

## **Situación actual de la producción de lixiviados en los vertederos provinciales de ciudad de la habana. Impacto ambiental y propuestas de sistemas de tratamiento**

### **Current situation of lixiviates production from the provincial wastes land fields in Havana City. Environmental impacts and waste water plants**

Autores: Yusely González Rodríguez (1), Odalys García Fonseca (1), Aymara Infante Sigler (1), Niurka Rodríguez Frade (2), Arlenne Martín Páramo (3), Jesús Beltrán González (3), Milena Chanquet Castro (1).  
(1) Grupo Técnico de Desarrollo e Inversiones (GTDI), Dirección Provincial de Servicios Comunales (DPSC). Ciudad de la Habana.

E-mail [odalys@sc.ch.gov.cu](mailto:odalys@sc.ch.gov.cu)

E-mail [ivette@sc.ch.gov.cu](mailto:ivette@sc.ch.gov.cu)

(2) Laboratorio de Análisis de residuos (LARE). Ciudad de la Habana.

E-mail [lare@ch.gov.cu](mailto:lare@ch.gov.cu)

(3) Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas. (CIMAB).

E-mail: [arlenne@cimab.transnet.cu](mailto:arlenne@cimab.transnet.cu)

E-mail: [beltrán@cimab.transnet.cu](mailto:beltrán@cimab.transnet.cu)

## **Resumen**

Los lixiviados que se generan en los vertederos son altamente contaminantes. Presentan altas concentraciones de sustancias tóxicas y su composición varía con la edad. Como resultado de esto, representan un grave peligro medioambiental de contaminación de las aguas superficiales y las aguas subterráneas, si no son tratados adecuadamente. Se han utilizado numerosas combinaciones de tratamientos de lixiviados, con diferentes grados de éxito. Teniendo en cuenta las peculiaridades típicas de los vertederos provinciales de Ciudad de la Habana, se hizo un estudio de caracterización de la composición físico-química de los lixiviados que en ellos se generan y se realizaron varias propuestas de combinaciones de tratamientos de lixiviados, con sistemas aeróbicos y anaeróbicos. Estas recomendaciones permitirán, haciendo estudios específicos para cada vertedero, elaborar una estrategia de tratamiento de lixiviados tanto para los vertederos existentes, como para los nuevos que se abrirán en el futuro.

## **Abstract**

The leachate generated in landfills are highly polluting. High levels of toxic substances and their composition varies with age. As a result, pose a serious environmental danger of contamination of surface water and groundwater, if not treated properly. Numerous combinations have been used for leachate treatment, with varying degrees of success. Taking into account the peculiarities typical of provincial landfills Havana, a study was conducted to characterize the physical and chemical composition of leachate generated in them and made several proposals for leachate treatment combinations, with systems aerobic and anaerobic. These recommendations will, with specific studies for each site, develop a strategy for treatment of landfill leachate for both existing and the new that will open in the future.

**Palabras Clave:** IMPACTO AMBIENTAL; CONTAMINACION AMBIENTAL; SUSTANCIAS TOXICAS; AGUAS SUBTERRANEAS; ENFERMEDADES; SALUD HUMANA; PROBLEMAS AMBIENTALES

## **INTRODUCCIÓN**

Los principales impactos ambientales asociados a los vertederos son: enfermedades potenciales, que son transmitidas por diferentes vectores como roedores, aves e insectos; el ruido que hacen los tractores y bulldozers; riesgos de fuegos por la

producción de gases inflamables como el metano; emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI) y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, causada por los lixiviados que en ellos se producen.

Uno de los principales problemas que condiciona la gestión de los vertederos controlados, es la generación de volúmenes de lixiviados con altas concentraciones de contaminantes. Los problemas de gestión de estas instalaciones están ligados, en muchos casos, a la falta de previsión en la determinación de estos volúmenes, así como de la caracterización y tratamiento de los lixiviados (Gómez y Antigüedad, 1997).

Se conoce como lixiviado, a cualquier líquido que percola a través de los residuos depositados y que sea emitido a este contenido en un vertedero. Este líquido se pone en contacto con los residuos depositados, excediendo a través de ellos su capacidad de absorción y aumentando su concentración en contaminantes, producto de la combinación de numerosos procesos físicos, químicos y microbiológicos (Christensen y Kjeldsen, 1989).

Durante años, los vertederos, al carecer de sistemas adecuados de gestión del lixiviado, han producido graves episodios de contaminación de suelos, aguas superficiales y aguas subterráneas. El principal efecto potencial de un lixiviado liberado a las aguas superficiales consiste en la depletación del oxígeno en partes de la superficie de los cuerpos de agua, cambios en la flora y la fauna en el fondo de los riachuelos y toxicidad por amoníaco (Christensen et al., 2001).

La emisión de lixiviados de un vertedero, y el posible impacto ambiental de los mismos, está íntimamente ligada al tipo de residuos que se depositan en el vertedero, así como la tecnología utilizada en el mismo (Mikae et al., 1998). Las características de los lixiviados depende de la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU), las precipitaciones, el balance hidrológico, la compactación, el diseño de cobertura, la edad de los residuos, la interacción entre el lixiviado y el medioambiente y el diseño y operación de los vertederos (Kjeldsen y Christophersen, 2001), algo que dificulta su tratamiento (Domínguez, 2000).

El alto poder contaminante de los lixiviados hace necesario un tratamiento adecuado, previo a su destino final. Este tratamiento dependerá del origen, composición y producción del lixiviado; mientras que la disposición final variará de acuerdo con el tratamiento recibido, como: vertido a aguas superficiales, descarga en estaciones depuradoras de aguas residuales, descargas sobre pilas de compostaje o descarga sobre el propio vertedero.

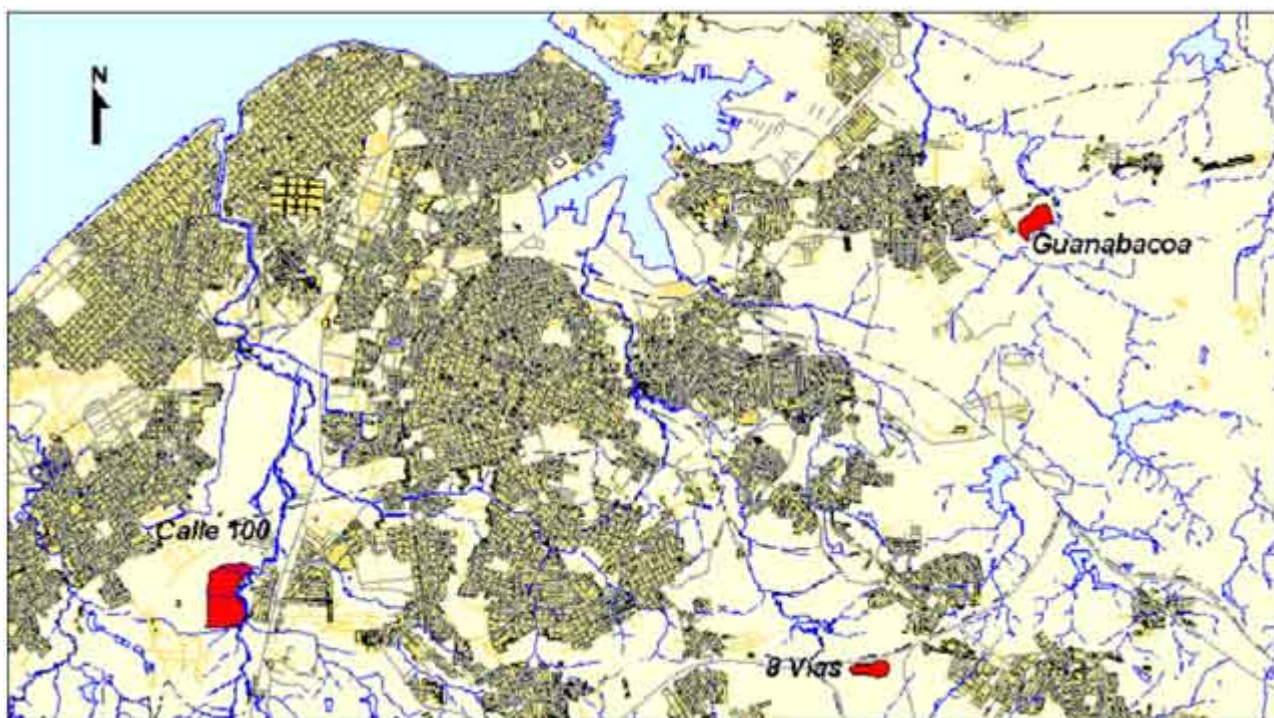
En Ciudad de la Habana, existen tres vertederos provinciales, dos municipales y ocho vertederos de período especial. Los vertederos más importantes son: Calle 100, Guanabacoa y 8 Vías (fig. 1).

El objetivo de este trabajo es brindar una breve reseña de los estudios de composición y calidad de los lixiviados en los vertederos que reciben RSU y compararlos con un estudio reciente de caracterización, realizado en los principales vertederos provinciales de Ciudad de la Habana tanto en época de lluvia, como en época de seca. Un segundo objetivo es realizar una comparación entre varios sistemas de tratamiento de lixiviados y proponer, entre ellos, los más adecuados para aplicar teniendo en cuenta nuestras condiciones socioeconómicas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Determinación de la calidad de los lixiviados**

La caracterización se realizó en estación de seca (mayo y junio, 2004) y en estación de lluvia (octubre y noviembre, 2004), en los Vertederos Provinciales de Ciudad de la Habana: Guanabacoa, Calle 100 y 8 Vías. El muestreo se hizo, de acuerdo a la norma ISO 5667-10 (fig. 1)



**Fig. 1. Localización de los vertederos estudiados, en Ciudad de la Habana.**

Se analizaron datos de referencias de la calidad de los lixiviados producidos en los vertederos, extraídos de estudios realizados en distintas partes del mundo y se compararon con los resultados obtenidos en el estudio.

### Sistemas de tratamiento de lixiviados

Existen numerosos problemas relacionados con el tratamiento de los lixiviados, derivados de su alto poder contaminante, las diferencias entre los lixiviados de los distintos vertederos y las fluctuaciones en cantidad y calidad del lixiviado en un mismo vertedero.

No existe, por lo tanto un sistema de tratamiento exclusivo para el lixiviado. Por tanto, se proponen numerosos métodos de tratamiento, que normalmente se combinan, y que se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Propuestas de procesos de tratamiento, según el parámetro a reducir

| Parámetros a reducir | Proceso de tratamiento |                  |                       |                   |   |
|----------------------|------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---|
|                      | 1                      | 2                | 3                     | 4                 | 5 |
| DBO5                 | Tratamiento biológico  | Carbón activado  | Floculación           |                   |   |
| DQO                  | Floculación            | Carbón activado  | Tratamiento biológico | Oxidación química |   |
| Metales pesados      | Floculación con álcali | Agentes quelatos | Intercambio iónico    | NF u OR           |   |

|         |                       |                        |                       |         |            |
|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------|------------|
| N-T     | Tratamiento biológico | k Absorción            | Vegetación            |         |            |
| F-T     | Floculación           | Formación de cristales | Tratamiento biológico | NF u OR | Vegetación |
| SS      | Sedimentación         | Filtración             |                       |         |            |
| Sal     | Evaporación           | NF u OR                |                       |         |            |
| E. coli | Infección             | Membrana MF o UF       | Laguna natural        |         |            |

Tomando como referencia los resultados obtenidos durante el estudio de caracterización de los lixiviados y como parte del Plan Maestro para el Manejo Integral de los RSU en la Ciudad de la Habana (JICA, 2004), se realiza un análisis de algunos de los métodos de tratamiento más utilizados internacionalmente y se diseñan algunas alternativas de sistemas de tratamiento.

Como no existe una norma cubana para la descarga de lixiviados tratados dentro de cuerpos de aguas generales, se realizó una propuesta de calidad del lixiviado y de la meta para el nivel de tratamiento, tomando como referencia la norma cubana NC 27:99: "Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado".

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Determinación de la calidad de los lixiviados

Se tomaron como referencia los valores reportados por el estudio de caracterización de los lixiviados, que se realizaron como parte del Plan Maestro para el Manejo Integral de los RSU en la Ciudad de la Habana (JICA, 2004). Los parámetros de mayor interés para la evaluación de los posibles sistemas de tratamiento, se muestran en las tablas 2, 3, 4, 5 y 6.

Tabla 2. Medidas de campo de los lixiviados

| Puntos de muestras | pH   | Temp. (oC) | EC (mS/cm) | DO (mg.L-1) |
|--------------------|------|------------|------------|-------------|
| C1 (V. Calle 100)  | 7.80 | 33.4       | 13.13      | 0.00        |
| C2 (V. Calle 100)  | 8.35 | 27.4       | 8.61       | 0.00        |
| C3 (V. Calle 100)  | 8.22 | 31.6       | 7.86       | 0.00        |
| C4 (V. Calle 100)  | 7.80 | 28.3       | 6.80       | 1.68        |
| C5 (V. Calle 100)  | 7.50 | 28.3       | 1.31       | 1.17        |
| H1 (V. Gbcoa.)     | 7.28 | 29.5       | 3.9        | 0           |
| H2 (V. Gbcoa.)     | 7.47 | 32.2       | 3.6        | 0           |
| F1 (V. 8 Vías)     | 7.09 | 30.7       | 4.86       | 0           |
| F2 (V. 8 Vías)     | 7.50 | 32.2       | 4.13       | 0           |

En todos los casos, los valores de pH de los lixiviados están por encima de 7.0, indicando una tendencia básica.

La conductividad eléctrica (EC) varía desde 1.31 mS.cm-1 hasta 13.13 mS.cm-1 (tabla 2). Los más altos valores de conductividad, se encontraron en los lixiviados colectados en el vertedero Calle 100.

Las concentraciones de oxígeno disuelto fueron cero para la mayoría de las muestras,



indicando anoxia en estos lixiviados y por lo tanto, la no presencia de la fase aeróbica en ninguna de las muestras en ambas épocas estudiadas.

Otros resultados de los indicadores de calidad en los lixiviados, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Indicadores de calidad en los lixiviados.

| Puntos de muestras | DBO5/<br>DQO | DBO5   | DQO    | TDS    | TSS    | TVS    | Coliformes Totales | Coliformes Fecales |
|--------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------------------|
|                    | mg.L-1       | mg.L-1 | mg.L-1 | mg.L-1 | mg.L-1 | mg.L-1 | NMP /100mL         | NMP /100mL         |
| C1                 | 0.56         | 1 128  | 1 999  | 7 770  | 1 280  | 7 528  | 2.10E+04           | 1.50E+03           |
| C2                 | 0.62         | 917    | 1 478  | 5 989  | 87     | 1 004  | 2.90E+05           | 2.40E+04           |
| C3                 | 0.98         | 1 128  | 1 152  | 4 874  | 232    | 938    | 4.30E+04           | 7.50E+03           |
| C4                 | 0.72         | 536    | 748    | 3 919  | 57     | 274    | 4.60E+05           | 9.30E+04           |
| C5                 | 0.31         | 174    | 564    | 706    | 50     | 100    | 4.30E+04           | 4.30E+03           |
| H1                 | 0.74         | 168    | 226    | 2 596  | 38     | 174    | 2.40E+04           | 2.40E+04           |
| H2                 | 0.68         | 206    | 304    | 2 144  | 130    | 666    | 9.30E+04           | 2.30E+03           |
| F1                 | 0.82         | 923    | 1 130  | 3 666  | 208    | 746    | 9.30E+05           | 2.40E+05           |
| F2                 | 0.67         | 984    | 1 478  | 2 754  | 132    | 292    | 4.30E+05           | 9.30E+04           |

Tanto en la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) como en la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), las concentraciones obtenidas en las muestras fueron elevadas. Esto denota la presencia de un alto contenido de materia orgánica. Los valores de concentraciones más altas fueron los del vertedero Calle100 (tabla 3).

La relación DBO5/DQO (BOD5/COD) en la mayoría de los casos es mayor que 0.40, lo que indica que los lixiviados se encuentran en fase acidogénica. Este resultado está acorde con la edad de los vertederos incluidos en este estudio (más de 25 años).

En todas las muestras se observa una prevalencia de la fracción de Sólidos Totales Disueltos (TDS).

Los coliformes totales y fecales tienen concentraciones mayores en la época de lluvia, que en la época seca. En todos los casos, las muestras tomadas tuvieron concentraciones mayores que 103 MPN/100mL.

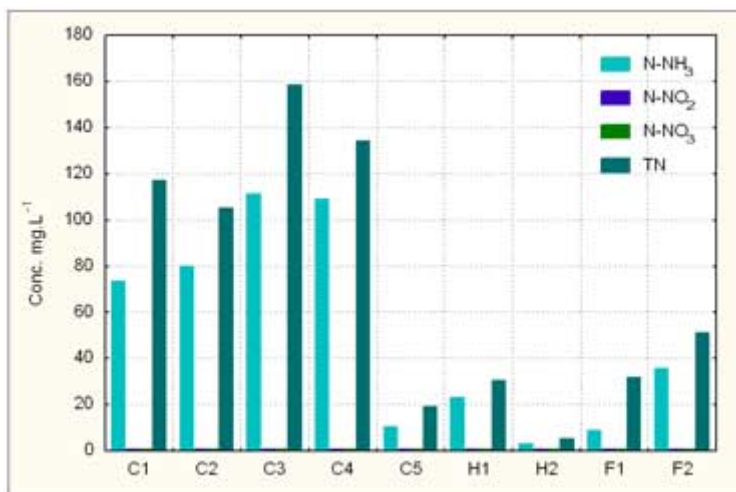
La tabla 4 muestra las concentraciones de los componentes de nitrógeno y fósforos totales. Se observan altas concentraciones de nitrógenos totales. Entre los componentes del nitrógeno, prevalece la fracción de amoníaco, para todos los casos.

Tabla 4. Concentraciones de componentes de nitrógeno y fósforos totales en los lixiviados

| Puntos de muestras | N-NH <sub>3</sub> | N-NO <sub>2</sub> | N-NO <sub>3</sub> | TN     | TP     |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|--------|
|                    | mg.L-1            | mg.L-1            | mg.L-1            | mg.L-1 | mg.L-1 |
| C1                 | 73.31             | 0.004             | 0.010             | 116.79 | 1.53   |
| C2                 | 80.25             | 0.004             | 0.012             | 105.32 | 35.65  |
| C3                 | 111.48            | 0.058             | 0.010             | 158.60 | 1.21   |
| C4                 | 108.81            | 0.054             | 0.040             | 133.83 | 2.81   |
| C5                 | 10.65             | 0.002             | 0.010             | 19.19  | 3.61   |
| H1                 | 22.70             | 0.004             | 0.010             | 30.67  | 12.36  |
| H2                 | 2.87              | <0.002            | 0.010             | 4.97   | 5.32   |
| F1                 | 8.94              | 0.015             | 0.010             | 32.26  | 15.29  |
| F2                 | 35.82             | 0.002             | <0.002            | 51.41  | 1.64   |

En general, las mayores concentraciones de componentes de nitrógeno, están localizadas en el vertedero Calle 100 (fig. 2).

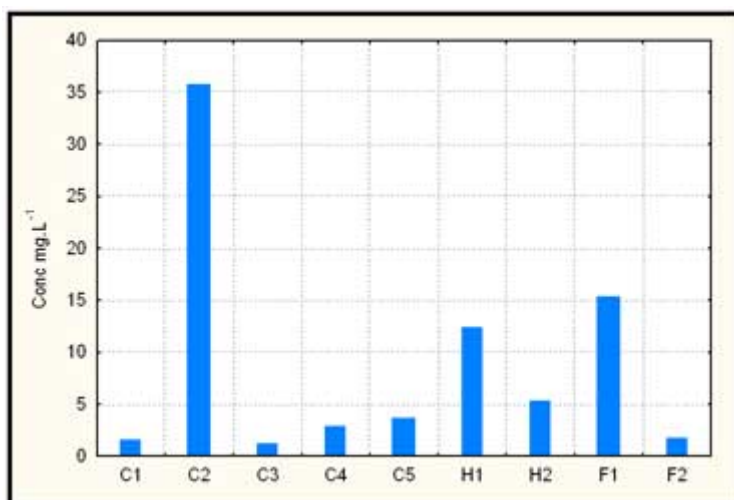
Fig. 2 Componentes de Nitrógeno en los lixiviados



En todos los casos, se observó una elevada contribución o permanencia de las formas reducidas del nitrógeno, especialmente en las muestras del vertedero Calle 100, las cuales presentaron las mayores concentraciones. Las concentraciones de los componentes oxidados del nitrógeno, como el nitrato (NO<sub>3</sub>) y el nitrito (NO<sub>2</sub>), son menores en comparación con el nitrógeno total (TN). Estas fueron menores en la época de lluvia, que en la época seca.

Los fósforos totales (TP) muestran concentraciones significativamente más bajas en la época de lluvia (70 mg.L-1) que en la seca (8 mg.L-1). (fig. 3)

Fig. 3. Fósforos Totales en los lixiviados



En la tabla 5 se muestra que de las concentraciones de metales pesados, los valores más elevados se reportan para Cu, Zn, Hg y Cr+6. El resto de los metales analizados presentan concentraciones cercanas o por debajo del límite de detección del método.

Como característica común, se observan altas concentraciones de Los valores más altos corresponden a las muestras de los puntos C3 y C4 correspondientes al vertedero Calle 100. Los metales Cu y Zn son considerados metales asociados a actividades antropogénicas.

Tabla 5. Concentraciones de metales pesados, Cr+6 y T-CN en los lixiviados.

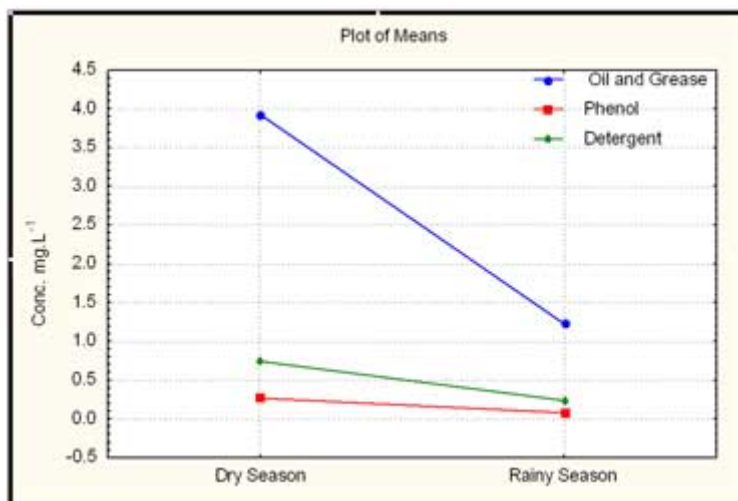
| Puntos de muestras | As mg.L-1 | Cd mg.L-1 | Cu mg.L-1 | T-Hg mg.L-1 | Pb mg.L-1 | Zn mg.L-1 | Cr+6 mg.L-1 | T-CN mg.L-1 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| C1                 | <0.08     | <0.005    | 0.288     | 0.060       | 0.12      | 0.706     | 0.161       | 0.053       |
| C2                 | <0.08     | <0.005    | 0.253     | 0.046       | <0.1      | 0.301     | 0.228       | 0.076       |
| C3                 | <0.08     | <0.005    | 0.214     | 0.025       | <0.1      | 0.288     | 0.550       | 0.061       |
| C4                 | <0.08     | <0.005    | 0.303     | 0.029       | <0.1      | 0.315     | 0.671       | 0.058       |
| C5                 | <0.08     | <0.005    | <0.01     | 0.026       | <0.1      | 0.051     | 0.296       | 0.055       |
| H1                 | <0.08     | <0.005    | 0.017     | 0.086       | <0.1      | 0.068     | 0.220       | 0.055       |
| H2                 | <0.08     | <0.005    | 0.019     | 0.056       | <0.1      | 0.068     | 0.280       | 0.061       |
| F1                 | <0.08     | <0.005    | 0.185     | 0.085       | <0.1      | 0.12      | 0.144       | 0.054       |
| F2                 | <0.08     | <0.005    | 0.079     | 0.073       | 0.14      | 0.211     | 0.225       | 0.08        |

Según estos resultados es evidente que los lixiviados del vertedero Calle 100 están causando un impacto medioambiental alto, en lo concerniente a Cu, Cr; Hg, Pb y Zn, fundamentalmente. Estos metales tienen valores superiores que la norma NC: 27, 1999.

Se analizaron, además, los valores de detergentes, fenoles y aceites y grasas presentes en los lixiviados. Solamente se reportaron valores significativos en el vertedero Calle 100. Todos los componentes orgánicos muestran una reducción en la

concentración durante el estudio de la estación lluviosa (fig. 4).

Fig. 4. Comparación de los componentes orgánicos en los lixiviados, para ambas estaciones de estudio



Los lixiviados representan un gran riesgo de contaminación de las aguas superficiales y las aguas subterráneas, lo cual es considerado el más severo impacto ambiental de los vertederos (Kjelden, 2001).

Los lixiviados analizados tienen como característica principal la elevada concentración de compuestos orgánicos degradables solubles y la relación DBO<sub>5</sub>/ DQO > 0.4 para la mayoría de los casos analizados. Teniendo en cuenta estos estadíos, es posible considerar que los lixiviados de los vertederos Calle 100, 8 Vías y Guanabacoa, se encuentran en fase acidogénica, de acuerdo con Rastas (2002) y Kruse (1994).

En la estación de lluvia todas las variables muestran una reducción de los valores medios, producto de la dilución de estas con el agua de lluvia y también, un mayor contenido de humedad de los residuos. Esto pudiera atribuirse al agua superficial que entra a los vertederos, que promueve la solubilización de los contaminantes obtenidos de la descomposición de la masa residual, en los lixiviados emanados por los vertederos.

La humedad dentro del vertedero sirve como un reactante a las reacciones de la hidrólisis, el transporte de nutrientes, las enzimas, disuelve los metabolitos, diluye los compuestos inhibitorios y expone el área de la superficie al ataque microbiano, entre otros. En este caso durante la estación lluviosa el aumento de humedad en la basura era evidente.

La cantidad de humedad es importante porque esto afecta la estabilización directamente dentro del vertedero. Sulfita et al. (1992) y Miller et al. (1994) notaron el papel importante de la humedad en el apoyo de la fermentación metanogénica de los residuos sólidos.

Se compararon los valores, de autores diferentes, para la caracterización de los lixiviados. Los resultados se muestran en la tabla 6.



Tabla 6. Comparación entre diferentes lixiviados (todos los valores en mg.L-1, excepto pH)

| Rastas, (2002) | Ehrig, (1989) | Quasim and Chiang, (1994) | Reinhardt and Grosh, (1998) | Pohland and Harper, (1985) | Glez, (1982) | Ciudad Habana (2004) |       |
|----------------|---------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|----------------------|-------|
| pH             | 4.5 - 7.8     | 4.5 - 9.0                 | 5.2 - 6.4                   | 6.1 - 7.5                  | 4.7 - 8.8    | 6.3 - 7.9            | 7.67  |
| DQO            | 400 – 15 200  | 500 – 60 000              | 400 – 40 000                | 530 - 3 000                | 31 – 71 700  | 1 870 – 62 320       | 1 008 |
| DBO5           | 500 – 68 000  | 20 – 40 000               | 80- 28 000                  | -                          | 4 - 57 700   | 380 – 52 000         | 685   |
| N-NH3          | 8.5 – 3 610   | 30 – 3 000                | 56-482                      | 9.4 - 1 340                | 2 - 1 030    | 5 - 1 420            | 50    |
| Pb             | <0.001 – 0.9  | 0.008 - 0.14              | 0.5-1.0                     | <0.105                     | 0.001-1.44   | 0 - 2.0              | 0.11  |
| Cd             | <0.0002 – 0.1 | 0.05 - 0.14               | <0.05                       | <0.105                     | 70 - 3900    | 0 - 0.025            | 0.01  |

En el caso de este estudio, el modo operacional en todos los vertederos es similar. Estos estaban bajo las mismas condiciones climáticas, pero es necesario encontrar más datos sobre la composición de los desechos sólidos, los métodos operacionales y propiedades de los residuos, para establecer diferencias o similitudes entre ellos.

#### Sistemas de tratamiento de lixiviados

Existen numerosos problemas relacionados con el tratamiento de los lixiviados, derivados de su alto poder contaminante, las diferencias entre los lixiviados de distintos vertederos y fluctuaciones en cantidad y calidad del lixiviado en un mismo vertedero.

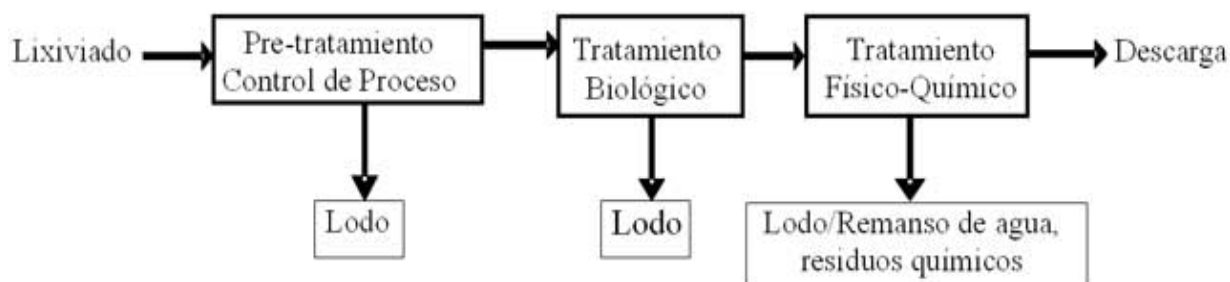
#### Parámetros de Tratamiento de Lixiviados e Instalaciones de Tratamiento

En lo que se refiere a los residuos, mayormente compuestos por sustancias biodegradables tales como residuos de cocina, las sustancias orgánicas o subproductos de la descomposición bacteriana de sustancias orgánicas como DBO5, DQO, T-N, NH4-N, etc., son los parámetros principales para el tratamiento. Otros problemas como pH, SS y coliformes, permanecen (JICA, 2004).

#### Concepto Básico del Sistema de Tratamiento de Lixiviados

Un sistema de tratamiento de lixiviados consiste de un proceso de tratamiento biológico y físico como se muestra en la Figura 5.

Fig. 5. Flujo General de un Tratamiento de Lixiviados.



El sistema de tratamiento inevitablemente produce lodos/ residuos incluyendo agua de enjuague, media y/o química. Al considerar un sistema de tratamiento de lixiviados se debe tener en cuenta el proceso de tratamiento y disposición, el costo y la facilidad para el mantenimiento de los lodos/ residuos. Un sistema de tratamiento de lixiviados depende de los parámetros y nivel de tratamiento. La calidad de los lixiviados fluctuará diariamente, estacionalmente y anualmente. Es muy importante planificar instalaciones de control/ ajuste y/o instalaciones de pretratamiento tales como rejillas, cámara de rejillas, remoción de aceites, sedimentación y otros para lograr un tratamiento estable (JICA, 2004).

#### **Criterios de calidad de Lixiviado**

Para este estudio, tuvimos en cuenta los indicadores referidos en la norma cubana NC 27:99: "Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado", que son: pH, conductividad eléctrica (EC), Metales Pesados, DBO5, DQO, Compuestos de Nitrógeno, Compuestos de Fósforo, SS, y coliformes.

#### **Nivel de Tratamiento Deseado**

No hay criterios para la descarga de lixiviados tratados a los cuerpos de agua generales. Por lo tanto, se propone un lineamiento temporal de descarga de lixiviado. Los criterios actuales de descarga para aguas residuales industriales tratadas en los cuerpos generales de agua son los siguientes: pH: 6-9; EC: 3,500 $\mu$ S/cm; Temperatura máxima: 50°C; Aceite y grasa: 30mg/L; SS: 5mg/L; T-DBO5: 60mg/L; DQO: 120mg/L; Kjeldahl -N: 20mg/L; T-P: 10mg/L (NC 27, 1999).

Es imposible remover todos ellos mediante procesos convencionales hasta el criterio de descarga de aguas residuales industriales. De acuerdo al estudio realizado en los vertederos existentes Calle 100 y Guanabacoa, el promedio EC es 9,500 $\mu$ S/cm. Es imposible reducir el EC del criterio para aguas residuales industriales tratadas a un cuerpo general de agua sin usar el sistema Ósmosis Reversa (RO) o nanofiltración (NF) que se usa en Japón y otros países europeos. Este sistema es costoso en su construcción y en la operación y mantenimiento (O&M) y necesita un alto nivel de técnicos. Por lo tanto, en este momento, EC no es eliminado para la guía de descarga de los lixiviados tratados (JICA, 2004).

Reducir DQO, T-N y T-P al criterio de descarga de aguas residuales industriales parece también considerablemente difícil por un proceso unitario. Si se usa el criterio de descarga de aguas residuales industriales a cuerpos de agua generales, las tasas de remoción requeridas son 94, 93, 92, 84% y más de 99% para T-DBO5, T-DQO, T-N, T-P y SS, respectivamente. No es posible remover T- DBO5 de más de 94% por medio de un sólo proceso de tratamiento y para lograrlo se requiere una combinación de procesos. Dentro de los criterios de descarga de aguas residuales industriales tratadas a los cuerpos generales de agua, 5 mg/L de SS no es realista. Debe ser

modificado, tomando en consideración el criterio mencionado más arriba para DBO5 y DQO. En este estudio se han propuesto 70 mg/L de SS como una pauta. En este caso la tasa de remoción requerida es 87 %. Al usar suelo de cobertura apropiada, se espera reducir el nivel T-P. En este caso la tasa de remoción requerida será menor.

### **Proceso de Tratamiento Seleccionado**

Tradicionalmente, el sistema que más se ha utilizado hasta la actualidad es la recirculación del lixiviado al propio vertedero, que se convierte en un gigantesco digestor anaeróbico para el tratamiento de los lixiviados. Este sistema aporta importantes ventajas entre las que se destacan la reducción del tiempo necesario para la estabilización del vertedero, la reducción del volumen de lixiviados por evaporación y la reducción de los costos finales de tratamiento (Pohland y Kim, 1999). Los inconvenientes más importantes que presenta este sistema son: el alto costo de mantenimiento de los sistemas de recirculación de lixiviados, emisión de olores en las balsas de almacenamiento, producción de insectos y diseño de sistemas de recogida de lixiviados para cargas hidráulicas más altas.

Los tratamientos físico-químicos aplicados a los lixiviados se caracterizan por una serie de ventajas como: rápida puesta en marcha, fácil automatización, simplicidad de equipamiento y materiales y menor sensibilidad a cambios de temperatura (Domínguez, 2000). Las desventajas fundamentales de estos sistemas son la producción de fangos y los altos costos de operación. Entre estos sistemas existen experiencias diversas aplicadas al tratamiento de lixiviados como la precipitación química, que permite, fundamentalmente, eliminar metales pesados y sólidos en suspensión (Qasim y Chiang, 1994). La oxidación química se ha utilizado para la destrucción de cianuros, fenoles y otros contaminantes orgánicos (Steensen, 1997). El carbón activo se aplica para la adsorción de aquellos compuestos orgánicos solubles que, por su carácter refractario, no han sido eliminados correctamente por métodos biológicos (Domínguez, 2000); existen también referencias en las que se han demostrado reducciones en el contenido de nitrógeno utilizando carbón activo (Horan et al., 1997). Los sistemas de filtración por membrana se han utilizado también en el tratamiento de lixiviados; existen referencias de su aplicación en estos efluentes de la ósmosis inversa (Domínguez, 2000), nanofiltración (Qasim y Chiang, 1994), ultrafiltración y microfiltración (Bueno et al., 1995).

Finalmente, la utilización de diferentes sistemas biológicos, aplicados al tratamiento de lixiviados, presenta una limitación importante, ya que estos efluentes pueden contener elementos tóxicos para los microorganismos. No obstante, se han utilizado sistemas biológicos basados en procesos aerobios como fangos activos, lechos bacterianos, biodiscos, nitrificación/desnitrificación o lagunas aeradas, que han producido resultados variables en la reducción de DBO5, metales pesados, nitrógeno, DQO y sólidos en suspensión (Urase et al., 1997). Existen también numerosas referencias de la utilización de tratamientos biológicos anaerobios aplicados a los lixiviados (Pohland y Kim, 1999; Cossu et al., 1995), que presentan ventajas como la capacidad de soportar altas cargas contaminantes, bajo costo energético, alta eficiencia en la depuración y facilidad de control y operación, aunque en estos sistemas se observa una lentitud en la puesta en marcha. Otras experiencias combinan sistemas biológicos aerobios y anaerobios que permiten una nitrificación-desnitrificación (Parra, 1999).

El proceso de tratamiento se determina de los parámetros y nivel de descarga de lixiviados requerido. La remoción de T- DBO5 y SS no es tan difícil si se combina lo biológico y la separación de sólidos-líquidos, en comparación a otros parámetros tales como DQO, T-N y T-P. El proceso de tratamiento prioritario es usar procesos biológicos únicamente, tomando en consideración el costo de construcción y de O&M y la necesidad de contar con técnicos con alto nivel de preparación. Considerar

tecnología avanzada como por ejemplo floculación con sedimentación, carbón activado, formación de cristales, intercambio de iones, oxidación química, RO o NF o evaporación no será apropiado en las circunstancias donde existen muy pocas plantas de tratamiento de aguas residuales industriales que cumplan con el criterio (JICA, 2004).

La tasa de tratamiento de remoción de T-P mediante proceso biológico no es tan alta, casi 60 a 70%. Se debe seleccionar el proceso de tratamiento biológico para la remoción de T- DBO5 y T-N para cumplir con el criterio de descarga de aguas residuales industriales en lo posible. En lo que se refiere a los SS, se debe seleccionar el proceso que cumpla con la pauta propuesta en este estudio.

En lo que respecta a la remoción de DQO y T-P, se debe seleccionar los procesos de tratamiento biológicos apropiados para acercarse al criterio indicado mas arriba. Es muy pronto para proponer pautas para estos parámetros. Por lo tanto, considerando la tasa de remoción del sistema de tratamiento principalmente biológico incluyendo el sistema natural, por el momento se propone T- DBO5: 60 mg/L, SS: 70 mg/L como un lineamiento temporal. No se está proponiendo una pauta para DQO, T-N y T-P, pero se seleccionará un sistema de tratamiento para alcanzar el criterio de descarga a un cuerpo general de agua para dichos parámetros.

Los procesos de tratamiento biológicos son los más comunes para el tratamiento de lixiviados. Estos se pueden dividir en procesos anaeróbicos y aeróbicos. Ambos se pueden llevar a cabo mediante sistemas diferentes, con sus propias ventajas y diferencias. También se dividen en tres categorías, biolodos suspendidos, película biológica y sistemas de lagunas naturales.

La prioridad de los sistemas biológicos es el de lagunas naturales desde el punto de vista de su fácil O&M y costo de construcción y mantenimiento, aunque requiere grandes espacios. En este estudio, se ha considerado el tratamiento de lixiviados utilizando el sistema de lagunas naturales, con un sistema de humedales para remover DQO, T- DBO5, T-N y T-P y SS. Se proponen también sistemas avanzados de lagunas para reducir el área de terreno y aumentar la eficiencia en el rendimiento. Antes de adoptar este sistema, es necesario contar con una planta o planta piloto para confirmar el rendimiento.

Se han considerado alternativas de sistemas de tratamiento como se muestra en la figura 6. Básicamente son el sistema de laguna o sistema natural.

**Fig. 6. Alternativas para el Tratamiento de Lixiviados.**



Generalmente se generan algas en una laguna poco profunda (laguna facultativa). Con el brillo solar, las algas producen oxígeno que descompone las materias orgánicas en los lixiviados. En lagunas profundas las bacterias anaeróbicas también descomponen las materias orgánicas. Este sistema generalmente consiste en la combinación de lagunas anaeróbicas, facultativas y naturales como tratamiento final. Generalmente, se incorpora una laguna anaeróbica para reducir el tiempo de retención requerido, DQO y la generación de lodos.

Cuando algunos de los límites de calidad del efluente no son alcanzados, una opción sería escoger un método suplementario (o aún una tecnología alternativa) con la finalidad de mejorar la calidad del efluente. En la tabla 11 se muestran algunos ejemplos de las tecnologías adicionales.

Tabla 11. Opciones después de un Sistema de Lagunas (después de una laguna facultativa)

| Opciones           | Parámetros que se espera remover   | Tasa de remoción (%) | Comentarios   |
|--------------------|------------------------------------|----------------------|---|
| Filtro de roca     | TSS (algas de la poza facultativa) | 60                   | Posterior a la poza facultativa, 0.33-0.044 Kg TSS/m <sup>3</sup>     |
|                    | T – DBO5                           | 60                   |   |
|                    | T – P                              | 46                   |   |
| Poza de maduración | T – DBO5                           | 95                   | Con poza facultativa  |
|                    | T – N                              | 80                   |   |
|                    | T – P                              | 70                   |   |
| Flujo terrestre    | T – DBO5                           | 90                   | 5.5 a 22.5 kg/ha/d, agua residual doméstica sin tratamiento después   |
|                    | TSS                                | Hasta 15 mg/L        | La tasa de algas removidas es inferior a 0.10 m <sup>3</sup> /m/h     |
|                    | NH4-N                              | 90                   |   |
|                    | T – P                              | 40 a 50              |   |
| Humedal (SFS)*     | Metal pesado                       | 50 a 80              | Posterior a la poza facultativa, posible remoción de algas, 7 días de |
|                    | T – DBO5                           | 73                   |   |
|                    | TSS                                | 70                   |   |



|                                |          |         |  |
|--------------------------------|----------|---------|--|
|                                | T – N    | 90      | retención  |
|                                | T – P    | 60      |  |
| Humedal (flotante, duckweek) * | T – DBO5 | 75      | Posterior a la poza facultativa con 20 días de retención |
|                                | TSS      | 80      |  |
|                                | T – N    | 85      |  |
|                                | T – P    | 50 a 60 |  |

- estimación

El proceso de tratamiento de lixiviados recomendado depende de la calidad requerida del lixiviado tratado, junto con el área y consumo de potencia necesarios. En el caso que la calidad requerida sea principalmente DBO y SS, el proceso recomendado es la Alternativa 6 (Laguna anaeróbica laguna aereada+ laguna de maduración). En el caso que la calidad requerida sea DBO, SS y N, el proceso recomendado es la Alternativa 3 (Laguna anaeróbica + laguna facultativa + laguna de maduración).

En las lagunas de maduración, algunas veces las algas fluyen hacia afuera nuevamente. En ese caso, se recomienda la Alternativa 4 (laguna anaeróbica + laguna facultativa + humedal). Para aplicar el humedal, se requieren pruebas para confirmar la vegetación disponible y los parámetros de diseño. En los casos que la altura del vertedero es alta, el consumo de potencia de la bomba de recirculación también aumenta. En algunos casos, puede valer la pena intentar un sistema de lagunas naturales mejoradas y sistema de humedales. Es necesario confirmar mediante pruebas, haciendo referencia al apéndice. El sistema natural es fácil de operar, pero necesita un sistema de revestimiento. En este contexto, un área pequeña es económica.

Como resultado, se recomienda la Alternativa 6 (Laguna anaeróbica + Laguna aereada + Laguna de Maduración) en la cual principalmente el T-DBO5 y SS son considerados como las pautas por el momento. En el caso de que la calidad requerida sea DBO, SS y N en el futuro, el proceso recomendado es la Alternativa 3 (Laguna Anaeróbica + Laguna Facultativa + Laguna de Maduración).

## CONCLUSIONES

- Los lixiviados de los vertederos estudiados, están en fase anaerobia acidogénica, de acuerdo con los grandes niveles de materia orgánica. Los valores de los indicadores de calidad evaluados tienen un comportamiento típico de los lixiviados de vertederos.
- Los lixiviados más contaminantes son los reportados en el vertedero Calle 100.
- Aunque es evidente una dilución de los lixiviados en la estación lluviosa, sus indicadores de calidad de agua continúan por encima de las normas cubanas.
- No existe un sistema de tratamiento exclusivo para los lixiviados.
- Al considerar el sistema de tratamiento de los lixiviados se deberá tener en cuenta el proceso de tratamiento y disposición de lodos/residuos, el costo, y la facilidad de mantenimiento.
- Para seleccionar el sistema de tratamiento, se determinarán los parámetros y el nivel de descarga requerido del lixiviado; así como su rentabilidad.

- No hay criterios para la descarga de lixiviados tratados a los cuerpos de agua generales. Por lo tanto, se propone un lineamiento temporal de descarga de lixiviado.
- Es imposible remover todos los indicadores fundamentales de calidad del lixiviado, en un proceso unitario. Para lograrlo, se requiere una combinación adecuada de procesos.
- Los procesos de tratamiento biológico son los más comúnmente empleados para el tratamiento de los lixiviados.
- El sistema biológico idóneo es el de lagunas naturales, si tomamos en consideración la facilidad de la operación/mantenimiento y los costos de construcción y mantenimiento, aunque se requieren grandes terrenos.
- De las alternativas de sistemas de tratamiento de lixiviados estudiadas, se recomienda emplear la Alternativa 6.

### **Bibliografía:**

- APHA (1998): "Standard Methods for the examination of Water and Wastewater". American Public Health Association. 20th Edition. 210p.
- Bueno J. L., Sastre H., Lavin A. G., Fernández S. y Cuervo M. (1995). Contaminación e ingeniería ambiental: Tomo IV. Degradación del suelo y tratamiento de residuos. F. I. C. Y. T. Madrid, España.
- Christensen T. H. y Kjeldsen P. (1989). Basic biochemical processes in landfills. Chapter 2.1 in Sanitary landfilling: Process, technology and Environmental Impact, Christensen T. H., Cossu R. and Stegmann R., Eds. Academic Press, London, 29.
- Christensen T. H., Kjeldsen P., Bjerg P. L., Jensen D. L., Christensen J. B., Baun A., Albrecht en H. J. and Heron G. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Appl. Geochem. 27:261-271.
- Cossu R., Stegman R., Andeottola G. y Cannas P. (1995). Sanitary Lanfilling Process. Technology and Environmental Impact. Academic Press. Reino Unido.
- Dominguez M. B. (2000). Vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: una perspectiva internacional. Módulo Gestión de Lixiviados. Aula de Medioambiente de Suances. Universidad de Cantabria.
- Ehrig, H. J. (1989). Leachate quality in Sanitary Landfilling: Process, Technology, and Environmental Impact. Eds: T.H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegman, Academic Press, New York, p. 213-229.
- Fang H. H. P. and Zhou G. M. (1999). Interactions of metanogens and denirifiers in degradation of phenols. Journal of Environmental Engineering. 125(1): 57-63.
- Gómez M. A. y Antiguedad T. (1997). Control de lixiviados en los vertederos de residuos sólidos urbanos de Guipúzcoa. Revista Técnica Residuos. No. 39:36-46.
- González Urdela J. Lorenzo (1982). "Monitoreo Ambiental en Rellenamientos", Cuba, 40p.
- Guilles P. (1990). Industrial scale of fixes biomass on the Mediteranean seaboard. Design, operatin results. Water Science Technology, Vol. 22:281-292.
- Horan N. J., Gohar H. and Hill B. (1997). Application of a granular activated carbon-biological fluidised bed for treatment of landfill leachate containing high concentrations of ammonia. Water Science Technology, Vol. 36:369-375.
- ISO 5667-10. Water quality. Sampling. Part 10: Guidance on sampling of waste waters.
- JICA (2004). Estudio del Plan Maestro sobre el manejo integral de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Ciudad de la Habana, Cuba. Informe Final, Vol. II, capítulo 8. Nippon Koei Co., LTD. Pacific Consultants International.

- Kjeldsen, P. and Christophersen, M. (2001). Composition of leachate from old landfills in Denmark. *Waste Management & Research*. Vol. 19, Is. 3: 249-256.
- Kruse (1994). Leachate treatment; principles and options. In Heyer, K-U, Stegmann, R., and Ehrig, H-J (1998). *International Training Seminar, Management and treatment of MSW land fill leachate*, Cagliari, Italy. Eds. Cossy, Lavagnolo, Burla and Raga. CISA, Italy. 2-4.
- Mikae N., Cosovic B., Ahel M., Andreis S. and Toncic Z. (1998). Assessment of groundwater contamination in the vicinity of a municipal solid waste landfill (Zagreb, Croatia). *Water Science technology*, Vol. 37, No 8:37-44.
- NC 27:99: Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado. Especificaciones. La Habana, Cuba, 14p.
- Nkhambayausi-Chirwa E. M. and Wang T. T. (2001). Simultaneous Chromium (VI) and phenol degradation in a fixed-film culture bioreactor: reactor performance. *Water Research*, 35(8): 1921-1932.
- Park E. J., Seo J. K., Kim M.R., Jug H. Kim J. Y. and Kin S. K. (2001). Salinity acclimation of immobilized freshwater denitrifier. *Aquacultural Engineering*. 24: 169-180.
- Parra P. (1999). Depuración de lixiviados con oxígeno en vertederos de RSU. *Revista Técnica Residuos*. No 48:38-40.
- Pohland F. G. and Kim J. C. (1999). In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors. *Water Science Technology*, Vol. 40, No. 8:203-210.
- Problemas ambientales causados por los vertederos. ASERMA ([www.confermadera.es/aserma](http://www.confermadera.es/aserma))
- Qasim R. and Chiang W. (1994). *Sanitary landfill leachate: Generation, Control and Treatment*. Technomic Publishing Co. E.U.
- Rastas, L. (2002). *Typical Leachate – Does It Exist?*. Department of Environmental Engineering Division of Waste Science & Technology, USA.
- Steensen M. (1997). Chemical oxidation for the treatment of leachate-process comparison and results from full-scale plants. *Water Science Technology*, Vol. 35:249-257.
- Tchobanoglous, G. Thiesen, and Vigil, S.A. (1993). *Integrated Solid Waste Management*. Mc Graw-Hill International Editions. London.
- Urase T., Salequzzaman M., Kobayashi S., Matsuo T., Yamamoto K. and Suzuki N. (1997). Effect of high concentrations of organic and inorganic matters in landfill leachate on the treatment of heavy metals in very low concentration level. *Water Science Technology*, Vol. 36, No. 12:349-356.
- USEPA, (2002). "Guidance on Monitoring of Landfill Leachate, Groundwater and Surface Water". A Practical Guide (Edition 2, June 2002)