésticos peligrosos constituyentes de esta corriente. (Favela Ávila et. al., 2009)

A continuación, en las figuras 2.3 y 2.4 así como en la tabla 2.4, se muestran resultados de un estudio de generación realizado para resolver la problemática anteriormente mencionada.

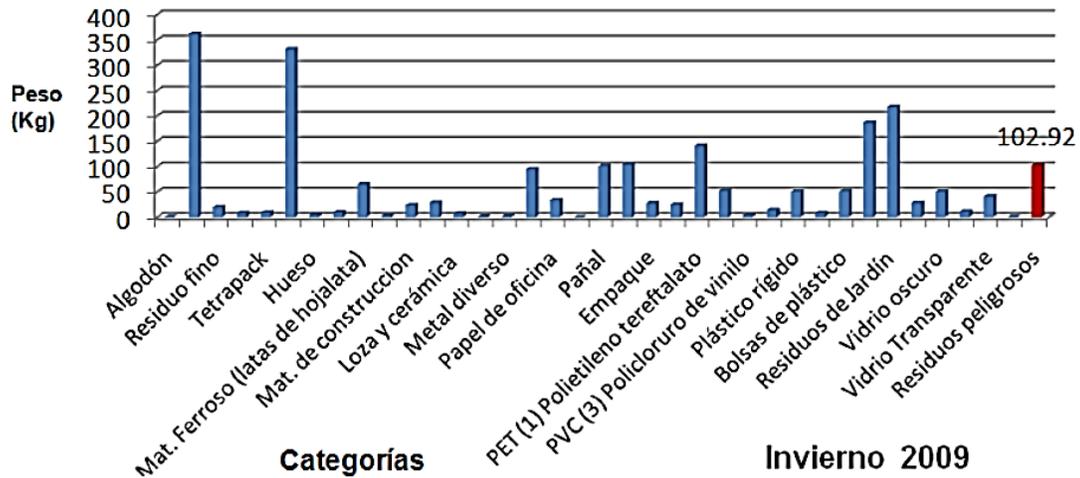


Figura 2.3 Pesajes en kilogramos del muestreo de primavera del 2009 (Favela Ávila et. al., 2009)

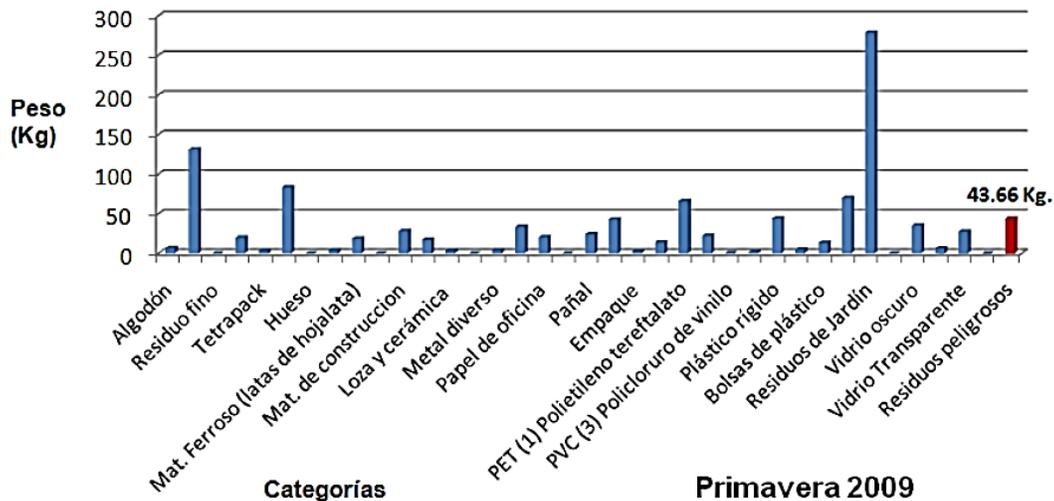


Figura 2.4 Pesajes en kilogramos del muestreo de primavera del 2009 (Favela Ávila et. al., 2009)

Tabla 2.4 Fracción de residuos domésticos peligrosos registrados en cada muestreo. Adaptado de (Favela Ávila et. al., 2009)

Muestreo	Total de muestra (kg)	Peso de peligrosos (kg)	Porcentaje de peligrosos
Invierno	2122.49	102.92	4.84%
Primavera	1074.93	43.66	4.06%

En la figura 2.3 se puede observar que, son aproximadamente 103 kg de residuos peligrosos los que se disponen de manera inadecuada, generando problemas en el suelo y aire. Estos problemas se tienen que mitigar ejecutando medidas preventivas.

Al término del estudio realizado en Mexicali, se propuso realizar programas de recolección selectiva que involucren el manejo y operación de los sistemas de aseo urbano, provocando disminución en los impactos negativos que reciben suelos, cuerpos de agua, mantos freáticos y aire.

Otro estudio de generación realizado dentro del país, donde se cuantificaron los residuos domésticos considerados como peligrosos, corresponde con el llevado a cabo dentro de la delegación (actualmente llamado alcaldía) Venustiano Carranza.

El estudio de generación en Venustiano Carranza tenía como objetivo determinar la composición, generación y características de peligrosidad de los residuos para que justificara la elaboración de planes de manejo en un futuro.

Primeramente, se realizó una encuesta para recopilación de datos como hábitos familiares relacionados con la producción de residuos peligrosos. La recolección de los residuos, así como el cuarteo se llevó a cabo según lo establecido en las normas mexicanas NMX-AA-61-1985 y NMX-AA-015-1985, respectivamente (Otálora Barreto, 2016).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta, el nivel de escolaridad máximo que alcanzaron los generadores se presenta en la figura 2.5.

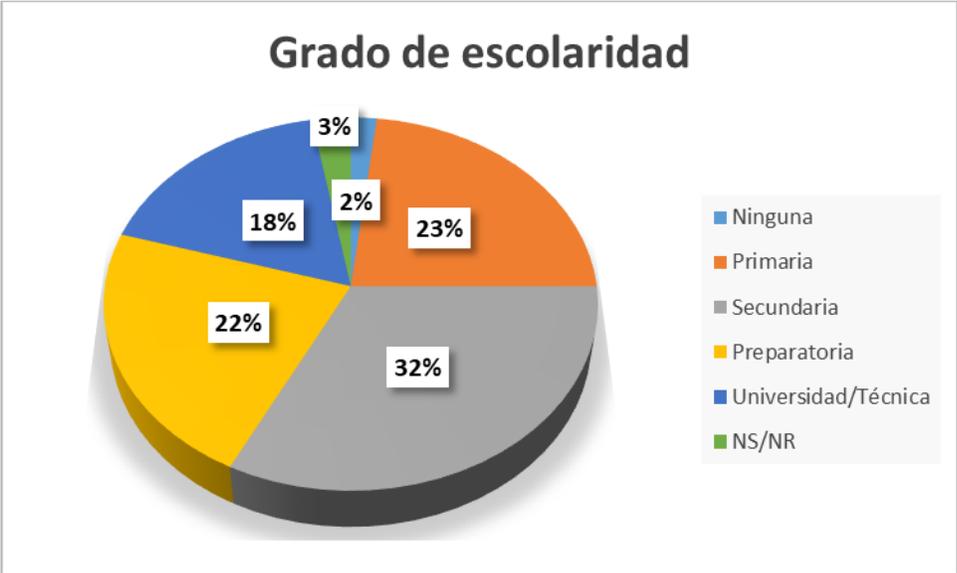


Figura 2.5 Nivel de escolaridad máximo alcanzado por los generadores. Adaptado de (Otálora Barreto, 2016)

NS/NR: No saben o no respondieron la pregunta.

Los resultados obtenidos del estudio de generación en Venustiano Carranza se presentan en figura 2.6.

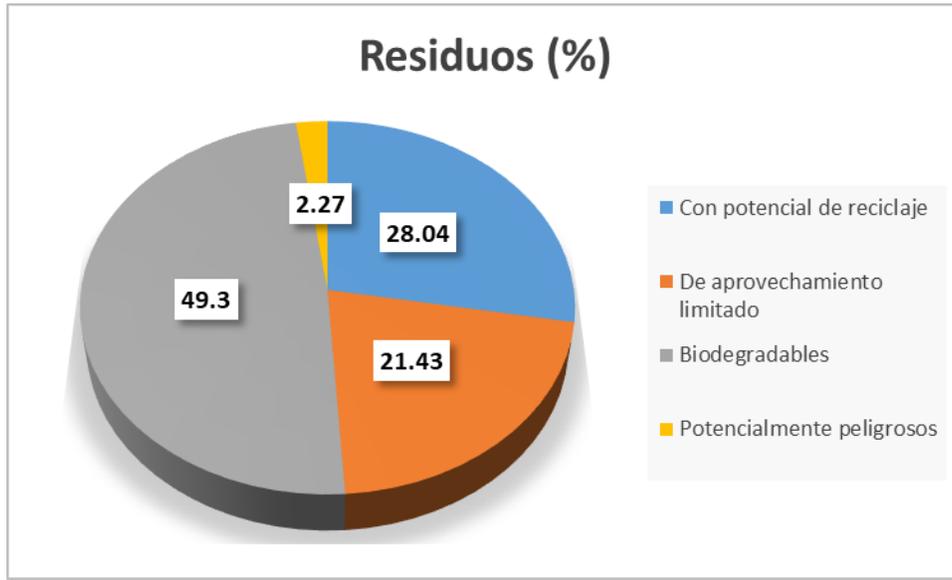


Figura 2.6 Porcentajes de residuos encontrados en estudio de generación de Venustiano Carranza. Adaptado de (Otálora Barreto, 2016)

La clasificación de cada categoría de residuos se tomó de la norma NADF-024-AMBT-2013.

En la Ciudad de México, se cuenta con la norma NADF-024-AMBT-2013 en la que se mencionan los criterios para la adecuada separación de residuos domésticos peligrosos, aunque todavía no se cuenta con los programas adecuados para la recolección y manejo selectivo.

La primera iniciativa que se tendrá en la Ciudad de México será el análisis de lixiviados que se realizará en esta tesis, con ello se podrá justificar la necesidad de contar con planes de manejo adecuados para evitar impactos ambientales mayores, tomando en cuenta, primeramente, el estudio de generación realizado en la unidad habitacional de Villa Olímpica.

En la Norma NMX-AA-61-1985 se establece que el universo adecuado para realizar el estudio de generación debe contar con 500 casas como máximo; la unidad

habitacional Villa Olímpica cuenta con 904 viviendas, esto es adecuado para que se tome como unidad representativa del estrato social medio.

2.1. Normatividad existente en el país

Como se menciona en la norma ambiental para la Ciudad de México NADF-024-AMBT-2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos de la Ciudad de México, en su tabla *Fracción de los Residuos que deberán ser entregados de manera diferenciada* se nombra a los residuos que se generan en las casas habitación. En la tabla 2.5 se muestran únicamente los residuos domésticos clasificados como peligrosos. (SEDEMA, 2013)

Tabla 2.5 Residuos considerados como peligrosos, generados (SEDEMA, 2013)

Material o envase	Producto
<p>Mantenimiento automotriz: Contenedor vacío o con residuos, y los subproductos contaminados con ellos, tales como: estopas o trapos impregnados, filtros de gasolina y aceite.</p>	<p>Aceite de motor Aceite lubricante gastado Aditivos para la gasolina Líquido anticongelante Limpiador de carburador Limpiador de motor Acumuladores o baterías ácido-plomo Combustibles Líquido de transmisión Líquido para frenos Aquellos productos en cuyos envases aparecen los siguientes símbolos:</p> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;">   </div>
<p>Productos para la limpieza y el mantenimiento del hogar: Contenedor vacío o con residuos, estopas o trapos impregnados, brochas, rodillos, esponjas, etc.</p>	<p>Destapa caños Pulidores para metales y recubrimientos Productos para pulir muebles Quita sarro Pintura base solvente (aceite) Solventes (thinner y aguarrás) Pegamentos y adhesivos epóxicos Removedor de pintura y barniz Selladores Tintas para madera Aquellos productos en cuyos envases aparecen los siguientes símbolos:</p>

	 
Biocidas: Contenedor vacío o con restos del producto o subproducto y los subproductos contaminados con ellos.	Conservadores de madera Insecticidas Herbicidas Naftalina en todas sus presentaciones Raticidas
Salud-medico asistenciales	Medicamentos caducos para humanos o mascotas Punzocortantes, venoclisis y material de curación.
Varios	Pilas y baterías eléctricas a base de mercurio, níquel-cadmio o cinc-plata Asbesto Explosivos (pirotecnia) Lámparas flourecentes Lámparas o focos ahorradores Productos de revelado fotográfico Productos químicos para albercas Tintes para cabello

De acuerdo con la norma NADF-024-AMBT-2013, estos residuos se deberían entregar de manera separada y darles un tratamiento adecuado y correspondiente con la norma establecida. En México, aun no se cuenta con una norma oficial que establezca la adecuada disposición o plan de manejo de estos residuos mencionados.

Es por ello, que todos estos desechos ingresan a los rellenos sanitarios o a los basureros a cielo abierto en medida descontrolada provocando así, que los lixiviados provenientes de los residuos sean tóxicos para el ambiente y con ello, residuos peligrosos.

Las características que se deben cumplir para que un residuo sea considerado como peligroso, de acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, son:

- ✓ **Corrosivo**, cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:
 - Es un líquido acuoso y presenta un pH menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5
 - Es un sólido que cuando se mezcla con agua destilada presenta un pH menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5.

- Es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55°C), según el procedimiento que se establece en la Norma Mexicana correspondiente.
- ✓ **Reactivo** cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:
 - Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición.
 - Cuando se pone en contacto con agua reacciona espontáneamente y genera gases inflamables en una cantidad mayor de 1 litro por kilogramo del residuo por hora.
 - Es un residuo que en contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor.
 - Posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250 mg de ácido cianhídrico por kg de residuo o 500 mg de ácido sulfhídrico por kg de residuo.
- ✓ **Explosivo** cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva solo o en presencia de una fuente de energía o si es calentado bajo confinamiento. Esta característica no debe determinarse mediante análisis de laboratorio, por lo que la identificación de esta característica debe estar basada en el conocimiento del origen o composición del residuo.
- ✓ **Tóxico Ambiental** cuando:
 - El extracto PECT, obtenido mediante el procedimiento establecido en la NOM-053- SEMARNAT-1993, contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos listados en la Tabla 2 de la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, en una concentración mayor a los límites señalados.
- ✓ **Inflamable** cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:
 - Es un líquido o una mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60.5°C, medido en copa cerrada, quedando excluidas las soluciones acuosas que contengan un porcentaje de alcohol, en volumen, menor a 24%.
 - No es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25°C.
 - Es un gas que, a 20°C y una presión de 101.3 kPa, arde cuando se encuentra en una mezcla del 13% o menos por volumen de aire, o tiene un rango de

inflamabilidad con aire de cuando menos 12% sin importar el límite inferior de inflamabilidad.

- Es un gas oxidante que puede causar o contribuir más que el aire, a la combustión de otro material.
- ✓ **Biológico-Infecioso** de conformidad con lo que se establece en la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.

Los rellenos sanitarios se caracterizan por ser una matriz compleja de diversos productos químicos, incluyen materia orgánica, sales orgánicas, contaminantes traza orgánicos y metales pesados, las concentraciones de las sustancias químicas varían de acuerdo con los factores físicos, como la intemperie; químicos, como la desorción de los productos contenidos en los rellenos sanitarios y los microbianos, como la degradación de los residuos orgánicos. Varios factores influyen en la composición de los rellenos sanitarios, uno de ellos es la edad de la tierra que se está utilizando para cerrar las celdas de los rellenos sanitarios. (Moody y Townsend, 2017)

2.2. Cantidad y composición de lixiviados

2.2.1. Cuantificación de lixiviados

Todo lo relacionado con cuantificación de lixiviados estará relacionado con rellenos sanitarios, presentado de manera general, debido a que es una cuantificación confiable de éstos, aunque la tesis esté enfocada a los basureros a cielo abierto y en estos sitios de disposición final, la cuantificación de lixiviados sería de manera similar a un relleno sanitario sin tomar en cuenta algunos términos como el material de cobertura, por nombrar alguno.

De acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2017, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en el apartado 6.4 inciso b, se menciona que los estudios previos para la construcción y operación de un sitio de disposición final deben incluir una cuantificación de lixiviados, la cual se debe realizar con base a un balance hídrico.

Los métodos más usuales para cuantificación de lixiviados mediante un balance hídrico son:

- ✓ Método de balance hídrico desarrollado por George Tchobanoglous
- ✓ Método de balance de agua (Water Balance Method)

- ✓ Evaluación hidrológica de la evolución de un relleno sanitario (Hydrologic evaluation of landfill performance: HELP)
- ✓ Balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite

Método del balance hídrico de Tchobanoglous et al. (1993)

El método de *balance hídrico* propuesto en el libro del autor Tchobanoglous engloba la composición de los residuos sólidos vertidos, así como la composición del material de relleno. Se realiza sobre un volumen de control de área unitaria, tomando en cuenta la altura de la celda.

En la figura 2.7 se muestra el esquema general en el que se basa el método de Tchobanoglous para poder obtener las ecuaciones respectivas para el balance hídrico.

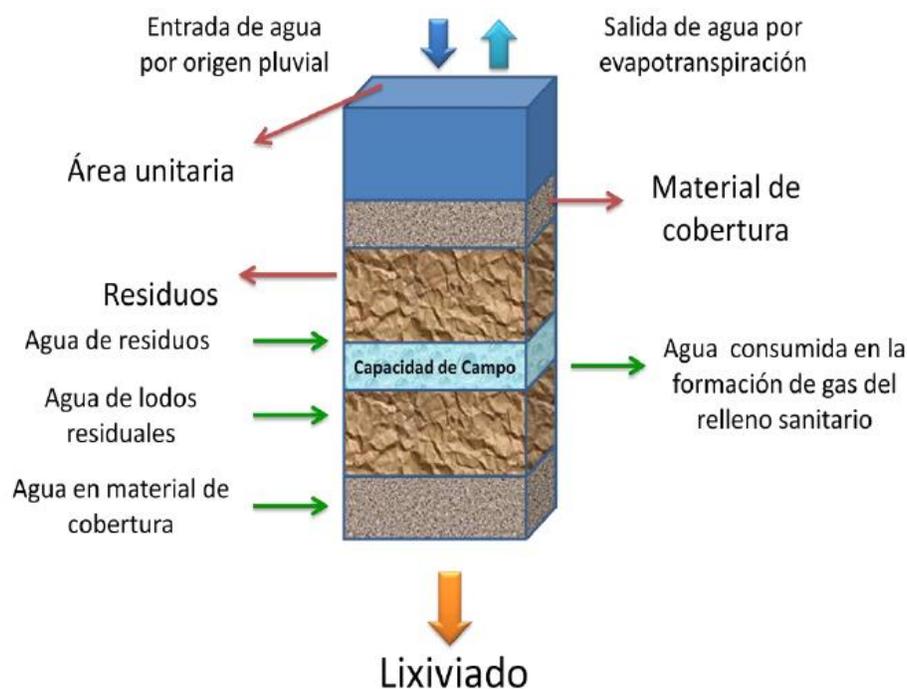


Figura 2.7 Esquema de definición para un balance hídrico utilizado para calcular la cantidad de lixiviado de un relleno sanitario (Olascoaga Guerrero, 2014)

Los términos que componen al balance hídrico de Tchobanoglous et al. (1993) se expresan en la siguiente ecuación:

$$\Delta S_{RS} = W_{RS} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_E - W_{F(L)} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

ΔS_{RS} : Variación de la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el relleno sanitario (kg/m^3)

W_{RS} : Humedad de los residuos sólidos depositados (kg/m^3)

W_{FT} : Humedad de los lodos de plantas de tratamiento de aguas depositados (kg/m^3)

W_{MC} : Humedad del material de cobertura (kg/m^3)

$W_{A(U)}$: Agua filtrada superiormente (precipitación pluvial) (kg/m^2)

W_{GV} : Agua perdida en la formación de gas (kg/m^3)

W_E : Agua perdida debido a evaporación superficial (evapotranspiración) (kg/m^2)

$W_{F(L)}$: Agua que sale inferiormente (lixiviado) (kg/m^2)

El contenido de humedad de los residuos sólidos depositados es una de las características más importantes de los residuos sólidos urbanos y matemáticamente puede expresarse de la siguiente manera:

$$M = \left(\frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

M: Contenido de humedad en porcentaje.

w: Peso inicial de la muestra (kg)

d: Peso de la muestra después de secarse a 105°C

A nivel internacional se estima que el contenido de humedad de los residuos sólidos es de aproximadamente del 20 al 40% del peso total (Tchobanoglous, Theisen, y Vigil, 1993) y alrededor del 37% en México (Kiss y Encarnación, 2006) sin embargo esta humedad puede variar durante las estaciones húmedas y secas, por lo cual se recomienda hacer una serie de ensayos durante dichos periodos. (Olascoaga Guerrero, 2014)

Por lo anterior, la ecuación para calcular la cantidad de humedad en los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario, con base al método de Tchobanoglous queda de la siguiente forma:

$$W_{RS} = (w_r)(0.20)$$

Ec. 2.3

Donde:

w_r : Peso de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario (kg).

Para la cuantificación de lixiviados en los lisímetros colocados como método experimental, se tomará en cuenta únicamente aquellas variables que estén involucradas en la generación de lixiviados, como lo son la humedad de los residuos y lo relacionado a la precipitación y evaporación presentada.

Método de balance de agua (Water Balance Method)

Para el balance hídrico de un relleno es clave la cuantificación de evapotranspiración y está en función de:

- ✓ Temperatura
- ✓ Humedad
- ✓ Viento
- ✓ Radiación solar

La evapotranspiración se calcula mediante una ecuación empírica, en tres etapas:

- ✓ Obtención del índice de calor de cada mes; se suman, para obtener el índice anual
- ✓ Con el índice de calor y tablas, se calcula el potencial diario de evapotranspiración
- ✓ Ajuste de este potencial por mes según la duración del día solar, mediante factores de corrección

$$P = PERC + AET + DST + r / o$$

Ec. 2.4

Donde:

P: Lixiviado generado

PERC: Percolación (pulgadas de agua)

AET: Evapotranspiración (pulgadas de agua)

DST: Cambio en la humedad del suelo, para cada mes (pulgadas de agua)

r/o : Múltiplo de la precipitación pluvial mensual por el coeficiente de caída para calcular la caída mensual (pulgadas de agua)

Evaluación hidrológica de la evolución de un relleno sanitario (Hydrologic evaluation of landfill performance: HELP)

El modelo HELP es bidimensional; se utiliza el perfil vertical completo: capas, residuos, membranas, agua drenante, etc., del relleno sanitario. Por su versatilidad para considerar varias configuraciones de perfil de relleno, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) lo utiliza ampliamente.

Los datos necesarios para el cálculo adecuado son:

- ✓ Clima
- ✓ Composición del suelo
- ✓ Vegetación del lugar de diseño

La ecuación requerida en el modelo HELP proporciona la conductividad hidráulica insaturada, se refiere a la capacidad del suelo insaturado para poder alojar líquidos en su interior. Su cálculo se realiza mediante:

$$K_u = K_s \left[\frac{(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} \right]^{(3 + \frac{2}{\lambda})} \quad \text{Ec- 2.5}$$

Donde:

K_u : Conductividad hidráulica insaturada

K_s : Conductividad hidráulica saturada

θ : humedad del suelo (volumen/volumen)

θ_r : humedad residual del suelo, capacidad de campo (volumen/volumen)

θ_s : humedad saturada del suelo (volumen/volumen)

λ : Índice de distribución de poros

Este modelo requiere información detallada de la zona. El inconveniente radica en que, en la mayor parte de las regiones de México la información es escasa.

Balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite.

La metodología establece una relación entre la hidrología básica de superficie con la hidrología subterránea a través de la cual, las variaciones en la cantidad de agua en el suelo vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles que tengan injerencia en el balance. Como entradas, se consideran las precipitaciones pluviales mensuales promedio. Así mismo, como salidas, se incluyen las evapotranspiraciones mensuales obtenidas a partir de las temperaturas promedio mensuales y la capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla (capacidad de campo del suelo). Además, la fracción de la precipitación pluvial que se pierde por escurrimiento sobre el suelo es también considerada como pérdida o salida. La aplicación de este balance, con los valores mensuales de las variables antes mencionadas, puede expresarse como metodología de cálculo según el siguiente diagrama (Medina Arévalo, 2006).

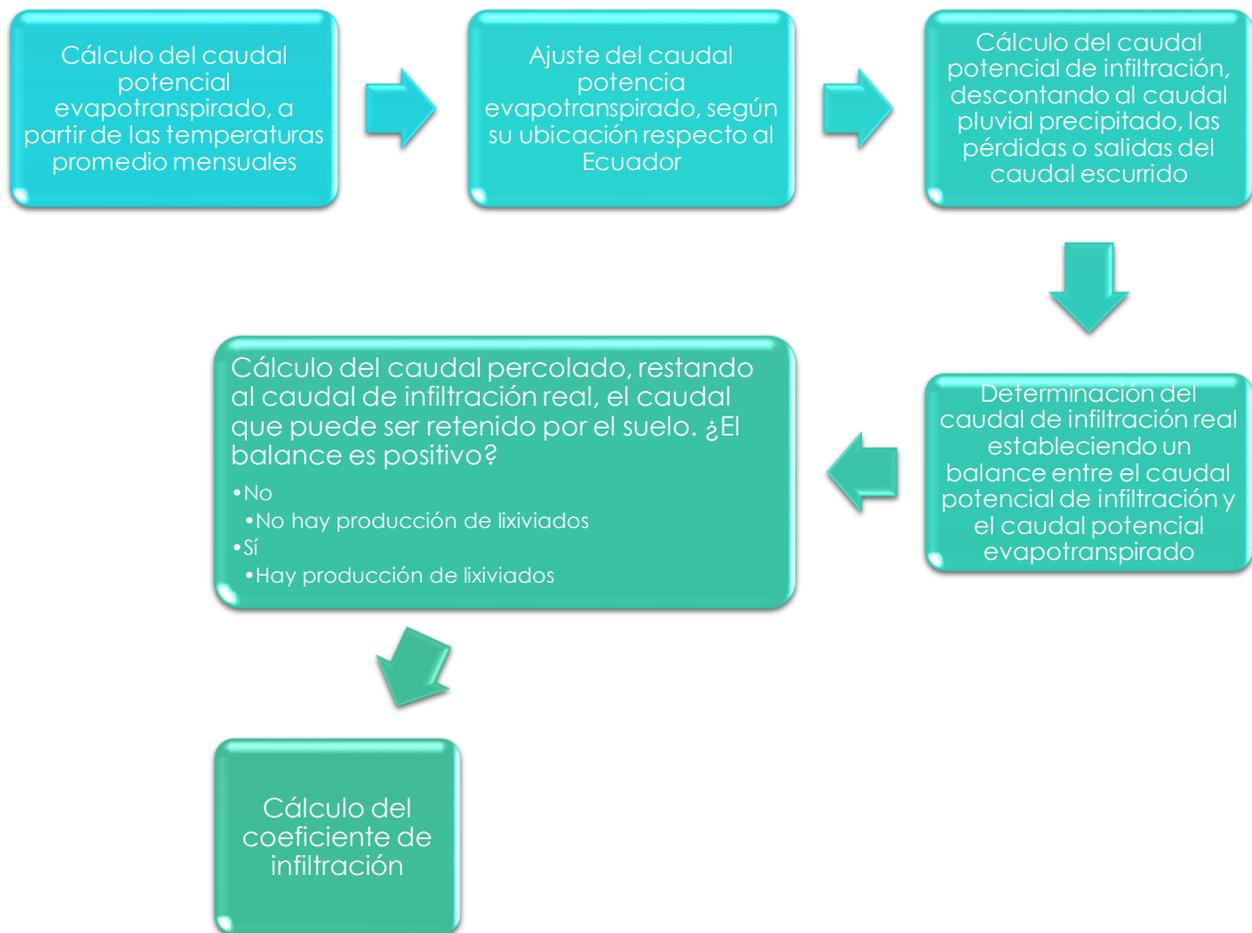


Figura 2.8 Metodología para el cálculo del balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite. Adaptado de Medina Arévalo, 2006.

La metodología, descrita en la figura 2.8, se presenta a continuación:

a) Determinación de la evapotranspiración mensual potencial corregida:

$$E_s = (h_p)(K_e) \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

h_p : Es la altura de precipitación media mensual (mm).

K_e : Coeficiente de escurrimiento que depende del tipo de suelo en estudio, adimensional.

E_s : Escurrimiento superficial mensual (mm).

- ✓ Evapotranspiración (E), (mm).
- ✓ Evapotranspiración potencial (E_p), (mm)
- ✓ Evapotranspiración real (E_r), (mm).

$$ij = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.51} \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$ET = 16(10T/I)^a \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$a = 0.49239 + (179 \times 10^{-5})I - (771 \times 10^{-7})I^2 + (675 \times 10^{-9})I^3 \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

ET: Evapotranspiración potencial sin corregir (mm/mes)

T_j : Temperatura media mensual (°C)

I = Sumatoria de los índices mensuales de calor tomando meses de 30 días con 12 horas diarias de sol, adimensional.

ij = Índice mensual de calor, adimensional.

a = Coeficiente que está en función de la sumatoria de los índices mensuales de calor, adimensional.

j = Número del mes considerado.

Finalmente se hace una corrección tomando en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar, mediante la aplicación de la expresión:

$$ET_p = (K_c)(ET) \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

K_c : Es el coeficiente que toma en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar.

ET: Evapotranspiración potencial mensual sin ajuste (mm).

ET_p : Evapotranspiración potencial mensual ajustada (mm).

b) Cálculo de la humedad potencial de infiltración mensual

$$I_j = h_p - h_p K_e - ET_p \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

I_j : Infiltración mensual (mm).

h_p : Altura de precipitación mensual (mm).

K_e : Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional.

ET_p : Evapotranspiración potencial mensual (mm).

c) Balance hídrico de la cubierta diaria y de la final del relleno sanitario, para cada mes.

Se considera:

- I. Cuando la precipitación pluvial mensual es igual o superior a la evapotranspiración potencial mensual, en la cubierta del terreno hay exceso de aporte de agua, que al ser absorbido incrementa la reserva de agua almacenada en el propio terreno.
- II. Si tal precipitación es inferior a dicha evapotranspiración, el valor real de ésta consume totalmente a aquella, y genera un déficit, que se suple con las reservas de agua del terreno hasta su agotamiento. Si éstas son suficientes para satisfacer la deficiencia, la evapotranspiración real es igual a la potencial, y se asemeja a la consideración anterior. Si son insuficientes, la evapotranspiración real queda ligada a la precipitación pluvial mensual, y se agotan: en el almacenamiento de agua en el subsuelo se genera un déficit (generación de lixiviados).

El cálculo del coeficiente de infiltración se obtiene empleando la siguiente ecuación:

$$COI_{j=1}^{12} = \frac{\sum_{j=1}^{12} ET}{\sum ET_p} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

COI: Coeficiente de infiltración, adimensional.

j: Indicador de los meses del año.

El método antes descrito, se debe aplicar para cada uno de los meses del año, estableciendo el balance de agua en la capa de cubierta considerada.

El método de balance de agua determina la cantidad de agua a infiltrarse al subsuelo, por lo que es de suponerse que las condiciones del suelo deben estar bien definidas, pues son condiciones que pueden afectar la percolación (escurrimiento de lixiviados), además de que existen varios coeficientes que serán utilizados en el cálculo. Por lo tanto, las condiciones, el tipo y espesor de cobertura, la presencia o ausencia de vegetación y las características topográficas, deberán definirse con precisión.

2.2.2. Composición de lixiviados

A continuación, se presentarán algunos estudios realizados para el análisis de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios (sitios controlados) a los cuales llegan residuos en una mezcla homogénea con residuos domésticos considerados como peligrosos.

Asimismo, se presentará la composición típica de los lixiviados según la literatura, de acuerdo con Tchobanoglous, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS). Ésta información será relevante únicamente como comparativa de lo que se revisa en literatura y lo que realmente se encuentra dentro de los rellenos sanitarios de las ciudades.

Los resultados observados en los análisis servirán de comparativa con la norma correspondiente para clasificarlos como residuos peligrosos.

Como primer estudio, se presenta el realizado en los lixiviados de Bordo Poniente.

En la caracterización del lixiviado proveniente del relleno sanitario que fue el más grande de la zona metropolitana de la Ciudad de México, *Bordo Poniente*, realizada en el año 2011 se encontraron los constituyentes mostrados en las tablas 2.6 y 2.7.

Tabla 2.6 Valor de pH de los lixiviados en los diferentes puntos de muestreo del relleno sanitario "Bordo Poniente" en las tres primeras etapas durante el muestreo en época de estiaje (E-E) y en época de lluvias (E-LL) (Robles Martínez et.al., 2011)

Etapas	I			II			III		
	PM	E-E	E-LL	PM	E-E	E-LL	PM	E-E	E-LL
1	7.88	8.51	7	7.85	9.91	13	7.78	7.10	
2	7.11	s.d.	8	s.d.	9.07	14	8.18	7.52	
3	8.20	8.01	9	s.d.	8.39	15	8.36	s.d.	
4	6.84	s.d.	10	8.69	8.26	16	8.20	6.39	
5	8.29	7.92	11	8.42	8.62	17	7.25	7.85	
6	s.d.	s.d.	12	8.12	8.20	18	8.17	6.17	

Tabla 2.7 Concentración de algunos metales en los lixiviados de los rellenos sanitarios de las ciudades de Estambul (Turquía), Ciudad de México (Bordo Poniente) y Mérida (México) (Robles Martínez et. al., 2011)

Relleno sanitario	Metal en lixiviado (mg L ⁻¹)			
	Pb	Cd	Cr	Ni
Estambul, Turquía (Inanc et al. 2000)	0.87	0.09	0.35	0.73
Mérida, México (Méndez-Novelo et al. 2002)	0.38	0.01	6.98	s.d.
Bordo Poniente, México (2011)	0.15	0.02	0.4	0.50

Es importante señalar que en ninguno de los casos el valor de pH de los lixiviados de las cuatro etapas y durante los dos muestreos, se acercó a los valores límite establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005, que caracterizan a un residuo como corrosivo ($pH \leq 2$ ó ≥ 12). (Robles Martínez et. al., 2011)

En ninguno de los casos y para ningún metal analizado se alcanzó el Límite Máximo Permisible (LMP). El LMP establecido en la NOM-052-SEMARNAT-2005 para cromo, níquel, plata y plomo es de 5 mg/L. (Robles Martínez et. al., 2011)

El relleno sanitario Bordo Poniente, se encuentra ubicado en el noreste de la Ciudad de México, en la zona donde alguna vez se encontró el Lago de Texcoco. Este sitio inició operaciones en febrero de 1985 y se clausuró en el año 2011 porque había llegado al límite de su capacidad. La operación del relleno se llevó a cabo en cuatro etapas, cada etapa ocupa un área diferente (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Características de las cuatro etapas del relleno sanitario "Bordo Poniente" (Robles Martínez et. al., 2011)

Etapas	Superficie ocupada para relleno sanitario (Ha)	Periodo de operación	Colocación de geomembranas
I	65	15/02/1985 a 25/06/1992	NO
II	75	31/07/1988 a 30/11/1997	NO
III	95	01/08/1991 a 05/05/1997	NO
IV	375	01/02/1995 a 2011	SI

Se ha establecido que entre más joven es un relleno sanitario, existe mayor probabilidad de tener lixiviados ácidos y de acuerdo con algunos autores, la evolución del pH en un relleno sanitario se mueve desde valores ácidos (pH 3.7) en la fase de operación, hasta valores alcalinos (pH 8.5) algunos años después de haber sido clausurado. (Robles Martínez et. al., 2011)

A continuación se presentará otro estudio de calidad de lixiviados realizado en la Habana.

En un estudio realizado en la Ciudad de La Habana, con muestras tomadas en el relleno sanitario de Calle 100 en 2004 durante mayo y junio (época de seca) y octubre y noviembre (época de lluvia), realizándose tres muestreos en cada época. Los lixiviados fueron tomados en cinco puntos de muestreo (C1 a C5), como se muestra en la figura 2.9, de acuerdo con las orientaciones de los expertos de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón. (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

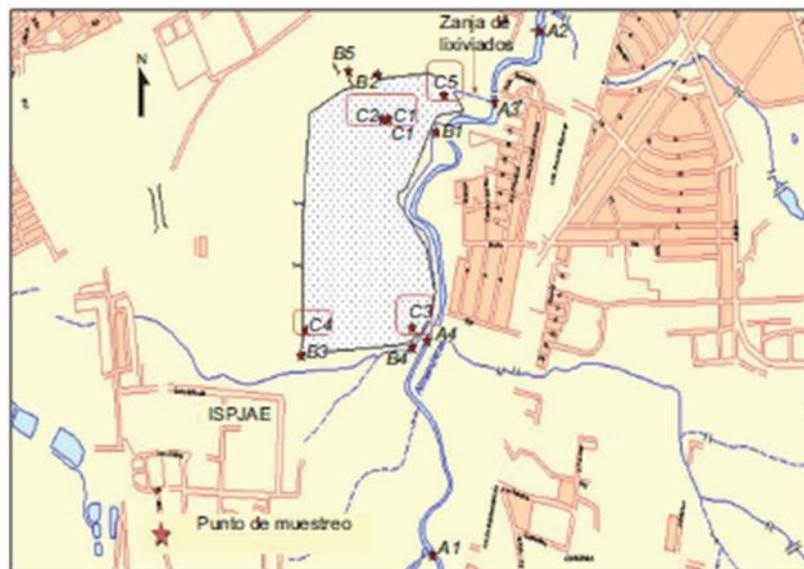


Figura 2.9 Ubicación de muestreos. Ciudad de la Habana (espinosa Lloréns et. al., 2010)

Durante los posteriores muestreos realizados en los años 2007 y 2008, solamente se tomaron muestras en el punto identificado como C5, ubicado en la zanja de lixiviados del relleno sanitario. Haciendo un análisis de la localización espacial de los puntos de muestreo y teniendo en cuenta que C1 y C2 se encontraban extremadamente cercanos uno del otro y, desde el punto de vista ambiental, no se debían esperar resultados con diferencias significativas, por ser ambos representativos de la misma zanja de evacuación de lixiviados, aunque los resultados arrojaron que los valores de

pH son distintos entre sí. En lo referente a los puntos C3 y C4, dadas las coordenadas donde se tomaron (Tabla 2.9), constituían puntos de acumulación de lixiviados, entre los propios residuos de aquellos momentos. (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

Las muestras de lixiviados fueron colectadas como muestras simples, a nivel superficial, siguiendo metodologías normalizadas. (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

Tabla 2.9 Coordenadas de los puntos muestreados (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

Punto de muestreo	Coordenadas	
	N	O
C1	23 03 92	082 24 40
C2	23 03 89	082 24 41
C3	23 03 20	082 24 58
C4	23 03 43	082 24 33
C5	23 04 02	082 24 28

Indicadores y métodos de ensayo

Los indicadores de calidad de agua y los métodos analíticos utilizados para el estudio en la ciudad de la Habana, se muestran en la tabla 2.10. En algunos de los indicadores se reporta el uso de más de un método analítico, ya que los ensayos se realizaron en diferentes laboratorios. Todas las muestras se analizaron por triplicado.

Tabla 2.10 Indicadores de calidad de agua y métodos analíticos utilizados (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

Indicador	Método analítico
pH	Método electrométrico
Temperatura (T)	Termómetro digital
Conductividad eléctrica (CE)	Método electrométrico
Oxígeno disuelto (OD)	Método de Winkler. Modificación de la azida. Método electrométrico
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Disolución y siembra durante 5 días a 20°C
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Oxidación con dicromato de potasio y reflujo cerrado. Método fotométrico
Sólidos totales, sólidos totales fijos y sólidos totales volátiles (ST, STF y STV). Sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles (SST, SSF y SSV). Sólidos disueltos totales, sólidos disueltos fijos y sólidos disueltos volátiles (SDT, SDF y SDV)	Métodos gravimétricos
Sólidos Sedimentables (S sed.)	Método volumétrico
Metales pesados: As, Cd, Cr, Cu, Hg total, Pb y Zn	Método de plasma inductivamente acoplado. ICP (digestión ácida con HNO ₃)
Cromo hexavalente (Cr ⁺⁶)	Método colorimétrico
Cianuros totales (CN ⁻ totales)	Método colorimétrico
Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂)	Diazotación. Espectrofotómetro

Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃)	Reducción con Cd-Cu y diazotación. Espectrofotómetro
Nitrógeno total (N total), orgánico (N org) y amoniacal (N am)	Oxidación con persulfato y reducción con Cd-Cu. Método Kjendahl volumétrico (digestión, destilación y valoración)
Fósforo total (P total) y ortofosfatos (P orto)	Oxidación con persulfato y ácido ascórbico. Método colorimétrico del vanadato-molibdato
Grasas y aceites	Espectrofotómetro FT-IR. Método gravimétrico mediante extracción con n-hexano
Fenoles	4-amino antipirina. Espectrofotómetro. Método de Folin-Denis
Detergentes	Azul de metileno. Espectrofotómetro
Alcalinidad	Valoración potenciométrica
Acidez	Valoración potenciométrica
Color	Comparación con escala de cloroplatinato-cobalto
Turbidez	Método nefelométrico
Humedad aire	Higrométero, medición de campo
Temperatura aire	Termómetro digital
Coliformes totales y fecales	Disoluciones. NMP en 100 ml.

En las tablas 2.11 y 2.12, se muestran los valores de los contaminantes encontrados en los lixiviados, en los distintos puntos donde se obtuvieron las muestras.

Tabla 2.11 Mediciones de campo de los lixiviados del vertedor de calle 100, durante la estación de lluvia (2004) (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

Punto de muestreo	pH	Temperatura (°C)	CE (μS cm ⁻¹)	OD (mg L ⁻¹)	Color (UC)	Turbidez (NTU)	Humedad aire (%)	Temperatura aire (°C)
C1	7.80	33.4	13130	0.00	3500	140	78	30.9
C2	8.35	27.4	8610	0.00	7000	28	64	32.2
C3	8.22	31.6	7860	0.00	7000	500	40	38.6
C4	7.80	28.3	6800	1.68	1750	5.9	34	37.2
C5	7.50	28.3	1310	1.17	140	20	59	33.9

Tabla 2.12 Valores promedio de indicadores de contaminación presentes en los lixiviados del vertedores de calle 100, durante la estación de lluvia (2004) (Espinosa Lloréns et. al., 2010)

Punto de muestreo	DBO ₅ /DQO	DBO ₅	DQO	SDT	SST	STV	Coliformes totales (NMP/100mL)	Coliformes fecales (NMP/100mL)
		Mg L ⁻¹						
C1	0.56	1128	1999	7770	1280	7528	2.10 x10 ⁴	1.50 x10 ³
C2	0.62	917	1478	5989	87	1004	2.90 x10 ⁵	2.40 x10 ⁴
C3	0.98	1128	1152	4874	232	938	4.30 x10 ⁴	7.50 x10 ³
C4	0.72	536	748	3919	57	274	4.60 x10 ⁵	9.30 x10 ⁴
C5	0.31	174	564	706	50	100	4.30 x10 ⁴	4.30 x10 ³

Algunos otros parámetros típicos utilizados para caracterizar lixiviados se muestran en las tablas 2.13 y 2.14.

Tabla 2.13 Parámetros indicadores y características típicas de un lixiviado (OPS y CEPIS, 2002)

Parámetro	Intervalo (mg/L)
pH	5.3 – 8.5
DQO	3,000 – 45,000
Cloruros	100 – 3,000
Nitratos	1 – 40
Nitrógeno amoniacal	10 – 800
Cianuros	100 – 1,500
Sulfuros	< 0.10
DBO	2,000 – 30,000
COT	1,500 – 20,000
Sólidos suspendidos totales	200 – 1,000
Fósforo total	1 - 70
Ortofosfatos	1 - 50
Alcalinidad como CaCO₃	1,000 – 10,000
Dureza total	200 – 3,000
Calcio	200 – 3,00
Magnesio	50 – 1,500
Potasio	200 – 2,000
Sodio	200 – 2,000
Hierro total	50 - 600

Tabla 2.14 Valores de los parámetros típicos encontrados en lixiviados (Tchobanoglous, et. al., 1993)

Constituyente	Valor (mg/L)		
	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario maduro (mayor de 10 años)
	Rango	Típico	
DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días)	2000 - 30000	10000	100 - 200
COT (Carbono Orgánico Total)	1500 - 20000	6000	80 - 160
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	3000 - 60000	18000	100 - 500
Sólidos suspendidos totales	200 - 2000	500	100 - 400
Nitrógeno orgánico	10 - 800	200	80 - 120
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200	80 - 120
Nitrato	5 - 40	25	5 - 10
Fósforo total	5 - 100	30	5 - 10
Ortofosfato	4 - 80	20	4 - 8
Alcalinidad como CaCO₃	1000 - 10000	3000	200 - 1000
pH	4.5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
Dureza total como CaCO₃	300 - 10000	3500	200 - 500
Calcio	200 - 3000	1000	100 - 400
Magnesio	50 - 1500	250	50 - 200
Potasio	200 - 1000	300	50 - 400
Sodio	200 - 2500	500	100 - 200
Cloro	200 - 3000	500	100 - 400
Sulfatos	50 - 1000	300	20 - 50
Hierro total	50 - 1200	60	20 - 200

Con los parámetros analizados en los lixiviados, se podría estimar, en algunos casos, el tipo de residuo que se está arrojando al relleno sanitario o bien, a un basurero a cielo abierto. Únicamente si las condiciones de pH y temperatura son las adecuadas para que los metales puedan lixiviar, por mencionar un ejemplo.

A continuación, se mencionará la procedencia de algunos compuestos contenidos en lixiviados de residuos domésticos.

Cloruros: Son un parámetro importante para el análisis. Están presentes en forma abundante en residuos industriales y municipales, no se ven afectados por los mecanismos de retención del suelo, debido a que éste no reacciona física ni

biológicamente. Se difunden con facilidad y frecuentemente son utilizados como una señal de contaminación de un cuerpo de agua. (OPS y CEPIS, 2002)

Amonio: Éste y otras formas de nitrógeno, principalmente en la forma de nitratos, son indicadores de contaminación por agua residual, fertilizantes, aerosoles nitrogenados, plásticos y fármacos. Se transportan con facilidad y su monitoreo está relacionado con aspectos de salud. Indica también cuando un relleno sanitario se encuentra en etapa de degradación anaerobia; los nitritos son indicadores de una importante actividad biológica. (OPS y CEPIS, 2002)

Sodio: Es el principal metal alcalino y tiende a permanecer en solución y no está sujeto a atenuaciones. El origen en los lixiviados es debido al intensivo uso de sales de sodio en la industria, o como parte de las actividades domésticas (papel, jabones, etc). (OPS y CEPIS, 2002)

Sulfatos: Los sulfatos son la forma más común del azufre en los rellenos sanitarios. Es un compuesto que se desplaza con facilidad y que puede ser de ayuda para monitorear la migración de lixiviados. (OPS y CEPIS, 2002)

Potasio: Es un nutriente esencial tanto en plantas como en animales, por lo que su presencia puede correlacionarse con la liberación de materiales orgánicos, que demandan oxígeno durante la descomposición de basura. (OPS y CEPIS, 2002)

Magnesio: La presencia de magnesio en rellenos sanitarios se atribuye principalmente a los cosméticos, cementos y textiles. (OPS y CEPIS, 2002)

Plomo: El plomo en un relleno sanitario tiene su origen en baterías, residuos fotográficos pinturas a base de plomo y tuberías de plomo. Es tóxico para todas las formas de vida, en ciertas concentraciones. Se considera uno de los metales pesados de mayor toxicidad, por lo que es evaluado para garantizar que no se excedan los límites de seguridad recomendados para la salud. Bajo condiciones ácidas se puede promover su liberación de la basura. (OPS y CEPIS, 2002)

Zinc: Está presente en baterías, soldaduras y lámparas fluorescentes. Los problemas que ocasiona están relacionados con las plantas y la vida acuática. (OPS y CEPIS, 2002)

DBO₅ y DQO: Ambos parámetros son utilizados como una medida indirecta del contenido de materia orgánica presente en una muestra, susceptible de oxidarse biológicamente (DBO₅) o químicamente (DQO). (OPS y CEPIS, 2002)

Para considerar su importancia, en órdenes de magnitud, un lixiviado joven (de 1 a 5 años de operación de relleno sanitario) puede presentar una concentración 100 veces más elevada como DBO₅, que la carga orgánica presente en un agua residual típica. La relación de ambos parámetros puede establecer el grado de estabilización de un lixiviado. (OPS y CEPIS, 2002)

Metales orgánicos volátiles (VOC's), plaguicidas, PCBs y otros compuestos orgánicos traza: Están asociados a la disposición inadecuada de residuos peligrosos. En ocasiones son analizados durante los programas de monitoreo, sobre todo cuando no se tiene la certeza de que los residuos depositados en el relleno sanitario no incluyan residuos de origen industrial. (OPS y CEPIS, 2002)

Estos parámetros justificarán los valores obtenidos durante el estudio en laboratorio que se realizará a los lixiviados provenientes del modelo a realizar en esta tesis.

De acuerdo con la composición típica de los lixiviados y comparándola con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005 donde se establecen los límites máximos permisibles para que un compuesto sea considerado como residuo peligroso, se ha encontrado que ningún estudio ha podido comprobar que los lixiviados provenientes de residuos sólidos domésticos conteniendo RPD son residuos peligrosos.

Aunque los lixiviados no sean considerados como residuos peligrosos de acuerdo con la norma correspondiente, tiene constituyentes que lo hacen peligroso para la salud humana, acuíferos, aguas superficiales y suelos. Esto se explicará con más detalle en el subcapítulo 2.4.

2.3. Tratamiento y disposición de lixiviados

Los rellenos sanitarios, han venido evolucionando desde basureros a cielo abierto, hasta rellenos altamente tecnificados donde se controlan las emisiones (líquidas y gaseosas) potencialmente peligrosas para el ambiente. (Méndez Novelo et. al., 2009)

Tanto en los basureros a cielo abierto, como en los primeros rellenos sanitarios no se controlaban las emisiones líquidas (llamadas lixiviados) y éstos escurrían a fuentes superficiales de agua, o bien, se infiltraban a las capas inferiores del terreno y en muchos casos contaminaban los acuíferos. Existen en la bibliografía numerosos reportes de ejemplos de impactos a acuíferos ocasionados por rellenos sanitarios. Este hecho ha propiciado la generación de normatividades y legislaciones nacionales y/o regionales encaminadas a proteger los cuerpos de agua de contaminantes

provenientes de rellenos sanitarios o en general de sitios de disposición final de residuos sólidos. (Méndez Novelo et. al., 2009)

La generación de lixiviados depende de muchos factores: grado de compactación de los desechos, grado de humedad inicial de la basura, material de cubierta de las celdas, precipitación pluvial, humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, capacidad de campo del relleno, etc. En general, se puede afirmar que es mucho más difícil estimar la cantidad de lixiviado producido en un relleno sanitario que en un terreno natural. Una razón para ello es que la estructura y composición de los desechos es tal (del 5 al 30% de material pequeño) que impide que el relleno se humedezca en forma homogénea, de tal forma que a menudo se pueden formar canales gruesos de lixiviados. (Méndez Novelo et. al., 2009)

El tratamiento de lixiviados que se podría utilizar dentro de los rellenos sanitarios es la evaporación con biogás, para que esto se pueda llevar a cabo se requiere de 300 m³ de biogás para poder tratar 1 m³ de lixiviados. (López Arriaza, 2016)

Tomando en cuenta que los rellenos sanitarios producen 200 m³/día de lixiviados en un día lluvioso, se requerirán 60000 m³/día de biogás para poder evaporar los lixiviados. (López Arriaza, 2016)

2.4. Lixiviados: Impacto ambiental y evaluación de su toxicidad

Uno de los efectos ambientales más serios provocados por el manejo inadecuado de los RSU es la contaminación de las aguas superficiales, las cuales muchas veces son fuentes de abastecimiento de agua potable. La materia orgánica de los residuos provoca una disminución del oxígeno disuelto y un aumento de los nutrientes (nitrógeno y fósforo), todo lo cual contribuye al crecimiento descontrolado de algas y genera procesos de eutrofización. Los RSU frecuentemente están mezclados con residuos peligrosos industriales, lo que origina, a su vez, contaminación química. Como consecuencia de todo lo explicado anteriormente, se produce la pérdida del recurso agua, ya sea para consumo humano o para recreación, se destruye la fauna acuática y también se deteriora el paisaje, lo que acarrea grandes inversiones si se quieren emprender trabajos de recuperación. (Méndez Novelo, y otros, 2009)

El relleno sanitario es el método más practicado en América Latina y el Caribe. Las condiciones de estas instalaciones han mejorado, aunque todavía no se usan membranas sintéticas para la impermeabilización ni se tratan los lixiviados, sino que

éstos se infiltran al subsuelo o se vierten en corrientes superficiales. (Espinosa Lloréns et al., 2010).

Los impactos ambientales asociados a los vertedores son: enfermedades potenciales transmitidas por diferentes vectores tales como roedores, pájaros e insectos; el ruido proveniente de los camiones y excavadoras; riesgo de fuego por la producción de gases inflamables como el metano y la ocurrencia de procesos de autocombustión, así como la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por los lixiviados producidos durante los procesos de disposición de los residuos. Este último aspecto puede considerarse como el impacto ambiental más severo de los vertedores (Kjeldsen et al. 2001).

Los ingenieros y operadores de los vertedores o rellenos sanitarios utilizan, en gran medida, la relación que existe entre DBO_5/DQO para poder evaluar el grado de estabilidad de materia orgánica en los lixiviados. (Moody y Townsend, 2017)

La evaluación de la toxicidad de los lixiviados de alta resistencia es un aspecto muy importante de la gestión de RSU. Comúnmente, los parámetros tales como el oxígeno disuelto (OD) y la demanda química de oxígeno (COD) se utilizan como parámetros para controlar la calidad del lixiviado. Estos análisis son, sin embargo, insuficiente, ya que no proporcionan ninguna información sobre el efecto en los organismos biológicos. (Ghosh, et. al., 2017)

Para evaluar la calidad del lixiviado se puede hacer uso de las herramientas mostradas en la figura 2.10:

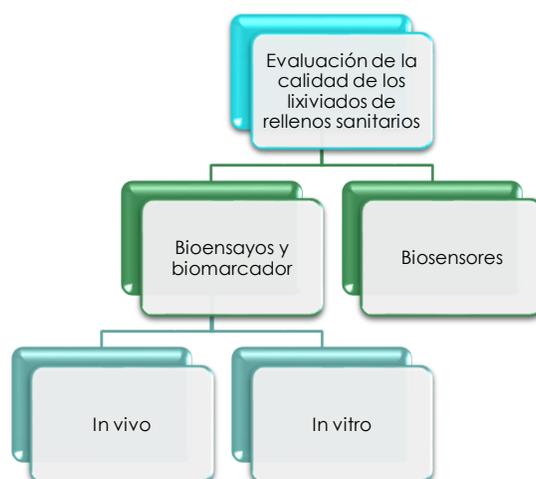


Figura 2.10 Herramientas para la evaluación de la calidad de los lixiviados en los rellenos sanitarios. Adaptado de (Ghosh, et. al., 2017)

Bioensayo se refiere a procedimientos que usan organismos vivos para determinar la toxicidad de una sustancia química. Se requiere la exposición de los organismos vivos a diferentes concentraciones de un tóxico potencial y la observación de la diferencia en los organismos, el comportamiento y la supervivencia; y establecer si, o en qué concentración, una sustancia química nociva tiene efectos. (Ghosh, et. al., 2017)

Un biomarcador es un cambio en una respuesta biológica (molecular, celular, fisiológica, cambios de comportamiento) que puede estar relacionado con la exposición a efectos tóxicos de los productos químicos ambientales. El uso de biomarcadores medido en el nivel molecular o celular sirve como una herramienta de alerta temprana sensible para efectos biológicos, resultante de la exposición química. (Ghosh, et. al., 2017)

Un inconveniente principal de los biosensores es que son específicos para un solo parámetro, tales como la demanda biológica de oxígeno (DBO). (Ghosh, et. al., 2017)

En las tablas 2.7, 2.11, 2.12, 2.13, y 2.14 de este capítulo, se muestran los constituyentes típicos y de estudios realizados con anterioridad de los lixiviados provenientes de residuos sólidos domésticos, en ellas se puede observar que algunos compuestos contenidos en los lixiviados son tóxicos en distintas dosis para el humano como son los cianuros, por mencionar alguno.

Ambientalmente, el cianuro es encontrado en forma natural en aire y agua y dada su toxicidad al ser humano es un contaminante de prioridad mundial. (Argota Pérez et. al., 2015)

Experimentos con animales han demostrado, que existen posibilidades de que sales cianúricas sean absorbidas por la piel (Ballantyne, 1987). Sobre la piel intacta el Cianuro de Sodio (NaCN) seco no resulta en absorción de cantidades suficientes para producir señales sistémicas de toxicidad.

La concentración del cianuro en los glóbulos rojos es diez veces más alta que en el plasma (Ballantyne, 1987).

El cianuro es una sal resultante de la combinación del ácido cianhídrico con diversos compuestos. Dada su afinidad por el hierro (Fe^{+3}) oxidado, presente en la cadena respiratoria de la célula (citocromooxidasa), se une a este elemento bloqueando dicha cadena y, por ende, la respiración (Rodríguez Fernández y del Pozo Hessing, 2001).

La vida media (el tiempo necesario para remover la mitad del material) del cianuro de hidrógeno en la atmósfera es alrededor de 1 a 3 años (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2006)

La exposición a niveles altos de cianuro durante un período breve daña el cerebro y el corazón y puede producir coma y la muerte. El cianuro produce efectos tóxicos a niveles de 0.05 miligramos de cianuro por decilitro de sangre (mg/dL) o mayores, y casos fatales han ocurrido a niveles de 0.3 mg/dL o mayores (1 decilitro es la décima parte de 1 litro ó 100 mililitros). Algunas personas que respiraron 546 ppm de cianuro de hidrógeno murieron después de 10 minutos de exposición y 110 ppm puso en peligro la vida después de 1 hora de exposición (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2006).

Algunos trabajadores que respiraron cantidades de cianuro de hidrógeno tan bajas como 6 a 10 ppm durante años sufrieron dificultades para respirar, dolor del pecho, vómitos, alteraciones de la sangre, dolores de cabeza y dilatación de la glándula tiroideas (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2006).

El NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health) determinó que el IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) para el cianuro de hidrógeno es de 50 ppm, ó 25 mg/m³ para la mayoría de las sales de cianuro (Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, 2006).

3. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el análisis correspondiente de los lixiviados, fue necesaria una adecuada planeación para el montaje del modelo.

Se realizó con 5 lisímetros conteniendo residuos domésticos considerados como peligrosos en diferentes proporciones.

Dentro de este capítulo se describirán cada una de las etapas involucradas en el proceso de montaje.

Las etapas involucradas y descritas en el proceso del montaje son:

- 1) Estudio de generación
- 2) Preparación de lisímetros
- 3) Montaje de lisímetros con residuos correspondientes
- 4) Toma de muestras y análisis de laboratorio

3.1. Estudio de generación

De acuerdo con la norma NMX-AA-61-1985 un estudio de generación es un método para determinar la generación de residuos sólidos municipales a partir de un muestreo estadístico aleatorio.

La norma referente a estudio de generación indica que el universo de trabajo, en un plano actualizado de las localidades, debe contar con un aproximado de 300 a 500 casas por cada estrato socioeconómico a muestrear.

Con base en esto, el primer trabajo que se realizó fue ubicar una zona con estrato socioeconómico medio (estrato socioeconómico promedio dentro de la Ciudad de México) y que se encontrara cerca del lugar donde se colocarían los lisímetros, esto con el fin de que el transporte de los residuos fuera más eficiente.

La localidad que recopilaba todas estas características fue la unidad habitacional Villa Olímpica.

La unidad habitacional Villa Olímpica Libertador Miguel Hidalgo fue construida entre julio y septiembre del año 1968. El edificio de administración, control y registro, al igual que la mayoría de las construcciones, fue proyectado y construido por la Secretaría de Obras Públicas con carácter desmontable y sirvió de acceso a la villa. (Gobierno de la Ciudad de México, 2008)

Esta edificación, ahora unidad habitacional Villa Olímpica, se construyó con el fin de alojar a 1 500 personas y 800 en su auditorio, las personas alojadas fueron competidores, jueces, árbitros, inspectores, tomadores de tiempo, etc.; personas que se encontrarían en las competencias de los juegos olímpicos celebrados en México en el año 1968. (Gobierno de la Ciudad de México, 2008)

La regla 37 de la Carta Olímpica, estipula que el Comité Organizador proporcionará una villa para hombres y otra para mujeres en que los competidores y oficiales de equipo puedan ser acomodados juntos y alimentados por un precio razonable". (Gobierno de la Ciudad de México, 2008)

La unidad habitacional cuenta con 29 edificios, reúnen un total de 5044 habitaciones y 2572 baños en 904 departamentos, cuenta con un área cubierta para estacionar 100 vehículos y varios andenes para el movimiento simultáneo de 40 autobuses; vestíbulo de entrada y oficinas para la acreditación de las delegaciones; barras de información incluyendo servicios bancarios, de correo y telégrafos; salas para entrevistas de prensa, radio y televisión, y estancias para reuniones. (Gobierno de la Ciudad de México, 2008)

El estudio de generación se llevó a cabo durante la segunda semana del mes de enero del 2018. A continuación, se presenta un resumen de lo realizado en el estudio de generación.

1. Se realizó una selección aleatoria de entre los 904 departamentos, obteniéndose una premuestra de 120 departamentos.
2. Se visitó a cada uno de los 120 departamentos seleccionados para ser entrevistados y proporcionarles información de cómo se realizaría el proyecto durante los 8 días.
3. Se obtuvo como muestra final 85 departamentos que accedieron al proyecto, a los cuales se les dio indicaciones de que recibirían 1 bolsa negra diaria en la cual depositarían sus RSU generados en 1 sólo día, los residuos depositados en las bolsas negras no debían contar con ningún tipo de separación.
4. El día domingo 14 de enero se realizó la operación limpieza. Esta consiste en recolectar todos los residuos generados para que así los departamentos no cuenten con acumulación de residuos, ya que esto afectaría con los resultados del estudio de generación y se tomarían como datos inválidos. Con esto, a partir del lunes 15 de enero, se tendría la seguridad de que los residuos recolectados únicamente serían producto de la generación de un día, como lo establece la norma NMX-AA-61-1985.
5. Durante los posteriores 7 días, se realizó la recolecta de los residuos por cada departamento, se mezclaron y se procedió con el método de cuarteo como lo indica la norma NMX-AA-015-1985, con ello se realizó la clasificación de los residuos.

Los resultados obtenidos durante el estudio de generación se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Generación de subproductos obtenidos en estudio de generación en Villa Olímpica

Subproducto / día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Promedio	Total semanal (kg)	Porcentaje
Tetrapak	0.204	0.336	0.296	0.306	1.016	0.959	1.089	0.601	4.206	1.76
Higiénico	3.468	2.560	1.480	2.664	2.881	3.267	3.977	2.900	20.297	8.49
Finos	0.434	0.386	0.420	0.112	0.174	0.251	0.112	0.270	1.889	0.79
Bolsas	0.860	1.008	0.906	1.012	1.572	1.077	1.619	1.151	8.054	3.37
Jardinería	0.122	0.075	0.102	0.000	0.000	0.181	0.364	0.121	0.844	0.35
Unicel	0.018	0.386	0.070	0.068	0.355	0.312	0.577	0.255	1.786	0.75
Papel, periódico	1.006	1.770	2.588	1.658	2.477	2.817	2.231	2.078	14.547	6.09
Vidrio	3.226	0.560	3.790	2.188	3.206	2.972	3.661	2.800	19.603	8.20
Orgánicos	17.245	23.418	15.252	17.620	18.918	12.150	19.059	17.666	123.662	51.74
PET, PAD	0.870	0.462	1.286	0.810	1.902	1.539	1.275	1.163	8.144	3.41
Plásticos envolturas	0.460	0.226	0.168	0.306	0.116	0.453	0.374	0.300	2.103	0.88
Cartón	0.736	1.458	0.842	1.196	0.683	0.977	0.976	0.981	6.868	2.87
Latas aluminio	0.273	0.386	0.542	0.337	0.599	0.708	0.792	0.520	3.637	1.52
Otros metales ferrosos	0.059	0.000	0.172	0.019	0.311	0.462	0.217	0.177	1.240	0.52
Textil	0.164	0.000	0.000	0.575	0.000	0.209	0.073	0.146	1.021	0.43
Otros	1.258	3.602	0.902	0.775	0.672	1.716	0.784	1.387	9.709	4.06
RPD	1.456	1.878	1.128	2.108	1.655	1.736	1.456	1.631	11.417	4.78
Total	31.859	38.511	29.944	31.754	36.537	31.786	38.636		239.027	
Promedio	1.874	2.265	1.761	1.868	2.149	1.870	2.273		14.060	

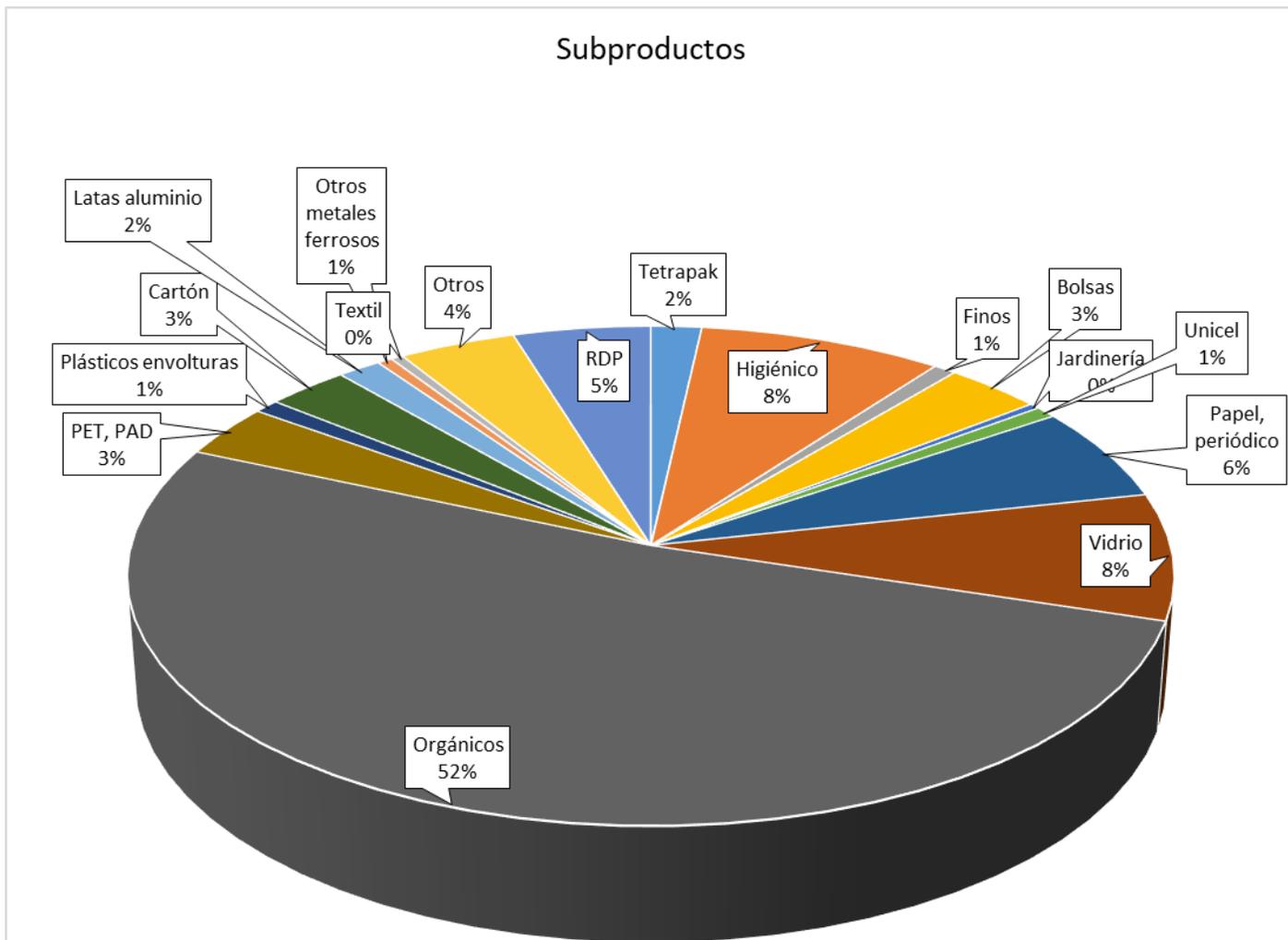


Figura 3.1 Porcentajes de subproductos obtenidos

Aunado a esto, se realizó una encuesta a los habitantes de Villa Olímpica para conocer la frecuencia con la que utilizan los distintos tipos de RPD. Se encuestó a 491 departamentos, los cuales participaron en el estudio de generación realizado.

Los resultados de la frecuencia de uso de RPD se presentan en la tabla 3.2 y figura 3.2.

Tabla 3.2 Frecuencia de uso de los RPD en Villa Olímpica

RPD/Frecuencia de uso, una vez por ...	Semana	Mes	Año
Destapacaños	0	3	48
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	0	3	4
Pulidores para muebles	0	0	12
Quita sarro	5	26	0
Pinturas base solvente (aceite)	0	4	12
Solventes (thinner y aguarrás)	0	12	0
Pegamentos y adhesivos	0	12	11
Removedor de pintura y barniz	0	0	4
Selladores	0	0	0
Tintas para madera	4	8	0
Aceite de motor	0	12	16
Aceite lubricante gastado	0	4	0
Aditivos para gasolina	0	11	0
Líquido anticongelante	0	4	8
Limpiador de carburador	0	0	0
Limpiador de motor	0	4	7
Acumuladores/batería ácido-plomo	0	4	0
Combustibles	0	0	6
Líquido para frenos	0	8	4
Conservadores de madera	0	0	0
Conservadores de metales	0	5	0
Insecticidas	0	11	3
Herbicidas	0	0	0
Raticidas	0	0	0
Limpiador de alfombras	0	0	4
Botes con pintura	8	2	8
Detergentes	16	13	0
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	0	0	23

RPD/Frecuencia de uso, dos veces por ...	Semana	Mes	Año
Destapacaños	0	0	4
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	0	0	0
Pulidores para muebles	0	0	8
Quita sarro	0	4	0
Pinturas base solvente (aceite)	0	4	0
Solventes (thinner y aguarrás)	0	0	1
Pegamentos y adhesivos	0	0	9
Removedor de pintura y barniz	1	0	0
Selladores	0	0	0
Tintas para madera	0	0	0
Aceite de motor	0	0	13
Aceite lubricante gastado	0	0	4
Aditivos para gasolina	0	4	0
Líquido anticongelante	0	0	12
Limpiador de carburador	0	0	0
Limpiador de motor	0	0	0
Acumuladores/batería ácido-plomo	0	0	1
Combustibles	0	0	0
Líquido para frenos	0	0	0
Conservadores de madera	0	5	0
Conservadores de metales	0	0	0
Insecticidas	0	3	4
Herbicidas	0	0	0
Raticidas	0	0	0
Limpiador de alfombras	0	0	0
Botes con pintura	0	0	0
Detergentes	24	8	0
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	0	0	24

RPD/Frecuencia de uso, tres veces por ...	Semana	Mes	Año
Destapacaños	0	0	4
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	0	0	0
Pulidores para muebles	0	0	8
Quita sarro	0	4	0
Pinturas base solvente (aceite)	0	4	0
Solventes (thinner y aguarrás)	0	0	1
Pegamentos y adhesivos	0	0	9
Removedor de pintura y barniz	1	0	0
Selladores	0	0	0
Tintas para madera	0	0	0
Aceite de motor	0	0	13
Aceite lubricante gastado	0	0	4
Aditivos para gasolina	0	4	0
Líquido anticongelante	0	0	12
Limpiador de carburador	0	0	0
Limpiador de motor	0	0	0
Acumuladores/batería ácido-plomo	0	0	1
Combustibles	0	0	0
Líquido para frenos	0	0	0
Conservadores de madera	0	5	0
Conservadores de metales	0	0	0
Insecticidas	0	3	4
Herbicidas	0	0	0
Raticidas	0	0	0
Limpiador de alfombras	0	0	0
Botes con pintura	0	0	0
Detergentes	24	8	0
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	0	0	24

Tabla 3.3 Resumen anual de RPD desechados en Villa Olímpica

RPD	Frecuencia de uso anual	Porcentaje anual
Destapacaños	96	1.13
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	40	0.47
Pulidores para muebles	36	0.43
Quita sarro	696	8.23
Pinturas base solvente (aceite)	204	2.41
Solventes (thinner y aguarrás)	147	1.74
Pegamentos y adhesivos	182	2.15
Removedor de pintura y barniz	148	1.75
Selladores	0	0.00
Tintas para madera	288	3.40
Aceite de motor	295	3.49
Aceite lubricante gastado	60	0.71
Aditivos para gasolina	276	3.26
Líquido anticongelante	92	1.09
Limpiador de carburador	0	0.00
Limpiador de motor	55	0.65
Acumuladores/batería ácido-plomo	51	0.60
Combustibles	6	0.07
Líquido para frenos	100	1.18
Conservadores de madera	180	2.13
Conservadores de metales	60	0.71
Insecticidas	259	3.06
Herbicidas	0	0.00
Raticidas	0	0.00
Limpiador de alfombras	4	0.05
Botes con pintura	418	4.94
Detergentes	4672	55.22
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	95	1.12

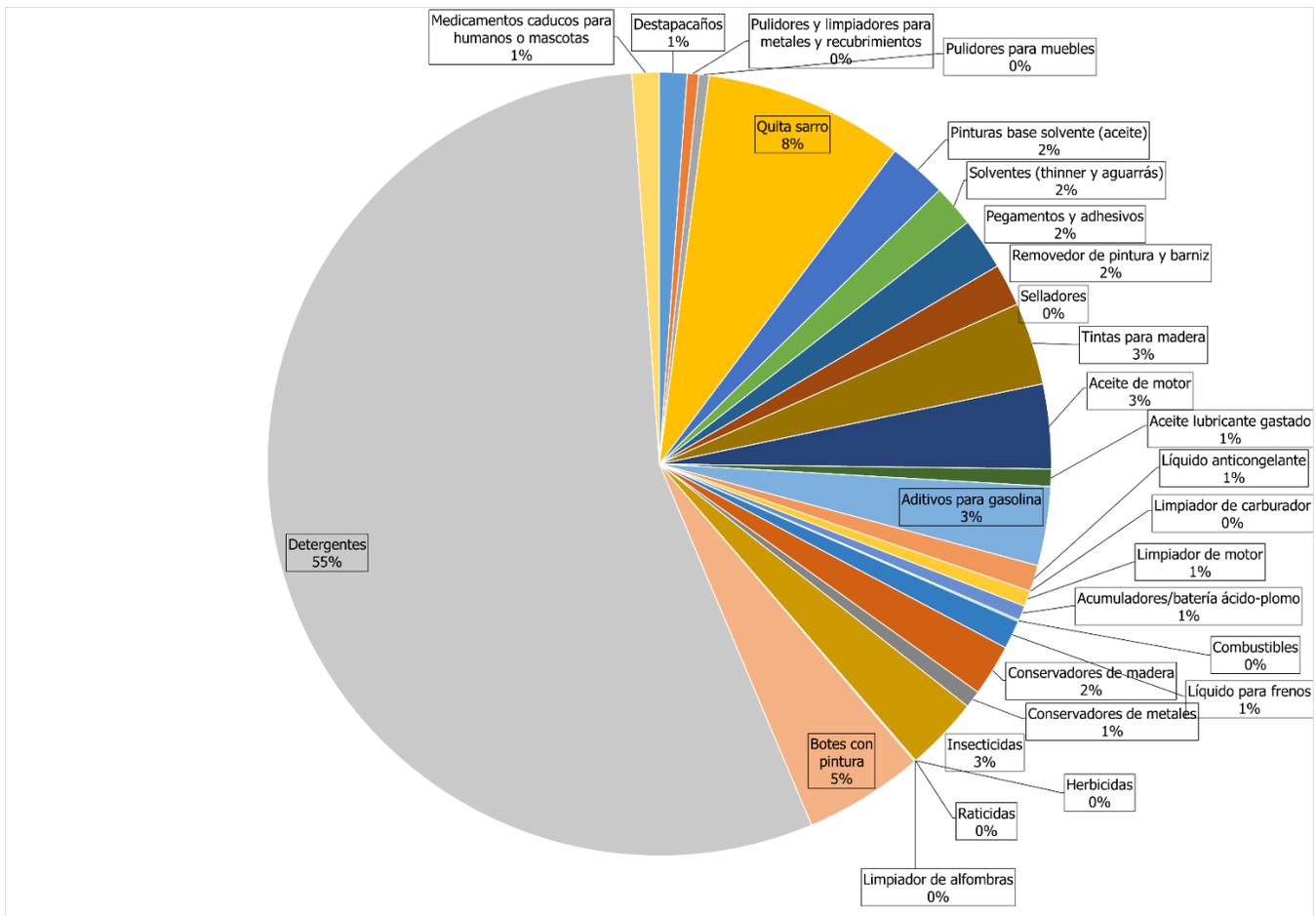


Figura 3.2 Porcentajes de RPD desechados anualmente en Villa Olímpica

Con los resultados obtenidos en el estudio de generación realizado en la unidad habitacional Villa Olímpica se procederá con el montaje de los lisímetros (parte experimental de esta tesis)

Inicialmente se realizó un ajuste a los lisímetros y así cuentan con las condiciones óptimas para que puedan almacenar residuos, principalmente los lixiviados generados durante varios meses.

3.2. Preparación de lisímetros

Para la parte experimental se contaron con 5 lisímetros, cada uno consistió en un cilindro de acrílico transparente con tapa y en el fondo, una válvula de salida para líquidos o percolaciones, cada lisímetro tiene una profundidad de 0.5 m por 0.5 m de diámetro, dando un total de 0.0982 m³ (98200 cm³).



Figura 3.3 Lisímetros que se utilizaron para simular basureros a cielo abierto.

El estudio de generación se utilizó para conocer qué cantidad y qué residuos sólidos domésticos considerados como peligrosos se generan.

Los lisímetros simulaban basureros a cielo abierto, uno de ellos fue el blanco, es decir no contenía residuos domésticos considerados como peligrosos; los cuatro restantes contenían residuos domésticos considerados como peligrosos en distintos porcentajes que se presentará más adelante.

Durante seis meses (tiempo en que tardan los residuos en generar lixiviados según literatura) los lisímetros se cuidaron, manteniendo las condiciones ideales para la generación de lixiviados. Al término de este tiempo, se extrajo el lixiviado mediante la válvula que se encuentra en la parte inferior de los lisímetros para realizar las pruebas en cada una de las muestras, con el fin de conocer las cantidades de los distintos elementos de los lixiviados que los pudieran hacer un residuos peligrosos.

Durante los meses de febrero, marzo y abril del 2018 las actividades experimentales correspondieron al ajuste de los lisímetros, ya que algunos no se encontraban en condiciones óptimas para poder realizar la simulación. Las actividades consistieron en probar si existía fugas de líquidos y en caso de que las hubiera, se les dio el mantenimiento adecuado, sellando perfectamente las fisuras.

Posterior al proceso de acondicionamiento adecuado para los lisímetros, estos se colocaron en la azotea del edificio de posgrado de ingeniería de la UNAM, para que en el mes de agosto del año 2018 se procediera a montar los basureros y se comenzó a monitorear las condiciones de ph y humedad dentro de los lisímetros. Ver figuras 3.4 y 3.5.



Figura 3.4 Lisímetros en azotea de posgrado de ingeniería. Imagen propia



Figura 3.5 Preparación de lisímetros. Imagen propia

3.3. Procedimiento experimental

Primeramente, los residuos que se colocaron en el interior de los lisímetros corresponden con una procedencia residencial esto es, residuos sólidos domésticos (RSD).

Los RSD se mezclaron con residuos domésticos considerados como peligrosos (RPD), de acuerdo con el porcentaje obtenido a partir del estudio de generación realizado en Villa Olímpica. En el estudio de generación realizado en Villa Olímpica se obtuvo que aproximadamente, el 5% del total de los residuos son RPD; en un estudio de generación

realizado en Mexicali (mencionado en el capítulo 2 de ésta tesis) se encontró que el 4% de los residuos totales en primavera correspondían con RPD; en la alcaldía de Venustiano Carranza, el porcentaje de los RPD fue de 2.27%, con estos estudios se puede observar que, dentro de la República Mexicana, los porcentajes de los RPD oscilan alrededor del 2% al 5%. Con los estudios mencionados se procedió a la asignación de porcentajes de RPD en los lisímetros.

Los porcentajes de residuos domésticos peligrosos (RPD) contenidos en cada uno de los lisímetros se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Porcentajes de RPD contenidos en cada uno de los lisímetros

Número de lisímetro	Porcentaje de RPD
1	5%
2	4%
3	3%
4	2%
5	0%

Con base en los resultados obtenidos en el estudio de generación y en las encuestas de generación realizadas a las personas de Villa Olímpica, se colocarán los RPD de acuerdo con los porcentajes mencionados en la tabla 3.4 es decir, para el primer lisímetro, el 5% de RPD estará compuesto por 55% de detergentes, 5% de botes de pintura y así sucesivamente de acuerdo con la tabla 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5 Volumen de RPD contenidos en lisímetros

RPD	Porcentaje anual	Lisímetro 1, 5% RPD (cm ³)	Lisímetro 2, 4% RPD (cm ³)	Lisímetro 3, 3% RPD (cm ³)	Lisímetro 4, 2% RPD (cm ³)
Destapacaños	1.13	55.72	44.57	33.43	22.29
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	0.47	23.22	18.57	13.93	9.29
Pulidores para muebles	0.43	20.89	16.71	12.54	8.36
Quita sarro	8.23	403.94	323.15	242.37	161.58
Pinturas base solvente (aceite)	2.41	118.40	94.72	71.04	47.36
Solventes (thinner y aguarrás)	1.74	85.32	68.25	51.19	34.13
Pegamentos y adhesivos	2.15	105.63	84.50	63.38	42.25
Removedor de pintura y barniz	1.75	85.90	68.72	51.54	34.36
Tintas para madera	3.40	167.15	133.72	100.29	66.86
Aceite de motor	3.49	171.21	136.97	102.73	68.48
Aceite lubricante gastado	0.71	34.82	27.86	20.89	13.93
Aditivos para gasolina	3.26	160.18	128.15	96.11	64.07
Líquido anticongelante	1.09	53.39	42.72	32.04	21.36
Limpiador de motor	0.65	31.92	25.54	19.15	12.77
Acumuladores/batería ácido-plomo	0.60	29.60	23.68	17.76	11.84
Combustibles	0.07	3.48	2.79	2.09	1.39
Líquido para frenos	1.18	58.04	46.43	34.82	23.22
Conservadores de madera	2.13	104.47	83.57	62.68	41.79
Conservadores de metales	0.71	34.82	27.86	20.89	13.93
Insecticidas	3.06	150.32	120.25	90.19	60.13
Limpiador de alfombras	0.05	2.32	1.86	1.39	0.93
Botes con pintura	4.94	242.60	194.08	145.56	97.04
Detergentes	55.22	2711.53	2169.22	1626.92	1084.61
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	1.12	55.14	44.11	33.08	22.05

Tabla 3.6 Volumen de RD contenidos en lisímetros

Residuos domésticos	Porcentaje	Lisímetro 1, 95% RD (cm ³)	Lisímetro 2, 96% RD (cm ³)	Lisímetro 3, 97% RD (cm ³)	Lisímetro 4, 98% RD (cm ³)	Lisímetro 5, 100% RD (cm ³)
Tetrapak	1.76	1641.56	1658.84	1676.12	1693.40	1727.96
Higiénico	8.49	7921.73	8005.12	8088.50	8171.89	8338.66
Finos	0.79	737.26	745.02	752.78	760.54	776.06
Bolsas	3.37	3143.40	3176.49	3209.58	3242.67	3308.84
Jardinería	0.35	329.41	332.87	336.34	339.81	346.74
Unicel	0.75	697.06	704.40	711.73	719.07	733.75
Papel, periódico	6.09	5677.56	5737.32	5797.09	5856.85	5976.38
Vidrio	8.20	7650.87	7731.40	7811.94	7892.47	8053.54
Orgánicos	51.74	48264.12	48772.16	49280.21	49788.25	50804.34
PET, PAD	3.41	3178.53	3211.99	3245.44	3278.90	3345.82
Plásticos envolturas	0.88	820.78	829.42	838.06	846.70	863.98
Cartón	2.87	2680.52	2708.73	2736.95	2765.16	2821.60
Latas aluminio	1.52	1419.49	1434.43	1449.37	1464.31	1494.20
Otros metales ferrosos	0.52	483.96	489.05	494.15	499.24	509.43
Textil	0.43	398.49	402.68	406.88	411.07	419.46
Otros	4.06	3789.33	3829.22	3869.11	3908.99	3988.77

Dentro de los RPD, según la norma NADF-024-AMBT-2013, como se mencionó en el capítulo 2 de esta tesis, existen más RPD que no se consideraron dentro del experimento de los lisímetros debido a su inexistencia en el estudio de generación realizado en Villa Olímpica.

Los RPD que se omitieron fueron los selladores, limpiadores de carburador, herbicidas y raticidas.

Como primer paso se procedió a recolectar todos los residuos requeridos para montar adecuadamente los lisímetros. Los residuos se consiguieron con los vecinos de la colonia Santo Domingo, Coyoacán y con los vecinos de la colonia Miguel Hidalgo Primera sección, Tlalpan. A ellos se les dio la indicación de que cada tercer día se recolectarían sus residuos separados, únicamente en inorgánicos y orgánicos, para facilitar el proceso de separación. Para este proceso de separación ya no se contó

con método de cuarteo o similar, ya que esto solo se llevó a cabo para obtener los residuos necesarios para realizar el montaje en los lisímetros.

Durante el proceso de recolección, los residuos se colocaron dentro de la cámara de enfriamiento que se encuentra dentro del laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería. Esto ayudó a preservar los residuos deteniendo el proceso de degradación y descomposición.

El proceso para obtener todos los residuos necesarios duró aproximadamente 1 mes (4 semanas).

Al término o inicio de cada semana se procedió a separar los residuos como se clasifican en las tablas 3.5 y 3.6 con el fin de que, al montar los lisímetros, solo se tomaran los residuos de la bolsa adecuada. A continuación, se muestran imágenes propias de este proceso (figuras 3.6, 3.7 y 3.8).



Figura 3.6 Residuos recolectados



Figura 3.7 Proceso de separación manual



Figura 3.8 Residuos clasificados y colocados en distintas bolsas

Todos los residuos se colocaron dentro de los lisímetros con su peso volumétrico exacto correspondiente, como se muestra en las tablas 3.7 y 3.8.

En la tabla 3.8 se muestran los pesos volumétricos de los materiales que contienen el residuo colocado dentro del lisímetro. En el estudio de generación se encontró que los residuos peligrosos se desechaban contenidos en su envase correspondiente, no se

encontró ningún residuo doméstico considerado como peligroso desechado directamente esto es, sin envase.

Tabla 3.7 Peso de cada subproducto colocado en los lisímetros

Residuos domésticos	Densidad (kg/m³)	Lisímetro 1, 95% RD (kg)	Lisímetro 2, 96% RD (kg)	Lisímetro 3, 97% RD (kg)	Lisímetro 4, 98% RD (kg)	Lisímetro 5, 100% RD (kg)
Tetrapak	80.00	0.131	0.133	0.134	0.135	0.138
Higiénico	20.00	0.158	0.160	0.162	0.163	0.167
Finos	481.00	0.355	0.358	0.362	0.366	0.373
Bolsas	50.00	0.157	0.159	0.160	0.162	0.165
Jardinería	101.00	0.033	0.034	0.034	0.034	0.035
Unicel	20.00	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015
Papel, periódico	90.00	0.511	0.516	0.522	0.527	0.538
Vidrio	196.00	1.500	1.515	1.531	1.547	1.578
Orgánicos	291.00	14.045	14.193	14.341	14.488	14.784
PET, PAD	40.00	0.127	0.128	0.130	0.131	0.134
Plásticos envolturas	65.00	0.053	0.054	0.054	0.055	0.056
Cartón	50.00	0.134	0.135	0.137	0.138	0.141
Latas aluminio	89.00	0.126	0.128	0.129	0.130	0.133
Otros metales ferrosos	320.00	0.155	0.156	0.158	0.160	0.163
Textil	65.00	0.026	0.026	0.026	0.027	0.027
Otros	150.00	0.568	0.574	0.580	0.586	0.598

Tabla 3.8 Peso de cada RPD colocado en los lisímetros

RPD	Material	Densidad (kg/m ³)	Lisímetro 1, 5% RPD (g)	Lisímetro 2, 4% RPD (g)	Lisímetro 3, 3% RPD (g)	Lisímetro 4, 2% RPD (g)
Destapacaños	PAD	100.00	5.572	4.457	3.343	2.229
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	PAD	100.00	2.322	1.857	1.393	0.929
Pulidores para muebles	PAD	100.00	2.089	1.671	1.254	0.836
Quita sarro	PAD	100.00	40.394	32.315	24.237	16.158
Pinturas base solvente (aceite)	Aluminio	740.00	87.614	70.091	52.568	35.046
Solventes (thinner y aguarrás)	Vidrio	210.00	17.916	14.333	10.750	7.167
Pegamentos y adhesivos	PAD	100.00	10.563	8.450	6.338	4.225
Removedor de pintura y barniz	PAD	100.00	8.590	6.872	5.154	3.436
Selladores	PAD	100.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Tintas para madera	PAD	100.00	16.715	13.372	10.029	6.686
Aceite de motor	PAD	100.00	17.121	13.697	10.273	6.848
Aceite lubricante gastado	PAD	100.00	3.482	2.786	2.089	1.393
Aditivos para gasolina	PAD	100.00	16.018	12.815	9.611	6.407
Líquido anticongelante	PAD	100.00	5.339	4.272	3.204	2.136
Limpiador de carburador	PAD	100.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Limpiador de motor	PAD	100.00	3.192	2.554	1.915	1.277
Acumuladores/batería ácido-plomo	Metales pesados	900.00	26.639	21.311	15.984	10.656
Combustibles	PAD	100.00	0.348	0.279	0.209	0.139
Líquido para frenos	PAD	100.00	5.804	4.643	3.482	2.322
Conservadores de madera	PAD	100.00	10.447	8.357	6.268	4.179
Conservadores de metales	PAD	100.00	3.482	2.786	2.089	1.393
Insecticidas	Aluminio	740.00	111.235	88.988	66.741	44.494
Herbicidas	PAD	100.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Raticidas	PAD	100.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Limpiador de alfombras	PAD	100.00	0.232	0.186	0.139	0.093
Botes con pintura	PAD	100.00	24.260	19.408	14.556	9.704
Detergentes	PAD	100.00	271.153	216.922	162.692	108.461
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	Blíster PE-LD y aluminio	131.00	7.223	5.778	4.334	2.889

Los envases o residuos voluminosos se cortaron para que el aire interior no utilizara volumen desaprovechado dentro de los lisímetros.

En el caso de los botes de pintura, por ejemplo, se pesó (como se muestra en la figura 3.9) y cortó el envase completo, posteriormente se extrajo toda la pintura seca en el

interior; únicamente la pintura fue colocada dentro de los lisímetros. Así se procedió con los envases similares.



Figura 3.9 Pesaje de bote completo de pintura.

Cabe destacar que, dado el riesgo que conlleva la manipulación de contenedores envasados a altas presiones, como es el caso de los aerosoles, se decidió no modificar su carcasa y colocar su contenido directamente en el lisímetro correspondiente.

El método de mezclado se realizó con base a la norma mexicana NMX-AA-15-1985 en la cual se indica que la mezcla de residuos sólidos se lleva a cabo mediante traspalea con pala y/o biello, hasta homogeneizarlos. Este procedimiento se realizó en la azotea del edificio de posgrado donde se encuentran los lisímetros.

Se colocó plástico sobre el suelo para su protección. Cuando los residuos se pesaban, se colocaban sobre el plástico para poder generar la mezcla homogénea que posteriormente se vertió dentro de los lisímetros mostrados en la figura 3.10.



Figura 3.10 Lisímetros con residuos de acuerdo con las tablas 3.7 y 3.8, 7-sep-2018.

Una vez que los lisímetros se montaron y contenían los residuos adecuados, estos se comenzaron a monitorear. Cada dos o tres veces por semana se revisaba que, en la parte inferior de los lisímetros, se contara con lixiviado.



Figura 3.11 Lisímetros con inicio de generación de lixivados, 16-oct-2018.

La cantidad de precipitación se obtuvo naturalmente en los meses de septiembre a marzo, durante estos meses se contó con una precipitación constante; los datos meteorológicos fueron monitoreados en la página de observatorio hidrológico del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Desde la figura 3.12 a la 3.18 se presentan los hietogramas generados con las lluvias máximas por día, en los meses de septiembre 2018 a marzo 2019, donde se muestra la cantidad de precipitación que cayó sobre los lisímetros de manera natural.

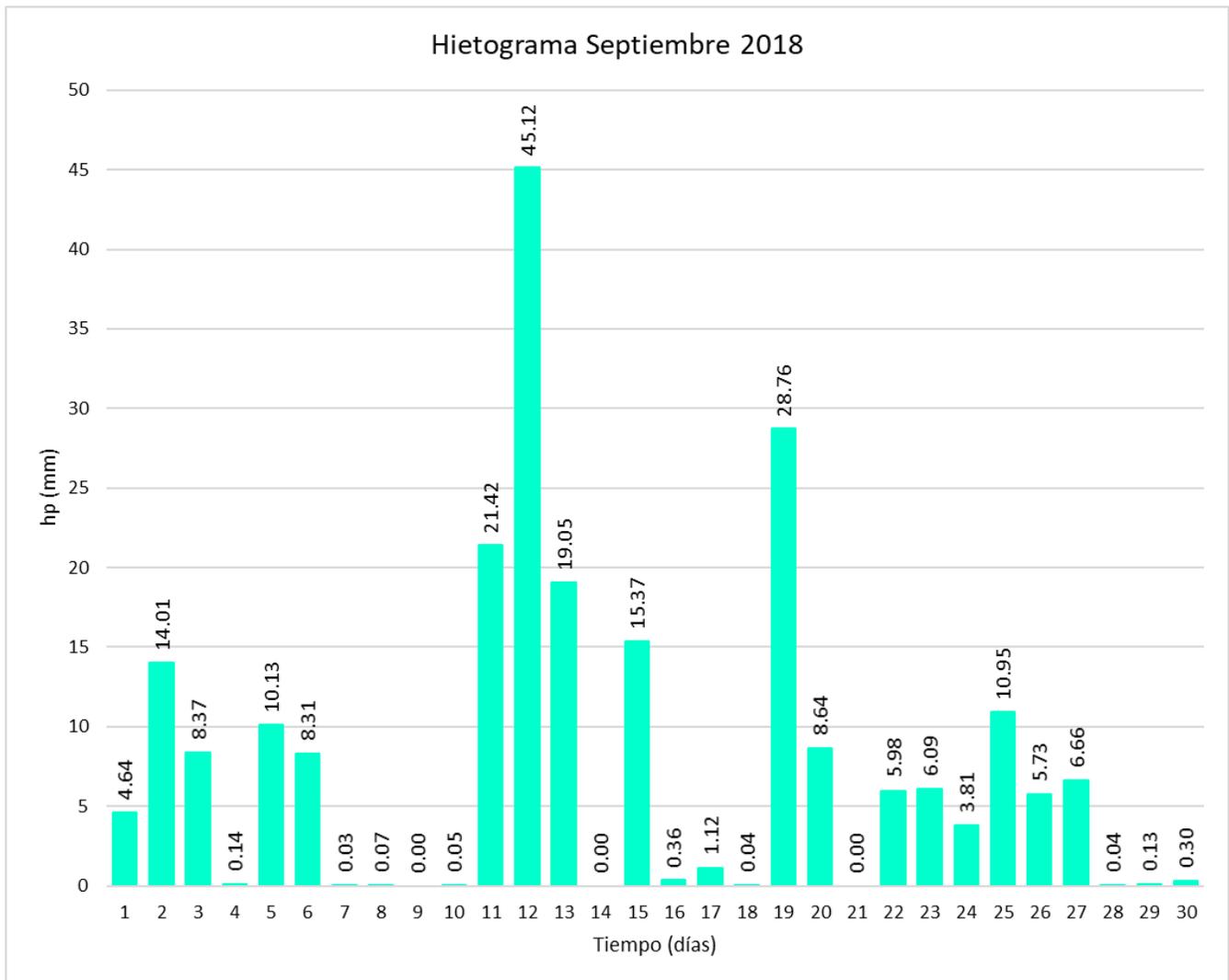


Figura 3.12 Hietograma de septiembre, 2018. Elaboración propia

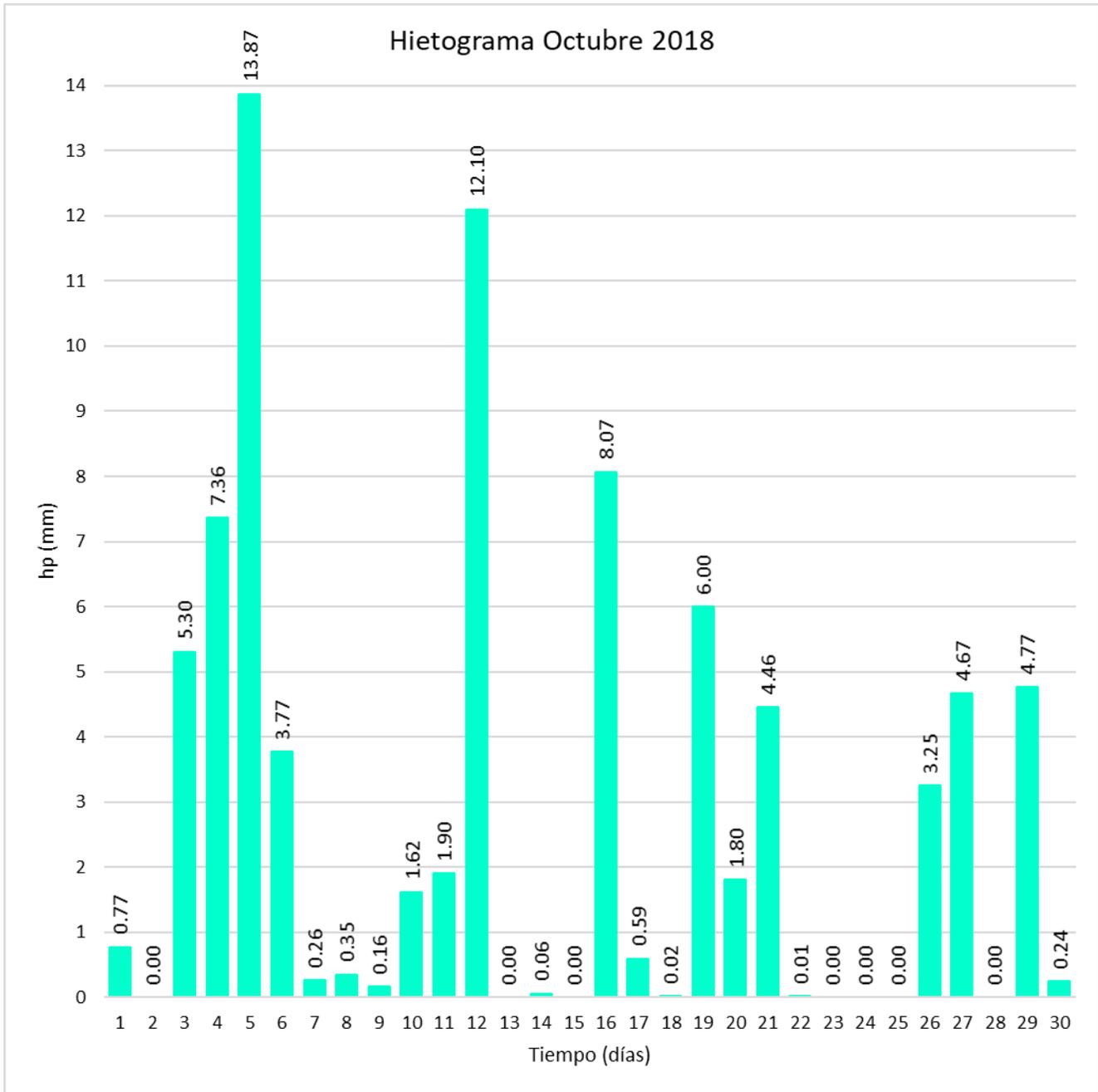


Figura 3.13 Hietograma de octubre, 2018. Elaboración propia

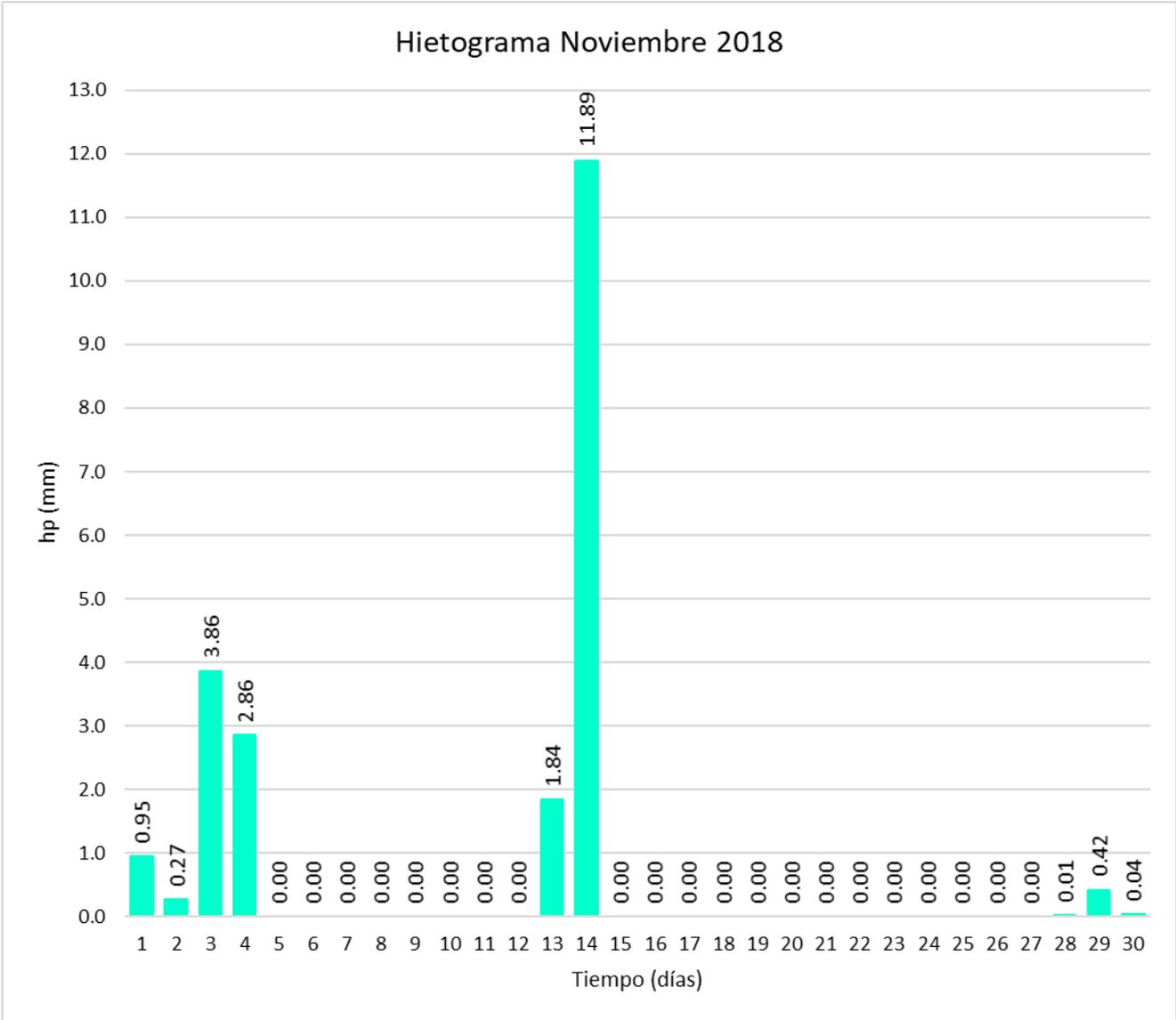


Figura 3.14 Hietograma noviembre, 2018. Elaboración propia

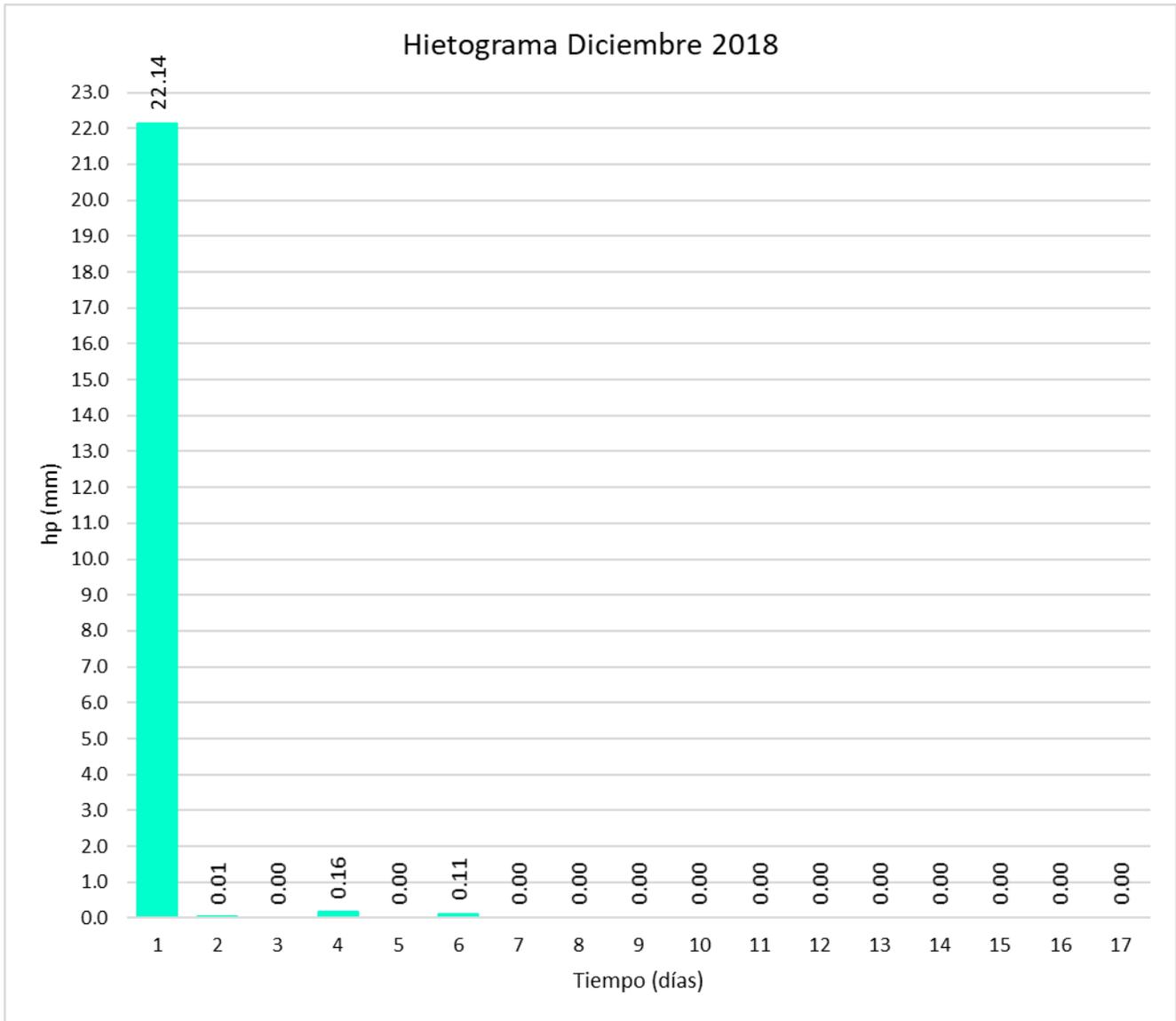


Figura 3.15 Hietograma diciembre, 2018. Elaboración propia

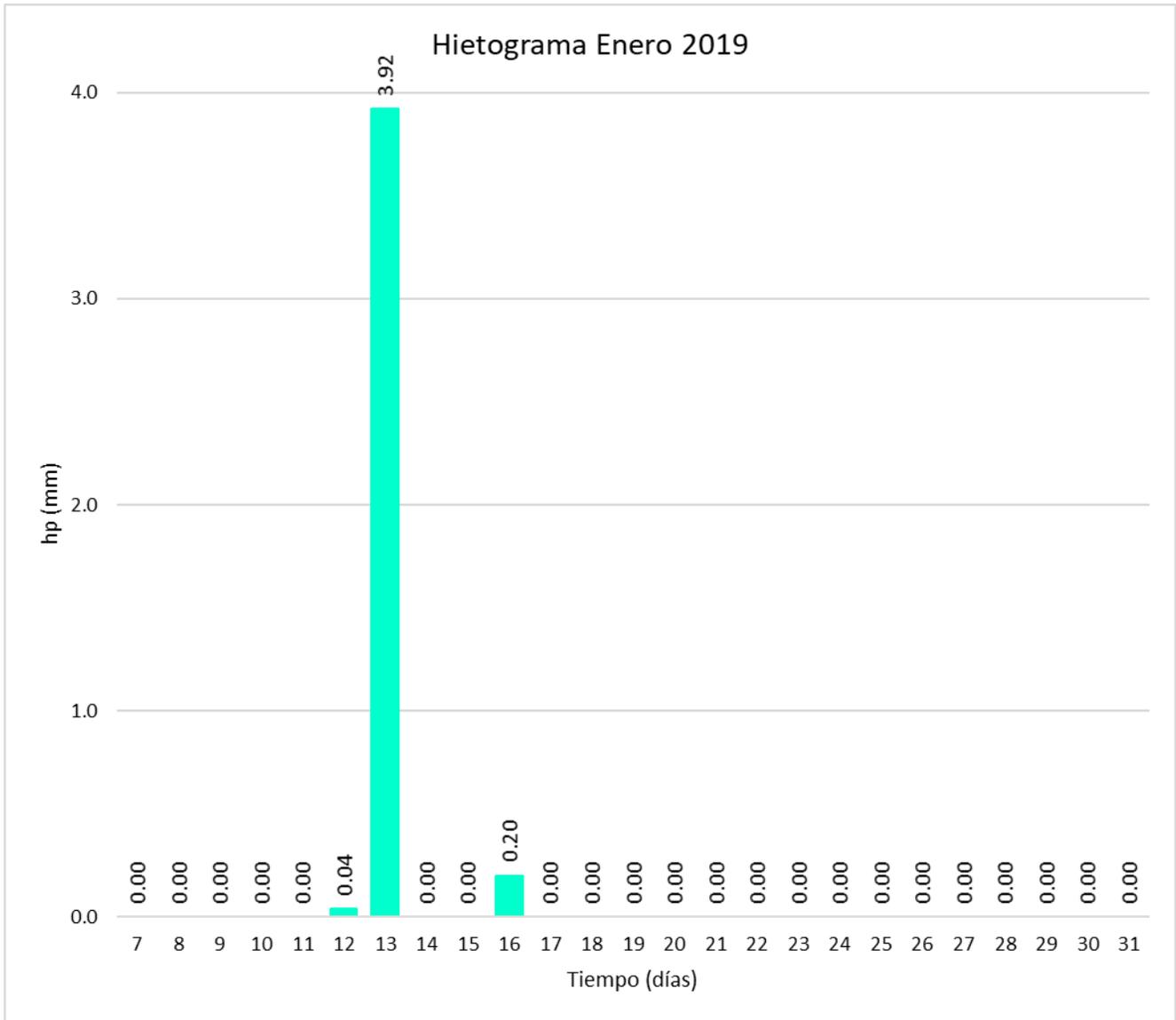


Figura 3.16 Hietograma enero, 2019. Elaboración propia

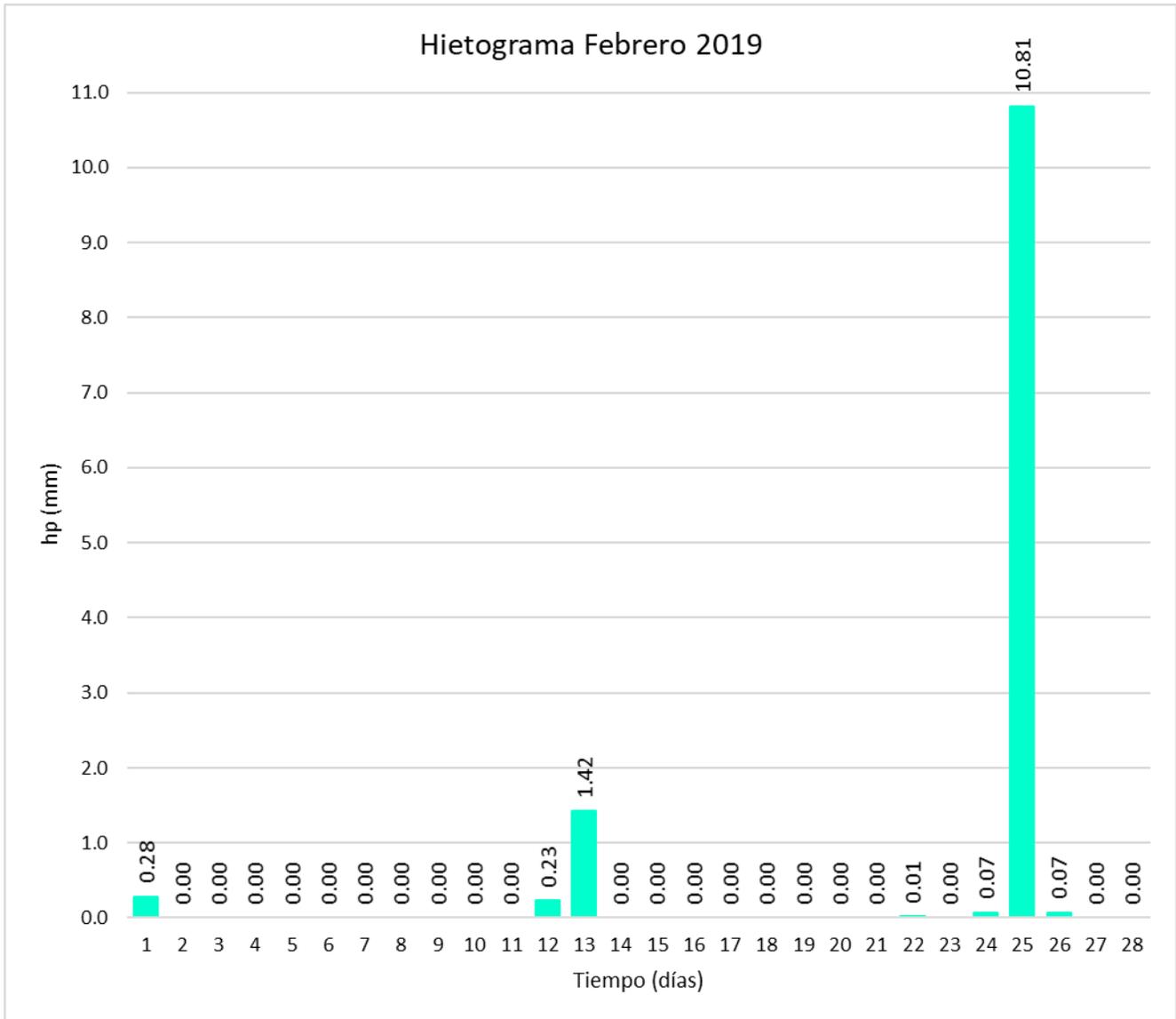


Figura 3.17 Hietograma febrero, 2019. Elaboración propia

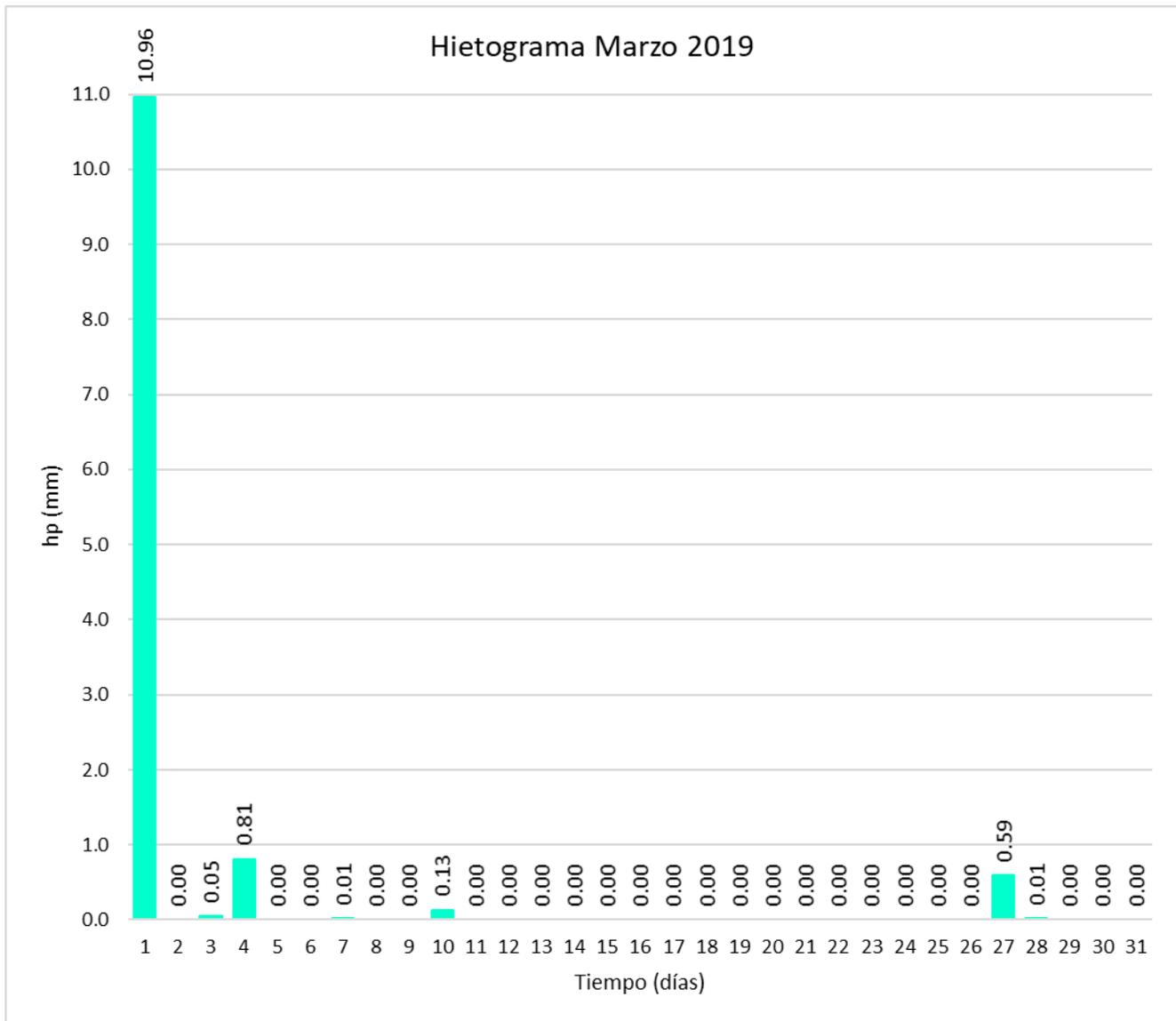


Figura 3.18 Hietograma marzo, 2019. Elaboración propia

A partir de que los lisímetros se instalaron adecuadamente, se monitorearon para que, al iniciar las actividades experimentales en laboratorio, se tuviera la cantidad necesaria de lixiviados de acuerdo con la norma correspondiente de cada parámetro a analizar. Los cálculos correspondientes con la generación de lixiviados, se presentará en el subcapítulo 3.4.

En la figura 3.19 se muestran los lisímetros con gran cantidad de lixiviado generado hasta el mes de noviembre.



Figura 3.19 Lixiviado generado en el fondo de los lisímetros, 16-nov-2018.

Los parámetros por medir, así como el método a utilizar y el laboratorio donde se determinarán las concentraciones contenidas en los lixiviados se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Parámetros y métodos utilizados

Parámetro	Método	Laboratorio
Arsénico	Espectrofotometría de absorción atómica	LISA, FI UNAM
Cadmio	Espectrofotometría de absorción atómica	LISA, FI UNAM
Cromo	Espectrofotometría de absorción atómica	LISA, FI UNAM
DBO ₅	Determinado de acuerdo a la norma NMX-AA-028-SCFI-2001	LISA, FI UNAM
DQO	Determinado de acuerdo al método ISO15705:2002	LISA, FI UNAM
Grasas y aceites	Determinado de acuerdo a la norma NMX-AA-005-SCFI-2000	LISA, FI UNAM
pH	Método electrométrico. Potenciómetro.	LISA, FI UNAM
Plata	Espectrofotometría de absorción atómica	LISA, FI UNAM
Plomo	Espectrofotometría de absorción atómica	LISA, FI UNAM

LISA, FI: Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería

Como se observa en la tabla 3.9, las variables de respuesta corresponden con los parámetros de la primera columna, de izquierda a derecha.

En el subcapítulo 3.4, se muestra el cálculo de los lixiviados generados dentro de los lisímetros colocados en la azotea de posgrado de la facultad de ingeniería, UNAM.

3.4. Cálculo de lixiviados generados

Como se mencionó en el subcapítulo 2.2.1, Cuantificación de lixiviados, existen diversos métodos para el cálculo de lixiviados generados, el que se utilizó en esta tesis es el propuesto por George Tchobanoglous (1993), ya que es el más adecuado debido a que engloba la humedad de los residuos y la precipitación; éstos son los dos términos de la ecuación 2.1 que se tienen dentro de los lisímetros y que influyen en la generación de los lixiviados.

Los otros métodos mencionados en el capítulo correspondiente se utilizan cuando los residuos cuentan con una capa de cubierta conteniendo algún tipo de suelo y vegetación. En esta tesis, los lisímetros se están simulando como basureros a cielo abierto, por lo que no cuentan con un material de cobertura.

De acuerdo con la ecuación 2.3 del subcapítulo 2.2.1, la cantidad de humedad por peso volumétrico de cada residuo, con la que cuenta cada lisímetro, se muestra en las tablas 3.10 y 3.11.

Tabla 3.10 Peso volumétrico de humedad por residuo. Residuos domésticos

Peso volumétrico de humedad por cada residuo

Residuos domésticos	Porcentaje de humedad	Lisímetro 1, 95% RD (kg/m ³)	Lisímetro 2, 96% RD (kg/m ³)	Lisímetro 3, 97% RD (kg/m ³)	Lisímetro 4, 98% RD (kg/m ³)	Lisímetro 5, 100% RD (kg/m ³)
Tetrapak	5%	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070
Higiénico	6%	0.102	0.102	0.102	0.102	0.102
Finos	8%	0.304	0.304	0.304	0.304	0.304
Bolsas	2%	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
Jardinería	80%	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285
Unicel	2%	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Papel, periódico	6%	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329
Vidrio	2%	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321
Orgánicos	70%	105.385	105.385	105.385	105.385	105.385
PET, PAD	2%	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
Plásticos envolturas	2%	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
Cartón	5%	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
Latas aluminio	3%	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
Otros metales ferrosos	3%	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
Textil	10%	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
Otros	15%	0.914	0.914	0.914	0.914	0.914
Total (kg/m³) =		107.977	107.977	107.977	107.977	107.977

El porcentaje de humedad fue tomado de la tabla 4-1 del libro de Tchobanoglous, 1993.

Tabla 3.11 Peso volumétrico de humedad por residuo. Residuos domésticos peligrosos

Peso volumétrico de humedad por cada residuo

RPD	Material	Porcentaje de humedad	Lisímetro 1, 5% RPD (kg/m ³)	Lisímetro 2, 4% RPD (kg/m ³)	Lisímetro 3, 3% RPD (kg/m ³)	Lisímetro 4, 2% RPD (kg/m ³)
Destapacaños	PAD	2%	0.023	0.023	0.023	0.023
Pulidores y limpiadores para metales y recubrimientos	PAD	2%	0.009	0.009	0.009	0.009
Pulidores para muebles	PAD	2%	0.009	0.009	0.009	0.009
Quita sarro	PAD	2%	0.165	0.165	0.165	0.165
Pinturas base solvente (aceite)	Aluminio	2%	0.357	0.357	0.357	0.357
Solventes (thinner y aguarrás)	Vidrio	2%	0.073	0.073	0.073	0.073
Pegamentos y adhesivos	PAD	2%	0.043	0.043	0.043	0.043
Removedor de pintura y barniz	PAD	2%	0.035	0.035	0.035	0.035
Selladores	PAD	2%	0.000	0.000	0.000	0.000
Tintas para madera	PAD	2%	0.068	0.068	0.068	0.068
Aceite de motor	PAD	2%	0.070	0.070	0.070	0.070
Aceite lubricante gastado	PAD	2%	0.014	0.014	0.014	0.014
Aditivos para gasolina	PAD	2%	0.065	0.065	0.065	0.065
Líquido anticongelante	PAD	2%	0.022	0.022	0.022	0.022
Limpiador de carburador	PAD	2%	0.000	0.000	0.000	0.000
Limpiador de motor	PAD	2%	0.013	0.013	0.013	0.013
Acumuladores/batería ácido-plomo	Metales pesados	0%	0.000	0.000	0.000	0.000
Combustibles	PAD	2%	0.001	0.001	0.001	0.001
Líquido para frenos	PAD	2%	0.024	0.024	0.024	0.024
Conservadores de madera	PAD	2%	0.043	0.043	0.043	0.043
Conservadores de metales	PAD	2%	0.014	0.014	0.014	0.014
Insecticidas	Aluminio	2%	0.453	0.453	0.453	0.453
Herbicidas	PAD	2%	0.000	0.000	0.000	0.000
Raticidas	PAD	2%	0.000	0.000	0.000	0.000
Limpiador de alfombras	PAD	2%	0.001	0.001	0.001	0.001
Botes con pintura	PAD	2%	0.099	0.099	0.099	0.099
Detergentes	PAD	2%	1.104	1.104	1.104	1.104
Medicamentos caducos para humanos o mascotas	Blister PE-LD y aluminio	1%	0.015	0.015	0.015	0.015
Total (kg/m³) =			2.719	2.719	2.719	2.719

El porcentaje de humedad fue tomado de la tabla 4-1 del libro de Tchobanoglous, 1993.

Para el cálculo del agua filtrada superiormente (precipitación pluvial) se tomaron en cuenta los datos obtenidos de la base de datos del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería, UNAM. La estación climatológica utilizada es la que se encuentra en la torre principal del Instituto de Ingeniería en Ciudad Universitaria, UNAM. En la tabla 3.12 se muestran los valores de precipitación obtenidos por mes.

Tabla 3.12 Precipitación por día de los meses considerados para la generación de lixiviados.

t (días) / Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
	hp (mm)	hp (mm)	hp (mm)	hp (mm)	hp (mm)	hp (mm)
1	4.64	0.77	0.95	22.14		0.28
2	14.01	0.00	0.27	0.01		0.00
3	8.37	5.30	3.86	0.00		0.00
4	0.14	7.36	2.86	0.16		0.00
5	10.13	13.87	0.00	0.00		0.00
6	8.31	3.77	0.00	0.11		0.00
7	0.03	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.07	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.05	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00
11	21.42	1.90	0.00	0.00	0.00	0.00
12	45.12	12.10	0.00	0.00	0.04	0.23
13	19.05	0.00	1.84	0.00	3.92	1.42
14	0.00	0.06	11.89	0.00	0.00	0.00
15	15.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.36	8.07	0.00	0.00	0.20	0.00
17	1.12	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.04	0.02	0.00		0.00	0.00
19	28.76	6.00	0.00		0.00	0.00
20	8.64	1.80	0.00		0.00	0.00
21	0.00	4.46	0.00		0.00	0.00
22	5.98	0.01	0.00		0.00	0.01
23	6.09	0.00	0.00		0.00	0.00
24	3.81	0.00	0.00		0.00	0.07
25	10.95	0.00	0.00		0.00	10.81
26	5.73	3.25	0.00		0.00	0.07
27	6.66	4.67	0.00		0.00	0.00
28	0.04	0.00	0.01		0.00	0.00
29	0.13	4.77	0.42		0.00	
30	0.30	0.24	0.04		0.00	
31					0.00	
Total (mm) =	225.32	81.40	22.14	22.42	4.16	12.89
Total (kg/m²) =	225.32	81.40	22.14	22.42	4.16	12.89

Los espacios en blanco, dentro de la tabla 3.12, significan que no se cuenta con dato, de altura de precipitación, para el día correspondiente.

A continuación, con ayuda del método de balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite y con ayuda de las ecuaciones 2.7 a 2.10, colocadas en el subcapítulo 2.2.1 de esta tesis, se calculó la evaporación mensual.

$$I = 33.575 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$a = 0.49239 + (179 \times 10^{-5})I - (771 \times 10^{-7})I^2 + (675 \times 10^{-9})I^3 = 0.491$$

La evaporación potencial mensual, se deberá de corregir con los datos mostrados en la tabla 3.13 para cada mes, los cuales están en función de la latitud del sitio de estudio.

Tabla 3.13 Valores de corrección para la evaporación potencial de acuerdo al mes y latitud del sitio (Aparicio Mijares, 1992)

Longitud en grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.79	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Las coordenadas GPS para Las Islas, Ciudad Universitaria son:

Latitud: 19.3329456

Longitud: -99.1851108

Utilizando los valores de corrección para una longitud de 20°, la evaporación mensual tiene los valores de la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Valores de la evaporación potencial mensual.

Mes-Año	Temperatura (°C)	ij	Evap. Pot. Sin Corregir (mm)	Factor de corrección	Evap. Pot. Ajustada (mm)
sep-18	17.31	6.522	35.805	1.02	36.521
oct-18	16.47	6.050	34.941	1.00	34.941
nov-18	15.08	5.296	33.460	0.93	31.118
dic-18	13.97	4.718	32.227	0.91	29.326
ene-19	13.83	4.647	32.068	0.95	30.464
feb-19	16.99	6.341	35.478	0.90	31.930
Total =					194.300

El total de lixiviados que se tuvo por cada lisímetro al inicio de la extracción para su análisis se muestra en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Cantidad de lixiviado contenido por lisímetro al inicio de los análisis

Lisímetro	Humedad en residuos (kg/m ³)	Precipitación total (kg/m ²)	Evaporación (kg/m ²)	Lixiviados (kg/m ²)	Lixiviado (l)
1	110.70	368.33	194.30	284.73	55.81
2	110.70	368.33	194.30	284.73	55.81
3	110.70	368.33	194.30	284.73	55.81
4	110.70	368.33	194.30	284.73	55.81
5	107.98	368.33	194.30	282.01	55.27

Con esto se aseguró que el lixiviado fuera suficiente para proceder con los análisis en laboratorio, la metodología utilizada se presenta a continuación.

3.5. Metodología de las pruebas en laboratorio

Los análisis que se realizaron para determinar la peligrosidad de los residuos domésticos considerados como peligrosos fueron de acuerdo a cada norma y metodología correspondiente, las normas y metodologías se mencionaron en la tabla 3.8 de esta tesis.

Algunos ajustes que se tuvieron que realizar, de acuerdo con las pruebas presuntivas realizadas, fueron los siguientes:

- De acuerdo con la norma NMX-AA-005-SCFI-2000, para extracción de grasas y aceites, el volumen de hexano que se colocó en el equipo soxhlet fue de 130 ml. Este volumen permitió que los ciclos pudieran llevarse de manera completa.
- El filtrado se realizó con varios papeles filtro debido a que la muestra contenía bastantes sólidos, ver figura 3.20. Una vez que los sólidos eran retirados, se procedía a pasar la muestra por el filtro del N° 42, como lo indica la norma. Todos los papeles utilizados para el filtrado fueron colocados en el cartucho de extracción y posteriormente en el equipo soxhlet.



Figura 3.20 Extracción de grasas y aceites. Imagen propia

- Al término de las 4 horas de digestión, de acuerdo con la norma correspondiente, los matraces de bola se colocaron en un rotavapor *Buchi R110* (figura 3.21) para extraer el hexano y preservar en ellos únicamente las grasas y aceites.
- Posteriormente, los matraces se colocaron en un horno, finalmente en un desecador para poder obtener el peso final de las grasas y aceites.



Figura 3.21 Rotavapor y balanza para obtener peso final de matraz con grasas y aceites. Imagen propia.

Para determinar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se realizó de acuerdo al método ISO15705:2002, con viales de alta densidad, con un rango de 0 a 15000 mg/L.

El equipo utilizado para la digestión de las muestras fue un equipo HACH COD Reactor y las lecturas de los valores de DQO se realizaron en un equipo HACH DR/2010 Portable Datalogging Spectrophotometer. Ver figura 3.22.

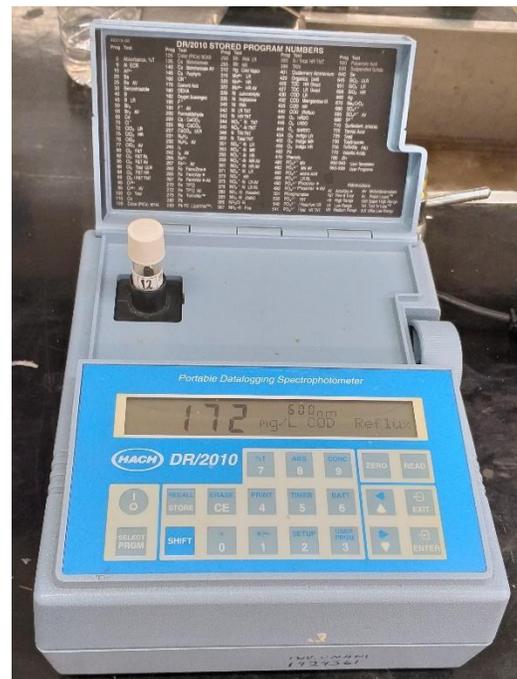


Figura 3.22 Reactor y espectrofotómetro de lecturas de DQO. Imagen propia

Las determinaciones de DBO_5 se obtuvieron de acuerdo con la norma NMX-AA-028-SCFI-2001. El agua de dilución con los nutrientes necesarios se preparó dentro del laboratorio de ambiental y sanitaria del posgrado, en la Facultad de Ingeniería como se muestra en la figura 3.23.



Figura 3.23 Preparación de nutrientes para agua de dilución. Imagen propia

Las muestras se colocaron en una incubadora a 20°C por 5 días. Al inicio y al término del tiempo, el Oxígeno Disuelto (OD) se leyó con un equipo YSI modelo 58 Dissolved Oxygen Meter mostrado en la figura 3.24.



Figura 3.24 Incubadora con las muestras y toma de OD. Imagen propia.

Las lecturas de pH se realizaron con un potenciómetro eléctrico Corning pH meter model 7, ver figura 3.25.



Figura 3.25 Toma de lecturas de pH para los lisímetros 3 y 5. Imagen propia.

Para las lecturas de metales, primero se realizó una extracción de ellos con 15 ml de ácido nítrico concentrado, vertido en 200 ml de muestra. El vaso de precipitado, con el ácido nítrico y la muestra, se colocó tapado en una parrilla eléctrica *Thermolyne type 1900 hot plate* a una temperatura de 190° C, esto permitió una recirculación de los líquidos evaporados. También se utilizó una parrilla eléctrica *Cole Parmer* para la extracción de metales. Las muestras se dejaron calentando durante 5 horas. Al término del tiempo se filtraron las muestras con papel filtro de poro 0.45 μm , se realizó esto para evitar la obstrucción del equipo de espectrofotometría de absorción atómica.

Las muestras se colocaron en botellas herméticas y se aseguró un pH < 2 para su posterior lectura en el espectrofotómetro mostrada en la figura 3.26.

Se extrajeron 3 muestras por cada lisímetro, a cada muestra se le aplicó la misma técnica de extracción de metales descrita anteriormente.



Figura 3.26 Muestras en parrilla para extracción de metales y finalmente vertidas en botellas para su posterior análisis. Imagen propia

Los metales que leyeron en el espectrofotómetro de absorción atómica GBC Avanta (figura 3.27) fueron arsénico, cadmio, cromo, plata y plomo que son los correspondientes con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.



Figura 3.27 Toma de lecturas en equipo de absorción atómica. Imagen propia.

Como se puede observar en la figura 3.27, en el espectrofotómetro de absorción atómica, se analizaron 16 muestras, colocadas en botellas de poliuretano. Quince de ellas correspondientes con los lixiviados digeridos y una de ellas, correspondiente con el blanco.

El blanco se realizó con agua destilada, utilizando el mismo proceso de digestión realizado a los lixiviados de los diferentes lisímetros.

4. RESULTADOS Y SU EVALUACIÓN

A continuación se presentarán los resultados obtenidos en laboratorio para cada una de las pruebas realizadas y descritas en el capítulo anterior.

4.1. Resultados de pH

En la tabla 4.1 y figura 4.1 se muestran los resultados por semana obtenidos de pH dentro de los lixiviados.

Tabla 4.1 Valores de pH diario por lisímetro.

Lisímetro/ Fecha	Semana 1				Semana 2			Semana 3		
	20-feb-19	21-feb-19	22-feb-19	25-feb-19	26-feb-19	28-feb-19	01-mar-19	05-mar-19	06-mar-19	07-mar-19
	pH									
1	7.30	7.40	6.90	6.90	7.10	7.00	6.90	7.00	6.80	6.90
2	7.50	7.50	7.10	6.90	7.20	7.00	7.00	7.00	6.90	6.95
3	7.30	7.50	7.20	7.10	7.30	7.20	7.20	7.30	7.15	7.25
4	6.90	7.10	6.80	6.90	6.90	6.80	6.80	7.00	6.75	6.90
5	6.80	7.00	6.80	6.90	6.80	6.90	6.80	7.00	6.80	6.90

Lisímetro/ Fecha	Semana 4					Semana 5			
	12-mar-19	13-mar-19	14-mar-19	15-mar-19	19-mar-19	20-mar-19	21-mar-19	22-mar-19	
	pH								
1	7.00	6.90	6.70	6.75	6.70	6.80	6.80	6.90	
2	7.15	7.15	6.95	7.15	7.00	7.30	7.20	7.20	
3	7.40	7.40	7.20	7.40	7.15	7.50	7.40	7.35	
4	7.00	6.95	6.80	6.90	6.70	7.00	6.90	6.90	
5	6.80	6.95	6.80	6.80	6.70	7.10	7.00	6.90	

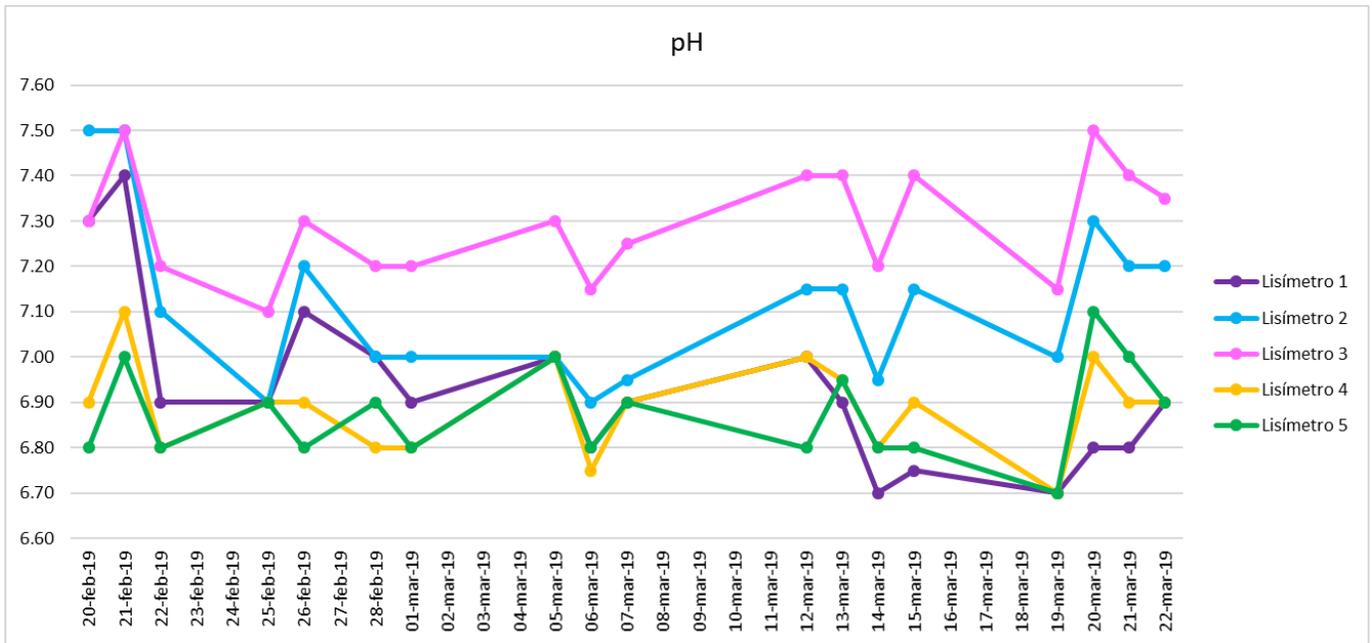


Figura 4.1 Gráfico de resultados de pH por lisímetro, por día.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de pH, de acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, apartado 7.2.1, para que un residuo sea considerado como peligroso, tiene que cumplir con características de corrosividad esto es, que el residuo tenga un valor de $\text{pH} \leq 2$ o bien, mayor o igual a 12.5. Como se podrá observar en la tabla 4.1, el valor de pH en los lixiviados oscila entre 6.70 y 7.50, por lo que no es considerado como residuo peligroso, bajo esta característica.

4.2. Resultados de grasas y aceites

En la tabla 4.2, se muestran los resultados de las grasas y aceites por lisímetro, por semana. En caso de que se requiera, todas las consideraciones para el análisis, por semana, se muestran en las tablas de los anexos.

Tabla 4.2 Resultados de grasas y aceites por semana.

Lisímetro/Fecha	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
	18-feb-19	25-feb-19	04-mar-19	11-mar-19	19-mar-19
	GyA (mg/L)				
1	11496.6	25.6	32.3	41.3	65.5
2	97.4	34.7	92.5	10.1	21.4
3	84.7	3.0	7.3	9.5	4.4
4	14.3	18.7	4.8	7.1	1.0
5	27.3	149.0	13.6	12.0	4.8

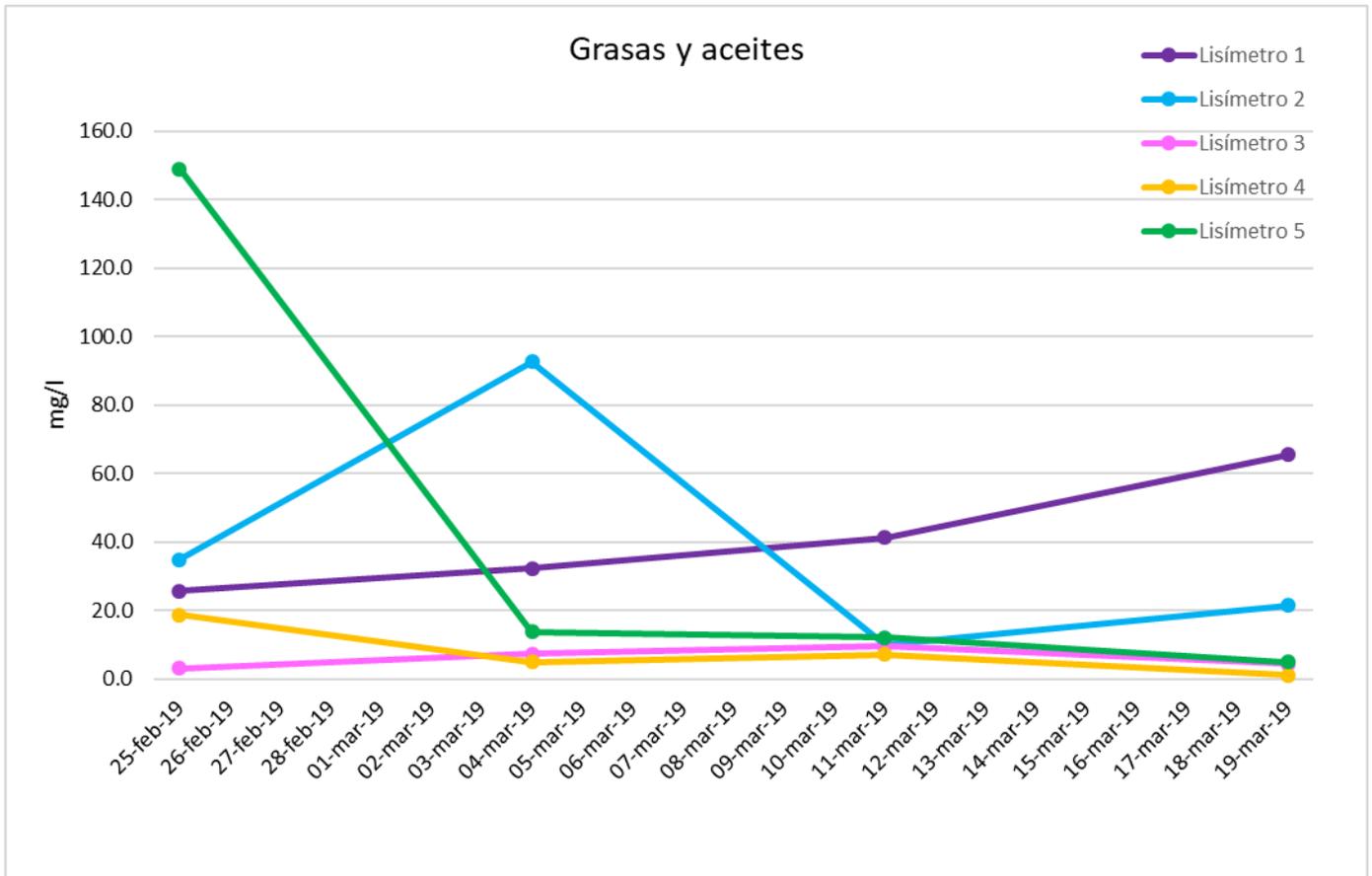


Figura 4.2 Valores de grasas y aceites por semana, por lisímetro.

Con los valores obtenidos de grasas y aceites se puede observar en la figura 4.2 que las grasas sí están presentes en los lixiviados esto es, existe un arrastre considerable de ellas, sin separación de mezcla por diferencia de densidades, sobre todo en los lisímetros 1 y 2 que corresponden con los lisímetros que contaban con mayor cantidad de RPD, 5% y 4%, respectivamente.

4.3. Resultados de DBO₅ y DQO

Los valores de DBO₅, así como DQO se muestran en las tablas 4.3 y 4.4, respectivamente. Si se requiere ver porcentaje de dilución, así como otras consideraciones para la determinación de estos parámetros, dirigirse a tablas de anexos.

Tabla 4.3 Valores obtenidos de DBO₅ por semana, por lisímetro.

Lisímetro/ Fecha	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4		Semana 5	
	20-feb-19	22-feb-19	27-feb-19	01-mar-19	06-mar-19	08-mar-19	13-mar-19	15-mar-19	20-mar-19	22-mar-19
	DBO ₅ (mg/L)									
1	799.33	641.00	765.67	792.00	649.33	652.67	627.67	618.67	758.00	626.33
2	697.00	582.33	522.00	379.00	284.67	547.00	240.67	80.50	198.67	189.50
3	899.33	58.00	258.33	86.00	99.67	105.50	209.50	210.00	224.00	43.50
4	390.00	201.33	57.50	97.33	79.67	47.50	218.67	11.50	286.00	52.00
5	500.33	204.33	316.33	163.67	218.00	76.67	7.00	166.50	211.67	110.33

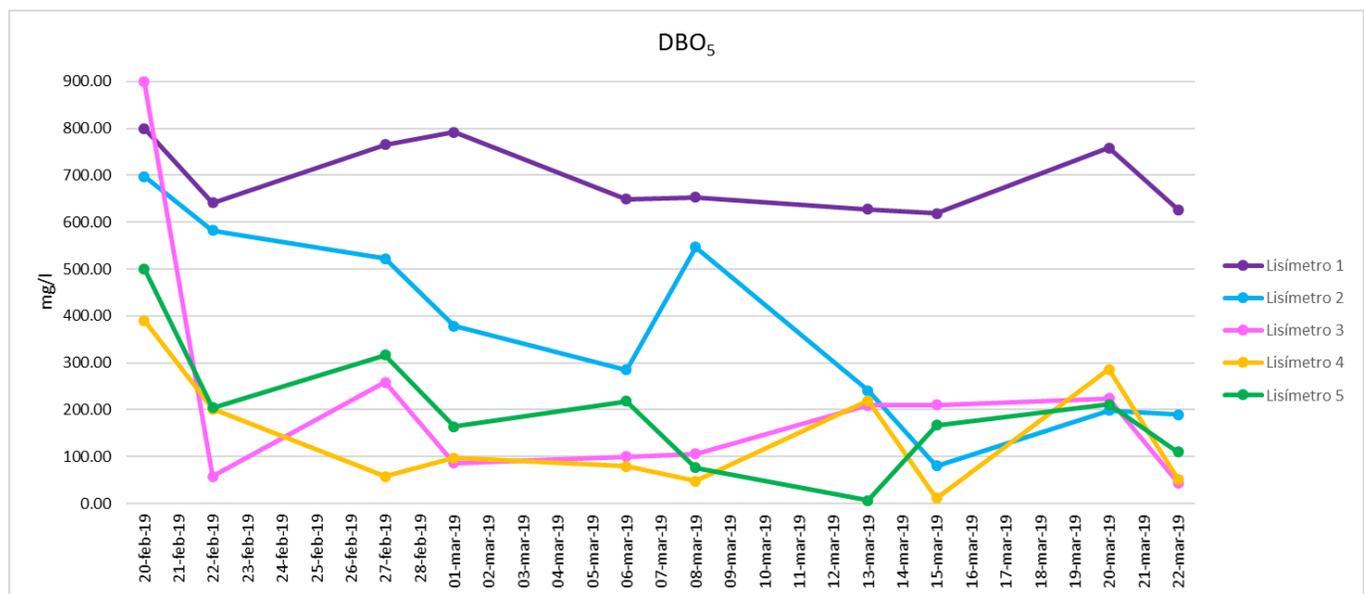


Figura 4.3 Valores de DBO₅ por lisímetro, por semana.

Tabla 4.4 Valores de DQO obtenidos por lisímetro, por semana.

Lisímetro/ Fecha	Semana 1		Semana 2		Semana 3		Semana 4		Semana 5	
	20-feb-19	21-feb-19	26-feb-19	28-feb-19	05-mar-19	07-mar-19	12-mar-19	14-mar-19	19-mar-19	21-mar-19
	DQO (mg/L)									
1	1660.0	4500.0	2660.0	2190.0	1710.0	1643.3	1853.3	1516.7	1270.0	1216.7
2	1632.0	3600.0	1720.0	823.3	876.7	760.0	783.3	496.7	450.0	440.0
3	626.0	100.0	290.0	370.0	240.0	223.3	216.7	190.0	286.7	230.0
4	598.0	400.0	210.0	200.0	186.7	166.7	143.3	143.3	140.0	160.0
5	564.0	100.0	720.0	363.3	376.7	256.7	230.0	183.3	253.3	170.0

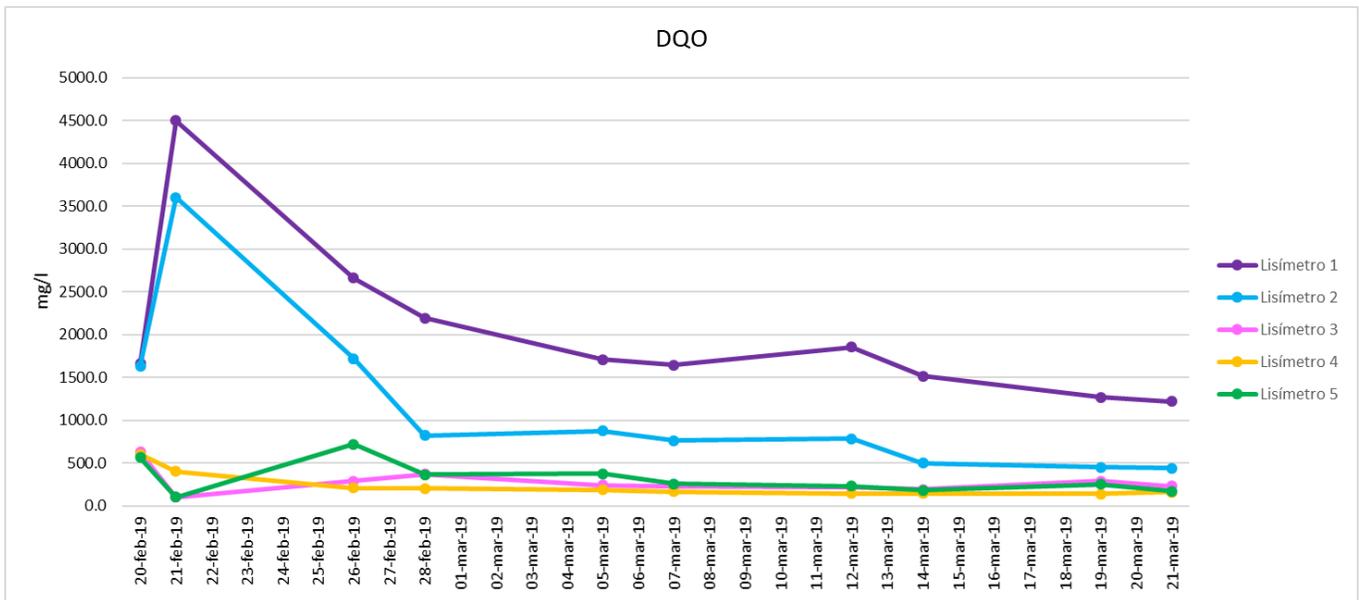


Figura 4.4 Valores de DQO por semana, por lisímetro.

Al comparar los valores obtenidos de DBO₅ y DQO (figuras 4.3 y 4.4) con los valores típicos de un lixiviado (tablas 2.13 y 2.14 de esta tesis) se puede observar que, los valores de los lixiviados, en los lisímetros, son más bajos. En la tabla 2.13 se menciona un rango de DBO₅ entre 2000 y 30000 mg/L, los valores en los lisímetros oscilan entre valores de 7 y 900 mg/L.

Del mismo modo, los valores normales para DQO (tabla 2.13) se encuentran en un rango entre 3000 y 45000 mg/L, en los lixiviados analizados en esta tesis se obtuvieron valores entre 100 y 4500 mg/L. Estos valores se aproximan a los valores comunes de un lixiviado.

En las tablas 4.3 y 4.4, se puede observar que los resultados fueron mayores en los lisímetros 1 y 2, correspondientes con un porcentaje de RPD de 5% y 4%, respectivamente.

4.4. Resultados de contenido de metales y metaloides

El contenido de cada botella, para los análisis de plata, arsénico, cromo y cadmio se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Contenido de cada botella analizada en el espectrofotómetro de absorción

Número de botella	Contenido
1	Blanco, agua destilada
2	Lixiviado, lisímetro 1
3	Lixiviado, lisímetro 1
4	Lixiviado, lisímetro 1
5	Lixiviado, lisímetro 2
6	Lixiviado, lisímetro 2
7	Lixiviado, lisímetro 2
8	Lixiviado, lisímetro 3
9	Lixiviado, lisímetro 3
10	Lixiviado, lisímetro 3
11	Lixiviado, lisímetro 4
12	Lixiviado, lisímetro 4
13	Lixiviado, lisímetro 4
14	Lixiviado, lisímetro 5
15	Lixiviado, lisímetro 5
16	Lixiviado, lisímetro 5

Para el análisis de plomo, las muestras se cambiaron de orden al analizarlas en el espectrofotómetro, no así el contenido de las botellas. Siendo la muestra 1 el lixiviado del lisímetro 1 y la muestra 16 el agua destilada (blanco).

En las tablas siguientes se muestran los resultados obtenidos para las determinaciones de metales, en algunos casos se realizaron con 3, 4 o 5 réplicas por botella.

Tabla 4.6 Concentración de plata por botella

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates			
1	ND	14.53	0.0044	0.0045	0.0049	0.0037	
2	ND	2.06	0.0034	0.0035	0.0033	0.0034	
3	ND	9.70	0.0025	0.0023	0.0027	0.0023	
4	ND	7.65	0.0025	0.0024	0.0027	0.0023	
5	ND	9.80	0.0027	0.0025	0.0027	0.0030	
6	ND	2.88	0.0030	0.0031	0.0029	0.0030	
7	ND	HIGH	0.0014	0.0007	0.0021	0.0015	
8	ND	10.48	0.0026	0.0023	0.0026	0.0028	
9	ND	1.63	0.0028	0.0028	0.0027	0.0028	
10	ND	18.39	0.0025	0.0029	0.0020	0.0025	
11	ND	7.30	0.0030	0.0029	0.0033	0.0029	
12	ND	17.13	0.0029	0.0026	0.0035	0.0027	
13	ND	HIGH	0.0024	0.0020	0.0019	0.0032	
14	ND	10.20	0.0030	0.0029	0.0027	0.0033	
15	ND	4.86	0.0036	0.0034	0.0036	0.0037	
16	ND	15.47	0.0036	0.0030	0.0038	0.0040	

En la tabla 4.7 se muestran los valores del contenido de arsénico en los lixiviados.

Tabla 4.7 Concentración de arsénico por botella

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
1	ND	HIGH	0.0029	0.0181	0.0050	-0.0263
				-0.0225	0.0403	
2	ND	HIGH	-0.0065	0.0093	0.0087	-0.0087
				-0.0314	-0.0104	
3	ND	HIGH	0.0134	-0.0010	0.0099	0.0113
				0.0300	0.0170	
4	ND	HIGH	0.0144	-0.0008	0.0066	0.0132
				0.0337	0.0195	
5	ND	HIGH	0.0147	0.0213	-0.0020	0.0297
				0.0282	-0.0035	
6	ND	HIGH	0.0146	0.0056	0.0213	0.0247
				-0.0012	0.0226	
7	ND	HIGH	0.0159	0.0261	-0.0160	0.0069
				0.0278	0.0347	
8	-0.050	HIGH	0.0265	0.0160	0.0268	0.0331
				0.0139	0.0430	
9	0.094	HIGH	0.0298	0.0395	0.0518	-0.0146
				0.0314	0.0409	
10	-0.429	HIGH	0.0180	0.0126	0.0336	-0.0039
				0.0220	0.0256	
11	-0.341	HIGH	0.0200	0.0463	0.0113	0.0209
				-0.0154	0.0368	
12	ND	HIGH	0.0102	-0.0131	0.0154	-0.0024
				0.0409	0.0102	
13	ND	HIGH	0.0123	0.0170	0.0264	0.0263
				0.0132	-0.0213	
14	-0.104	HIGH	0.0253	0.0347	0.0142	0.0240
				0.0281	0.0256	
15	ND	HIGH	-0.0023	0.0079	0.0005	0.0082
				-0.0120	-0.0162	
16	ND	HIGH	0.0048	0.0008	-0.0111	0.0288
				0.0136	-0.0083	

Tabla 4.8 Concentración de cromo por botella

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Sample 1	-0.568	HIGH	-0.0003	-0.0002	-0.0005	-0.0011
				0.0007		
Sample 2	-0.485	HIGH	0.0004	0.0006	-0.0004	-0.0006
				0.0022		
Sample 3	-0.571	HIGH	-0.0003	-0.0028	0.0004	0.0011
				0.0001		
Sample 4	-0.534	HIGH	-0.0000	0.0015	0.0000	-0.0014
				-0.0001		
Sample 5	-0.594	HIGH	-0.0005	0.0006	-0.0008	-0.0012
				-0.0007		
Sample 6	-0.575	HIGH	-0.0004	-0.0007	0.0009	-0.0011
				-0.0006		
Sample 7	-0.587	HIGH	-0.0005	-0.0004	-0.0007	-0.0018
				0.0011		
Sample 8	-0.450	HIGH	0.0007	0.0006	0.0017	0.0007
				-0.0001		
Sample 9	-0.401	HIGH	0.0011	0.0015	0.0011	0.0014
				0.0005		
Sample 10	-0.521	HIGH	0.0001	-0.0007	-0.0001	0.0002
				0.0011		
Sample 11	-0.529	HIGH	0.0000	-0.0010	0.0026	-0.0007
				-0.0007		
Sample 12	-0.554	HIGH	-0.0002	0.0002	0.0003	-0.0017
				0.0004		
Sample 13	-0.560	HIGH	-0.0002	-0.0005	-0.0015	0.0003
				0.0007		
Sample 14	-0.595	HIGH	-0.0005	0.0007	-0.0014	-0.0002
				-0.0013		
Sample 15	-0.463	HIGH	0.0006	0.0005	-0.0006	0.0021
				0.0005		
Sample 16	-0.504	HIGH	0.0003	0.0008	0.0007	0.0014
				-0.0019		

Tabla 4.9 Concentración de plomo por botella

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Sample 1	ND	HIGH	-0.0034	0.0008	0.0078	-0.0205
				-0.0018		
Sample 2	ND	HIGH	-0.0158	-0.0188	-0.0142	-0.0238
				-0.0063		
Sample 3	ND	HIGH	-0.0111	0.0035	-0.0101	-0.0263
				-0.0115		
Sample 4	ND	HIGH	-0.0011	-0.0073	0.0079	-0.0073
				0.0024		
Sample 5	ND	HIGH	-0.0028	0.0097	0.0055	-0.0198
				-0.0066		
Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Sample 6	ND	HIGH	-0.0029	-0.0067	-0.0091	0.0033
				0.0009		
Sample 7	ND	HIGH	-0.0085	-0.0023	-0.0098	-0.0196
				-0.0024		
Sample 8	ND	HIGH	-0.0093	-0.0115	-0.0081	0.0048
				-0.0224		
Sample 9	ND	HIGH	-0.0076	-0.0134	-0.0121	-0.0097
				0.0048		
Sample 10	ND	HIGH	-0.0016	-0.0068	0.0091	-0.0048
				-0.0040		
Sample 11	ND	HIGH	-0.0032	0.0010	-0.0065	0.0021
				-0.0092		
Sample 12	ND	HIGH	-0.0104	-0.0116	-0.0119	-0.0024
				-0.0156		
Sample 13	ND	HIGH	-0.0068	-0.0196	0.0107	-0.0077
				-0.0107		
Sample 14	ND	HIGH	-0.0018	0.0016	0.0058	-0.0033
				-0.0113		
Sample 15	ND	HIGH	-0.0126	-0.0096	-0.0250	-0.0138
				-0.0020		
Sample 16	ND	HIGH	-0.0107	-0.0059	-0.0106	-0.0053
				-0.0208		

Tabla 4.10 Concentración de cadmio por botella

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
Sample 1	ND	HIGH	-0.0091	-0.0067	-0.0086	-0.0121
Sample 2	ND	HIGH	-0.0038	-0.0047	-0.0008	-0.0060
Sample 3	ND	HIGH	-0.0044	-0.0026	-0.0032	-0.0072
Sample 4	ND	HIGH	-0.0090	-0.0148	-0.0136	0.0016
Sample 5	ND	HIGH	-0.0076	-0.0060	-0.0067	-0.0101
Sample 6	ND	16.34	-0.0062	-0.0070	-0.0067	-0.0051
Sample 7	ND	HIGH	-0.0074	-0.0072	-0.0107	-0.0042
Sample 8	ND	15.56	-0.0104	-0.0105	-0.0087	-0.0120
Sample 9	ND	HIGH	-0.0076	-0.0069	-0.0040	-0.0120
Sample 10	ND	11.57	-0.0088	-0.0088	-0.0098	-0.0078
Sample 11	ND	HIGH	-0.0109	-0.0102	-0.0165	-0.0061
Sample 12	ND	HIGH	-0.0096	-0.0031	-0.0117	-0.0141
Sample 13	ND	HIGH	-0.0046	-0.0026	-0.0061	-0.0052
Sample 14	ND	HIGH	-0.0051	-0.0100	-0.0018	-0.0035
Sample 15	ND	HIGH	-0.0082	-0.0113	-0.0128	-0.0005
Sample 16	-0.084	HIGH	-0.0022	0.0049	-0.0089	-0.0025

De acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, en su tabla número 2 se mencionan los límites máximos permisibles (LMP) en metales que hacen al residuo un Residuo Peligroso. Citando la tabla mencionada, los valores se presentan en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos (metales). (SEMARNAT, 2005)

Contaminante	LMP (mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Cadmio	1.0
Cromo	5.0
Mercurio	0.2
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0

Como se puede observar en los resultados obtenidos en metales, se tiene:

- ✓ Plata: en todas las muestras se encontró un nivel ND (no detectable). De acuerdo con la ecuación para obtener la concentración de plata por muestra y el máximo valor obtenido se absorbanancia, se tiene que:

$$Conc_{Ag} = -0.1871 + 48.0234(Abs_{Ag})$$

$$Conc_{Ag} = -0.1871 + 48.0234(0.0049) = 0.048 \mu g/ml$$

- Comparando este valor, con el LMP, nos indica que está por debajo del permitido.
- ✓ Arsénico: En las botellas 8, 9, 10, 11 y 14 indica un valor de concentración negativo. En las botellas, en las cuales el equipo de absorción arrojó valores que aparece como ND, el máximo valor de absorbancia detectado fue de 0.0518, utilizando la ecuación para obtener la concentración, se tiene un valor de $1.07 \mu\text{g}/\text{ml}$, que es un valor por debajo del LMP.
 - ✓ Cromo: Para este metal, todos los valores de concentración son negativos. No rebasa el LMP.
 - ✓ Plomo: Tomando en cuenta el máximo valor obtenido de absorbancia, se tiene un máximo valor de $-0.51 \mu\text{g}/\text{ml}$ en concentración de plomo, esta concentración se encuentra por debajo de los LMP.
 - ✓ Cadmio: De acuerdo con los valores obtenidos por el equipo de absorción atómica, solo una de las concentraciones es con valor negativo, las demás concentraciones de encontraron como ND, por lo que utilizando el mayor valor de absorbancia y aplicándolo en la ecuación correspondiente, arroja un valor de $-0.0683 \mu\text{g}/\text{ml}$ en concentración de cadmio. Este metal se encuentra por debajo del LMP.

Haciendo un resumen de las concentraciones obtenidas en el análisis de metales, se tiene que ningún metal analizado rebasa los LMP para asegurar que, el lixiviado analizado en esta tesis, bajo las condiciones analizadas, no es un residuo peligroso bajo las condiciones de metales.

En la tabla 4.12 se tiene la comparación de los valores de la NOM-052-SEMARNAT-2005 y los valores de las concentraciones de metales contenidos en los lixiviados generados en esta tesis.

Tabla 4.12 Comparación de LMP y resultados obtenidos en laboratorio para lixiviados

Contaminante	LMP (mg/L)	Concentración máxima ($\mu\text{g}/\text{ml}$)
Arsénico	5.0	1.07
Cadmio	1.0	-0.0683
Cromo	5.0	Valores negativos
Plata	5.0	0.048
Plomo	5.0	-0.51

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De acuerdo con la investigación de los porcentajes obtenidos en los estudios de generación previos, realizados en los estados y municipios de la República Mexicana, se encontró que los porcentajes de RPD contenidos en los residuos de casa habitación, oscilan entre el 2% y 5%. Otro hallazgo fue que este tipo de estudios no se encuentran para todos los estados o todos los municipios de México, por lo que es complicado generalizar los resultados obtenidos para todo el país, solo se puede extender a los estados y municipios que cuenten con este tipo de estudio de generación y que los porcentajes de RPD se encuentren dentro en el rango mencionado.

Los resultados de la DBO y DQO, en los lisímetros que contenían mayor cantidad de RPD, fueron valores más altos en comparación con los lisímetros que contenían menor cantidad de RPD. Por lo que se puede concluir que, en este trabajo, los RPD no inhibieron el crecimiento de las bacterias generadas dentro de ellos.

En cuanto a la baja concentración de metales, como arsénico y plata, se puede explicar debido a los valores de pH que se obtuvo en todos los días de muestreo. Los metales pesados tienden a lixiviar eficientemente en valores de pH bajos. Los valores de pH, para todos los días de muestreo, correspondieron con valores neutros (valores entre 6.7 y 7.5).

Las grasas y aceites estuvieron presentes en todos los lisímetros; en los lisímetros 1 y 2 se tuvo la mayor concentración y fueron donde se tuvieron mayor porcentaje de RPD. En el lisímetro que no contenía RPD, se obtuvieron valores de concentración entre 5 y 30 mg/L. De esto se puede concluir que, en este trabajo la concentración de grasas y aceites en el lixiviado dependió del contenido de RPD.

Con respecto a la determinación de la peligrosidad de los lixiviados generados en los lisímetros monitoreados semanalmente, se observó que los lixiviados de estos residuos, no son peligrosos debido a que los resultados de concentración de metales y pH, no rebasan los LMP de la normatividad mexicana (NOM-052-SEMARNAT-2005) correspondiente con Residuos Peligrosos.

Finalmente se puede concluir que al caracterizar y evaluar la condición de peligrosidad de los lixiviados generados por residuos sólidos urbanos que contienen residuos domésticos peligrosos, a través de análisis a nivel laboratorio y bajo

condiciones experimentales de la CDMX, prevalecientes en los meses de marzo, abril y mayo, se encontró que no se pueden incluir en la tabla de la NOM-052 donde se mencionan los residuos peligrosos.

Recomendaciones

Para la caracterización de los lixiviados, se recomienda la toma de muestra directamente de los rellenos sanitarios.

Además, es necesario realizar estudios de generación más completos, donde se pueda observar con claridad la composición de los residuos domésticos peligrosos, en todos los municipios, estados y diferentes estratos sociales del país, debido a que el estudio de generación solo se realizó en una parte de un estrato social medio.

Dentro de la NADF-024-AMBT-2013 se menciona la separación adecuada de los residuos domésticos considerados como peligrosos, se requieren realizar más estudios sobre estos residuos para fundamentar adecuadamente la razón por la cual es necesario separarlos, ya que en el estudio realizado en esta tesis, se encontró que sus lixiviados no son peligrosos bajo las condiciones de análisis que se tenían dentro de los lisímetros y durante el análisis de los diferentes parámetros en el laboratorio. Es necesario un estudio para conocer la peligrosidad más específica que generan los RPD.

Una vez que se hayan realizado más estudios sobre el fundamento de una adecuada separación de los residuos domésticos peligrosos señalados en la norma NADF-024-AMBT-2013, es necesario contar con adecuados planes de manejo de estos residuos. Para ello, se podrían retomar las ideas implementadas en otros países, como las mencionadas en la tabla 2.1 de esta tesis.

Cuando los planes de manejo se establezcan, se podría contar con la participación de la unidad habitacional Villa Olímpica para implementar esta nueva recolección de RPD, como una unidad piloto, ya que es una unidad que cuenta con un sistema adecuado de separación de residuos. Dentro de la unidad, se cuenta con distintos tipos de almacenaje de residuos, identificados por colores e incluso, por zonas de almacenaje.

ANEXOS

Consideraciones para determinación de grasas y aceites

Fecha Inicial: 18-feb-19

N° Lisímetro	Vol filtrado (l)	Peso inicial (mg)	Peso con GyA (mg)	GyA (mg/L)
1	0.5	100608.8	106357.1	11496.6
2	1	104207.6	104305.0	97.4
3	1	102156.2	102240.9	84.7
4	1	92656.2	92670.5	14.3
5	1	102625.1	102652.4	27.3

Fecha Inicial: 25-feb-19

N° Lisímetro	Vol filtrado (l)	Peso inicial (mg)	Peso con GyA (mg)	GyA (mg/L)
1	1	102155.2	102180.8	25.6
2	1	104208.0	104242.7	34.7
3	1	102630.6	102633.6	3.0
4	1	100608.5	100627.2	18.7
5	1	92661.2	92810.2	149.0

Fecha Inicial: 4-mar-19

N° Lisímetro	Vol filtrado (l)	Peso inicial (mg)	Peso con GyA (mg)	GyA (mg/L)
1	1	102155.2	102187.5	32.3
2	0.95	104207.7	104295.6	92.5
3	1	102630.0	102637.3	7.3
4	1	100621.6	100626.4	4.8
5	1	92657.3	92670.9	13.6

Fecha Inicial: 11-mar-19

N° Lisímetro	Vol filtrado (l)	Peso inicial (mg)	Peso con GyA (mg)	GyA (mg/L)
1	1	102154.2	102195.5	41.3
2	1	104213.5	104223.6	10.1
3	1	102622.7	102632.2	9.5
4	1	100614.2	100621.3	7.1
5	1	92650.9	92662.9	12.0

Fecha Inicial: 19-mar-19

N° Lisímetro	Vol filtrado (l)	Peso inicial (mg)	Peso con GyA (mg)	GyA (mg/L)
1	1	102153.2	102218.7	65.5
2	1	104206.0	104227.4	21.4
3	1	102628.4	102632.8	4.4
4	1	100618.0	100619.0	1.0
5	1	92656.7	92661.5	4.8

Consideraciones para determinación de DBO₅

Fecha Inicial: 20/febrero/2019

Fecha final: 25/febrero/2019					
N° Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	9.5	0.3	920	799.33
1	1	8.97	3.6	537	
1	1	9.71	0.3	941	
2	1	9.5	2.79	671	697.00
2	1	7.99	1.66	633	
2	1	8.32	0.45	787	
3	1	8.68	0.59	809	899.33
3	1	9.89	0.22	967	
3	1	9.38	0.16	922	
4	1	9.2	4.8	440	390.00
4	1	9.11	5.32	379	
4	1	9.06	5.55	351	
5	1	8.31	4.07	424	500.33
5	1	8.28	4.16	412	
5	1	8.05	1.4	665	

Fecha Inicial: 22/febrero/2019

Fecha final: 27/febrero/2019					
N° Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	6.3	0.25	605	641.00
1	1	6.76	0.18	658	
1	1	6.86	0.26	660	
2	1	6.94	1.9	504	582.33
2	1	7.83	1.03	680	
2	1	7.18	1.55	563	
3	1	6.85	6.26	59	58.00
3	1	6.79	6.22	57	
3	1	7.37	7.36	1	

4	1	6.88	5.07	181	201.33
4	1	8.23	6.1	213	
4	1	8.96	6.86	210	
5	1	6.93	4.77	216	204.33
5	1	6.43	4.31	212	
5	1	6.89	5.04	185	

Fecha Inicial: 27/febrero/2019

Fecha final: 4/marzo/2019					
N° Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _f (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	8.46	0.16	830	765.67
1	1	7.37	0.14	723	
1	1	7.65	0.21	744	
2	1	7.09	1.41	568	522.00
2	1	6.45	1.81	464	
2	1	6.95	1.61	534	
3	1	8.08	4.43	365	258.33
3	1	6.85	5.12	173	
3	1	6.85	4.48	237	
4	1	6.73	6.54	19	57.50
4	1	6.6	5.95	65	
4	1	6.25	5.75	50	
5	1	8.73	4.88	385	316.33
5	1	8.45	5.71	274	
5	1	8.85	5.95	290	

Fecha Inicial: 1/marzo/2019

Fecha final: 6/marzo/2019					
N° Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _f (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	8.35	0.13	822	792.00
1	1	6.65	4.96	169	
1	1	7.79	0.17	762	
2	1	6.43	2.88	355	379.00
2	1	7.55	2.95	460	
2	1	6.35	3.13	322	
3	1	6.53	4.84	169	86.00
3	1	6.67	5.83	84	
3	1	6.33	5.45	88	
4	1	7.19	6.1	109	97.33
4	1	6.56	5.49	107	
4	1	6.27	5.51	76	
5	1	6.58	5.05	153	163.67

5	1	7.12	5.14	198	
5	1	6.35	4.95	140	

Fecha Inicial: 6/marzo/2019

Fecha final: 11/marzo/2019

N° Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO _s (mg/L)	Promedio
1	1	6.4	0.21	619	649.33
1	1	6.44	0.14	630	
1	1	7.15	0.16	699	
2	1	6.2	3.58	262	284.67
2	1	7.49	3.69	380	
2	1	6.53	4.41	212	
3	1	6.8	5.88	92	99.67
3	1	6.28	5.27	101	
3	1	6.33	5.27	106	
4	1	6.15	5.36	79	79.67
4	1	6.54	5.76	78	
4	1	7.1	6.28	82	
5	1	6.98	4.9	208	218.00
5	1	6.94	4.66	228	
5	1	5.98	5.19	79	

Fecha Inicial: 8/marzo/2019

Fecha final: 14/marzo/2019

N° Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO _s (mg/L)	Promedio
1	1	6.69	0.16	653	652.67
1	1	6.51	0.15	636	
1	1	6.84	0.15	669	
2	1	5.98	0.83	515	547.00
2	1	6.55	1.05	550	
2	1	6.59	0.83	576	
3	1	6.76	5.7	106	105.50
3	1	6.62	5.57	105	
3	1	6.18	5.99	19	
4	1	6.08	5.73	35	47.50
4	1	6.48	6.39	9	
4	1	6.51	5.91	60	
5	1	6.95	6.09	86	76.67
5	1	5.85	5.09	76	
5	1	5.9	5.22	68	

Fecha Inicial: 13/marzo/2019

Fecha final: 19/marzo/2019					
Nº Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	5.08	1.11	397	627.67
1	1	8.23	0.31	792	
1	1	7.29	0.35	694	
2	1	6.67	4.47	220	240.67
2	1	6.84	4.35	249	
2	1	6.55	4.02	253	
3	1	6.09	3.84	225	209.50
3	1	7.03	5.09	194	
3	1	6.1	5.66	44	
4	1	9.81	6.51	330	218.67
4	1	6.2	4.75	145	
4	1	7.9	6.09	181	
5	1	6.45	6.44	1	7.00
5	1	6.44	5.51	93	
5	1	7.12	6.99	13	

Fecha Inicial: 15/marzo/2019

Fecha final: 20/marzo/2019					
Nº Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	6.81	0.1	671	618.67
1	1	6.12	0.18	594	
1	1	6.89	0.98	591	
2	1	6.23	4.28	195	80.50
2	1	6.18	5.32	86	
2	1	5.43	4.68	75	
3	1	8.41	5.54	287	210.00
3	1	6.67	5.34	133	
3	1	5.8	5.69	11	
4	1	5.48	5.37	11	11.50
4	1	6.46	6.34	12	
4	1	6.06	5.3	76	
5	1	5.72	4.61	111	166.50
5	1	6.85	4.63	222	
5	1	5.66	5.16	50	

Fecha Inicial: 20/marzo/2019

Fecha final: 25/marzo/2019					
Nº Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	8.7	1.08	762	758.00

1	1	8.94	1.4	754	
1	1	9.08	1.5	758	
2	1	9.28	7.05	223	
2	1	9.42	6.84	258	198.67
2	1	9.38	8.23	115	
3	1	9.41	7.22	219	
3	1	9.23	6.83	240	224.00
3	1	8.61	6.48	213	
4	1	10.1	6.76	334	
4	1	8.97	8.92	5	286.00
4	1	9.4	7.02	238	
5	1	8.98	6.34	264	
5	1	9.51	7.05	246	211.67
5	1	8.63	7.38	125	

Fecha Inicial: 22/marzo/2019

Fecha final: 27/marzo/2019

Nº Lisímetro	% Dilución	OD _i (mg/L)	OD _r (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Promedio
1	1	7.69	1.38	631	
1	1	8.45	2.13	632	626.33
1	1	7.83	1.67	616	
2	1	8.31	5.96	235	
2	1	7.71	6.27	144	189.50
2	1	8.2	7.41	79	
3	1	9.42	6.62	280	
3	1	7.26	7.11	15	43.50
3	1	7.99	7.27	72	
4	1	8.17	7.32	85	
4	1	7.93	7.55	38	52.00
4	1	7.43	7.1	33	
5	1	7.9	6.46	144	
5	1	7.51	6.54	97	110.33
5	1	7.4	6.5	90	

Consideraciones para determinación de DQO

Fecha Inicial: 20-feb-19

N° Lisímetro	% Dilusión	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	50	830.0	1660.0
2	50	816.0	1632.0
3	50	313.0	626.0
4	50	299.0	598.0
5	50	282.0	564.0

Fecha Inicial: 21-feb-19

N° Lisímetro	% Dilusión	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	1	45.0	4500.0
2	1	36.0	3600.0
3	1	1.0	100.0
4	1	4.0	400.0
5	1	1.0	100.0

Fecha Inicial: 26-feb-19

N° Lisímetro	% Dilusión	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	10	266.0	2660.0
2	10	172.0	1720.0
3	10	29.0	290.0
4	10	21.0	210.0
5	10	72.0	720.0

Fecha Inicial: 28-feb-19

N° Lisímetro	% Dilusión	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	30	657.0	2190.0
2	30	247.0	823.3
3	30	111.0	370.0
4	30	60.0	200.0
5	30	109.0	363.3

Fecha Inicial: 5-marzo-19

N° Lisímetro	% Dilusión	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	30	513.0	1710.0
2	30	263.0	876.7
3	30	72.0	240.0

4	30	56.0	186.7
5	30	113.0	376.7

Fecha Inicial: 7-marzo-19

N° Lisímetro	% Dilución	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	30	493.0	1643.3
2	30	228.0	760.0
3	30	67.0	223.3
4	30	50.0	166.7
5	30	77.0	256.7

Fecha Inicial: 12-marzo-19

N° Lisímetro	% Dilución	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	30	556.0	1853.3
2	30	235.0	783.3
3	30	65.0	216.7
4	30	43.0	143.3
5	30	69.0	230.0

Fecha Inicial: 14-marzo-19

N° Lisímetro	% Dilución	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	30	455.0	1516.7
2	30	149.0	496.7
3	30	57.0	190.0
4	30	43.0	143.3
5	30	55.0	183.3

Fecha Inicial: 19-marzo-19

N° Lisímetro	% Dilución	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
1	30	381.0	1270.0
2	30	135.0	450.0
3	30	86.0	286.7
4	30	42.0	140.0
5	30	76.0	253.3

Fecha Inicial: 21-marzo-19

N° Lisímetro	% Dilución	DQO _{Espectro} (mg/L)	DQO _{Real} (mg/L)
--------------	------------	--------------------------------	----------------------------

1	30	365.0	1216.7
2	30	132.0	440.0
3	30	69.0	230.0
4	30	48.0	160.0
5	30	51.0	170.0

Curvas de calibración de metales y metaloides para espectrofotómetro de absorción

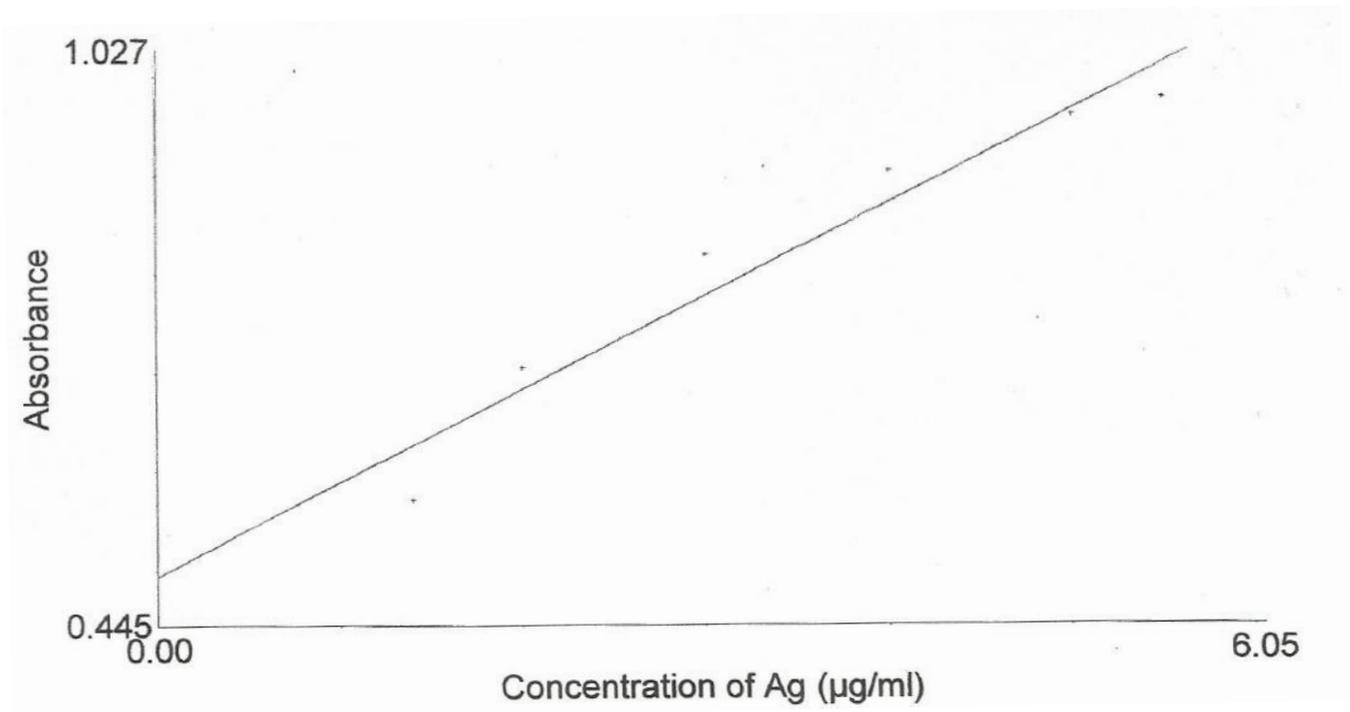


Figura 6.1 Curva de calibración para plata (Ag).

$$Conc_{Ag} = -0.1871 + 48.0234(Abs_{Ag})$$

Ec. 6.1

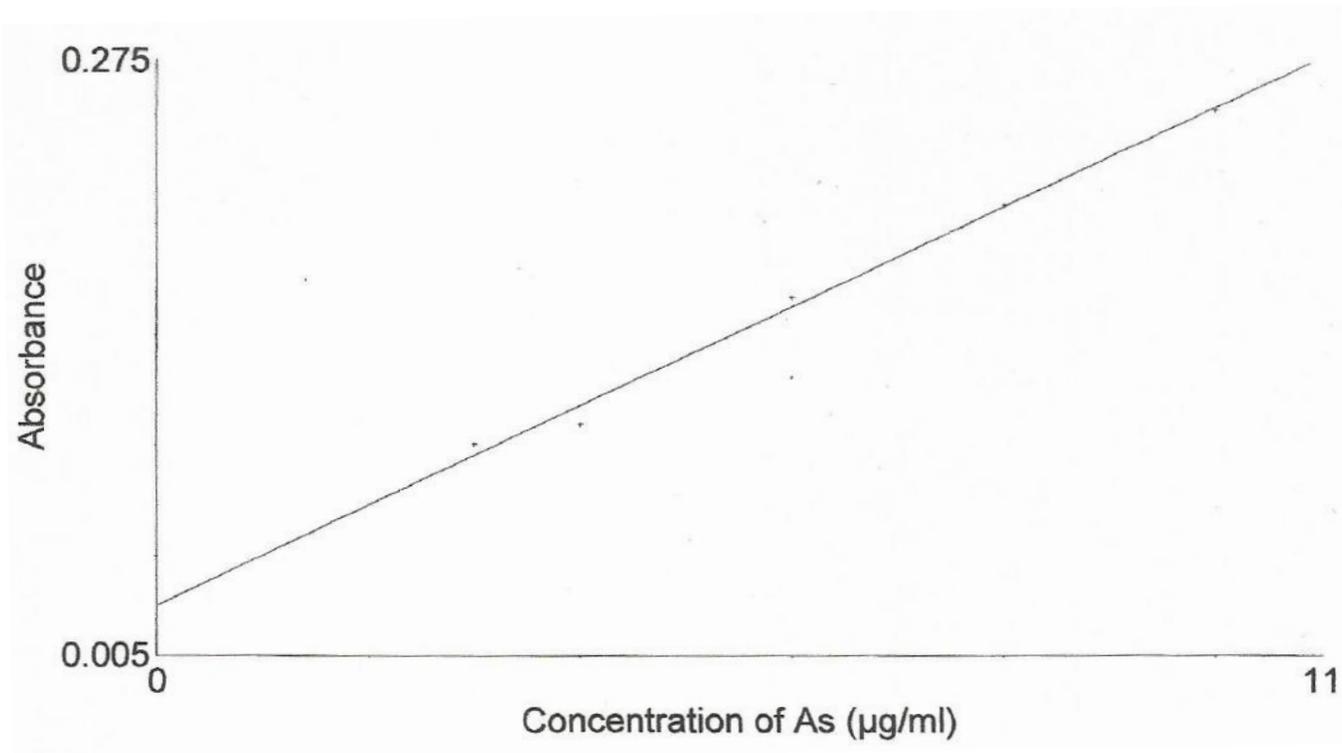


Figura 6.2 Curva de calibración de arsénico (As)

$$Conc_{As} = -1.2266 + 44.3360(Abs_{As})$$

Ec. 6.2

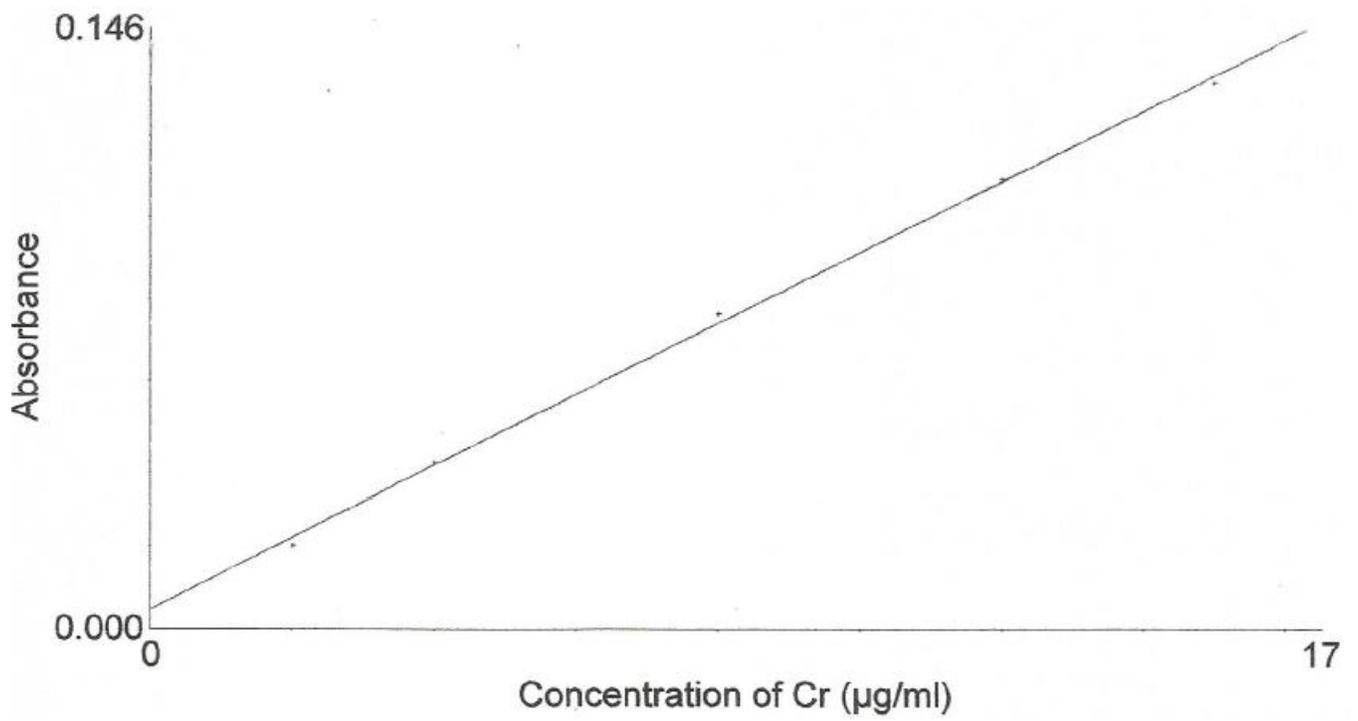


Figura 6.3 Curva de calibración de cromo (Cr)

$$Conc_{Cr} = -0.5329 + 115.2361(Abs_{Cr})$$

Ec. 6.3

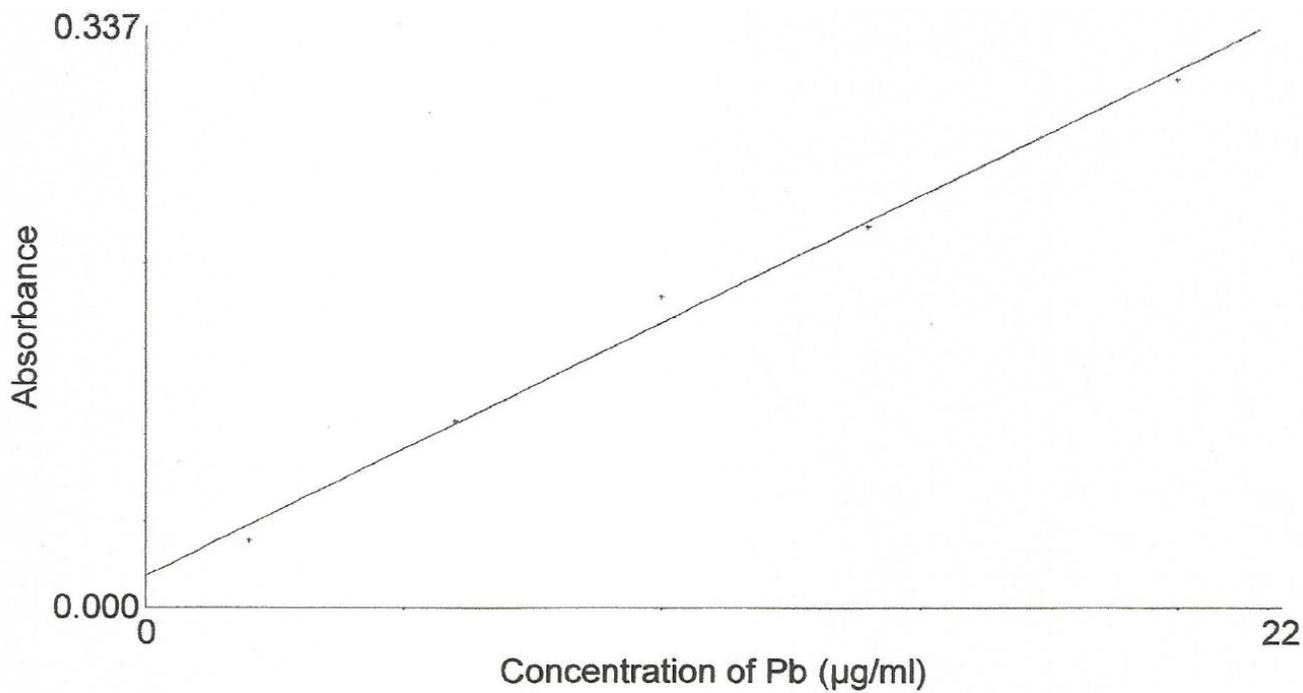


Figura 6.4 Curva de calibración de plomo (Pb)

$$Conc_{Pb} = -1.2409 + 67.9040(Abs_{Pb})$$

Ec. 6.4

}

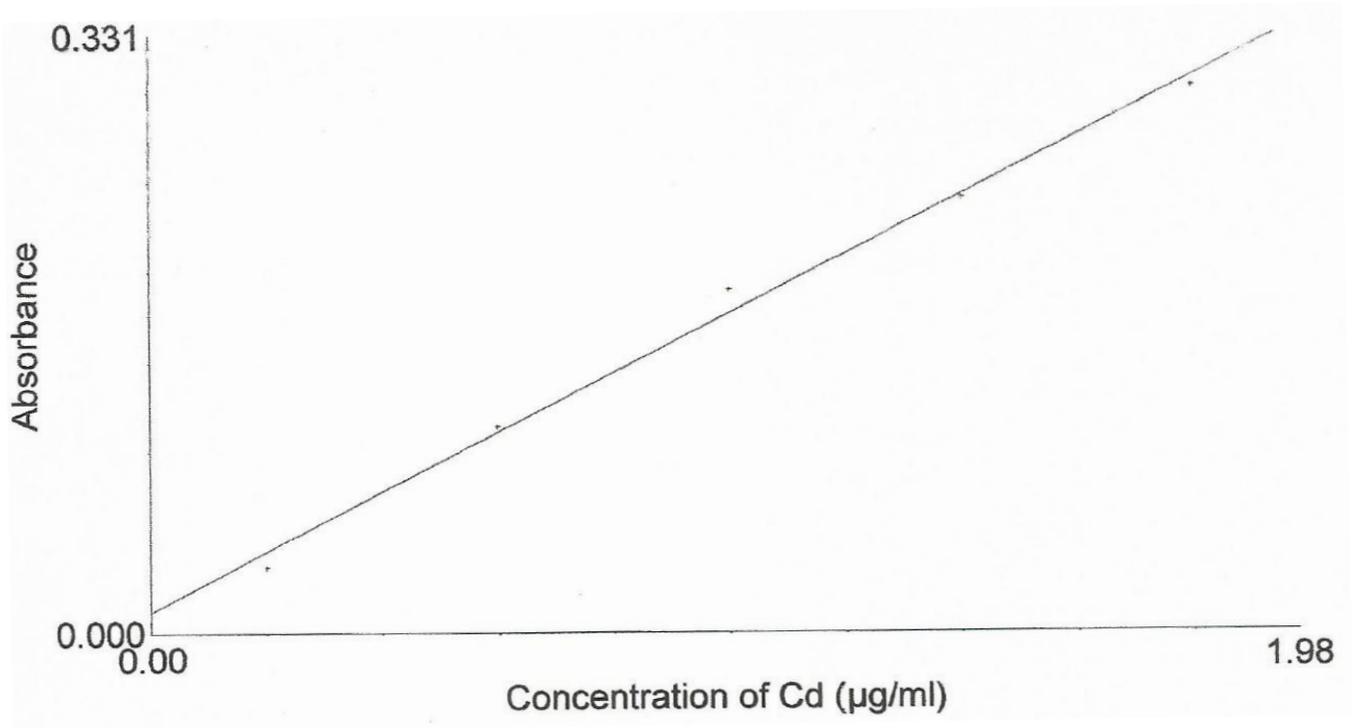


Figura 6.5 Curva de calibración de cadmio (Cd)

$$Conc_{Cd} = -0.0708 + 6.0719(Abs_{Cd})$$

Ec. 6.5

REFERENCIAS

- Cruz Aburto, É. Y. (2018). *La basura que día con día generamos*. Veracruz: Universidad Veracruzana. Ciencia UV.
- Abu Qdais, H., Hamoda, M., & Newham, J. (1997). Analysis of residential solid waste at generation sites. *Science Direct*, 395-406.
- Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (2006). *Resumen de salud pública: Cianuro*. Atlanta: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU.
- Alver, A., & Altas, L. (2017). Characterization and electrocoagulative treatment of landfill leachates: A statistical approach. *Science Direct*, 102-111.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Argota Pérez, G., Espinoza Flores, N., & Iannacone Oliver, J. (2015). Evaluation of lethal half toxicity for exposition to free cyanide in outflows and wash again miners utilizing the biomodels *Brachydanio* and *Eisenia andrei*. *Cátedra Villareal*, 3(1), 83-88.
- Ballantyne, B. (1987). *Toxicology of cyanides in: Clinical and experimental toxicology of cyanides*. Wright, Bristol: TC Marrs eds.
- Buenrostro, O., & Israde, I. (2003). La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), 161-169.
- D. LaGrega, M., L. Buckingham, P., & C. Evans, J. (2001). *Hazardous waste management*. Singapore: McGraw-Hill.
- Dupuis, I. (2006). *Estimación de los residuos agrícolas generados en la isla de Tenerife*. Santa Cruz de Tenerife: Servicio técnico de agricultura y desarrollo rural.
- Espinosa Lloréns, M., López, M., Pellón, A., Robert, M., Díaz, S., González, A., . . . Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 313-325.
- Fadem, J. C. (2008). *A community guide to environmental health*. Berkeley, California: Hesperian Foundation. Obtenido de

http://es.hesperian.org/hhg/Gu%C3%ADa_comunitaria_para_la_salud_ambiental

- Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. (2016). *Densidad aparente y densidad compactada de polvos*. Ciudad de México: FEUM.
- Favela Ávila, H., Ojeda Benítez, S., & Lozano Olvera, G. (2009). Cuantificación de residuos sólidos domésticos peligrosos generados en dos periodos estacionales en una ciudad mexicana. *II Simposio Iberoamericano de ingeniería de residuos* (págs. 1-12). Baja California: REDISA.
- Gasparini Reis, B., Lemes Silveira, A., Tostes Teixeira, L. P., Akemi Okuma, A., Celina Lange, L., & Santos Amaral, M. C. (2017). Organic compounds removal and toxicity reduction of landfill leachate by commercial bakers' yeast and conventional bacteria based membrane bioreactor integrated with nanofiltration. *Waste Management*, 170-180.
- Ghosh, P., Thakur, I. S., & Kaushik, A. (2017). Bioassays for toxicological risk assessment of landfill leachate: A review. *Science Direct*, 259-270.
- Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. (2009). *Estudio para la identificación y análisis de pilas y baterías*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2008). *Las villas olímpicas*. Obtenido de http://alejandria.ccm.itesm.mx/biblioteca/digital/basesdatos/mexico68/vol2/libro/capitulo_7.pdf
- Goicochea Cardoso, O. C. (2015). Evaluación ambiental del manejo de residuos sólidos domésticos en la Habana, Cuba. *Ingeniería Industrial*, XXXVI(3), 263-274.
- Inanc, B., Calli, B., & Saatci, A. (2000). Characterization and anaerobic treatment of the sanitary landfill leachate in Istanbul. *Water Science and Technology*, 223-230.
- Jaramillo Henao, G., & Zapata Márquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Colombia.
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica* (79), 39-51.

- López Aguilar, J. J., & de Haro Duarte, J. H. (2000). Residuos peligrosos domésticos (Sustancias peligrosas en el hogar). *Promoción ambiental Salmantina*, 1-10.
- López Arriaza, D. Á. (2016). Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogas producido en rellenos sanitarios. *Tesis*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- López, G., & Dorado, S. (2008). Residuos peligrosos domésticos en los residuos sólidos urbanos. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos* (págs. 1-9). Madrid: REDISA 2008.
- M. Masters, G., & P. Ela, W. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Medina Arévalo, A. (2006). *LA recirculación de los lixiviados y sus efectos en la compactación de rellenos sanitarios*. Ciudad de México: UNAM.
- Méndez Novelo, R. I., Castillo Borges, E. R., Sauri Riancho, M. R., Quintanal Franco, C. A., Giácoman Vallejos, G., & Jiménez Cisneros, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 13.
- Méndez-Novelo, R., Barrios-Pérez, J., & Jiménez Cisneros, B. (2002). Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados de un relleno sanitario. *Revista Ingeniería*, 7-12.
- Moody, C., & Townsend, T. (2017). A comparison of landfill leachates based on waste composition. *Science Direct*, 267-274.
- Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., & Rojas Valencia, M. (2009). Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Red de ingeniería en saneamiento ambiental*, 9.
- Olascoaga Guerrero, L. (junio de 2014). Programa de cálculo para estimar la cantidad de lixiviados generados en rellenos sanitarios. *Tesis*. México, Ciudad de México.
- Oloibiri, V., De Coninck, S., Chys, M., Demeestere, K., & Van Hulle, S. W. (2017). Characterisation of landfill leachate by EEM-PARAFAC-SOM during physical-chemical treatment by coagulation-flocculation, activated carbon adsorption and ion exchange. *Chemosphere*, 873-883.

- OPS y CEPIS. (2002). Manual de monitoreo para el relleno sanitario de Mallasa. 102-129.
- Otálora Barreto, Z. I. (2016). *Estudio de generación para determinar la composición de residuos peligrosos domésticos generados en la Ciudad de México*. Ciudad de México: UNAM.
- Pellón Arrechea, A., López Torres, M., Espinosa Lloréns, M., & González Díaz, O. (2015). Propuesta para un tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 3-16.
- PROFECO. (2012). Rollo lo mata carita (ycartera). *Revista del consumidor*, 48-63.
- Ramos Sánchez, J. E. (2016). Plan de cierre del relleno sanitario de Mallasa: Evaluación y soluciones sobre contaminación de suelos mediante el uso de la lombricultura. *Researchgate*, 1-24.
- Rivera Laguna, E., Barba Ho, L., & Torres Lozada, P. (2013). Toxicity determination of leachate from municipal solid waste using biological indicators. *AFINIDAD LXX*, 183-188.
- Robles Martínez, F., Morales López, Y., Piña Guzmán, A., Espíndola Serafín, O., Tovar Gálvez, L., & Valencia Del Toro, G. (2011). Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la ciudad de México. *Universidad y Ciencia*, 121-132.
- Rodríguez Fernández, D., & del Pozo Hessing, D. (2001). Intoxicación por cianuro. *MEDISAN*, 103-107.
- Sanches, A. C., de Souza, D. P., Mendonca, F., & Maffei, R. (2017). Construction and calibration of weighing lysimeters with an automated drainage system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 505-509.
- Sánchez Díaz, I. (2011). *Estudio técnico y económico de una planta de tratamiento de residuos vegetales en Getafe*. Madrid: Fundación EOI.
- SECOFI. (1980). NMX-AA-003-1980. México.
- Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-028-SCFI-2001. Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2009). *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. México.

- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). GUÍA PARA LA PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO DE RIESGO MODALIDAD ANALISIS DE RIESGO. México. Obtenido de http://tramites.semarnat.gob.mx/Doctos/DGIRA/Guia/MIAParticularRiesgo/GuiaEstudioRiesgo/g_vias_generales.pdf
- SEDEMA. (2013). NADF-024-AMBT-2013. Ciudad de México.
- SEMARNAT. (1985). NMX-AA-15-1985 Método de cuarteo. México.
- SEMARNAT. (1985). NMX-AA-19-1985 Determinación del peso volumétrico in situ . México.
- SEMARNAT. (1985). NMX-AA-22-1985 Selección y cuantificación de subproductos . México.
- SEMARNAT. (1985). NMX-AA-61-1985 Determinación de la generación. México.
- SEMARNAT. (28 de Enero de 1988). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México.
- SEMARNAT. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Diario Oficial*, (págs. 10-37). Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2005). Norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2006). Manual para la supervisión y control de rellenos sanitarios . México.
- SEMARNAT. (2017). NOM-083-SEMARNAT-2017. México, Ciudad de México.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management*. California: McGraw-Hill.
- Torres, P., Barba, L., & Pizarro, C. (2010). Anaerobic toxicity mitigation of leachates by mixing with municipal sewage. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 64-74.