

ASENTAMIENTOS EN UN VERTEDERO CONTROLADO A ESCALA CON RECIRCULACION DE LIQUIDOS LIXIVIADOS

R. Espinace A., J. Palma G., M. Szanto N.

Académicos Escuela de Ingeniería en Construcción, U. Católica de Valparaíso

M. C. Schiappacasse D., R. Chamy M.

Académicos Escuela de Ingeniería Bioquímica, U. Católica de Valparaíso

4° Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. 21 al 24 de Octubre de 1997.

RESUMEN

Un vertedero controlado es básicamente una obra en la cual el material de relleno sufre pérdidas de masa y variaciones en sus características debido a la descomposición de los residuos y a esfuerzos mecánicos, dando lugar a asentamientos que pueden prolongarse por muchos años. Los fenómenos de degradación que afectan a la fracción biodegradable de los desechos producen una pérdida de masa que se manifiesta con la generación de biogas y líquidos lixiviados, que están entre los principales problemas que deben enfrentarse durante la operación de un vertedero. De las técnicas más recientes para reducir el impacto ocasionado por los lixiviados, destaca la recirculación de los mismos al relleno.

En este artículo, se darán a conocer los resultados preliminares de la investigación desarrollada en la Universidad Católica de Valparaíso desde 1996, sobre la velocidad de estabilización y la modelación de los asentamientos registrados en dos vertederos controlados a escala, que ha sido relleno con residuos sólidos representativos de país. El primero ha sido alimentado con líquidos lixiviados y en el segundo no se ha realizado ningún proceso de recirculación.

INTRODUCCIÓN

El cambio en la composición y el aumento en la producción de residuos sólidos que se ha venido registrando en el país en las últimas décadas, junto con la preocupación creciente por la protección del ambiente y la salud pública le confiere especial importancia al tratamiento final de los desechos generados. Entre las alternativas que existen, el método conocido como vertedero sanitariamente controlado o relleno sanitario, es hoy en día el método de tratamiento final más aplicado en el mundo. Este método por la sencillez de la operación, por los costos involucrados y por la seguridad ambiental que ofrece, resulta atractivo tanto para países desarrollados como para países en vías de desarrollo.

Para implementar un emplazamiento que cumpla con los requerimientos de un vertedero controlado, en primer lugar se debe contar con un sitio apto, y cumplir con las restricciones que impone la seguridad sanitaria y ambiental. Por otro lado, es

necesario que los diseños se adapten a terrenos que presentan inconvenientes para el emplazamiento, ya que la dificultad para encontrar terrenos que sirvan para estos fines es creciente. Por estas razones se requiere diseñar vertederos que sean económicamente factibles de construir y que cuenten con sistemas seguros desde un punto de vista sanitario, ambiental y estructural en el largo plazo. Esto obliga a un adecuado control de los dos principales agentes contaminantes que se generan en un relleno sanitario que son los líquidos lixiviados y el biogas generado. En lo que se refiere al control de los lixiviados el método consistente en recircular los mismos al vertedero presenta variadas ventajas, además de ser económica y tecnológicamente accesible para países en vías de desarrollo.

Por lo anteriormente comentado, se requiere que estas obras civiles tengan una vida útil lo más larga y segura posible. Esto se puede lograr disminuyendo el volumen de los residuos sólidos que llegan al vertedero mediante políticas como reducir la producción de basuras, reciclar y reutilizar los materiales que se pueden obtener de los residuos. Otra alternativa consiste en optimizar la operación de estos emplazamientos, para aprovechar al máximo su volumen útil. Esto se puede lograr aumentando la densidad del relleno y/o acelerar los procesos de degradación que dan lugar a los asientos con lo que se logra liberar un volumen que puede ser ocupado nuevamente por basura.

En la U. Católica de Valparaíso las escuelas de Ingeniería en Construcción y de Ingeniería Bioquímica, están desarrollando un proyecto de investigación que tiene como objetivo estudiar la influencia que tiene en la producción de biogas y los asientos que se generan en el relleno, la recirculación de los líquidos lixiviados tratados en un digestor anaerobio. La hipótesis de trabajo indica que recirculación de los líquidos lixiviados generados en un vertedero controlado, previamente tratados en un digestor anaerobio, debería producir una disminución del período de degradación, lográndose incrementos en la velocidad de los asientos y en la vida útil del mismo por el volumen ganado. Además se logra el beneficio de estimular y mejorar la producción de gas, por la aceleración del proceso de degradación.

METODOLOGÍA APLICADA

Diseño y construcción de un vertedero a escala de laboratorio

Un lisímetro, es una representación a escala de un vertedero controlado, que simula el comportamiento de una celda de un relleno sanitario.

Se diseñaron y construyeron dos lisímetros, cada uno de 1 m³ de capacidad con el fin de evaluar el asentamiento de los residuos sólidos urbanos bajo las siguientes modalidades de operación.

- Con recirculación de lixiviado tratado en un filtro anaerobio y con adición de agua que simula la lluvia (Lisímetro N°1)
- Sin recirculación de lixiviado y con adición de agua que simula la lluvia (Lisímetro N°2).

El lisímetro N°1 se ha diseñado con un sistema para almacenar y recircular los líquidos lixiviados que se generan. El lisímetro N°2 considera un sistema para la incorporación de agua, que es idéntico al sistema del lisímetro N°1. Ambos vertederos cuentan con sistemas para la evacuación de lixiviados y gases, además de medición de asentamientos.

Construcción de los lisímetros e implementación de sistemas de control

El llenado de cada lisímetro se ha realizado en tres fases, cada una se prolongó por un día. En cada fase se rellena una de las tres etapas cilíndricas, hasta completar así, al cabo del tercer día, la altura del lisímetro. Este procedimiento permite que se pueda controlar mejor el relleno y lograr más fácilmente la densidad deseada para los residuos sólidos.

Los residuos sólidos que conforman el relleno de los lisímetros, han sido preparados en laboratorio, con una composición representativa de los desechos domésticos de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar. El procedimiento ha consistido en esparcir y mezclar manualmente sobre una membrana de polietileno, los diferentes componentes de la basura, con un tamaño máximo de 10 cm, para que la muestra quede mezclada de manera homogénea. La densidad de los residuos sólidos depositados en los lisímetros tiene un valor de $0,5 \text{ t/m}^3$, que es representativa de la mayor parte de los vertederos controlados de Chile.

En la primera fase se instala un filtro de fondo, el sistema para la evacuación de gases y el sistema para la medición del nivel de líquido. En la tercera fase se coloca el sistema para la recirculación del lixiviado, el sistema que evacua los gases hacia el exterior y por último la cobertura del lisímetro. Finalmente se realizan todas las instalaciones de tubería y válvulas exteriores.

Para evaluar el comportamiento del sistema se midió la variación de la concentración de DQO y pH del lixiviado generado y tratado; la producción de biogas y el grado de asentamiento de los RSU. Para acelerar la generación de lixiviado en el lisímetro N°1, se agregaron 110 lt de agua durante las dos primeras semanas de operación, tiempo en el cual se obtuvo lixiviado. Este volumen de agua permite alcanzar la capacidad de campo requerida para saturar la masa y producir la percolación del líquido.

La medición de los asientos se realiza mediante un sistema sencillo de medida, el cuál consiste en establecer nueve puntos fijos, que se encuentran distribuido sobre la superficie de la capa de recubrimiento final de cada lisímetro, de manera que cubran la totalidad del área. Para fijar estos puntos, se utilizó un elemento plástico circular de aproximadamente 1", que se dispuso sobre la cobertura, quedando su parte superior a la vista. Cada punto se marcó con un número de identificación para medir diariamente en el mismo lugar. Para registrar la medida correspondiente se coloca un perfil en la parte superior del lisímetro, y luego con una regla graduada se procede a registrar los asientos en cada punto.

Figura 1. Esquema de lisímetro tipo

RESULTADOS OBTENIDOS

En las figuras siguientes se presentan los asientos registrados y los asientos promedio en ambos lisímetros. Los asientos medidos entre noviembre de 1996 y septiembre de 1997, en el lisímetro N°1 alcanzan a un 25%, en tanto que los asientos registrados entre enero y septiembre de 1997, en el lisímetro N°2, bordean el 10%.

En cuanto a los líquidos lixiviados, los resultados obtenidos en el lisímetro N°1 indican que se genera diariamente aproximadamente 2,5 litros, el cual contiene una concentración promedio en DQO de 65.000 mg/l, en sólidos totales de 39 gr/l, en alcalinidad medida como CaCO₃ de 11230 mg/l y que su pH ha ido incrementando gradualmente de 5,3 a 5,8. En el filtro anaerobio se lograron remociones del 98% de la materia orgánica que posee el lixiviado y se han alcanzado velocidades de carga orgánica de 8 kg. DQO/m³ día. El lisímetro N°2 no ha generado lixiviado durante este período.

Modelos aplicados para el estudio de los asientos

Los primeros estudios de la compresibilidad de los vertederos controlados datan de la década de 1940 en Estados Unidos. Desde esas primeras investigaciones ha interesado observar el comportamiento y la posible utilización de los vertederos controlado como terrenos para emplazar construcciones.

La compresibilidad y en general el comportamiento mecánico de un vertedero sanitariamente controlado está afectado por múltiples factores, siendo los principales:

- Composición, características de las basuras y espesor de la celda en el relleno.
- Contenido de humedad del residuo, capacidad de campo del relleno y humedad de saturación de la cobertura.
- Tipo y metodología de rellenos empleada; equipo usado en la operación de compactación y densidades alcanzadas por los residuos y el material de cobertura.
- Tipo de material de cobertura y su espesor, lo que condicionará la evolución de la temperatura y la humedad, entre otros factores, y con ello influirá en el proceso anaerobio de descomposición.
- Las condiciones climáticas, tanto de pluviometría, como las temperaturas ambientales. Además es necesario tener presente las condiciones de evaporación, transpiración y congelamiento que influyen junto con los demás factores en la descomposición físico-química y bio-química de los residuos.
- Edad del vertedero, condición fundamental en la estabilidad de este.

Los residuos sólidos depositados en un vertedero sufren grandes asientos, con lo cual su volumen disminuye y la capacidad del vertedero aumenta. La importancia de cuantificar los asientos que se producen, el tiempo en el que se producirán y su ritmo de aparición se debe no sólo al aprovechamiento que se puede hacer de la capacidad real del vertedero, sino también al interés de realizar estas previsiones durante la fase de diseño. Así mismo, la evaluación de los asientos remanentes es de gran importancia a la hora de definir la posible utilización posterior del vertedero.

En el caso de los rellenos de residuos sólidos urbanos los asientos inmediatos o primarios dependen al igual que en el caso de los suelos de las cargas que se impongan, pero los asientos secundarios, se deben principalmente a complicados fenómenos de descomposición de la materia orgánica biodegradable contenida en los residuos sólidos. En tanto que en suelos es la consolidación primaria la que tiene una importancia ingenieril fundamental, en los residuos sólidos son los asientos más lentos los que merecen mayor atención. En la presente investigación se ha focalizado la atención en los asentamientos asociados a los fenómenos de degradación.

Sowers (1973), fue el primero en plantear un modelo para predecir los asientos que ocurren en un vertedero controlado. Aunque con posterioridad al planteamiento de este investigador se han desarrollado una serie de modelos conducentes al estudio de la compresibilidad de los rellenos, la mayoría de ellos se basa en las hipótesis iniciales planteadas por dicho autor.

Los modelos utilizados habitualmente en Geotecnia para predecir asientos en suelo se han utilizado con buenos resultados en vertederos controlados, pero las condiciones impuestas para su empleo no se cumplen en este tipo de rellenos.

Por ello, plantear un modelo que represente los asientos secundarios considerando los procesos de degradación que ocurren en los residuos sólidos, constituye un aporte interesante para el estudio de asientos. En esta línea el modelo Meruelo, desarrollado por el Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, España, con colaboración

de investigadores de la U. Católica de Valparaíso (Arias, 1994 – Palma, 1995), pretende predecir los asentamientos que ocurren en un vertedero a partir de una formulación que incorpore y relacione los parámetros fundamentales que determinan los procesos de degradación como pueden ser el tiempo, el contenido de materia orgánica en los residuos, la humedad contenida, y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación, entre otros.

Modelo de Sowers (1973)

Gran parte de las investigaciones sobre el tema de la compresibilidad se han basado en el planteamiento propuesto por Sowers (1973), quien establece un paralelismo entre que los asentamientos producidos por incrementos de carga en suelos y en vertederos. Con independencia de un primer asiento instantáneo debido a la compresibilidad volumétrica (con saturación parcial y elevada permeabilidad) y deformaciones elásticas, plantea que existen unos asentamientos primarios, que se pueden determinar mediante la teoría de la consolidación primaria, y que según el autor se producen en una primera fase que se prolonga un mes aproximadamente.

Terminada la primera fase, se inicia un nuevo desarrollo de asentamientos producto de cambios físico químicos, degradación biológica y deformación mecánica de tipo viscoso, que según Sowers, en condiciones ambientales estables, tienen un comportamiento más o menos lineal con el logaritmo del tiempo, similar a la compresión secundaria de suelos y se pueden determinar en consecuencia mediante la teoría de la consolidación secundaria, aplicando la expresión:

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

donde:

S_s = asiento por consolidación secundaria al tiempo t_2

H = altura de la celda al tiempo t_1 (30 días)

C_α = índice de compresión secundaria

e_0 = índice de vacíos

t_2 = tiempo de estimación de asentamientos

t_1 = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

Finalmente, el mismo autor señala que otros asentamientos, como los producidos por fenómenos de colapso, combustión o la interacción de otros varios fenómenos, no pueden ser estimados por estos medios.

La obtención del índice de compresión secundaria (C_α) no es fácil, debido a lo complicado que resulta realizar ensayos de laboratorio fiables. Las dificultades principales son la obtención de muestras representativas y la escasez de equipos de

laboratorio para efectuar ensayos confiables. Una solución consiste en despejar estos valores desde información obtenida de vertederos reales a partir de la medición de la deformabilidad del relleno para los asientos secundarios. Sowers (1973) obtuvo información desde vertederos reales, encontrando que el modelo de consolidación era aplicable, y presentó la relación de este parámetro (C_{α}) con el índice de poros (e_s), aun cuando no manifiesta como obtiene esto. En la figura 5 se observan los gráficos propuestos por Sowers, a los que se ha añadido la información recopilada por Cartier y Baldit (1983) de experiencias realizadas en diferentes investigaciones.

Figura 5- Valores típicos de C_{α} (Cartier y Baldit, 1983)

Los gráficos presentados por Sowers permiten una aplicación tentativa del modelo a nivel de anteproyecto, pero no son de utilidad práctica por la dificultad para determinar el índice de poros (e_0) en un vertedero controlado. Una solución a esta dificultad consiste en adoptar como parámetro la siguiente expresión:

$$C_{\alpha}' = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} \quad (2)$$

El valor de C_{α} define la pendiente de la ley semilogarítmica del índice de poros contra log. tiempo ($e - \log. t$), en tanto que el valor C_{α}' corresponden a una curva semilogarítmica de deformación unitaria contra log. de tiempo ($\varepsilon - \log. t$).

Para el cálculo de los asientos secundarios a partir de la ecuación propuesta por Sowers, se utiliza la siguiente expresión, que es más práctica y no requiere la estimación del índice de poros:

$$S_s = H C_{\alpha}' \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (3)$$

La propuesta de Sowers, tiene sin embargo unas limitaciones de partida que no pueden ser ignoradas:

- En primer lugar, la utilización de la teoría de consolidación de Terzaghi-Frolich implica la aceptación de sus hipótesis, entre las cuales la de saturación completa es, por los datos con que se cuenta, de dudoso cumplimiento en el seno de un vertedero controlado.
- Por otra parte, hay que considerar que tanto la ley asiento final-carga como la ley asiento secundario-tiempo son dos ecuaciones sin base teórica contrastada en residuos.

Adicionalmente, y ya con vista a su aplicación práctica, el modelo predice, para los asientos lentos, un proceso de desarrollo indefinido, y además el asiento "final" se hace infinito, por lo que el modelo sólo permite la predicción de asientos para fechas determinadas.

Posteriormente a la propuesta realizada por Sowers, distintas referencias bibliográficas dan cuenta de la aplicación de esta propuesta a casos reales, así como presentan discusiones o críticas a la validez del parámetro C_u' (Watts y Charles, 1990; Yen y Scanlon, 1975, entre otros). Fassett, Leonards y Repetto (1994) hacen una revisión concluyendo que los motivos de discrepancia se basan en la variación del parámetro C_u' con el tiempo, así como en la observación de su dependencia del espesor del relleno. Es una constante en todos los datos existentes que C_u' decrece con el tiempo transcurrido, así como que la selección de uno u otro origen de tiempos modifica apreciablemente los resultados (Watts y Charles, 1990).

En todo caso, los valores que se encuentran en las referencias disponibles están mayoritariamente por debajo de 0,1, salvo uno de los datos por Watts y Charles y los proporcionados por Druschel y Wardwell (1991), caso este último en el que los autores, aún señalando la discrepancia con respecto a la gama de valores típicos, no son capaces de suministrar una explicación.

Modelo Meruelo (1994)

En el planteamiento de este modelo, se considera solamente los asientos que son dependientes del tiempo, es decir los que se deben a la descomposición de la materia orgánica biodegradable. La descomposición de la materia orgánica de los residuos sólidos pasa por una fase aerobia, y una fase anaerobia. En condiciones de operación normales, la fase de descomposición aerobia se extiende de 10 a 50 días, hasta que se agota el oxígeno que está en los poros del relleno. En cambio la fase de descomposición anaerobia tiene un período de duración bastante prolongado y se suceden cuatro etapas conocidas como hidrolítica, acidogénica, metanogénica y de maduración.

Para el desarrollo de este modelo de predicción de asientos se examinaron modelos que representan la eliminación de la materia orgánica biodegradable. En general, los modelos de degradación estudiados, y utilizados en ingeniería sanitaria, se aplican al análisis de procesos en reactores de laboratorio, considerando el proceso con un inicio definido y aplicado a una masa de material degradable también definida, existente en el instante inicial, sin aportes adicionales de masa una vez que el proceso de

degradación comenzaba. En este caso, al plantear el modelo de degradación de un vertedero se han tenido que considerar los aportes de masa que se producen durante la etapa de explotación.

El planteamiento anterior implica que, para un período de tiempo prolongado, la materia orgánica biodegradable debería desaparecer en su totalidad. Sin embargo, dado que una parte de los RSU no son orgánicos y por lo tanto no sufren degradación, y que por otra no toda la materia orgánica se degrada, se deben considerar estos otros materiales. Para aplicar las propuestas de degradación sólo al material susceptible de sufrir degradación, se puede optar por determinar la cuantía del material degradado con relación al total de los residuos sólidos.

Si se hace la diferencia entre el total del material aportado y el material remanente en cualquier momento (t), se puede determinar el material degradado en ese momento. En todo caso, esto supone sólo una estimación de la masa de material degradado, expresada como una proporción del total. Habrá en consecuencia que establecer una relación de la degradación con los asientos producidos en el vertedero.

La pérdida de masa puede tener lugar produciendo también la pérdida del volumen ocupado por ella (manteniendo constante la densidad del vertedero, y traduciéndose en aparición de asientos, en consecuencia), o bien puede producir pérdida de densidad, desarrollándose huecos o zonas en las que, en todo caso posteriormente pero con ritmo no condicionado por la degradación, tendrían lugar procesos de colapso y la consiguiente producción de asientos.

El balance entre uno y otro efecto depende de las características del vertedero, fundamentalmente de la densidad y del grado de degradación de los residuos: En el caso de vertidos muy heterogéneos en tamaño, los residuos muy compactados tienen una estructura capaz de puentear las masas perdidas, traduciéndose la degradación en disminución de la densidad; por el contrario, residuos de baja densidad traducirían la pérdida de masa en disminución de volumen en la misma proporción. Si la estructura es muy homogénea, la degradación también lo será, por lo que no tiene sentido que aparezcan los efectos arco o cúpula que llevan a que la pérdida de masa se traduzca en pérdida de densidad.

En todo caso, la relación entre el total de pérdida de masa y el de pérdida de volumen parece razonable que se plantee como una constante para todos los residuos de un vertedero, que sea independiente del tiempo y que no dependa tampoco del estado tensional.

Estableciendo esa relación para una celda del vertedero de área (S) constante en altura y para toda la altura (H) de ésta, el volumen total de residuos es S·H y el volumen de asientos s·H, con lo que, utilizando el parámetro α , puede estimarse el asiento.

Por lo tanto, y atendiendo a la evaluación de los asientos, éstos pueden expresarse para todo el período posterior a la etapa de explotación de un vertedero como función de los siguientes parámetros en la forma:

$$S_s = \alpha H \text{ COD} \left[1 - \frac{1}{k_h T_c} (e^{-k_h(t-T_c)} - e^{-k_h t}) \right] \quad (4)$$

donde:

- S_s = asientos (mm)
- α = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos
- H = espesor del relleno (mm)
- COD = contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos (tanto por uno)
- T_c = tiempo de construcción del relleno (días)
- k_h = coeficiente de hidrólisis (días⁻¹)
- t = tiempo al cual se quiere predecir los asientos (días)

En esta expresión se reproducen las formulaciones para la degradación de residuos orgánicos, modificadas para tener en cuenta que la masa de residuos experimenta en forma continua la degradación y que ha sido aportada durante un tiempo determinado con un ritmo constante, ritmo que cesa pasado ese tiempo. Además, el material degradado (y con él el remanente) se expresan como fracción del total de material del vertedero. En cuanto a la relación entre el volumen de asientos producido y el correspondiente a la masa perdida por degradación, el coeficiente α se considera constante y característico del tipo de vertedero y de residuos depositados.

La expresión permite plantear en consecuencia la predicción de asientos a largo plazo en un vertedero de residuos compactados. De todos modos, la dificultad ya planteada inicialmente para determinar la cota de superficie al inicio del proceso de degradación, que es aún más grande cuando se trata de vertederos, en los que la degradación se inicia cuando aún se están aportando residuos, hace adecuado expresar los asientos en términos de descenso con respecto a un momento determinado, considerado como inicial. Hay que señalar que en las condiciones reales los asientos en un vertedero controlado se obtienen con respecto a una primera nivelación llevada a cabo en un momento t₀ > T_c. Expresando esto se llega a la expresión que refleja la producción de asientos:

$$\Delta S = \frac{\alpha H \text{ COD}}{k_h T_c} (1 - e^{-k_h T_c}) (e^{-k_h t} - e^{-k_h t_0}) \quad (5)$$

donde:

- ΔS = asientos ocurridos entre t₀ y t
- t₀ = edad del relleno al inicio de las nivelaciones
- t' = edad del relleno en la última nivelación

A partir de la ecuación 5, y conocidos los valores de los parámetros, se pueden predecir los asientos a lo largo del tiempo. También se puede, al contrario, y contando

con medidas reales de asiento, estimar el coeficiente de pérdida de masa que se transforma en asientos (α), y además ajustar otros valores como el coeficiente de hidrólisis k_p .

Modelización de los asientos observados en los lisímetros

A los asientos medidos en los dos lisímetros, se han ajustado los dos modelos geotécnicos de predicción de asentamientos en rellenos sanitarios antes presentados, se ha obtenido los parámetros para cada caso y se ha realizado una predicción de los asientos esperados en los próximos dos años. En las figuras siguientes se aprecian los resultados obtenidos.

Respecto a los resultados obtenido en la predicción a través de los modelos, se observa claramente que el lisímetro que considera la recirculación de lixiviado tratado presenta un mayor asentamiento para las fechas estimadas, respecto del lisímetro que no considera recirculación, esto se refleja en los siguientes datos:

- Según modelo Meruelo para un período de 24 meses el lisímetro que considera la recirculación de lixiviado tratado tendrá un asentamiento de 28%, mientras que el lisímetro que no considera recirculación tendrá un asentamiento de un 11%.
- Según modelo Sowers para un período de 24 meses el lisímetro que considera la recirculación de lixiviado tratado tendrá un asentamiento de 28%, mientras que el lisímetro que no considera la recirculación del lixiviado tendrá un asentamiento de un 12%.

CONCLUSIONES

De los resultados mostrados se puede concluir que debido a los bajos valores de pH obtenidos en el lisímetro la actividad microbiológica está bastante deprimida siendo casi nula para las bacterias metanogénicas. Por lo cual gran parte de la depuración de la materia orgánica se estaría llevando a cabo en el filtro anaerobio. Se espera que en el mediano plazo de operación se incremente la actividad del lisímetro producto del aumento lento pero gradual del pH.

Respecto a los asentamientos medidos, se observó que aunque los dos vertederos presentan características de construcción y residuos similares, se produjeron asentamientos mayores en el vertedero que considera la recirculación del lixiviado tratado. Por lo tanto, se concluye preliminarmente que la recirculación de lixiviados tratados produce una disminución del período de degradación de los residuos sólidos, logrando aumentar la velocidad de estabilización y de los asentamientos del vertedero. Esto dará lugar a asentamientos mayores en períodos más cortos, lo que incrementará la vida útil de un vertedero por el volumen recuperado.

Las predicciones realizadas muestran que en el caso del lisímetro N°1, sometido a recirculación, el valor final de asentamientos es prácticamente más del doble que en el caso del lisímetro N°2, por tanto en este último vertedero los RSU, bajo las condiciones en las que se encuentran actualmente, alcanzarán la estabilización en un período de tiempo mayor.

Los modelos geotécnicos utilizados se ajustan bien a las medidas reales y los parámetros obtenidos en cada caso, permiten predecir los asentamientos que ocurrirán en los lisímetros para períodos posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a la Dirección General de Investigación y Postgrado de la Universidad Católica de Valparaíso por el apoyo prestado a la presente investigación. También desean manifestar su reconocimiento a los alumnos tesisistas Srta. Martina Reinke O. de la Escuela de Ingeniería Bioquímica y al Sr. Claudio Carrasco M. de la Escuela de Ingeniería en Construcción por la dedicación y el esfuerzo desplegado durante el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

Arias, A., (1994), "Modelo de Asentamiento de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos". Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente, Universidad de Cantabria.

Cartier, G., y Baldit, R., (1983), "Comportement Géotechnique des Décharges de Residus Urbains". Bull. Liaison, Lab. Central des Ponts et Chaussées, 128, Nov-Dec, pp. 55-64.

Druschel, S.J., y Wardwell, M.B., (1991), "Impact of Long Term Landfill Deformation". Proceedings of Geotechnical Engineering Congress, Boulder, Co.,

Fasset, J.B., Leonards, G.A., and Repetto, P.C., (1994), "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Landfill Design". Proceedings, WasteTech '94 -Landfill Technology Conference, Charleston SC, National Solid Waste Management Association, 31 pags.

Palma J.H. (1995). "Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos". Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España.

Sowers, G.F., (1973), "Settlement of waste disposal Fills". 8a Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings, vol. 2, Moscú, pp. 207-210.

Watts, K.S., Charles, J.A., (1990), "Settlements of recently placed domestic refuse landfill". Proc. Instr. Civ. Engrs, Part 1, Dec., pp. 971-993.

Yen, B.C., y Scanlon, B., (1975), "Sanitary landfill settlement rates". ASCE Jnl. Geotechnical Engineering Division, 101, GT5, pp. 475-487.