

CÁLCULOS BÁSICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UN RELLENO SANITARIO

Jorge Eduardo Loayza-Pérez¹, Marina Silva-Meza²

Facultad de Química e Ingeniería Química - Universidad Nacional Mayor de San Marcos

RESUMEN

El relleno sanitario es una infraestructura destinada a la disposición final de residuos no reciclables. Es posible calcular su vida útil teniendo en cuenta tres casos; el primero supone que no existe crecimiento poblacional, el segundo que la población se duplica cada cierto número de años y el tercero que la población crece exponencialmente. En el presente artículo se presentan detalladamente cada uno de los casos; así como, ejemplos para determinar la vida útil del relleno sanitario (en años).

Palabras clave: Relleno sanitario, Infraestructura destinada para la disposición final, Vida útil.

ABSTRACT

A landfill is an infrastructure used for the final disposal of non-recyclable wastes. It is possible to calculate its useful lifetime by taking into account three cases; the first one assumes that there is no growth in the population, the second that the population doubles every given number of years and the third that the population grows exponentially. The following article presents all three cases in detail; as well as examples to determine the useful lifetime of the landfill (in years).

Keywords: Landfill, Infrastructure used for the final disposal, Useful lifetime.

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos municipales³, conocidos internacionalmente como residuos sólidos urbanos o residuos domésticos, son un problema ambiental debido al crecimiento poblacional de algunos centros poblados, así como, por la falta de lugares aptos para albergar este tipo de residuos. El tipo de infraestructura comúnmente usada, sobre todo en países en vías de desarrollo son los botaderos, que son espacios que no cuentan con un diseño técnicamente desarrollado ni el control adecuado, por parte de las autoridades¹. El relleno sanitario, en cambio, sí es una instalación que ha sido diseñada técnicamente y cuenta con el estudio de impacto ambiental respectivo; además, es controlado por las autoridades del sector salud y las autoridades municipales⁴.

II. INFRAESTRUCTURA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS MUNICIPALES

Aquellos residuos que no puedan ser reciclados, reaprovechados o valorizados energéticamente deberán ser confinados en un lugar diseñado técnicamente conocido como relleno sanitario. El relleno sanitario necesita de un diseño de ingeniería, lo que existe en la mayoría de ciudades a nivel nacional, son botaderos. Los botaderos pueden ser reconvertidos en rellenos, luego del estudio respectivo y las modificaciones sugeridas por instituciones como la OPS (Organización Panamericana de la Salud).

Un botadero es un lugar donde se dispone el residuo sólido; no existiendo el control sobre el tipo y la cantidad del residuo que se dispo-

ne, además los residuos no se compactan ni cubren diariamente, y los gases y líquidos se drenan sin control alguno. En los botaderos existen recicladores y criadores de cerdos, que ponen en riesgo la salud de los seres humanos y de los componentes de los ecosistemas.

Un botadero puede contaminar las aguas superficiales y subterráneas, el suelo, el aire; además de generar olores no deseados y ser foco de proliferación de insectos y roedores, vectores transmisores de enfermedades.

Los botaderos deben ser transformados en rellenos sanitarios si existen las condiciones para ello, o clausurados, dejando el lugar rehabilitado de modo que no se generen impactos ambientales negativos¹.

Un relleno sanitario es una infraestructura diseñada para la disposición final de residuos municipales (urbanos o domésticos). Un relleno sanitario es una alternativa comprobada para la disposición final de residuos sólidos municipales. En el relleno sanitario los residuos sólidos se confinan en el menor volumen posible, existe control del tipo y cantidad de residuos que se deposita; además de controlar los gases, evitar los olores no deseados y drenar y tratar adecuadamente los lixiviados que se generan por la humedad de los residuos y las lluvias².

III. COMPONENTES DE UN RELLENO SANITARIO

El relleno sanitario cuenta con las siguientes áreas: ingreso, recepción y pesado, vías de acceso, depósito para el material de cobertura, depósito para el almacenamiento de agua, una depresión para el depósito de residuos, un lugar para el estacionamiento de maquinarias y sistemas de compactación; así como, oficinas administrativas y servicios básicos, tanto para el personal, como para los visitantes.

IV. CÁLCULOS BÁSICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UN RELLENO SANITARIO

Con la finalidad de ilustrar la forma de realizar los cálculos básicos para la determinación de la vida útil de un relleno sanitario, se presenta un caso general, con la información correspondiente y luego tres situaciones, que corresponden a los Caos I, II y III.

Caso general

Una ciudad de 10 000 habitantes dispone de un lugar de sección cuadrada para depositar los residuos sólidos generados por su población. El área disponible es de 5 ha; por características de diseño es necesario considerar un espacio para la circulación y los bordes, de 15 m de ancho. La operación del relleno implicará la acumulación de los residuos, en una depresión de una profundidad máxima de 10 m, tomando como referencia el nivel del suelo. Cuando el relleno haya llegado al límite de su capacidad (al final de su vida útil), será recubierto por 2,5 m de material de cobertura. La altura del relleno no debe exceder los 6 m de altura (sobre el nivel del suelo).

Del trabajo de campo efectuado se ha determinado una producción per cápita de residuos (ppc) de 1,2 kg/hab.día y de acuerdo a las campañas de la autoridad ambiental se espera reciclar el 25% de la cantidad generada. La densidad² compactada de los residuos que van al relleno es de 0,85 TM/m³.

Calcular la vida útil del relleno (o tiempo de servicio) en años, si el factor de carga es 1,25 (debido al material de cobertura utilizado por cada celda). Considerar que los residuos se generan los 365 días del año⁴.

Caso I

Tomando como referencia los datos del caso general. ¿Cuál será el valor de la vida útil (VU) en años, si la tasa de crecimiento poblacional es cero; es decir, la población se mantiene constante en el tiempo?

Procedimiento de cálculo:

Paso 1. Cálculo de la longitud del área efectiva (L^*)

La longitud efectiva (L^*) es la diferencia entre la longitud disponible del terreno menos el doble del espacio mínimo destinado para los bordes y el área de circulación⁵.

$$L^* = L - 2e \quad (1)$$

Como el área disponible (A_d) es cuadrada, la longitud disponible se puede calcular utilizando la relación elemental:

$$L = (A_d)^{1/2} \quad (2)$$

Reemplazando valores y aproximando se tiene:

$$L = 224 \text{ m}$$

Por lo tanto la longitud efectiva es:

$$L^* = 224 \text{ m} - 2(15) \text{ m} = 194 \text{ m}$$

Paso 2. Cálculo del volumen efectivo del relleno

El volumen efectivo (V_e) será aproximadamente el volumen de un paralelepípedo rectangular, el cual se puede calcular por el producto del área efectiva (A_e) por la altura efectiva (H_e):

$$V_e = (A_e) \cdot H \quad (3)$$

Para el cálculo de la altura efectiva se deberá considerar la profundidad de la depresión (p) más la altura resultante de la diferencia entre la altura máxima permitida (h) y el espesor del material de cobertura superior (e):

$$H_e = p + (h - e) \quad (4)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$H_e = 10 \text{ m} + (6 - 2,5) \text{ m} = 13,5 \text{ m}$$

Entonces el volumen efectivo es:

$$V_e = (L^*)^2 \cdot H_e \quad (5)$$

$$V_e = 5,08 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Paso 3. Cálculo del volumen del relleno efectivamente utilizado (V)

Para este cálculo hay que tener en cuenta el número de habitantes (N), el porcentaje de los residuos que va al relleno (P), la densidad compactada estimada (dc) y el factor de carga (fc) correspondiente al material de cobertura utilizada en la construcción de las celdas.

$$V = (N \cdot P \cdot ppc \cdot fc) / dc \quad (6)$$

Reemplazando valores, teniendo en cuenta que $P = 0,75$ y utilizando un factor de conversión adecuado se tiene:

$$V = 13,24 \text{ m}^3/\text{día}$$

Paso 4. Cálculo de la vida útil en años (VU)

La vida útil en este caso se puede calcular con la siguiente relación:

$$VU = (V_e/V) \quad (7)$$

Reemplazando valores y aproximando se tiene:

$$VU = 105 \text{ años}$$

Caso II

Tomando como referencia los datos del caso general. ¿Cuál será la vida útil del relleno, si se espera un crecimiento lineal de la población, duplicándose el número de habitantes, cada 20 años?

Procedimiento de cálculo:

Paso 1. Cálculo de la cantidad de residuos depositados al finalizar el primer día (m_0).

La cantidad de residuos depositados al finalizar el primer día, depende de la cantidad de habitantes, del porcentaje de residuos que va al relleno y de la producción per cápita de residuos, según la relación:

$$m_o = N.P. ppc \quad (8)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$m_o = 9000 \text{ kg/día}$$

Paso 2. Cantidad de residuos depositados al finalizar el último día (mf):

Análogamente, pero teniendo en cuenta que el volumen se duplica, cada 20 años, se tiene:

$$mf = 18\,000 \text{ kg/día}$$

Paso 3. Cálculo de la tasa de incremento de la cantidad de residuos depositados diariamente ($\Delta m/\Delta t$)

Para calcular la tasa de incremento, se utiliza la siguiente relación:

$$\Delta m/\Delta t = (mf - m_o)/n \quad (9)$$

donde n es el número de años considerado, en este caso n = 20 años.

Reemplazando valores se tiene:

$$\Delta m/\Delta t = 1,23 \text{ (kg/día)/día}$$

Paso 4. Cálculo de la masa depositada en un día «d» (md)

$$md = m_o + (\Delta m/\Delta t)(d-1) \quad (10)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$md = 9000 + 1,23 (d-1) \quad (11)$$

Si la relación (11) se escribe:

$$md = m_o + (\Delta m/\Delta t) d \quad (12)$$

el error que se comete es despreciable.

Paso 5. Cálculo de la masa acumulada depositada en un tiempo «t» (mt)

Reemplazando valores e integrando de 0 al tiempo t en días:

$$m_t = \int_0^t (9000 + 1,23t) dt \quad (13)$$

$$mt = 9000t + 0,615t^2 \quad (14)$$

Paso 6. Cálculo de la cantidad máxima depositada teniendo en cuenta las dimensiones del terreno m_{max}

La cantidad máxima expresada en unidades de masa (m_{max}) es:

$$m_{max} = V_e \cdot dc / fc \quad (15)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$m_{max} = 3,45 \times 10^8 \text{ kg}$$

Paso 7. Cálculo de la vida útil del relleno (VU):

La vida útil del relleno en días se podrá encontrar al igualar $mt = m_{max}$:

$$9000t + 0,615t^2 = 3,45 \times 10^8$$

Resolviendo esta ecuación se tiene que t = 17 472 días.

Convirtiendo este valor en años y redondeando, se tiene:

$$VU = t/365 \quad (16)$$

$$VU = 48 \text{ años}$$

Caso III

Tomando como referencia los datos del caso general. ¿Cuál será la vida útil del relleno, si se espera un crecimiento exponencial de la población, de 1,80 % anual? (5)

Procedimiento de cálculo:

Paso 1. Cálculo de la cantidad depositada al finalizar el primer año (V_o)

La cantidad depositada al finalizar el primer año depende del número de habitantes (N), del porcentaje de residuos que va al relleno (P), de la producción per cápita (ppc) y de la densidad compactada (dc), debiendo utilizar los factores de conversión adecuados.

$$V_o = (N.P. ppc. fc / dc) \quad (17)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$V_0 = 4,83 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ (al finalizar el primer año).}$$

Paso 2. La población aumenta en 1,8% anual, lo que significa que al finalizar el año 2, la cantidad de residuos depositados será la suma de la cantidad V_0 más la cantidad V_1 , la que se calcula de la siguiente manera:

$$V_1 = (1+r)^1 \cdot V_0 \quad (18)$$

Donde r es la tasa de crecimiento poblacional. Reemplazando valores y calculando se tiene:

$$V_1 = 4,92 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Entonces la cantidad acumulada es:

$$V_{a1} = 9,75 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Análogamente para el tercer año

$$V_2 = (1+r)^2 \cdot V_0$$

$$V_2 = (1.018)^2 \cdot 4,83 \times 10^3 \text{ m}^3 = 5,01 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$V_{a2} = V_2 + V_{a1} = 14,76 \times 10^3 \text{ m}^3$$

La vida útil del relleno se encontrará por iteraciones sucesivas cuando el volumen acumulado V_{an} coincida con el volumen efectivo del relleno ($V_e = 5,08 \times 10^5 \text{ m}^3$), para lo cual se hace uso de una hoja de cálculo.

Utilizándose el método descrito, se encuentra que la vida útil del relleno estará entre 58 y 59 años.

V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Cuadro N° 1. Resultados obtenidos para cada uno de los tres casos.

	Caso I	Caso II	Caso III
VU (años)	105	48	58-59

Del cuadro N° 1 se observa que en el Caso I, si la población no aumenta, situación que no se presenta a nivel de países en vías de desarrollo, la vida útil del relleno será máxima, en el Caso II, se ha supuesto un crecimiento lineal duplicándose cada 20 años, lo cual se

aproxima un poco más a la realidad y el Caso III, sería el más recomendado cuando se tienen datos demográficos actualizados para países en vías de desarrollo donde el crecimiento poblacional es exponencial.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Es posible determinar mediante cálculos básicos la vida útil de un relleno sanitario, teniendo como información fundamental, la producción per cápita y la densidad compactada; así como la población para un año de referencia.
2. Para los tres casos se ha considerado que el 25% de los residuos municipales es reciclado, por lo tanto el 75% de los residuos generados va al relleno. Se observa que, si se aumenta el porcentaje de residuos reciclados la vida útil del relleno aumentará.
3. El factor de carga depende de consideraciones de diseño. Si este valor es menor, la vida útil será mayor.
4. Para comunidades donde se mantiene aproximadamente constante la población, se recomienda el método indicado para el Caso I.
5. Para comunidades donde la población aumenta linealmente, se recomienda usar el método indicado para el Caso II.
6. Para comunidades donde la población aumenta exponencialmente, se recomienda usar el método indicado para el Caso III.
7. La vida útil del relleno es una información fundamental cuando se reporta el diseño de un relleno sanitario.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CONAM - CEPIS/OPS. Guía técnica para clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos. Primera impresión. Lima. 2004, pp. 11, 12, 13-59.
2. CONAM. Guía técnica para la formulación e implementación de planes de

- minimización y reaprovechamiento de residuos sólidos en el nivel municipal. Primera impresión. Lima. 2006, pp. 32-33.
3. Herry Glynn, Heinke Gary, Ingeniería Ambiental. Prentice Hall. Segunda Edición. México. 1999, pp. 596-600.
 4. Miller Tyler Jr, Ecología y Medio Ambiente. Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V. Primera Edición. México. 1994, pp. 573-579.
 5. Loayza Jorge, Gestión de Residuos Industriales. Programa de Titulación Extraordinaria. Escuela Profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química e Ingeniería Química. UNMSM, Lima. 2006, pp. 120-123.

Ce

I. INT

Over
have
by in
(PSE
syste
(MPC
many
impr
payb.
Whik
indus
the ir

Abno
descri
the p
accep
contr
distur
order
situa

* Aut
Em