

<https://rcientificaesteli.unan.edu.ni>

DOI: <https://doi.org/10.5377/farem.v11i3.14916>

Propuesta de procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

Proposed procedure for the environmental life cycle assessment of sanitary landfill sites

Lidia Esther Batista Vázquez

Universidad de Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-5022-4374>

lbatastav@uho.edu.cu

María Onelia Urbina Reynaldo

Universidad de Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0003-4202-8151>

maria_urbino@uho.edu.cu

RECIBIDO

10/02/2022

ACEPTADO

23/08/2022

RESUMEN

Los rellenos sanitarios actualmente constituyen una alternativa viable para la gestión de residuos, sin embargo, la mayoría de los calificados como tal no cumplen las especificaciones técnicas requeridas, lo que ha generado impactos al medio, y es motivo de preocupación internacional. La evaluación ambiental es una herramienta de protección que responde a tal problemática y surge a finales de los años 60, es asumida como instrumento y metodología para la ejecución de los estudios ambientales, acorde a la utilización de una escala de parámetros o indicadores, que no se incorporan a los vertederos. Por tal razón, a partir del empleo de un conjunto de métodos de investigación del nivel teórico, empírico y estadístico se diseña un procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de dichas instalaciones, a partir de la integración coherente de indicadores ambientales de la normativa alemana para sitios de disposición final y de la Norma Cubana NC 135:2002 que permita la toma de decisiones oportunas. La propuesta contemplada en este artículo se fundamenta en una serie de concepciones teórico - metodológicas desde dimensiones ambiental, institucional, participativa, legal y económica, que posibilita contar con una herramienta de evaluación. Esta propuesta está integrada por tres fases y ocho pasos, para organizar la situación/inventario, ejecutar la evaluación después de definidos los indicadores, precisar las actividades y categorías de impacto, e interpretar los resultados. Esta propuesta de procedimiento ofrece una propuesta de acciones en los métodos constructivos y de operación, o para el cierre, sellado y inserción de la infraestructura para minimizar las afectaciones a los sistemas natural y socioeconómico.

PALABRAS CLAVE

Evaluación ambiental; ciclo de vida; indicador; vertedero.



ABSTRACT

Landfills currently constitute a viable alternative for waste management, however, most of those qualified as such do not meet the required technical specifications, which has generated impacts to the environment, and is of international concern. Environmental assessment is a protection tool that responds to this problem and emerged at the end of the 1960's. It is assumed as an instrument and methodology for the execution of environmental studies, according to the use of a scale of parameters or indicators, which are not incorporated to landfills. For this reason, based on the use of a set of theoretical, empirical and statistical research methods, a procedure is designed for the environmental evaluation of the life cycle of these facilities, from the coherent integration of environmental indicators of the German regulations for final disposal sites and the Cuban Norm NC 135:2002, which allows timely decision making. The proposal contemplated in this article is based on a series of theoretical-methodological conceptions from environmental, institutional, participatory, legal and economic dimensions, which makes it possible to have an evaluation tool. This proposal is made up of three phases and eight steps to organize the situation/inventory, carry out the evaluation after defining the indicators, specify the activities and impact categories, and interpret the results. This proposed procedure offers a proposal for actions in the construction and operation methods, or for the closure, sealing and reinsertion of the infrastructure to minimize the effects on the natural and socioeconomic systems.

KEYWORDS

Environmental assessment; life cycle; indicator; landfill.

INTRODUCCIÓN

289

La Evaluación Ambiental (EA) es asumida como instrumento de política pública, procedimiento administrativo y metodología para la ejecución de los estudios ambientales (Leiva, 2011). Va acorde a la utilización de una escala de niveles (parámetros o indicadores). Estos reflejan el estatus político, la forma de gobierno, la cultura e idiosincrasia de los pueblo. Por ello su diseño debe estar sujeto a las tendencias establecidas a escala internacional considerando las particularidades específicas de cada región donde se aplicarán (Leiva, 2011) que permita recopilar información y realizar una toma de decisiones eficiente (Mijangos-Ricardez, 2013).

Teniendo en cuenta estos criterios se hace necesario encontrar soluciones que conlleven a un correcto procedimiento de EA, donde se tome en cuenta el ciclo de vida de los vertederos y la inclusión de indicadores ambientales a medir. Para ello se consultaron investigaciones y estudios referidos al tema que aportaron visiones diferentes. Entre ellos la Ley 81 del Medio Ambiente (1997); las normas cubanas NC 133, 134 y 135 del 2002; el Decreto alemán para vertederos y sitios de disposición final (2009) y la Resolución No. 132/2009. Se analizaron las experiencias nacionales e internacionales desarrolladas por Espinosa et al. (2010), Espinosa (2012), Sánchez y Coble (2012), Columbié (2012), Zapata Muñoz y Zapata Sánchez (2013), Zuluaga (2014), Koch et al. (2015) y Bau-Satula et al. (2017).

La sistematización de las bibliografías referenciadas permitió evidenciar que los problemas en los vertederos de relleno sanitario son comunes en varias regiones del mundo. Sus causas están relacionadas entre otras por los insuficientes lineamientos técnicos básicos para lograr una situación más favorable. Los existentes no están concebidos en su mayoría para el control particular de sitios de disposición final, no cuentan con el apoyo de indicadores ambientales para su evaluación desde etapas tempranas, o los que existen no están actualizados.

Se visualiza, entonces, la carencia de una planificación adecuada de las actividades que conforman el ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario al no tomar en cuenta los criterios de medición, la interacción entre ellos, ni su comportamiento durante todas las etapas. Además, no se realiza una caracterización físico- química de las emisiones y los parámetros a medir y sus valores varían en cada investigación sin el análisis adecuado de los mismos. Por tanto, no se emiten resultados confiables al identificar los impactos ambientales sobre el medio físico, biológico y social, y en ocasiones, es imposible acceder a los servicios de un laboratorio especializado. Es por ello que resulta necesario el diseño de un procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario que favorezcan su operación y mantenimiento para minimizar las afectaciones a los sistemas natural y socioeconómico.

MATERIALES Y MÉTODOS

290

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó como guía la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la ISO 14040: 2009, con la incorporación de indicadores ambientales del Decreto alemán para vertederos y sitios de disposición final (2009). Se consideran las características de los vertederos existentes en Cuba y la disponibilidad de materiales e instrumentos. Fue necesario emplear los métodos de investigación teóricos, empíricos y estadísticos que permitieron realizar un análisis histórico considerando la información precedente. Entre ellos la revisión de documentos, el análisis – síntesis; el histórico –lógico, la inducción – deducción, hipotético-deductivo, encuestas; entrevistas, consultas a directivos y observación científica.

Para la valoración de la factibilidad de la propuesta del procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario se somete al criterio de especialistas. Para su selección se tomó en cuenta la experiencia en la práctica sobre el tema que se consulta y que fuera un posible usuario de la propuesta que se somete a su consideración. Basado en ello, se conformó un grupo de 19 personas procurando que cumplieran los siguientes requisitos:

- Universitarios.
- Más de 10 años en su desempeño profesional.
- El dominio teórico de las temáticas referentes a la propuesta a evaluar.
- Una trayectoria avalada por resultados científicos-investigativos destacados.
- Voluntariedad para su cooperación con la investigación.

Para la selección definitiva del grupo de especialistas a los que se aplicaría la encuesta, se hizo necesaria la determinación del coeficiente de competencia (K_c) de cada uno, utilizando la autovaloración del mismo por el propio experto de acuerdo con la opinión sobre su nivel de conocimiento acerca del problema que se está resolviendo y con las fuentes que le permiten argumentar sus criterios.

$$K_c = \frac{1}{2}(k_c + k_a)$$

Donde:

K_c : es el coeficiente de competencia.

k_c : es el coeficiente de conocimiento o información que tienen el experto acerca del problema, calculado sobre la valoración del propio experto en una escala de 0 a 10 y multiplicado por 0,1. De esta forma, la evaluación 0 indica que el experto no tiene absolutamente ningún conocimiento de la problemática correspondiente, mientras que la evaluación de 10 significa que el experto tiene pleno conocimiento del problema planteado.

k_g : es el coeficiente de argumentación de los criterios del experto, obtenidos como resultado de la suma de los puntos resultantes a través de una tabla patrón. Al experto se le presentará esta tabla sin cifras orientándose el marcado de cuáles de estas fuentes el considera que han influido en su conocimiento. Posteriormente utilizando los valores de la tabla patrón para cada una de las casillas marcadas por el experto se calcula el coeficiente de argumentación.

Ya determinados ambos coeficientes se calcula el coeficiente de competencia del experto el cual se clasifica de la siguiente forma:

Si $0,8 \leq K_c \leq 1$, el coeficiente de competencia del experto es alto.

Si $0,5 \leq K_c < 0,8$, el coeficiente de competencia del experto es medio.

Si $K_c < 0,5$, el coeficiente de competencia del experto es bajo.

De los 19 especialistas, 12 presentan un coeficiente de competencia superior o igual a 0,8 ($0,8 \leq K \leq 1$), al ser categorizados como especialistas altos; 6 presentan el coeficiente de competencia en este intervalo: $0,5 \leq K < 0,8$, por lo que quedan clasificados como especialistas medios; mientras que 2 especialistas no resultaron seleccionados para aplicarles la segunda encuesta al tener sus coeficientes de competencia inferiores a 0,5. El coeficiente de competencia promedio de los expertos seleccionados resultó de 0.81, lo que asegura la fiabilidad en la selección de los especialistas.

Esto proceso permitió realizar las valoraciones pertinentes respecto a la competencia de los especialistas seleccionados, en este caso 17, provenientes de la Unidad Presupuestada de Servicios Comunales del Municipio Holguín (4), el CITMA (4), la Dirección Municipal de Higiene y Epidemiología (1), de Planificación Física (3), así como de la Universidad de Holguín (5). Una vez seleccionados se les hizo llegar una encuesta en la que se les anexó la propuesta de procedimiento de la investigación y se les pidió su opinión. Se les solicitó, además, su valoración sobre la base de las siguientes variables e indicadores de medición.

Variable 1. Aplicabilidad del procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.

1. Nivel en que se valora por los expertos la existencia de los requerimientos técnicos y humanos para aplicar el procedimiento.
2. Nivel en que valoran los expertos la claridad y precisión del procedimiento propuesto.
3. Nivel en que valoran los expertos la aceptación de la propuesta por trabajadores de las entidades a fin y de la población en general.

Para los indicadores de medición se utilizará como escala: Medianamente Aplicable (MA); Aplicable (A) y No aplicable (NA)

Variable 2. Eficiencia del procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.

1. Nivel en que valoran los expertos el favorecimiento en la reducción de las afectaciones a los recursos naturales, entorno social e imagen urbana.
2. Nivel en que valoran el favorecimiento del logro del carácter educativo de la propuesta.
3. Nivel en que valora el favorecimiento del proceso de EA de los vertederos de relleno sanitario con la propuesta del procedimiento.

Para los indicadores de medición se utilizará como escala: Medianamente Eficiente (ME); Eficiente (E) e Ineficiente (I)

Variable 3. Optimización del procedimiento.

1. Nivel en que valora el experto que el procedimiento sirve como buen instrumento teórico – práctico para el logro de las metas deseadas.

Para los indicadores de medición se utilizará como escala: Medianamente Pertinente (MP), Pertinente (P) y No Pertinente (NP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

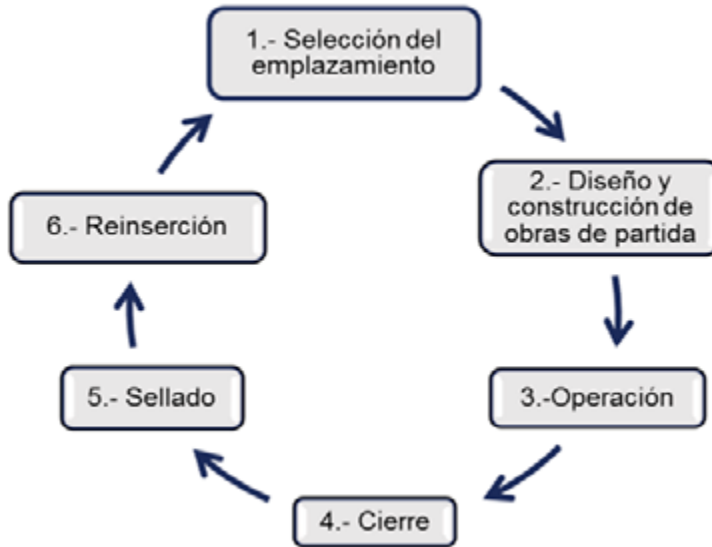
El ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

Una ventaja del relleno sanitario sobre otros métodos de tratamiento de residuos, es la posibilidad de recuperación de áreas ambientalmente degradadas por la minería o explotación de canteras, así como de terrenos considerados improductivos o marginales. Además requiere de una baja inversión de capital comparada con otros métodos de tratamiento (compostaje, incineración y reciclaje); generación de empleo de mano de obra no calificada; flexibilidad, en cuanto a la capacidad para recibir cantidades adicionales de desechos y la posibilidad de utilizar el gas metano producido como fuente alternativa de energía (Ulloa, 2006).

Constituyen según Quispe (2016) una instalación o infraestructura que cumple con las condiciones técnicas, sanitarias y ambientales empleadas para la disposición final de residuos, donde se realiza el esparcimiento, acomodo y compactación de los mismos sobre impermeable, la cobertura con tierra u otro material inerte, el manejo y tratamiento de lixiviados y gases y, el control de vectores con el fin de evitar la contaminación del medio ambiente y proteger la salud de la población. Sin embargo, los mal ubicados y/o contruidos pueden generar contaminación ambiental e impactar a la estética, salud pública y ocupacional.

En este sentido se deben evaluar las características del sitio, las particularidades operacionales y de control, así como las sanitarias y ambientales; mediante un procedimiento que permita determinar la pertinencia o no de su buen funcionamiento (Morocho, 2017). Para su evaluación se debe partir de cuáles son las etapas que conforman su ciclo de vida (figura 1).

Figura 1. Ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario



Fuente: Adaptado de Espinace (2003)

Etapa 1. Selección del emplazamiento.

Debe ser elegido adecuadamente y de acuerdo a las normativas vigentes en cada país. Es necesario tener en cuenta las características del suelo y la secuencia y distribución de los estratos. De igual manera, el régimen de las aguas freáticas, la permeabilidad del estrato superficial, la profundidad de los acuíferos, la protección del patrimonio cultural de la zona y las distancias entre el límite de las zonas residenciales y recreativas. Se deben analizar, además, factores técnicos como la estabilidad de taludes y la existencia y calidad del suelo de cobertura.

Etapa 2. Diseño y construcción de obras de partida.

En esta etapa se consideran fundamentalmente los pretiles, drenes y sellos. Para el diseño del sistema de explotación, es necesario preparar la zona de vertido y realizar una serie de operaciones que permitan dejar el terreno en condiciones de recibir los residuos.

Etapa 3. Operación del relleno sanitario.

Entre las principales obras de un relleno sanitario figuran la construcción de terraplenes o diques de contención, construcción de bermas de equilibrio, excavación de trincheras y excavación de canales de drenaje. Otro aspecto importante es la cobertura, el cubrimiento diario de los residuos y la cobertura final del relleno sanitario con tierra.

Etapa 4. Cierre del relleno sanitario.

Es la operación que da por finalizada la explotación. Se clausura el lugar y se realizan labores de desmantelamiento, limpieza y colocación de capa de cobertura final.

Etapa 5. Sellado.

Operación realizada después del cierre en la cual se construyen todas las obras destinadas a mantener los residuos aislados, minimizando los riesgos de contaminación y peligro sanitario. Se deben considerar las obras destinadas al monitoreo de gases y lixiviados, que es necesario mantener a largo plazo. También es objetivo preparar la superficie para realizar las futuras obras de reinscripción.

Etapa 6. Reinscripción de los rellenos sanitarios.

Se realizan los trabajos destinados a reincorporar a su entorno el relleno sanitario ya sellado, controlando las emisiones de biogás, lixiviados y los problemas que puedan causar los asientos, de manera que impida impactos negativos al ambiente y a la salud. La reinscripción, habitualmente tiene como alternativas de destino la agricultura, recreación y/o apoyo a algún tipo de estructuras.

La evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de rellenos sanitarios

Las evaluaciones ambientales para vertederos de relleno sanitario son muy diversas, y están encaminadas a identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales. A decir de Mijangos-Ricardez y López (2013) las consideraciones previas a su selección dependen, entre otros criterios, del marco normativo vigente, el tipo de estructura, magnitud y complejidad, características del medio social y físico-biótico potencialmente afectable y la etapa de desarrollo en la cual se aplicará. Es por ello que se puede afirmar que cualquier herramienta jurídica debe establecer las formas de llevar a cabo el proceso, los roles y responsabilidades institucionales involucrados, la coordinación de actividades, los plazos límites para llevarlos a cabo y las formas de participación ciudadana, entre otras (Luz De la Maza, 2007).

Diversos son las herramientas para la evaluación ambiental, a pesar de que en cada una varían los proyectos específicos en los que se puede aplicar, las actividades de ejecución, la documentación técnica requerida, los indicadores a medir. En el caso específico del ACV, de acuerdo a lo planteado por las normas ISO 14040:2009 e ISO 14044:2009 se dedica a identificar las oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos y servicios en las distintas etapas. El mismo aporta información para la toma de decisiones y la selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición. Está conformado por cuatro fases: definición del objetivo y el alcance;

análisis del inventario; evaluación del impacto ambiental e interpretación. Sin embargo, no es aplicable en todas las situaciones ya que generalmente no considera los asuntos económicos o sociales de un producto.

En el caso específico de Cuba, los antecedentes en las investigaciones en vertederos de relleno sanitario parten de Espinosa, M.C. et.al. (2010), quién realiza un análisis del comportamiento de los resultados del monitoreo de los lixiviados del mayor vertedero de residuos sólidos urbanos de Ciudad de La Habana. Aunque se realizaron mediciones de campo y de laboratorio, y se estudiaron diversos indicadores fisicoquímicos y microbiológicos, la carencia de sistemas de información y seguimiento para los sitios de disposición final, restringió la posibilidad de planificar y tomar decisiones, respecto al saneamiento ambiental del área. Los indicadores asumidos para el análisis fueron tomados de normas cubanas con más de 20 años por lo que se toma el riesgo de no contemplar otros parámetros y valores más actualizados.

Espinosa (2012) y Columbié (2012), deciden realizar la EA del vertedero de Alcides Pino en Holguín luego de detectar que las condiciones actuales del mismo mostraban una situación desfavorable y que lo habían convertido en un botadero a cielo abierto. Para ello se hace un diagnóstico de las condiciones higiénico sanitarias, según la NC-135: 2002, y la evaluación de los criterios geotécnicos en las diferentes etapas que componen el ciclo de vida de este proyecto. Los resultados obtenidos mostraron el incumplimiento de los requisitos higiénico- sanitarios y ambientales establecidos en la norma, pero aun así estos controles fueron insuficientes pues la norma no está dedicada a la EA, ni plantea un procedimiento para este estudio.

También Triana (2013) evalúa los impactos ambientales asociados al sistema actual de manejo de residuos sólidos urbanos en Sagua La Grande, incluyendo la recogida y disposición en el vertedero municipal (con tiempo en explotación de 18 años), y los residuos que generan las entidades de salud. Se aplicó la metodología del ACV junto con el programa Simapro 7.1 empleando el método del Eco-indicador 99 que considera 11 categorías de impacto y tres categorías de daños. De esta forma se demostró cuáles eran las etapas de mayor impacto ambiental durante todo el ciclo de vida para proponer mejoras y se apreció, que la disposición en el sitio actual tiene valores significativos en la categoría de cambio climático, combustibles fósiles y respiratorios de inorgánicos y que la categoría Salud Humana es la más impactada.

Como se evidencia la problemática de los vertederos son problemas comunes. Entre las causas se encuentran las limitaciones en instrumentos que permitan una planificación adecuada de las actividades que conforman su ciclo de vida desde la selección de emplazamiento hasta el cierre o reinserción así como en indicadores ambientales básicos para lograr un diagnóstico más acertado. Por ello se considera que para la EA de sitios de disposición final de residuos, resulta imprescindible la integración del procedimiento establecido en el ACV de la ISO 14040 con las etapas del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario,

así como la incorporación de indicadores de comportamiento y de situación medioambiental más adecuados.

Procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

La propuesta de procedimiento para la EA del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario, se desarrolla a través de cada una de las etapas de su ciclo de vida y parte de considerar en el análisis las siguientes dimensiones.

1. Dimensión ambiental.

Constituye uno de los ejes principales porque propicia el proceder del hombre como el centro de atención en su actuar vinculado a la naturaleza (Castroviejo y Herrero, 1992). Implica la existencia de espacios ambientalmente sostenibles, o sea, con estructuras ambientales óptimamente funcionales, una reproducción adecuada de los recursos y servicios ambientales y una degradación ambiental mínima [...] (Rodríguez, 2015). Constituye un aspecto importante en el que se necesita considerar entre otros:

- a) La adaptación a los requisitos legales y normativos, pues cualquier acción encaminada a la protección ambiental debe ser consistente con las leyes y decretos, así como con las normas, procedimientos, metodologías y demás mecanismos establecidos.
- b) Estimular la aplicación de indicadores ambientales, porque una adecuada medición permite conocer las carencias y potencialidades para el mejoramiento del servicio.

2. Dimensión institucional.

Tiene en cuenta los factores involucrados en el estudio, considerando las instituciones ya que el adecuado desempeño ambiental debe ser tanto interés de la población como de ellas. Estas son las capacitadas para, luego del conocimiento de la situación, realizar estudios y establecer sistemas de control.

3. Dimensión participativa.

En este caso resulta necesario:

- a) Desarrollar el compromiso de los factores involucrados y los habitantes para la protección del medio ambiente y hacer cumplir las evaluaciones establecidas, a partir de lograr la concientización colectiva en el éxito, la interrelación entre ellos y el adecuado desempeño ambiental.
- b) Conocimiento de la situación y de su evolución. La información debe obtenerse periódicamente mediante sistemas de control para determinar las oportunidades y problemas en relación con el entorno.
- c) Comunicación. La información debe transmitirse con fluidez y de forma

fidedigna entre los involucrados, creando un clima de cooperación entre las autoridades y la población.

4. *Dimensión legal.*

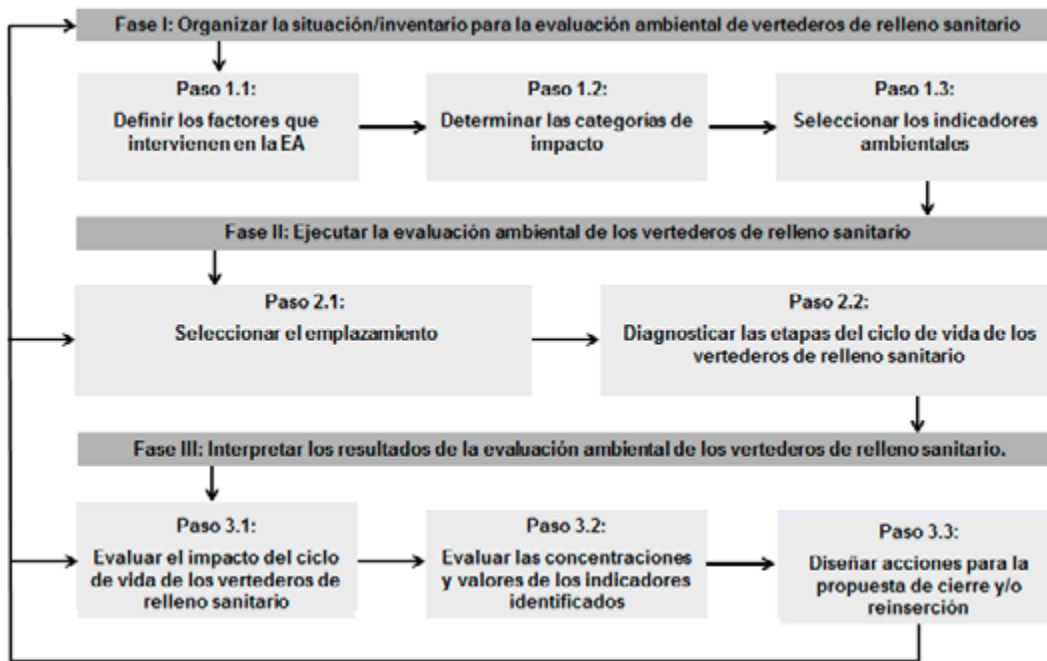
Es imprescindible partir de lo establecido actualmente en las normas y leyes dirigidas a la EA en vertederos. Además se debe contar con la documentación de partida que avale estén establecidas todas las condiciones necesarias. Esta dimensión a su vez está estrechamente relacionada con la dimensión ambiental y la institucional pues, su incumplimiento provocaría la generación de problemas asociados a impactos ambientales, y los organismos involucrados son los máximos encargados de emitir los documentos de autorización y realizar los estudios necesarios para ello.

5. *Dimensión económica.*

Al realizar la EA con la inclusión de indicadores, se contemplan los posibles impactos en los recursos naturales. Identificarlos permite minimizar los gastos en que incurre el Estado, bien para potabilizar las aguas de consumo por la contaminación de pozos aledaños. También, se minimizan los gastos en la salud pública por las afectaciones respiratorias provocadas en las personas por inhalación de humo, gases tóxicos y pequeñas partículas tóxicas que se generan en los procesos de combustión en el vertedero producto a las altas temperaturas y la descomposición de los residuos. De igual manera, se minimizan los gastos en la limpieza y operación de estos sitios al realizarse las acciones de mantenimiento, seguimiento y control en todas las etapas de su ciclo de vida.

El procedimiento propuesto tiene como objetivo considerar las características de los vertederos y las actividades que conforman su ciclo de vida de manera que se favorezca su operación y mantenimiento para minimizar las afectaciones a los sistemas natural y socioeconómico. Además de que sea aplicable en nuestro país y el resto del mundo de acuerdo a la disponibilidad de materiales e instrumentos para la EA de este tipo de obra de ingeniería. Está integrado por tres fases y ocho pasos (figura 2), los cuales cuentan con las acciones necesarias para su implementación.

Figura 2. Procedimiento de evaluación ambiental para vertederos de relleno sanitario.



Fuente: Adaptado de Espinace (2003) y de la NC-ISO 14040:2009.

Fase I: Organizar la situación/inventario para la evaluación ambiental de vertederos de relleno sanitario

Su objetivo es identificar los impactos medioambientales significativos de las actividades del vertedero a evaluar. Para ello se debe reflejar con claridad la situación medioambiental del área, así como la necesidad de la evaluación de acuerdo a las exigencias medioambientales y sociales.

Paso 1.1: Definir los factores que intervienen en la EA

Para la definición de los factores que intervienen en la EA, se deben determinar el objetivo y alcance, así como su profundidad y amplitud, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle. Todo ello será en dependencia del tema, objetivo y uso previsto de la evaluación, que permita garantizar compatibilidad y suficiencia. La técnica de ACV es iterativa, y mientras se recopilan los datos e información, pueden modificarse diversos aspectos del alcance para cumplir con el objetivo original del estudio.

Dentro de los factores a considerar, también se deben tener en cuenta los que motivan la necesidad de realizar una EA. Se definirá el objeto de estudio y se especificará el público previsto. Se deberá aclarar si se prevén utilizar los resultados en aseveraciones comparativas. Se explicarán, además, las limitaciones o imprevistos que se puedan presentar en cualquiera de las etapas del estudio, que impidan a su vez el logro del objetivo de manera parcial o total. Por último, se puntualizará el tipo y formato del informe requerido para el estudio.

Paso 1.2: Determinar las categorías de impacto

Las categorías de impacto seleccionadas se definirán de acuerdo al medio o factor que se esté midiendo. Pueden ser salud humana; impacto paisajístico; aguas superficiales y subterráneas; emisiones (de gases y líquidos); porción sólida del residuo, entre otras. Se determinarán, en este caso, de acuerdo a aquellos medios que, tanto las normas cubanas (NC 133, 134 y 135: 2002) y el Decreto alemán (2009), consideran como impactados por los vertederos de relleno sanitarios.

Paso 1.3: Seleccionar los indicadores ambientales

Será imprescindible la consulta la NC 135:2002 y del Decreto alemán (2009) para la selección de los indicadores que se medirán resumidos en: contenido orgánico del residuo seco de la sustancia original (que se determina como pérdida de calor y como TOC, criterios de materiales sólidos (se determinan los contenidos de BTEX, PAK, sustancias lipofílicas y metales pesados en la masa seca), criterios de eluato (pH, DOC, fenoles, metales pesados, contenido total de sólidos disueltos y conductividad eléctrica).

Se seleccionarán indicadores de comportamiento y de situación medioambiental. Los primeros se utilizarán como punto de partida y se centrarán en la planificación, control y seguridad del impacto medioambiental de la instalación. Pueden representar la base para una gestión de costos medioambientales. Se dividirán en indicadores de materiales, de infraestructura y de transporte.

- a). Los indicadores de materiales se refieren a la disposición de material para la preparación del terreno, y para la cobertura y aislamiento de los residuos.
- b) Los indicadores de infraestructura medirán la existencia de servicios básicos para los trabajadores, áreas que conforman la instalación (desde una cerca perimetral hasta un área de clasificación de residuos), cómo están dispuestas las trincheras para la disposición, la implementación de sistemas de recolección y tratamiento de emisiones.
- c) Los indicadores de transporte, medirán sus condiciones y existencia tanto para el traslado de los residuos como para su manejo dentro de la instalación.

Los indicadores de situación medioambiental por su parte, describirán la calidad del entorno medioambiental de la instalación. Determinar estos indicadores merece un esfuerzo considerable y solo merece la pena si la instalación es la causa fundamental de un problema medioambiental de su zona.

Fase II: Ejecutar la evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario

Esta fase persigue el objetivo de ejecutar el proceso de evaluación luego de haber sido definidos los indicadores a evaluar, en qué actividades y para qué categorías de impactos. Se controlará el desarrollo de las actividades definidas

para la etapa del ciclo de vida y se medirán aquellos indicadores a los que sea necesario analizar a nivel de laboratorio.

La fase de ejecución de impacto de un ACV tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario. En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías, para entender estos impactos. La fase de la evaluación también proporciona información para la fase de interpretación del ciclo de vida (NC-ISO 14040:2009).

Su objetivo es recopilar los datos necesarios del sistema bajo estudio para cumplir los objetivos del mismo. En esta se desarrolla todo lo correspondiente a la selección del emplazamiento, el diseño y construcción de obras de partida y la operación del vertedero. Para darle al proceso de EA el nivel científico requerido y aún más calidad, se incorporarán los indicadores de comportamiento y de situación medioambiental a los que se hizo referencia anteriormente. Los primeros se refieren al cumplimiento de la infraestructura, documentación técnica, y sus requisitos de operación, y los segundos a los indicadores físicos-químicos a medir.

Paso 2.1: Seleccionar el emplazamiento

Una correcta selección del emplazamiento constituirá el cimiento para el funcionamiento exitoso del vertedero y a su vez se harán mínimos los impactos en su entorno y medio ambiente. Para la selección del emplazamiento, se deberán realizar las siguientes actividades:

Actividad 1. Ubicar el objeto de estudio de la investigación.

Actividad 2. Verificar si la instalación cuenta con la documentación técnica requerida.

Actividad 3. Puntualizar las entradas y salidas pertinentes así como los procedimientos de cálculo para cuantificarlas.

Actividad 4. Clasificar el vertedero.

a) De acuerdo a la disposición final, según Jaramillo (2002):

- Relleno sanitario mecanizado: diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias de residuos sólidos y cuya operación será con equipos pesados.
- Relleno sanitario semimecanizado: cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos sólidos, y se emplee maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual.
- Relleno sanitario manual: para pequeñas poblaciones que producen

menos de 15 t de residuos/día y sus condiciones económicas no están en capacidad de adquirir el equipo pesado. En este último, la operación de los residuos será con el apoyo de una cuadrilla de hombres y el empleo de algunas herramientas.

b) De acuerdo al método constructivo y la secuencia de la operación.

Existen dos maneras para construirlo, una es con el método de trinchera o zanja, que se utiliza en regiones planas. Consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad, con el apoyo de una retroexcavadora o tractor de oruga. Los residuos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos.

El método de área es el otro utilizado para construir un relleno sanitario. Se emplea en áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar la basura. Esta puede depositarse directamente sobre el suelo original, el que debe elevarse algunos metros, previa impermeabilización del terreno. Ambos métodos pueden combinarse para lograr un mejor aprovechamiento del terreno del material de cobertura y de los rendimientos en la operación (Jaramillo, 2002).

c) De acuerdo al tipo de residuo depuesto (Decreto Alemán (DepV § 2 Nr. 6).

Se dividen en cinco clases de vertederos:

- Vertederos sobre la superficie, que comprenderán los vertederos Clase (VC) desde VC 0 hasta VC III:
 - a) VC 0: Vertedero de residuos inertes.
 - b) VC I: Vertedero de residuos no peligrosos con poca cantidad de material orgánico (escombros de construcción, suelos y escorias minerales).
 - c) VC II: Vertedero de residuos comerciales.
 - d) VC III: Vertedero de residuos no peligrosos y residuos peligrosos que cumplan determinados criterios establecidos en el decreto (residuos especiales).
- Vertederos bajo la superficie:
 - a) VC IV: Vertederos subterráneos (residuos especiales), que bien pueden ser depositados en una mina con una zona separada del depósito de una producción de minerales, o en una caverna completamente encerrada.

Paso 2.2: Diagnosticar las etapas del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

El diagnóstico de las etapas del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario permitirá describir el comportamiento medioambiental de la instalación estudiada y aquellas actividades y/u operaciones que están siendo incumplidas en cada una de las etapas del ciclo de vida definidas.

Etapa 2: Diseño y construcción de obras de partida

Actividad 1. Controlar la preparación de la superficie del terreno para que tenga la impermeabilidad requerida. Se chequeará si se han garantizado en el área de deposición del vertedero tanto la barrera geológica como el sistema de impermeabilización de la base, con los componentes que ameriten de acuerdo a la clase de vertedero en cuestión, y cada uno de ellos con las características exigidas, según lo que se refleja en el Decreto alemán para vertederos y sitios de disposición final (2009).

Actividad 2. Chequear la disponibilidad de servicios auxiliares para los trabajadores: como el agua, luz y comunicación, etc.

Actividad 3. Verificar que se cuente con una puerta de entrada e identificación visible en la misma, y con un camino de acceso y las condiciones del mismo.

Actividad 4. Determinar si el vertedero está cercado y en qué condiciones.

Actividad 5. Precisar si existe un sistema de desviación de pluviales, y de sistemas de drenaje y recolección de las aguas superficiales y subterráneas.

Etapa 3: Operación

Actividad 1. Definir origen y clasificación de los residuos recibidos.

Actividad 2. Precisar los medios de transportación que se utilizan para los residuos y la capacidad de cada uno de estos medios.

Actividad 3. Determinar las formas de control de las entradas y salidas.

Actividad 4. Identificar las maquinarias existentes para el manejo de los residuos en la instalación y las condiciones de las mismas.

Actividad 5. Considerar la disponibilidad de material para la preparación de trincheras y la cobertura de los residuos.

Actividad 6. Identificar la existencia de medidas correctivas o preventivas para el impacto visual y paisajístico durante la explotación: la NC 135: 2002 establece que las instalaciones de tratamiento y disposición final de residuos quedan obligadas a implementar estas medidas mediante pantallas visuales, adecuación de la instalación al paisaje, acceso oculto a la visión directa u orientación de las trincheras para reducir el impacto visual, integrándose las medidas aplicadas al plan de rehabilitación al cierre de la instalación.

Actividad 7. Tomar y preparar la muestra de material para ensayos a nivel de laboratorio: se realiza la toma de muestras de los residuos en la instalación. Se utiliza el método de cuarteo o de fragmentación. Se toman con ayuda de una

pala los residuos de diferentes puntos de forma que se obtenga una muestra que contenga todos los tipos de residuos depositados hasta el momento.

Actividad 8. Realizar el análisis físico-químico de las muestras de residuos.

Cuando ya se cuente con las muestras necesarias para su análisis se remitirá al anexo 1 donde se exponen un gran número de parámetros a verificar en diferentes vertederos y etapas de su ciclo de vida. En el caso de los residuos tratados mecánica y biológicamente se establecen como indicadores:

- la porción orgánica del residuo seco de la sustancia original: se considera cumplida cuando tiene un TOC de 18 % en masa o cuando el mayor valor de calentamiento de 6 000 kJ/kg MS (masa seca) no se supera;
- el DOC: de máximo 300 mg/l;
- la biodegradabilidad del residuo seco de la sustancia original: de 5 mg/g (determinado con la prueba de laboratorio de la transpirabilidad, determinado a lo largo de 4 días) o 20 l/kg (determinada con la velocidad de formación de gas determinado a lo largo de 21 días en una prueba de laboratorio) no se supera.

Además, se deberá medir:

- Temperatura de los lixiviados.
- Contenido de humedad y el material orgánico

Ensayos a los residuos líquidos (lixiviados):

Se deben preparar los lixiviados para realizar los ensayos correspondientes. Para ello resulta necesario filtrarlos para obtener un líquido lo más claro posible, con ínfimas cantidades de sólidos pero de un color marrón claro propio de su interacción con materia orgánica.

- Conductividad eléctrica:
- Valor de pH y temperatura:
- Determinación de metales pesados:

Es válido además la medición de indicadores que no se exijan en el Decreto Alemán para vertederos y sitios de disposición final, siempre que se consideren también de importancia y que se disponga de los materiales necesarios.

Fase III: Interpretar los resultados de la evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario.

La interpretación de los resultados intenta ofrecer una lectura comprensible, completa y coherente de la presentación de resultados de un ACV (NC-ISO 14040:2009). Deberá proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance definidos, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones. Se desarrollará a través de tres pasos.

Paso 3.1: Evaluar el impacto del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

En este paso se deben exponer los resultados de la EA obtenidos de los análisis realizados en las actividades definidas para los pasos anteriores, a partir de lo definido para cada una de las etapas del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario. Los resultados de los análisis para las fases I y II permitirán identificar la etapa que más impacto genera en caso de incumplirse la normativa técnica y legal establecida; cuáles actividades se están incumpliendo, en qué etapas del ciclo de vida y qué daños están provocando.

Paso 3.2: Evaluar las concentraciones y valores de los indicadores identificados.

Se deberán interpretar los resultados en base a las concentraciones obtenidas, sus posibles causas y consecuencias. Exponer los resultados de los indicadores medidos a nivel de laboratorio.

Paso 3.3: Diseñar acciones para la propuesta de cierre, sellado y reinserción.

Las actividades de cierre y sellado de un vertedero de relleno sanitario van de la mano al final de su ciclo de vida. Al final de la evaluación, y en dependencia de si los resultados son positivos o no, se procederá al cierre de la instalación, o solo se requerirá su sellado en caso de ser pertinente que se mantenga funcionando.

Si finalmente se determina la necesidad del cierre de la instalación (etapa 4) se debe:

Actividad 1. Proponer un plan de medidas para continuar el monitoreo o para mitigar aquellos factores que no estén rindiendo de la mejor forma.

Actividad 2. Concluir si existe alguna posibilidad de aprovechamiento de los residuos como puede pasar con la fracción orgánica para fabricar compost que puede ser utilizado como abono sustituyendo el uso de fertilizantes químicos y reduciendo la emisión de óxidos de nitrógeno. Esta actividad se debe realizar incluso si las conclusiones fueran favorables y no requirieran de un cierre.

Actividad 3. Especificar si existen posibilidades de reinserción y destinar un nuevo lugar para la disposición de los residuos antes aquí recibidos.

La etapa que le seguiría sería la de sellado (se realice o no el cierre del vertedero), para la cual es necesario:

Actividad 1. Verificar el funcionamiento de los sistemas de recolección de gases y lixiviados: si están funcionando adecuadamente, y si es que estos fueron construidos.

Actividad 2. Chequear las condiciones de la capa de recultivación: aquí se mide la calidad de la cobertura, tanto el modo en que se hizo como la calidad del material.

Ya para la última etapa del ciclo de vida del vertedero (etapa 6: reinserción), se deberán definir las siguientes actividades:

Actividad 1. Demostrar las posibilidades de reinserción: Se determinará si es posible reincorporar el relleno sanitario ya sellado a su entorno de acuerdo al grado de contaminación, en gran parte determinado por la correcta implementación de las instalaciones de monitoreo, necesarias para el control.

Actividad 2. Proponer alternativas de reinserción: se puede dar la oportunidad de su empleo como terreno agrícola o el uso como terreno recreacional. Finalmente se debe especificar si será necesario esperar un tiempo (y de ser así de cuánto) hasta que el suelo recupere sus nutrientes naturales para poder realizar la reinserción y si en el proceso se deberán chequear las emisiones como las de metano o de los lixiviados generados.

Valoración de la factibilidad de la propuesta

Para la validación de la propuesta de procedimiento se aplicó el criterio de expertos que demostró que los siete criterios evaluados en las tres variables fueron en su totalidad considerados positivos desde el punto de vista de la aplicabilidad con un 80%, la eficiencia (94%) y la optimización de la propuesta (82%). Además, sirvió como vía de enriquecimiento de la investigación por las sugerencias ofrecidas por los especialistas para dar continuidad a su perfeccionamiento.

En la variable 1, el 76% de los expertos considera aplicable la existencia de los requerimientos técnicos y humanos para aplicar el procedimiento. En la variable 2 el 100% supone que el procedimiento permitirá reducir las afectaciones a los recursos naturales, entorno social e imagen urbana y reconoce el logro del carácter educativo de la propuesta. Del mismo modo, en la variable 3, el 88% considera que el procedimiento sirve como buen instrumento teórico – práctico para el logro de las metas deseadas.

Se puede afirmar que de manera general el sistema de indicadores propuesto tuvo una buena acogida por los expertos, y fue resaltada su pertinencia y actualidad. No obstante, se realizaron las recomendaciones siguientes:

- Especificar en cada uno de los indicadores, sean de comportamiento o de situación ambiental, el o los responsables de su medición, cuáles serían los resultados que se esperan y a las conclusiones a las que llevan esos resultados, sean positivos o no, y en base a esto cómo y quién actuará en consecuencia con el resultado.
- Asignar valores cuantitativos a los resultados de los indicadores medidos de forma que al final se pueda crear una especie de matriz de valoración y

reflejar la importancia del efecto.

- Hacer una comparación de los valores límites establecidos en la norma alemana utilizada, con otros indicadores iguales o similares medidos en otras normas o investigaciones, y valorar su similitud con los utilizados en otros países y compararlos con estadísticas nacionales.
- Investigar cuáles serían los principales intereses, tanto con la construcción de una instalación como con la implementación de una evaluación ambiental de la misma complementada con un sistema de indicadores, del personal que labora en la instalación, vecinos y comunidad en general, promotores del proyecto, de la administración pública, entes financieros, organizaciones ambientalistas, etc.
- Evidenciar cómo influiría en el estilo de vida de la población el garantizar las actividades propuestas para el buen funcionamiento del vertedero.
- Coordinar asesoramiento técnico con los especialistas ambientales del CITMA para la aplicación del sistema de indicadores ambientales diseñado.
- Recomendar qué indicadores serían adecuados evaluar luego del cierre, sellado y reinserción del vertedero, cuáles serían sus valores adecuados y cuál sería la periodicidad óptima para su medición.

CONCLUSIONES

La sistematización de los fundamentos teóricos-metodológicos evidenció que las problemáticas para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario son problemas comunes en varias regiones del mundo. Demostró la necesidad de aplicar un procedimiento para su evaluación ambiental, si es que se quiere parar las afectaciones medioambientales que están causando las malas prácticas.

La propuesta de un procedimiento para la evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario, a través del análisis de su ciclo de vida con la incorporación de indicadores ambientales de la norma alemana como herramientas de evaluación, quedó integrado por tres fases y ocho pasos y el mismo permite identificar los métodos constructivos y de operación que están siendo violados y la presencia de contaminantes difíciles de controlar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bau, I., Ulloa, M., Gola, J. (2017). Evaluación ambiental del depósito de residuos sólidos de Katenguenha, Angola. Minería y Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Nuñez Jiménez”.
- Columbié, Y. (2012). Evaluación geotécnica del relleno sanitario Alcides Pino, municipio Holguín. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniera Civil. Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.
- Decreto alemán para vertederos y sitios de disposición final (Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Deponieverordnung- DepV) (2009)
- Espinace, R. (2003). Geotecnia Ambiental en rellenos sanitarios. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería en Construcción.
- Espinosa, Y. (2012). Propuesta de solución geotécnica del relleno sanitario “Alcides Pino”, Holguín. 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cujae.
- Espinosa, M.C., López, M., Pellón, A., Robert, M., Díaz, S., González, A., Rodríguez, N. y Fernández, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. Versión impresa ISSN 0188-4999. *Rev. Int. Contam. Ambiental* vol.26 no.4 México.
- Jaramillo, J. 2002. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones. Universidad de Antioquia, Colombia.
- Koch, C.; Giese, S.; Frausto Martínez, O.; Jost, R.; Schirmer, M. (2015). Economía de circulación y monitoreo de rellenos sanitarios en Alemania. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/304781754_Economia_de_circulacion_y_monitoreo_de_rellenos_sanitarios_en_Alemania
- Leiva, J. (2011) Evaluación de soluciones tecnológicas en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas mediante un sistema local de indicadores de sostenibilidad ambiental Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Química y Farmacia. Departamento de Ingeniería Química. Santa Clara.
- Ley 81 del Medio Ambiente de la República de Cuba (1997). Gaceta Oficial de la República de Cuba. La Habana. Cuba.
- Mijangos, O.F, López, J. (2013). Metodologías para la identificación y valoración de impactos ambientales. Temas de Ciencia y Tecnología. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez.
- NC ISO 14040 (2009). Gestión Ambiental — Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba. 2da Edición.
- NC 133:2002. Residuos sólidos urbanos. Almacenamiento, recolección y

- transportación. Requisitos higiénicos-sanitarios y ambientales. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba.
- NC 134:2002. Residuos sólidos urbanos. Tratamiento. Requisitos higiénicos-sanitarios y ambientales. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba.
- NC 135:2002. Residuos sólidos urbanos. Disposición final. Requisitos higiénicos-sanitarios y ambientales. Oficina Nacional de Normalización. La Habana. Cuba.
- Resolución No. 132/2009: „Reglamento del proceso de evaluación de impacto ambiental“.
- Sánchez, G.M., Coble, J.J. (2012). Análisis de ciclo de vida aplicado a la gestión de residuos urbanos del Distrito Nacional de la República Dominicana. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad Nebrija. Master en Diseño Industrial especializado en diseño de interiores y mobiliario. Proyecto fin de master.
- Zapata, A.F. y Zapata, C.E. (2013). Gestión y Ambiente. Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios. UNAL, 6(2). Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/39571/42037>
- Zuluaga; A.C. (2014). Evaluación de la aplicabilidad de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales de la gestión de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali. Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería. Departamento de Energética y Mecánica. Programa de ingeniería ambiental. Santiago de Cali.