



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DPTO. CONSTRUCCIONES

SISTEMA DE INDICADORES PARA EL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS VERTEDEROS DE RELLENO SANITARIO

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Autor: Fernando Rodríguez Maldonado

HOLGUÍN 2022





**Universidad
de Holguín**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DPTO. CONSTRUCCIONES

SISTEMA DE INDICADORES PARA EL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS VERTEDEROS DE RELLENO SANITARIO

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Autor: Fernando Rodríguez Maldonado

Tutor: MsC. Lidia Esther Batista Vázquez (P.I.)

HOLGUÍN 2022



PENSAMIENTO

“Nunca consideres el estudio como un deber, sino como una oportunidad para penetrar el maravilloso mundo del saber.”

Albert Einstein (1932)



DEDICATORIA

A mi madre, porque todos mis logros son el fruto de su apoyo y su confianza incondicional en mí.



AGRADECIMIENTOS

A mi familia por sus ánimos y apoyo incondicional.

A mis amistades y a mi novia por acompañarme en todo momento.

A mi tutora, por siempre tener un espacio en su limitado tiempo y brindarme su asesoría, por compartir sus conocimientos y experiencias en el desarrollo de este trabajo.

A todos los que de una forma u otra me han apoyado en este camino.

Muchas gracias.



RESUMEN

La creación de vertederos de relleno sanitario es una de las soluciones más utilizadas a nivel mundial para darle un destino final a los residuos. Sin embargo, el cumplimiento de las especificaciones definidas para su funcionamiento, así como la carencia de indicadores ambientales limitan el control de las condiciones de los mismos y han dado lugar al deterioro de los medios naturales y socioeconómicos. Por tal razón se desarrolla un sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de dichos vertederos de manera que permita identificar las deficiencias en las etapas más importantes de su ciclo de vida. Se propone un total de tres fases para la solución del problema de la investigación. El cumplimiento del objetivo fue posible con la implementación de un sistema de métodos de la investigación científica de naturaleza teórica y empírica.



ABSTRACT

The creation of sanitary landfill dumps is one of the solutions more used at world level to give a final destination to the residuals. However, the execution of the defined specifications for their operation, as well as the lack of environmental indicators, limits the control of the conditions of the same ones and they have given place to the deterioration of the natural and socioeconomic means. For such a reason a system of indicators is developed for the inventory of the cycle of life of this sanitary landfills so that it allows to identify the deficiencies in the most important stages in its cycle of life. It intends a total of three phases for the solution of the problem of the investigation. The execution of the objective was possible with the implementation of a system of methods of the scientific investigation of theoretical and empiric nature.



ÍNDICE	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICO METODOLÓGICOS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS VERTEDEROS DE RELLENO SANITARIO	6
1.1. El ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.....	6
1.2 El inventario del ciclo de vida. Concepto y caracterización general	11
1.2.1 Indicadores para el inventario del ciclo de vida	14
1.3 El inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario	19
1.3.1 Experiencias en el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario	23
Conclusiones del capítulo	30
CAPÍTULO 2: PROPUESTA DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA EL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS VERTEDEROS DE RELLENO SANITARIO.....	31
2.1 Concepciones metodológicas para la elaboración del sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.....	31
2.2 Sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.....	33
2.3 Valoración de la factibilidad de la propuesta	41
Conclusiones del capítulo	44
CONCLUSIONES GENERALES.....	45
RECOMENDACIONES	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXOS	51



INTRODUCCIÓN

Durante milenios las comunidades humanas han generado residuos, pero pocos derivados de una actividad productiva socialmente organizada. No se percibía que el amontonamiento de desperdicios en las calles generaba un problema social, aunque sus consecuencias sí lo hicieran, ya que hasta el siglo XIX favoreció la propagación de grandes epidemias.

Con el florecimiento de la civilización minoica en Creta se adoptaron prácticas distintas, entre los años 3000 – 1000 a. C. Los desechos se colocaban en grandes hoyos y se cubrían con tierra a intervalos. Por tanto, la idea básica de un relleno sanitario ya existía en aquel entonces. No es hasta 1950 que se asume este método como una forma de destino final y seguro para los residuos. Es cuando se comienza la aplicación de técnicas de ingeniería sanitaria que propiciaran el aislamiento de los mismos.

Ningún sistema de gestión de residuos puede prescindir de la existencia de rellenos sanitarios. Con diferentes grados de tecnologías, constituyen una alternativa viable desde el punto de vista económico y tecnológico (Cubillo Betancourt, 2005). Aunque actualmente es el método más practicado en los países en vías de desarrollo, la mayoría de los calificados como sanitarios no cumplen las especificaciones técnicas requeridas.

Esta disposición ineficiente de desechos sólidos y sin rigor científico alguno ha acarreado dificultades de acumulación excesiva, estrechamente relacionada con el deterioro ambiental y de la salud humana. Esto a su vez conllevaría a la pérdida de recursos potenciales a través de la recuperación de materia prima y energía.

En las nuevas políticas de gestión de residuos desarrolladas en los países más industrializados, se da prioridad a cualquier tipo de aprovechamiento relegando el vertido a la última posición entre las alternativas de gestión. Todo lo contrario ocurre en los países más desfavorecidos, donde la disposición final de los residuos sólidos



urbanos (RSU) en vertederos o rellenos sanitarios es la práctica más común de tratamiento.

La generación de los RSU y su manejo adecuado es un desafío para cualquier sociedad y su influencia negativa sobre su entorno crea la necesidad de su tratamiento ambiental y socialmente adecuados. Para la elaboración de un sistema de gestión de residuos, es importante tener en cuenta los diferentes métodos de tratamiento que podrían aplicarse. Todos estos métodos implican tanto beneficios como costos ambientales, por lo que es necesario definir cuál es el más factible de acuerdo a la localidad de que se trate.

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las metodologías desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV).

El ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto. Está conformado por cuatro etapas entre las que se encuentra el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV). Esta última consiste en un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido.

La fase de ICV carece de una etapa capaz de evaluar los resultados de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental, pero la principal deficiencia del ICV es que no presenta un sistema de indicadores ambientales para vertederos de relleno sanitario.

Por las razones anteriormente expuestas se plantea como **problema científico de la investigación**: las limitaciones en la fase correspondiente al inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario para llevar a cabo su evaluación



ambiental, no contribuyen a su operación y mantenimiento para minimizar las afectaciones a los sistemas natural y socioeconómico.

Como **objeto de la investigación** se identifica: el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario, y como **campo de acción**: el sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.

De acuerdo con lo anterior se define como **objetivo general**: diseñar un sistema de indicadores para el inventario 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.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean como **objetivos específicos**:

1. Sistematizar los fundamentos teóricos y metodológicos de los sistemas de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.
2. Diseñar un sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.
3. Valorar la factibilidad de la propuesta del sistema de indicadores.

La **hipótesis** planteada en la investigación es la siguiente: si se diseña un sistema de indicadores oportuno, preciso y fiable para la el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario, se podrá favorecer su operación y mantenimiento para minimizar las afectaciones a los sistemas natural y socioeconómico.

Para el desarrollo de la investigación fue necesario emplear los siguientes métodos de la investigación científica:

Métodos teóricos:

- Análisis y síntesis: para analizar la información teórica y metodológica obtenida a partir de las diferentes fuentes bibliográficas consultadas y procesarlas.



- Histórico - lógico: para conocer la historia y evolución que ha caracterizado el inventario del ciclo de vida de los vertederos, y cómo se ha comportado a través del tiempo su evaluación.
- Hipotético - deductivo: para realizar una elaboración lo más precisa posible de la hipótesis de la investigación, que permita una relación adecuada entre la variable dependiente y la independiente de la misma, así como en la concepción de los objetivos específicos que orientan la lógica del proceso investigativo.
- Inductivo - deductivo: para proponer un sistema de indicadores para favorecer el proceso de evaluación ambiental de los vertederos y minimizar las afectaciones a las aguas subterráneas y superficiales, al suelo y al aire y por tanto a la calidad de vida de la población.

Métodos empíricos:

- Entrevistas: para realizar la caracterización del objeto y campo y realizar un análisis histórico del mismo.
- Consultas a directivos: para enriquecer y verificar la calidad de los resultados obtenidos durante la investigación.
- Encuestas a factores claves del entorno
- Observación científica
- Recopilación de datos: está vinculada con la naturaleza exploratoria de la investigación y el tipo de información requerida para evaluar el inventario del ciclo de vida de los vertederos.

Métodos estadísticos – matemáticos:

- Estadístico descriptivo: para organizar y presentar las informaciones derivadas de los procesos del diseño del sistema de indicadores y de la validación de la propuesta (cálculos sencillos, tablas y gráficas estadísticas).



- Estadístico inferencial: para diseñar el proceso de experimentación y realizar inferencias a partir de los resultados obtenidos con él y con el proceso de constatación de la hipótesis.

Esta investigación tiene como aporte que radica en un sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario que favorezca su operación, mantenimiento y evaluación, para minimizar las afectaciones a los sistemas natural y socioeconómico. Es una novedad científica por la incorporación de indicadores ambientales en la fase de inventario del ciclo de vida para la evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario que permita la toma de decisiones oportunas.

La actualidad del tema de investigación radica en que la problemática abordada responde a las tareas asignadas por el plan de estado para el enfrentamiento al cambio climático aprobado en Cuba en el 2017, conocido como Tarea Vida, priorizada por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Además, toma en cuenta los objetivos 6, 11 y 12 de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en septiembre de 2015. También responde a una de las líneas de investigación priorizadas por el Ministerio de la Educación en Cuba, el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y el Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín.



CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS TEÓRICO METODOLÓGICOS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS VERTEDEROS DE RELLENO SANITARIO

El inventario del ciclo de vida (ICV) ha nacido como una herramienta de protección que, apoyada por la institucionalidad y acorde a las necesidades de los distintos países, se ha fortalecido y diversificado. Sin embargo, son pocas las experiencias que contemplan estudios e indicadores para su desarrollo. Por tanto, analizar el estado actual del ICV dedicado específicamente a vertederos de relleno sanitario, a partir de las experiencias y regulaciones existentes, constituye el objetivo del presente capítulo. Para ello se determinará su alcance y limitaciones.

1.1. El ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

Para la disposición final de los residuos existen diferentes soluciones cada una con diferentes requisitos técnicos y finalidades. Entre estas variantes se encuentran los rellenos sanitarios, los rellenos de tierra controlados, rellenos de tierra no controlados y los tiraderos a cielo abierto.

De las más utilizadas en el mundo están los rellenos sanitarios por su factibilidad y la seguridad que brindan. Varias son las definiciones emitidas por diferentes investigadores, Pérez & Gardey (2015) plantea que, el relleno sanitario es una técnica donde, además de la impermeabilización y de otros procesos para lograr que estos desechos no se conviertan en un peligro para la salud pública, se desarrolla la compactación de los residuos, gracias a lo cual ocupan la menor cantidad de espacio posible. Es necesario que las autoridades elijan un lugar adecuado para el desarrollo de este relleno y que su gestión diaria sea controlada de manera rigurosa para evitar problemas de contaminación y salubridad.

Quispe Mendoza (2016) considera que es 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. Con este concepto coincide el autor y lo asume en el desarrollo de la investigación, pues resume de la manera más acertada las características que identifican un vertedero de relleno sanitario.

El objetivo principal de todo tipo de vertedero es el de almacenar la basura en áreas o terrenos grandes lejos de las ciudades, disponiéndolos en capas de determinado espesor, las cuales se van cubriendo con ciertos materiales aptos para esto, como puede ser, por ejemplo, arcilla o hule polietileno con ciertas características específicas para este uso, sobre todo para lograr tener un adecuado manejo de los olores y gases que se generan después de cubrir dichos residuos. La operación de los rellenos sanitarios debe estar respaldada por una documentación específica y seguir distintas normas que regulen tanto al personal que labora en el lugar, como aquel encargado de recolectar la basura, así como otros factores que derivan del espacio (SEMARNAT, 2021).

Algunas de las ventajas del relleno sanitario sobre otros métodos de tratamiento de residuos, es que la inversión inicial de capital es inferior a la que se necesita para instaurar el tratamiento de residuos mediante plantas de incineración o de compost. Además de que puede comenzar a funcionar en corto tiempo como método de eliminación de residuos. Se considera flexible porque puede recibir mayores cantidades de residuos con poco incremento de personal.

No obstante, este método posee también algunas desventajas: el rápido proceso de urbanización limita y encarece el costo de los pocos terrenos disponibles, lo que obliga a ubicar el relleno sanitario en sitios alejados de la población. Se requiere un monitoreo luego de la clausura del relleno sanitario, no solo para controlar los impactos ambientales negativos, sino también para evitar que la población use el sitio indebidamente. Puede generar contaminación ambiental e impactar a la estética, salud pública y ocupacional si no se toman las previsiones necesarias en la selección del sitio y no se ejercen los controles para mitigarlos.



Debido a los impactos negativos que puede ocasionar, su evaluación y control estaría directamente relacionada con el buen vivir de sus habitantes. En este sentido se deben evaluar las características del sitio, las particularidades operacionales y de control, así como las sanitarias y ambientales, mediante una metodología que permita determinar la pertinencia o no del buen funcionamiento de un vertedero de relleno sanitario (Morocho, 2017).

Para dicha evaluación se debe partir de cuáles son las etapas que conforman el ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario. El conocerlas, así como cada una de las actividades que las conforman, garantizará una EA (evaluación ambiental) con calidad y la toma de decisiones más efectivas.

La norma internacional ISO 14040:2009 plantea que el ciclo de vida son etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final. Todas estas fases deben ser tomadas en cuenta, ya que pueden producirse efectos cruzados entre ellas y las medidas adoptadas para reducir el impacto medioambiental en una fase podrían empeorar la otra.

En el caso de los vertederos de relleno sanitario el ciclo de vida está comprendido por seis etapas como se muestra en la figura 1.



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



Fuente: Batista (2021).

A continuación se profundiza en cada una de ellas:

Etapa 1. Selección del emplazamiento.

El emplazamiento debe ser elegido adecuadamente por ser para toda la vida y seleccionarse de acuerdo a las normativas vigentes en cada país. Es necesario tener en cuenta las características del suelo, o sea, el reconocimiento de la composición geológica del terreno; propiedad, 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 donde se va a asentar y las distancias que hay entre el límite del vertedero y 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. Algunas de estas operaciones son limpieza y preparación del terreno para darle la geometría deseada y el grado de impermeabilidad exigido por la normativa; construir caminos de acceso, el vallado periférico, los servicios auxiliares (agua, luz y teléfono), la red de desviación de pluviales, los sistemas de recogida y tratamiento de lixiviados y gases (biogás).

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. Es necesario contar con una báscula para conocer de forma precisa los residuos que aportan al vertedero. Se realiza la compactación insitu con



la maquinaria encargada de distribuir los residuos y extender la capa de tierra que se utiliza como recubrimiento.

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. El relleno sanitario debe cubrirse con tierra de forma tal que mantenga la vegetación, por lo que es importante que se haga de forma adecuada. Con su cierre se minimiza la presencia y proliferación de moscas y aves, se evita la entrada y proliferación de roedores, se logran evitar incendios y presencia de humos, se reducen los malos olores y se disminuye la entrada de agua de lluvia.

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 reinserción.

Etapa 6. Reinserción 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 asentamientos, de manera que impida impactos negativos al ambiente y a la salud. La reinserción, habitualmente tiene como alternativas de destino la agricultura, recreación y/o apoyo a algún tipo de estructuras.

Teniendo en cuenta lo analizado se puede argumentar que la investigación será aplicada solo a las etapas de construcción, operación y cierre del vertedero al concluirse que son estas las que mayores impactos generan a los medios naturales y socioeconómicos.



1.2 El inventario del ciclo de vida. Concepto y caracterización general

El ACV, de acuerdo a la ISO 14040 (2009), es una de las diversas herramientas de gestión ambiental existentes, entre las que también se cuenta con: la evaluación del riesgo, evaluación del desempeño ambiental, auditoría ambiental y evaluación del impacto ambiental. Comprende desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba). Hay cuatro fases en este tipo de estudio:

- a) la fase de definición del objetivo y el alcance
- b) la fase de análisis del inventario
- c) la fase de evaluación del impacto ambiental
- d) la fase de interpretación

El análisis del inventario, como fase, implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema del producto. Hay casos en los cuales el objetivo de un ACV se puede satisfacer desarrollando únicamente un análisis de inventario y una interpretación. Generalmente se hace referencia a esto como un estudio de ICV. Estos estudios son similares a los estudios de ACV, pero excluyen la fase de evaluación del impacto ambiental. No hay que confundir los estudios de ICV con la fase ICV de un estudio de ACV.

La realización de un análisis de inventario es un proceso iterativo. A medida que se recopilan los datos y se aprende más sobre el sistema, se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones, que requieran cambios en los procedimientos de recopilación de datos, de manera que aún se puedan cumplir los objetivos del estudio. Algunas veces, se pueden identificar algunos asuntos que requieren una revisión del objetivo o del alcance del estudio.

La recopilación de datos puede ser un proceso intensivo en materia de recursos. Las limitaciones prácticas en la recopilación de datos deberían tenerse en cuenta en el alcance y documentarse en el informe del estudio.



Al decir de Rojas (s.f.), la estructura del análisis del ICV viene determinada por la normativa ISO 14042, distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales. Los elementos considerados obligatorios son:

- Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
- Clasificación: en esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
- Caracterización: consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. Es necesario el uso de modelos para obtener estos factores de caracterización. La aplicabilidad de los factores de caracterización dependerá de la precisión, validez y características de los modelos utilizados.

En sentido general, la realización del inventario del ACV permite determinar las magnitudes y el indicador que caracterizan el proceso, y por consiguiente determinan, en cuanto a su valor, el impacto al medio ambiente.

Hay tres maneras para la obtención de los datos, en orden descendente de confiabilidad (Fullana, et al. 2008):

- Los datos obtenidos por el o la analista de ACV a través de mediciones directas o por los fabricantes de los productos analizados, suelen ser los datos más fiables, sin embargo, pueden ser muy específicos del proceso en estudio y no se debe descuidar la transferencia a otros análisis.
- Datos conseguidos en estudios anteriores disponibles en la literatura científica y, más concretamente, en bases de datos actualizadas y verificadas internacionalmente. El analista tiene menos control directo sobre ellos, pero tiene la ventaja de haber sido analizada y revisada por expertos y con frecuencia son un promedio ponderado de varios procesos similares.



- Datos inferidos por medio de conjeturas y estimaciones basados en análisis previos y la experiencia del analista. Estos son inevitablemente afectados por la mayor incertidumbre, sin embargo, si el analista tiene suficiente experiencia en el área, los datos pueden ser muy aceptables.

Hay otra información que no debe ser olvidada con respecto a los datos: el periodo al que se refieren, la región geográfica donde fueron recolectados, representatividad de los datos , ya sea obtenidos de un solo proceso, o un promedio de múltiples procesos similares, o del cálculo teórico (Sánchez, 2012).

El inventario, a fin de dar una visión global, además de los datos cuantificados debe constar de:

- Diagramas de flujo que dejen claro el sistema en estudio, así como las relaciones que tienen lugar dentro del mismo.
- Descripción detallada de cada unidad de proceso, listando la categoría de los datos asociados con cada una de ellas.
- Desarrollo de una lista donde se especifiquen las unidades de medida de cada parámetro.
- Descripción de los métodos empleados para recoger los datos y de las técnicas de cálculo empleadas para cada categoría de datos.
- Instrucciones informando claramente de fuentes documentales para casos especiales, irregularidades, o cualquier otra circunstancia asociada con la recogida de datos (Haya, 2016).

Se deben documentar todos los procedimientos de cálculo, que deben ser coherentes a lo largo de todo el estudio, y explicar las suposiciones realizadas. Es necesario validar los datos recopilados. La validación puede implicar, por ejemplo, realizar balances de materia, balances de energía y/o análisis comparativos de los factores de emisión y vertido. Asimismo, hay que relacionar los datos con los



procesos unitarios y con la unidad funcional. Como resultado, todos los datos de entrada y salida deben estar referenciados a la unidad funcional.

A partir de los datos obtenidos puede ser necesario ajustar los límites del sistema. Para ello, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad que puede determinar (Haya, 2016):

- La exclusión de etapas del ciclo de vida o de procesos unitarios cuando el análisis de sensibilidad pueda demostrar que carecen de importancia,
- La exclusión de entradas o salidas que carezcan de importancia,
- La inclusión de nuevos procesos unitarios, entradas y salidas que el análisis de sensibilidad haya demostrado que son importantes.

En el caso de considerar más de un producto, se deben especificar los criterios de asignación de los datos. Referente a inventarios, se recomienda anotar los elementos que permitan apreciar su contenido (ubicación de la estación de estudio, fecha del inventario, métodos utilizados, investigador, etc.) en fichas de análisis de impacto (Haya, 2016).

A partir de lo expuesto por diferentes especialistas se corrobora que el ICV es un proceso laborioso y complejo que requiere de conocimientos tanto técnicos como ambientales independientemente del producto o servicio sometido a estudios. Constituye una herramienta determinante en la transición hacia un modelo sostenible ya que aporta información valiosa sobre los perfiles ambientales.

1.2.1 Indicadores para el inventario del ciclo de vida

Según Perevochtchikova (2013) los indicadores se reconocen como una necesidad fundamental para el desarrollo, y en particular para las tareas de la evaluación ambiental, por lo que su uso se encuentra ampliamente difundido en las diversas instituciones nacionales e internacionales. Ellos permiten interpretar un fenómeno o un proceso en particular de forma más simple y sistémica, lo que hace posible cuantificar y comunicar la información relevante a diversos sectores.



Por encima de todo, debe ser práctico y realista dadas las muchas limitaciones a las que se enfrentan las personas que ejecutan y realizan el seguimiento de los proyectos. A menudo son un compromiso entre la precisión científica y la información disponible a un coste razonable en algo cuantificable, de forma que la información pueda así ser comunicada (Environmental Performance Index, EPI, 2013).

Caballero (2015) enmarca los indicadores en tres etapas:

- Etapa I (a partir de 1980): indicadores de sostenibilidad ambiental de primera generación.

Son los que habitualmente reciben el nombre de indicadores ambientales. Dan cuenta del fenómeno complejo desde un sector productivo, desde la singularidad o un número reducido de dimensiones. Son necesarios, porque de allí se logran diseñar e implementar indicadores ambientales, hasta un nivel de rigurosidad y calidad similar a la de los indicadores económicos y sociales, que habían sido instalados con anterioridad en los países.

Sin embargo, con la progresiva incorporación de otras concepciones su potencia se hizo cada vez menor, y fue necesario pasar a proponer sistemas más complejos y completos.

- Etapa II: indicadores de desarrollo sostenible o de segunda generación.

Corresponde al desarrollo realizado desde el enfoque multidimensional del desarrollo sostenible: diseño e implementación de sistemas de indicadores compuesto por indicadores de tipo ambiental, social, económico e institucional. Son más vinculantes o agregados, metodologías de agregación que pueden ser medidas, ya sea de tipo índices o monetizadas; comunicacionalmente potentes, pero metodológicamente discutibles; falta de carácter realmente vinculante o sinérgico.

- Etapa III: indicadores de desarrollo sostenible de tercera generación.

Diseñar e implementar estos indicadores constituye producir indicadores vinculantes, en pocas cifras permite tener un acceso rápido a un mundo de significados mucho mayor; incorporado lo económico, social y ambiental en forma transversal y



sistemática; número limitado de indicadores vinculantes, que tengan incorporados, potenciándose sinérgicamente, dimensiones y sectores desde su origen; utilidad para el diseño y evaluación de la eficacia de las políticas de sostenibilidad.

Esta tercera generación corresponde al actual desafío en el que se incorporan ingentes iniciativas en el mundo. En este nivel se realizarán los desarrollos científicos más impactantes, en la medida que su utilidad para el diseño y evaluación de la eficacia para las políticas públicas los hace realmente valiosos.

Cabe decir que en estos momentos la mayor cantidad de trabajos relacionados a las temáticas de los indicadores de desarrollo sostenible se encuentran entre la primera y la segunda generación de indicadores, de acuerdo a las posibilidades reales de cada país, con determinados aciertos en muy pocos casos que se acercan a los indicadores de la tercera generación (Rangel y Llanes, 2007).

De igual manera Moncada-Serrano y Rodríguez-Córdova (2012) clasifican los indicadores ambientales en tres grandes grupos.

- a) Indicadores de comportamiento medioambiental: se utilizan como punto de partida. Se dividen en las áreas de indicadores de materiales y energía, de infraestructura y transporte. Se centran, además, en la planificación, control y seguridad del impacto medioambiental generado. Son una herramienta importante para comunicar datos por medio de informes o declaraciones medioambientales. Representan la base de una gestión de costos medioambientales.
- b) Indicadores de gestión medioambiental: reflejan las acciones organizativas emprendidas para minimizar el impacto medioambiental ocasionado. Las cifras sirven como medida de control interno y de información, pero no proporcionan información válida sobre el comportamiento medioambiental real.
- c) Indicadores de situación medioambiental: describen la calidad del entorno medioambiental. En conexión con los objetivos de la política medioambiental, pueden usarse de forma pública como orientación para fijar prioridades al determinar sus indicadores y objetivos.



Según TuDashboard (2018), un indicador es un elemento de información o un conjunto de información que contribuye a la evaluación de una situación por parte de los responsables de la toma de decisiones. Clasifica los indicadores según la cronología del proyecto y según la perspectiva del usuario u operador.

Según la cronología del proyecto los tipos de indicadores que plantea son:

- Indicadores de contexto: Variables sociales, demográficas, políticas, culturales, medioambientales y legales, que permiten comprender un contexto, un territorio, una situación, etc.
- Indicadores de proceso: Uno de los objetos será detectar una posible discrepancia entre lo que habíamos planeado y lo que está sucediendo según lo previsto.
- Indicadores de resultados: Productos de la acción, evalúan el progreso en relación con el objetivo que se había fijado.
- Indicadores de efecto o impacto: Abarcan las consecuencias en su conjunto, independientemente del vínculo con los objetivos originales: Efectos intencionales o no intencionales, positivos o negativos, directos o indirectos.

Según la perspectiva del usuario u operador propone:

- Indicadores externos: Los datos provienen de los usuarios con el fin de medir los resultados o efectos de una intervención.
- Indicadores internos: Permiten analizar si una organización está en consonancia con estos valores, su legitimidad, su razón de ser.

Si bien abundan los indicadores externos, que informan la acción, es mucho más raro poder visualizar conjuntos de indicadores internos, que proporcionan información sobre la gobernanza. A veces confidenciales, a menudo simplemente no existen.

Cuartin (2020) refleja en su artículo de Lemontech Blog, que los indicadores son unidades de medición que permiten evaluar el rendimiento de los procesos internos de la firma, ya sea para medir la rentabilidad, productividad, calidad de servicio, gestión del tiempo, entre otros. En este sentido, lo que es un indicador de



evaluación se puede utilizar para medir el desempeño global del estudio o el desempeño de un área, proceso o persona específica.

Entendiendo que existen tantos posibles indicadores como procesos críticos dentro en una empresa, para un estudio de abogados se pueden identificar los siguientes tipos de indicadores que son los más relevantes:

- De rentabilidad o financieros: estos son indicadores de gestión que te permiten conocer el desempeño de la actividad económica de la firma. Es decir, si los beneficios obtenidos superan o no los costos invertidos.
- De calidad del servicio: son indicadores que miden los resultados de los procesos de servicio al cliente, para conocer el nivel de satisfacción de este en su experiencia con el estudio de abogados.
- De productividad: son indicadores de proyectos que miden la relación entre la cantidad de carga laboral y el rendimiento individual de cada uno de los miembros de la firma.

Específicamente aplicado a un inventario del ciclo de vida, los datos para cada proceso unitario dentro de los límites del sistema pueden clasificarse bajo grandes títulos que incluyen:

- las entradas de energía, de materia prima, entradas auxiliares, otras entradas físicas
- los productos, coproductos y residuos
- las emisiones al aire, los vertidos al agua y suelo
- otros aspectos ambientales.

Luego de analizar las propuestas de indicadores según diferentes autores, la clasificación que se tendrá en cuenta para incorporar a la investigación será la planteada por Moncada-Serrano y Rodríguez-Córdova (2012). Solo se tomarán de esta los indicadores de comportamiento medioambiental y de situación medioambiental, pues se considera que aquí se reúnen todos los aspectos esenciales a controlar durante el ciclo de vida de un vertedero.



1.3 El inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

El Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es la etapa más exigente en el ACV, esta comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (uso de recursos) y las salidas (productos, co-productos, emisiones al aire, agua y suelo) de un sistema de producción. Para esto se colectan datos del uso de recursos y emisiones de todos los procesos, utilizando distintas fuentes de datos (bases de datos de ACV, reportes, artículos científicos, investigaciones en el lugar, conocimientos de expertos); además se construye un modelo del sistema y se calcula el uso de recursos y emisiones del producto estudiado. Mediante los cálculos se puede detectar en qué fase del ciclo de vida del vertedero objeto de estudio, se dan las mayores entradas, salidas e impactos ambientales (Pérez Gil et. al., 2011).

En el marco del ICV constan varios tipos de indicadores para medir el impacto de los vertederos. Estos indicadores varían de acuerdo al sitio de disposición analizado, ya que las condiciones sociales, climáticas y geológicas varían de acuerdo al lugar. Dentro de los sistemas de indicadores más completos y precisos se encuentran los del Decreto Alemán para vertederos y sitios de disposición final (Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Deponieverordnung - DepV) y los parámetros propuestos por la corporación West Systems (Peña, 2021).

El Decreto Alemán para vertederos y sitios de disposición final, brinda una variada gama de indicadores a estudiar en diferentes vertederos y requisitos en sus etapas de vida. Hace referencia a los indicadores de comportamiento medioambiental que serían aquellos referidos a las actividades que conforman las etapas del ciclo de vida de los vertederos. En cuanto a los indicadores de situación medioambiental se establecen como criterios de clasificación en el caso de los residuos tratados mecánica y biológicamente los siguientes:

- Porción orgánica del residuo seco de la sustancia original.
- DOC (Carbono orgánico disuelto).



- Biodegradabilidad del residuo seco de la sustancia original.

Esta norma contiene por cada indicador establecido, los valores o rangos permitidos para cada clase de vertedero de acuerdo a su clasificación y los parámetros a medir en los residuos sólidos como líquidos, separándolos en tres criterios:

- Contenido orgánico del residuo seco de la sustancia original: determinación del contenido orgánico de la muestra sólida de los residuos, que determina la pérdida de calor, TOC (Total organic carbon - carbono orgánico total). La materia orgánica es elaborada de compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas y animales y sus productos de residuo.
- Criterios de materiales sólidos: Se determinan los contenidos de BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, o-, m-, p-xileno, estireno, cumeno), PAK (Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe - Hidrocarburos aromáticos policíclicos), sustancias lipofílicas y metales pesados en la masa seca. La materia seca es la parte que resta del residuo tras extraer toda el agua posible a través de un secado por calentamiento en un horno de laboratorio, llegando a una temperatura de entre 103 y 105°.
- Criterios de eluato: Es la solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en laboratorio. Consiste en analizar la contaminación del líquido que se extrae después de mantener en contacto una cierta cantidad de residuo con una cierta cantidad de líquido mientras se somete el conjunto a agitación. Una vez filtrado al eluato extraído de la muestra, se somete a diferentes técnicas analíticas para obtener la concentración de los distintos parámetros contaminantes.

Este decreto no está dedicado al ICV, pero brinda los requisitos a tener en cuenta para el sitio y regula, en particular, los requisitos para la construcción, operación, cierre y cuidado posterior de los vertederos. Estas medidas incluyen la producción con garantía de calidad de sistemas de sellado para el sellado básico y superficial.



La ordenanza también regula la recolección y descarga de lixiviados y gases de rellenos sanitarios. Posee una amplia gama de indicadores a medir que proporciona datos certeros y completos.

Según la Guía Ambiental de VRS (vertederos de relleno sanitario) de Colombia (2002) plantean cuando ya esté implantado el VRS, la frecuencia de monitoreo está relacionado con la complejidad del sitio y los indicadores a monitorear son:

-En los acuíferos: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, metales pesados, DQO (Demanda Química de Oxígeno); DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), materia orgánica, nitratos y nitritos, si los niveles son altos la frecuencia sería mensual y si son bajos anuales.

-Biogás: composición del biogás (CH₄, CO₂, O₂), se evaluará bimestral. El de explosividad se evaluará diario.

-Partículas aerotransportables: partículas suspendidas totales y partículas respirables; se evaluará mensualmente.

Esta evaluación hace un estudio de todos los impactos que pueden afectar el sitio por la implementación de la estructura, teniendo en cuenta a todas las especies que habitan en el lugar. Carece de más indicadores para el monitoreo de los lixiviados como fenoles, DOC, cianuro, los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, o-, m-, p-xileno, estireno, cumeno) o contenido de sólidos disueltos los planteados en el Decreto alemán antes abordado.

La definición de procedimientos estandarizados en el muestreo, análisis y procesamiento de parámetros químico-físicos para la caracterización de los VRS y el impacto del Ciclo de Vida, representa un paso indispensable para la tutela del ambiente y para lograr una gestión adecuada de los vertederos mismos.

Para este propósito, es indispensable según la metodología de la West Systems (2020):

- el reconocimiento y la cuantificación de las emisiones fugitivas del suelo, de los principales gases de efecto invernadero, como el CO₂ y CH₄;



- la evaluación de la calidad del aire en la zona del vertedero y en los alrededores (receptores sensibles);
- el control de los lixiviados en aguas superficiales y profundas.

Para lograr esto, es necesario llevar a cabo un estudio detallado que utilice técnicas innovadoras para la medición de los principales parámetros de control y la elaboración de protocolos de monitoreo ambientales específicos para el sitio. Estas investigaciones contribuyen a la mejora de la gestión y a una mejor comprensión de los problemas de olor causados por presencia de VRS.

Para realizar el inventario se agrupan cada uno de los parámetros a medir en diferentes categorías de impacto en dependencia de las consecuencias ambientales generadas y del medio sobre el que inciden. Rojas (s.f.) muestra ejemplos de categorías de impacto que se incluyen generalmente tales como:

- Disminución de recursos y tratamiento de residuos.
- Efecto invernadero (directo e indirecto).
- Disminución de la capa de ozono.
- Acidificación.
- Nutricación/eutrofización.
- Formación de oxidantes fotoquímicos.

Además puntualiza que existen otras categorías que sólo son usadas por algunos profesionales y que no están bien definidas como:

- Volumen de depósito en vertederos.
- Destrucción de paisajes.
- Toxicidad humana.
- Ecotoxicidad.
- Ruidos.
- Olores.
- Salud laboral.



- Recursos bióticos.
- Congestión.

En el caso de que se estén realizando los estudios previos a escoger la forma más óptima de valorización (compostaje, tratamiento térmico, rellenos sanitarios, etc.) de los residuos generados ya por una entidad o asentamiento determinado, el ICV contribuirá a determinar la mejor decisión. Se hará de manera que se minimice tanto el consumo de energía y materias primas, como la emisión del agua y aire, así como la cantidad de materiales inertes que se disponen en caso de escogerse un relleno sanitario. El sistema mejor para cada región dependerá de las necesidades y prioridades locales tanto como la necesidad de reducir los requerimientos de los residuos o la necesidad de reducir las emisiones de agua o aire.

Para lograr un buen ICV es imprescindible contar con un sistema de indicadores cuantitativos que muestren el verdadero impacto que puedan causar los VRS, sin menospreciar los cualitativos, pero los cuantitativos dotan de un resultado contundente. Por estos motivos se considera que los indicadores más apropiados son los del Decreto Alemán referenciados por Peña (2021). Por tanto, se asumen como referencia para la conformación de la propuesta de sistema de indicadores para la presente investigación.

1.3.1 Experiencias en el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

El ICV de los sitios para la disposición final de los residuos sólidos generados por las ciudades está directamente relacionado con el buen vivir de sus habitantes. En este sentido las características del sitio, las particularidades operacionales y de control, así como las sanitarias y ambientales son los ámbitos que se deben evaluar mediante un sistema de indicadores que permita determinar la pertinencia o no del buen funcionamiento de los sitios o lugares de disposición final de residuos sólidos.

En este sentido, autores como Basabe (2009, citado en Batista, 2021), han desarrollado estudios centrados en el análisis y el ICV de los vertederos. Dicho autor



tomó como objeto de estudio un vertedero de residuos de construcción y demolición en España, y en concreto su vaso de vertido y las balsas de lixiviados que forman parte de las instalaciones. Este proyecto siguió la metodología de la Norma española UNE 150008: Análisis y evaluación de riesgo ambiental, junto con la Norma española experimental UNE 150008 EX. Su objetivo fue conocer la situación ambiental del vertedero y el entorno potencialmente más afectado en caso de tener un accidente.

Para ello se valoraron:

- La fuga de lixiviados
 - Rotura geotextil
 - Fuga de carburante
 - Rotura de diques.
 - Rotura de balsa de lixiviados
 - Fuga de biogás
 - Lo más cercano al estudio planteado en esta investigación son los siguientes pasos que la misma norma UNE 150008:2008 establece para el análisis de riesgos:
- Identificación de causas y peligros
 - Identificación de los sucesos iniciadores
 - Estimación de las consecuencias
 - Estimación del riesgo (probabilidad/frecuencia)

También Sánchez y Coble (2012), realizó el ICV para determinar la situación actual de la disposición final de los RSU en el vertedero de Duquesa del Distrito Nacional del municipio de Santo Domingo Norte con la aplicación de la metodología del ACV. Junto a esta se seleccionó el método CML 2000, que es una de las metodologías de impacto que incluye el software Simapro desarrollado por el Center for Environmental Science de la Universidad de Leiden. El mismo se ha configurado para ser empleado en la fase de inventario del ciclo de vida aplicando los procedimientos de los



estándares ISO (Hischier, 2010). También se consideraron las siguientes categorías de impactos:

- Agotamiento de los recursos abióticos
- Potencial de acidificación
- Potencial de eutrofización
- Potencial de toxicidad humana
- Potencial de calentamiento global
- Potencial de destrucción de la capa de ozono
- Potencial de oxidación fotoquímica

Con la aplicación del ICV se puede obtener información objetiva, útil para llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental, por lo que se hace prudente hacer uso de él para llevar a cabo este estudio. Sin embargo, se aprecia que los indicadores ambientales medidos son solo expresión del grado de contaminación derivado de las emisiones de gases producto a la descomposición como lo son los metanos y furanos.

En Colombia, Zapata Muñoz y Zapata Sánchez (2013) realizaron el ICV de un relleno sanitario y granja ambiental “Los Saltos”. Se hizo la descripción de las actividades de operación del relleno sanitario, y la caracterización fisicoquímica de sus lixiviados. Los parámetros medidos fueron: temperatura, pH, DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), sólidos totales y sólidos suspendidos totales, nitratos y nitritos, metales pesados (cadmio, plomo, zinc, cromo y níquel).

Por su parte, la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (2013) utilizada en los Estados Unidos Mexicanos hace referencia al ICV como parte de un conjunto articulado e interrelacionado de datos de gestión integral de residuos desde su generación hasta la disposición final. Además, define los órganos de consulta que participarán en el proceso, sin embargo, nuevamente se aprecia la falta de definición del mismo como estudio, y por tanto de las actividades e indicadores que lo deberían de integrar.



Koch et al. (2015) plantea que estudiantes de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Jena y la institución del medio ambiente y geología de Turingia llevaron a cabo mediciones de las aguas subterráneas en dos rellenos sanitarios recultivados con el fin de decidir sobre su tratamiento futuro. Los indicadores revisados fueron la temperatura del agua, conductividad eléctrica, valor pH, cloruro, sulfato y metal pesado, entre otros. Se pudieron demostrar contaminaciones del agua subterránea causadas por los residuos depositados. La investigación aplica para la presente tesis porque está enfocada a rellenos sanitarios con tiempo de explotación a los que necesita decidir si sellarlos o reinsertarlos. Lamentablemente solo se mencionan algunos de los indicadores medidos, pero no aborda un estudio a seguir para el inventario ni de qué forma se evaluaron las etapas de su ciclo de vida.

En la localidad de Huambo (Angola), en el vertedero conocido como Katenguenha, Bau-Satula et al. (2017) también realizaron una investigación con el propósito de evaluar los efectos que sobre el medio ambiente produce este vertedero. Para el desarrollo de esta investigación se siguieron las siguientes etapas metodológicas:

1. Recopilación, análisis y procesamiento de la información
2. Trabajo de campo
 - 2.1. Caracterización del área en estudio y diagnóstico ambiental
 - 2.2. Identificación de acciones susceptibles a producir impactos
 - 2.3. Identificación de los componentes del medio susceptibles a recibir impactos
3. Identificación y evaluación de impactos: Para ello se aplicó el método de criterios relevantes integrados (CRI) de Buroz (1990). Este método consiste en asignar valores a los efectos adversos relevantes de acuerdo a los criterios de extensión, intensidad, duración, reversibilidad y riesgo, para de esta manera alcanzar el valor de impacto ambiental por efecto y la jerarquización de los mismos.
4. Propuesta de medidas de minimización

Finalmente se identificaron los principales impactos ambientales que se producen durante la deposición de residuos sólidos de Katenguenha, a partir de considerar las



principales acciones susceptibles de producir dichos impactos (consumismo, recolección, transportación y deposición final de los mismos) y su interacción con los componentes del medio (suelo, aire, agua, flora, fauna y paisaje). La aplicación del método CRI permitió identificar y valorar los impactos ambientales producto de la gestión incorrecta del vertedero de residuos sólidos, pero de manera superficial pues no se realiza una caracterización físico-química de los mismos.

Ziegler et. al. (2018) hace un análisis de ciclo de vida en varios rellenos sanitarios de Perú a través de la herramienta de cálculo EASETECH (Dinamarca). Para el inventario de ciclo de vida (ICV) propone dos actividades:

- Recolección de información: a través de cuestionarios y visitas de campo
- Asignación de todas las entradas y salidas en función de la unidad funcional.

Como entradas considera materias primas como arcilla, combustible, energía, acero, concreto, etc. Luego analiza la composición de los residuos para tener en cuenta su degradación, y finalmente considera como salidas las emisiones de gases de efecto invernadero, de lixiviados y otras.

El método de cálculo fue aplicado a las etapas de construcción, operación y cierre. Se concluyó que el mayor impacto ambiental se produce en los primeros años luego de disponer los residuos y propone evaluar la mejor tecnología de tratamiento de residuos de acuerdo a disponibilidad técnica y económica y atendiendo a criterios ambientales.

Como experiencia en nuestro país se puede citar a Espinosa et.al. (2010), quién realizó un análisis del ICV de los lixiviados del mayor vertedero de RSU de Ciudad de La Habana, situado en Calle 100, municipio Marianao. Se realizaron mediciones de campo y en el laboratorio, y se estudiaron indicadores fisicoquímicos y microbiológicos tales como temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica, demanda química y biológica de oxígeno, metales pesados, aceites y grasas, fenoles, detergentes, alcalinidad, acidez, turbidez, empleando métodos normalizados o validados. Se compararon los resultados con los límites máximos



permisibles promedios de la norma cubana NC 27:99 Vertimiento de Aguas Residuales a Aguas Terrestres y Alcantarillado, comprobándose que se incumplía con los parámetros establecidos.

Si bien no se realiza un ICV en su totalidad, sí se tiene en cuenta el análisis de los lixiviados que es uno de los aspectos fundamentales a analizar por la carga contaminante que genera. Tampoco se tomarán en cuenta los indicadores asumidos para el análisis de lixiviados pues están dirigidos a aguas superficiales y subterráneas que puedan estar contaminando afluentes, pero no son concebidos para el control de sitios de disposición final, objetos de este estudio.

Por su parte López et al. (2021) en su investigación sobre la predicción de la generación de lixiviados en VRS de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Santa Clara, Cuba, emplean el Método Suizo. Se basa en datos de la composición de los residuos, suelo y área del relleno, así como climatológicos. Permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de los lixiviados (Q) que este depende de las precipitaciones anuales (P), el área del relleno o de la celda (A), el tiempo (t) y el coeficiente de compactación de los residuos (K); y las cargas contaminantes (CC) depende de los factores de DBO_5 , DQO , de los sólidos suspendidos (SST) y el valor del caudal. Este método resulta de gran utilidad para la toma de decisiones en el diseño de futuros rellenos sanitarios y plantas de tratamientos de lixiviados a construirse.

A modo de experiencia en nuestra provincia, Peña (2021) realizó la evaluación ambiental de vertederos de rellenos sanitarios, y utilizando la matriz de Leopold permitió establecer un sistema de indicadores para monitorear los impactos que se generaron en la instalación. Esto permitió percibir la magnitud y la importancia de los daños ocasionados en un vertedero en las etapas más importantes de su ciclo de vida. El sistema quedó conformado por indicadores integrados a través de dicha matriz, esta hizo posible identificar los métodos constructivos y de operación que estaban siendo violados y la presencia de contaminantes difíciles de controlar y dio



paso a un plan de mitigación ambiental enfocado a estas tres fases. Al contemplar el uso de parámetros físico químicos extraídos de la ordenanza alemana aumentó la eficacia.

Batista (2018), realizó una EA del vertedero de relleno sanitario “Alcides Pino I” en la ciudad de Holguín. Para la fase de inventario del ciclo de vida relaciona: la ubicación del objeto de estudio, año de creado y tipo de sitio de disposición para el que fue concebido. Realiza el inventario de todas las etapas del ciclo de vida del vertedero teniendo en cuenta:

Etapa 1. Selección del emplazamiento:

1. Documentos legales y licencias
2. Realización de estudios hidrológicos, topográficos, y otros para la selección del emplazamiento.
3. Cumplimiento de los requisitos establecidos por normas para su ubicación.

Etapa 2. Diseño y construcción de obras de partida:

1. Preparación a la superficie del terreno
2. Servicios auxiliares para los trabajadores
3. Cerca perimetral e identificación de límites
4. Camino de acceso
5. Sistema de desviación de pluviales

Etapa 3. Operación

1. Cantidad de residuos que se reciben y forma de control
2. Tipo de residuos
3. Transportación de los residuos
4. Área destinada a la clasificación de los residuos
5. Equipos para el manejo de los residuos
6. Impermeabilización de paredes y fondo de las trincheras
7. Sistema de drenaje de las aguas superficiales
8. Medidas correctoras sobre el impacto visual y paisajístico



Etapa 4. Cierre

1. Se hace un resumen de las insuficiencias detectadas de manera que se justifique el cierre de la instalación

Etapa 5. Sellado:

1. Chequear el adecuado funcionamiento de los sistemas de recolección de gases y lixiviados
2. Labores para favorecer la futuro reinscripción del vertedero luego de sellado

Etapa 6. Reinscripción:

1. Se concluye si es posible la reinscripción del verterlo y cual alternativa es la más óptima en caso de ser posible. Si no fuese posible también se debe proponer actividades de control y recuperación

Se puede concluir que entre las causas que están provocando impactos negativos producto a los VRS se encuentra la deficiencia de un ICV y la escasez de un sistema de indicadores que proporcionen un diagnóstico certero, abarcador y que muestre todos los daños que se ocasionan. También la falta de organismos que controlen y la desactualización de las normas. Es preciso tener un rigor elevado a la hora de estudiar estos lugares pues las consecuencias que generan son grandes al entorno y nos afectan a todos.

Conclusiones del capítulo

Luego del análisis de los antecedentes teóricos-metodológicos se demuestra que existen pocos estudios a nivel nacional e internacional sobre la utilización de sistemas de indicadores para el ICV de los vertederos. Se pudo diagnosticar que a pesar del desarrollo en ascenso del tema aún son muy pocas las propuestas con este fin por lo que se demuestra la necesidad de un sistema de indicadores sólido para dichas instalaciones de disposición de residuos. Estos indicadores ambientales, a pesar de su enorme utilidad en la evaluación ambiental, previamente fue necesario realizar un ICV, por tanto podemos utilizar estos indicadores para la etapa de ICV.



CAPÍTULO 2: PROPUESTA DEL SISTEMA DE INDICADORES PARA EL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS VERTEDEROS DE RELLENO SANITARIO

Continuando con las experiencias extranjeras y nacionales expuestas en el capítulo precedente, surge la necesidad de desarrollar un sistema de indicadores (SI) para la evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario. El objetivo es que sean lo más diáfanos y eficientes posibles para lograr un buen estudio. Se muestran su diseño las concepciones metodológicas, para de esta forma realizar una propuesta con la mayor calidad técnica y ambiental.

2.1 Concepciones metodológicas para la elaboración del sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario

Resulta imprescindible definir los fundamentos científicos, analizar las concepciones metodológicas y ofrecer las posibles soluciones. Para la presente investigación se partirá de las especificaciones que propone la ISO 14040 para la fase de ICV como parte de la metodología para el ACV. Al adaptarse este ICV a los vertederos de relleno sanitario, se irá desarrollando a través de cada una de las etapas de este tipo de infraestructura. Dicho inventario será aplicado solo a las etapas de construcción, operación y cierre del vertedero al concluirse que son estas las que mayores impactos generan a los medios naturales y socioeconómicos. Se incorporarán tanto indicadores de comportamiento como de situación medioambiental para lo cual se proponen los de la norma alemana y los planteados por la West Systems. También, se considerarán claves el análisis de las siguientes dimensiones:

- 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 [...] (Mateo Rodríguez, 2015). Influye en el mejoramiento de la calidad de vida de los residentes y la imagen urbana, a través del uso óptimo de los recursos naturales. Constituye un aspecto importante en el que se necesita considerar entre otros:

1. 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, metodologías y demás mecanismos establecidos.
 2. Estimular la aplicación de indicadores ambientales durante el ICV de los vertederos de relleno sanitario, porque una adecuada medición permite conocer las carencias y potencialidades para el mejoramiento del servicio.
- Dimensión institucional:

Este aspecto 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 capacidades para, luego del conocimiento de la situación, realizar estudios y establecer sistemas de control. Es necesario el interés del Gobierno, el trabajo conjunto de las entidades responsables del medio ambiente y el manejo de residuos sólidos para la calidad en la información y metodologías establecidas.

- Dimensión participativa:

En este caso resulta necesario:

- 1- Desarrollar el compromiso de los factores involucrados y los habitantes para la protección del medio ambiente a fin de lograr la concientización colectiva en el éxito, la interrelación entre ellos y el adecuado desempeño ambiental.
- 2- 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.



3- 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.

- Dimensión legal:

Es imprescindible partir de lo establecido actualmente en las normas y leyes, además se debe contar con la documentación de partida que avale que estén establecidas todas las condiciones necesarias para contar con un ICV exitoso del vertedero. Esta dimensión a su vez está estrechamente relacionada con la dimensión ambiental y la institucional pues, por una parte, 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.

Ha de destacarse además que, para la construcción del sistema de indicadores se debe definir primeramente un marco conceptual teórico desde el que se seleccionen los indicadores y se establezca la manera en que estos se combinen entre sí. Dicho marco conceptual debe ser lo más inteligible y detallado posible para disponer de una mejor definición del sistema y de las relaciones entre sus componentes. Para ello, es necesario tener categorizado, de forma amplia, el contexto de análisis y tener comprensión del fenómeno a medir.

El marco conceptual teórico debe estar basado en lo que se desea medir y no en lo que está disponible para medir. Es conveniente que en esta etapa participen expertos en el área de estudio y grupos de interés, para tener en cuenta múltiples puntos de vista y aumentar la solidez del proceso. Por lo tanto, la transparencia en la construcción del sistema de indicadores es esencial, de lo contrario, podría proporcionar unos resultados pobres en información.

2.2 Sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario



El sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de un VRS propuesto en la presente investigación, se definió de manera que pueda ser aplicado en cualquier región. Permite evaluar y monitorear dichas instalaciones, identificar mejoras en los procesos y generar una herramienta en la toma de decisiones con bases científicas. Para definir los indicadores que conformarán el sistema, se definirán primeramente los objetivos generales y específicos referentes al ICV del VRS en cuestión. Se tendrá como base la descripción, caracterización y análisis del ambiente (abiótico, biótico y socioeconómico) en el cual se desarrolló la obra. Se definirán los ecosistemas y sistemas sociales ambientalmente sensibles o de importancia ambiental, que serán afectados.

El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema. Para el objetivo que ocupa este estudio se deberá contar con equipos de trabajo donde deben participar miembros de los organismos decisores, consultantes, trabajadores del sitio y factores claves del entorno. Es probable que para realizar este inventario haya necesidad de recurrir a bases de datos con información secundaria en caso de no ser posible obtenerla a partir de documentación técnica con la que debe contar el vertedero o que no esté al alcance de los miembros del equipo de trabajo.

Para la confección del sistema de indicadores de la presente investigación para la evaluación ambiental de VRS, se definieron tres fases:

Fase 1: Identificación de los componentes del medio susceptibles a recibir impactos.

La ejecución de un relleno sanitario es un ejemplo claro de una alteración ambiental originada por el hombre. En especial genera efectos como alteración de la calidad del aire, pérdida de especies de flora acuática y terrestre, alteración del ciclo hidrológico y disminución de la calidad de aguas superficiales y subterráneas (Burquin, 2018). A continuación, se identificarán y analizarán todos los impactos



ambientales, positivos o negativos, derivados de las etapas de construcción, operación y cierre del VRS.

En la etapa de construcción se afecta el suelo, por las actividades de desmonte durante la preparación del terreno para la apertura de las primeras trincheras, obras de drenaje de aguas pluviales. Aumentarán los riesgos de erosión, la capacidad de infiltración del agua y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) disminuirán. Se verá incrementado el consumo de agua, para regar los caminos de acceso al área y para la ejecución de las obras propias del proyecto. Las maquinarias utilizadas producirán ruidos y partículas de polvo, provocando una contaminación puntual en el sitio. La flora y fauna se afectará por la pérdida de buena parte de la cobertura vegetal que protege al suelo, impactando a especies de animales que ocupan los árboles como nichos ecológicos. El paisaje se verá afectado con los daños al ecosistema, el valor del sitio disminuirá, cambiando el potencial paisajístico del sitio. En la salud se pueden presentar algunos problemas ligados a las actividades anteriores. Las condiciones socioeconómicas generarán nuevos empleos, pero por otra parte, se producirá una pérdida del valor de las tierras cercanas al relleno.

En la etapa de operación el suelo se verá impactado por la producción constante de lixiviados. Las aguas subterráneas pueden verse afectadas por el desgaste de la manta aislante y la infiltración de los lixiviados. Parte de los residuos generados a diario están compuestos por materia orgánica que, al descomponerse, producirá una gran cantidad de gases, ocasionando una contaminación en el aire. Los impactos sobre la vegetación tendrán un efecto negativo, por la tala de los árboles en el área donde se ubicarán las nuevas trincheras. El valor del sitio experimentará una disminución. También habrá una disminución de enfermedades provocadas por vectores puesto que los residuos serán cubiertos, sin embargo, estará como impacto negativo la generación de malos olores. Socioeconómicamente se producirán nuevos empleos, para el desempeño de las distintas actividades a realizarse en la obra.



Durante la etapa de cierre, el suelo no podrá ser utilizado para actividades agropecuarias y de urbanización, únicamente para fines ornamentales y de conservación, en dependencia de su nivel de contaminación. Las fuentes de agua subterráneas no se verán afectadas si el tipo de suelo presenta características impermeables, impidiendo la infiltración de lixiviados. Después de cerrado el relleno, se le tiene que dar un seguimiento, para evitar que no se produzca ninguna contaminación a las fuentes de agua superficiales, el aire se puede ver afectado por las emisiones de gases que aún se emitirán del relleno. Se observará una mejor percepción visual por las obras de reforestación y el retiro de infraestructura. Los impactos sobre la salud de las personas, será mínima. Las condiciones económicas de las personas que recibían un salario por trabajar en el relleno, se verá disminuida, pero se contratarán personas para darle mantenimiento al área.

Luego de realizar el inventario y la evaluación se deberá diseñar un plan de medidas de prevención, corrección y mitigación a fin de garantizar la recuperación ambiental del proyecto.

Fase 2: Caracterización del área en estudio y diagnóstico ambiental.

En esta primera fase se relacionan las principales características del relleno partiendo de:

1. Ubicación.
2. Capacidad.
3. Tiempo aproximado de explotación.
4. Tipo de relleno.

Esta clasificación será en correspondencia al tipo de residuos que se deponga:

- Vertederos de residuos inertes: incluye los residuos de la construcción y demolición con ciertas condiciones.
- Vertederos de residuos no peligrosos: se incluyen todos los urbanos e industriales no peligrosos.



- Vertederos de residuos peligrosos: aquí se incluyen los residuos que contengan materiales radioactivos o impliquen algún riesgo biológico.

5. Distancia a fuentes acuíferas:

En este punto se incluyen ríos, pozos, y cualquier fuente de agua potable y demás afluentes que se encuentre en las cercanías de la zona de emplazamiento pues a través de este paso se medirá el cumplimiento o no de las distancias de separación requeridas para evitar contaminaciones.

6. Distancia a asentamientos humanos:

A través de este paso se medirá el cumplimiento o no de las distancias de separación requeridas a zonas de viviendas, diferentes servicios sociales o áreas con fines recreativos, para evitar afectaciones a la salud humana producto a las emisiones atmosféricas o a la propagación de vectores o malos olores.

7. Características de la flora y fauna circundante:

En base a estos datos se pueden proponer, una vez realizada la evaluación que precede la fase de inventario en cuestión, medidas ya sea para mantener la presencia de la flora y fauna en el entorno en caso de estar en óptimas condiciones, o para recuperarla si por el contrario su estado no es el adecuado.

Fase 3: Identificación de acciones susceptibles a producir impactos.

El objetivo será definir las causas que desencadenan los impactos desde el momento que se producen. Para identificar las acciones capaces de producir impactos sobre los componentes del medio se deberán aplicar técnicas de consultas de expertos y entrevistas.

Las alteraciones que produzcan los componentes ambientales definidos se determinarán solo para tres de las etapas del ciclo de vida del vertedero: construcción, operación y cierre. Esta decisión se debe a que, a pesar de que el ciclo de vida de un VRS está compuesto por seis etapas, estas tres son las que más producen modificaciones en el terreno seleccionado, en zonas aledañas y las que más impactan sobre los componentes abióticos y biótico (Batista, 2021).



Etapa de construcción:

1. Preparación de la superficie del terreno: se chequearán los materiales y métodos que se utilizan en el área de deposición para lograr la impermeabilidad requerida tanto para la barrera geológica como para el sistema de impermeabilización de la base.
2. Vallado periférico y servicios auxiliares: se debe chequear la existencia de una garita y baño con disponibilidad de agua, iluminación y algún medio de comunicación. También se determina si el vertedero cuenta con una cerca perimetral y en qué condiciones lo cual evitaría el acceso de animales y personas ajenas a la entidad.
3. Existencia de accesos a la instalación: se controla la existencia de caminos de acceso que permitan el paso de vehículos de recogida y descarga de residuos en cualquier época del año, así como las condiciones en las que se encuentran.
4. Red de desviación de pluviales: las aguas de escorrentía superficiales no pueden ni deben entrar en el área de vertido, pues llevaría a aumentar la producción de lixiviados; por ello, deben ser desviadas mediante la construcción de canales abiertos y rodeando toda el área de vertido. En este paso se chequea su existencia y estado.
5. Sistemas de recogida y tratamiento de lixiviados y gases: Se refiere a la presencia de la capa de drenaje que recoja los lixiviados y los canalice, mediante una red de tuberías, a un depósito de almacenamiento para su control y posterior tratamiento antes de su vertido, si fuese preciso. Antes de depositar los residuos se debe disponer de estas para la conducción de gases y lixiviados. Se pueden utilizar gravas, geotextiles y georredes. Para el aislamiento se emplean arcillas naturales, aislantes arcillosos geosintéticos y geomembranas.

Etapa de operación:

1. Control de las entradas y salidas: Es necesario controlar el origen de los residuos recibidos y conocer de forma precisa la cantidad que se aportan al vertedero.



2. Medios de transportación: se refiere a aquellos medios que se utilizan para la recogida de los residuos, la capacidad de cada uno de ellos así como la cantidad de viajes diarios que dan cada uno. Ello servirá para determinar el volumen de residuos que se recepciona o saca de la instalación, así como mantener un control de a dónde pertenecen.
3. Clasificación de los residuos recibidos: se define qué tipos de residuos son recepcionados (escombros, vidrio, cartón, tela, aluminio, metales, plásticos, residuos de riesgo biológico (hospitalarios), madera, etc.). Esto permitirá más adelante el aprovechamiento de los mismos ya sea como materias primas o como alternativa energética.
4. Maquinarias existentes para el manejo de los residuos en la instalación: este indicador es necesario para verificar si se están cumpliendo con las formas de operar definidas para el vertedero, la calidad con que se hace, y si existen problemas con la disponibilidad de estas maquinarias y su mantenimiento, ya que estos son factores que podrían impactar en el buen funcionamiento de la instalación.
5. Disponibilidad de material para la preparación de trincheras y la cobertura final de los residuos: resulta de vital importancia conocer qué material se tiene disponible para la cobertura de los residuos y para la impermeabilización de paredes y fondo de las trincheras para evitar la penetración de lixiviados causando contaminación de las aguas subterráneas y del suelo.
6. Medidas para minimizar el impacto visual y paisajístico durante la explotación: aquí se resalta la existencia de pantallas visuales y si se adecua la instalación al paisaje.
7. Control de los lixiviados:
Se indica la toma de muestras para el análisis físico-químico de los lixiviados en laboratorios especializados. Algunos de los parámetros a verificar serán TOC, el DOC, temperatura de los lixiviados de las muestras de residuos, contenido de



humedad y de material orgánico, conductividad eléctrica, pH y contenidos de metales pesados.

8. Control del material orgánico:

Se indica la toma de muestras para el análisis de la fracción sólida para verificar su contenido de humedad y chequear más adelante la posibilidad de aprovechamiento como material orgánico para compost que puede ser utilizado como abono sustituyendo el uso de fertilizantes químicos y reduciendo la emisión de óxidos de nitrógeno.

Etapa de cierre:

1. Aprovechamiento de los residuos: se debe controlar si se implementa alguna posibilidad de aprovechamiento como se mencionó en el paso anterior.
2. Verificación el funcionamiento de los sistemas de recolección de gases y lixiviados.
3. 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.
4. Labores de desmantelamiento, limpieza y colocación de capa de cobertura final: se verifica si el relleno es cubierto con el material adecuado de forma tal que sea posible mantener la vegetación. Con esto se minimiza la presencia y proliferación de moscas y aves, se evita la entrada y proliferación de roedores, se logra evitar incendios y presencia de humos, y se reducen los malos olores.

El intervalo en el que deben visitarse los vertederos para aplicarse este sistema de indicadores dependerá de una evaluación sistemática de los riesgos ambientales asociados a él, en particular sobre la base de los efectos posibles y reales del vertedero en cuestión sobre la salud humana y el medio ambiente. Se deben tener en cuenta los niveles y tipos de emisiones, la sensibilidad del entorno local y el riesgo de accidentes derivados de la instalación.



2.3 Valoración de la factibilidad de la propuesta

Para la valoración de la factibilidad de la propuesta, se somete al criterio de especialistas el sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario. Al seleccionar a los especialistas se tomó en cuenta la experiencia en la práctica sobre el tema que se consulta y que este fuera un posible usuario de la propuesta que se somete a su consideración. Basado en ello, se conformó un grupo de 8 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. El coeficiente de competencia se calcula por la siguiente fórmula:

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

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_a : 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 (anexo 1, tabla 3). 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 coeficiente 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.

Los 8 especialistas respondieron la primera encuesta (anexo 1). De ellos 5 presentan un coeficiente de competencia superior o igual a 0,8 ($0,8 \leq K \leq 1$), al ser categorizados como especialistas altos; 1 presenta el coeficiente de competencia en este intervalo: $0,5 \leq K < 0,8$, por lo que queda clasificado como especialista medio; mientras que 2 especialistas no resultaron seleccionados para aplicarles la segunda encuesta al tener sus coeficientes de competencia inferiores a 0,5 (anexo 1 tabla 4). El coeficiente de competencia promedio de los expertos seleccionados resultó de 0,8, 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 6, provenientes de la Unidad Presupuestada de Servicios Comunes del Municipio Holguín (2), el CITMA (3), así como de la Universidad de Holguín (1). Finalmente se les envió la segunda encuesta (anexo 2).

Una vez seleccionados los expertos se les hizo llegar una encuesta en la que se les anexó la propuesta de sistema de indicadores de la investigación y se les pidió su



opinión. Se solicitó a los especialistas su valoración sobre la base de las dimensiones siguientes:

Dimensión 1: Aplicabilidad del sistema de indicadores para el inventario 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 sistema de indicadores.
- 2- Nivel en que valoran los expertos la claridad y precisión del sistema de indicadores 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.

Dimensión 2: Eficiencia del sistema de indicadores para el inventario 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 inventario de los vertederos de relleno sanitario con la propuesta del sistema de indicadores.

Dimensión 3: Optimización del sistema de indicadores:

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

Después de aplicada la encuesta se pasó al procesamiento de la misma en cada una de los criterios considerados en las dimensiones:

Dimensión 1: Esta dimensión dirigida a valorar la aplicabilidad del sistema de indicadores a través de tres criterios resultó ser un 50% aplicable para el criterio 1, un 83% aplicable para el criterio 2 y un 83% aplicable para el criterio 3, considerándose la propuesta del sistema de indicadores un 72% aplicable.



Dimensión 2: Esta dimensión dirigida a valorar la eficiencia del sistema de indicadores a través de tres criterios resultó ser un 67% eficiente para el criterio 1, un 83% eficiente para el criterio 2 y un 100% eficiente para el criterio 3, para un promedio de eficiencia del sistema de indicadores de un 83%.

Dimensión 3: Esta dimensión dirigida a valorar la optimización del sistema de indicadores a través de un solo criterio resultó ser un 100% óptima.

Estos resultados de opiniones de los especialistas acerca de los aspectos que evalúan la propuesta en correspondencia con las dimensiones planteadas, permitieron conocer que los siete criterios evaluados por los expertos fueron considerados positivos.

Conclusiones del capítulo

El procedimiento propuesto para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario es el resultado de la cohesión de experiencias internacionales dedicadas al tema. Si bien representa un referente sujeto a mejoras y modificaciones, constituye una prueba de la innovación que es posible lograr con pinceladas del esfuerzo de varios investigadores a lo largo del tiempo, con la capacidad de detectar las potencialidades y deficiencias de cada uno, y además si se es flexible y adaptativo.

Mediante el criterio de especialistas se pudo valorar la factibilidad de la propuesta de procedimiento concluyéndose que las tres fases evaluadas fueron consideradas positivas.



CONCLUSIONES GENERALES

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

El sistema de indicadores propuesto para el inventario de los vertederos de relleno sanitario, a través del análisis de las tres etapas más destacadas de su ciclo de vida y con la incorporación de indicadores ambientales de la norma alemana como herramientas de evaluación referenciados por Peña (2021), quedó integrado por tres fases que permitirán identificar los requerimientos que están siendo violados.

La validación mediante el criterio de expertos demostró que los siete criterios evaluados fueron considerados positivos desde el punto de vista de la aplicabilidad (con un 72%), la eficiencia (83%) y la optimización de la propuesta (100%). Además que permitió corroborar la hipótesis planteada.



RECOMENDACIONES

Se sugiere a:

La Unidad Presupuestada de Servicios Comunes de Holguín:

- Velar por una supervisión constante a las instalaciones de vertederos de rellenos sanitarios para garantizar el cumplimiento de las normas e indicadores.
- Aplicar los resultados de la investigación a los vertederos de la provincia como parte de las actividades de vigilancia y control ambiental.
- Continuar el tema de investigación con el análisis de la propuesta para su incorporación en las Normas Cubanas destinadas a los sitios de disposición de residuos en función de mejorar la operación y mantenimiento de estos sitios.

Al Departamento de Construcciones de la Universidad de Holguín:

- Mantener la incorporación en el plan de superación, temáticas relacionadas con la evaluación ambiental y los sitios de disposición final en general, para fomentar cambios en la conciencia ambiental y el actuar de los implicados y para que se siga perfeccionando el proceso y su implementación sea lo más efectiva posible.

El autor deberá divulgar los resultados obtenidos en el trabajo de investigación a través de publicaciones científicas en revistas y la participación en eventos científicos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Batista, V. (2021). Procedimiento para la evaluación ambiental del ciclo de vida de los vertederos de Relleno Sanitario. Universidad de Holguín.
2. Bau-Satula, I., Ulloa-Carcasés, M., Gola-Cahimba, 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”.
3. Burquin, Y. (2018). Trabajo Integrador Final Estudio de Impacto Ambiental: Construcción de Relleno Sanitario para la disposición final de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Berisso. La Plata.
4. Castroviejo Bolivar, M. y Herrero, J. (1992). Ecoturismo: criterios de desarrollo y casos de manejo. Instituto Nacional para la conservación de la naturaleza. España.
5. Cuartin, A. (2020, 24 de noviembre). ¿Qué son los indicadores? Ejemplos características y tipos. Lemontech Blog. <https://blog.lemontech.com/que-son-indicadores-ejemplos-caracteristicas-y-tipos/>
6. Cubillo Betancourt, Paulina Elizabeth (2005) Ubicación del nuevo relleno sanitario en base a criterios ambientales, socioeconómicos y técnicos, y propuesta de plan de reciclaje en la ciudad de Quero, Cantón Quero Provincia del Tungurahua. Tesis de grado previo a la obtención del título de Ingeniero geógrafo y del medio ambiente. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería geográfica y del Medio Ambiente. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/722/1/T-ESPE-025114-1.pdf>
7. Decreto alemán para vertederos y sitios de disposición final (Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Deponieverordnung- DepV) (2009)
8. Espinosa Lloréns, 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.

9. Espinosa Gaínza, Yamilet. (2012). Propuesta de solución geotécnica del relleno sanitario “Alcides Pino”, Holguín. 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cujae.
10. Fullana, P., y otros. 2008. *Life Cycle Assessment applications: results from COST action 530*. Madrid (España) : Aenor Ediciones, 2008. DL.-40749 .
11. Guía Ambiental para Rellenos Sanitarios (2002). ISBN 958-9487-38-6
12. Índice de rendimiento ambiental (EPI) (2013) Euskadi. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial. Gobierno Vasco. Disponible en: www.euskadi.eus
13. Julián Pérez Porto y Ana Gardey. Publicado: 2014. Actualizado: 2015. Definicion.de: Definición de relleno sanitario (<https://definicion.de/relleno-sanitario/>)
14. Koch, Christian; Giese, Steffen; Frausto Martínez, Oscar; Jost, Reiner; Schirmer, Matthias (s.f.). 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](https://www.researchgate.net/publication/304781754_Economia_de_circulacion_y_monitoreo_de_rellenos_sanitarios_en_Alemania)
15. Kurt Ziegler, Ian Vázquez-Rowe, Ramzy Kahhat, María Margallo. (2018) Análisis del Ciclo de Vida en Rellenos Sanitarios. Departament de Ingenieria Lima Peru.
16. Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003. Última reforma publicada DOF 22-05-2015 Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Presidencia de la República.



17. Llanes Regueiro, J. y Rangel Cura, R. C. (2007). Indicadores de desarrollo sostenible. Un acercamiento inicial desde la perspectiva económico-ambiental para Cuba. Universidad de La Habana. Tesis de Maestría en Economía.
18. López Vega, Ramírez González y Santos Herrero (2021). Anuario Estadístico de Cuba 2010. Disponible en: http://www.onei.gob.cu/sites/default/files/03_poblacion_2012_sitio.pdf [Links] (consultado 30 de septiembre de 2021)
19. Mateo Rodríguez, J. M. (2015). Planificación y Gestión Ambiental, Universidad de la Habana. Facultad de Geografía, La Habana Cuba, 150 p.
20. Moncada-Serrano, N. C. y Rodríguez-Córdova, R. (2012). Sistema de Indicadores para la Evaluación de la Aplicación del Sistema de Gestión Ambiental en Empresas Constructoras. Ciencias Holguín ISSN 1027-2127 1. Cuba
21. Morocho Rojas, Leoner Johnson (2017). Metodología de evaluación del sitio para la disposición final de los residuos sólidos. Propuesta metodológica y tecnológica avanzada previa a la obtención del grado académico de Magíster en Gestión de la Construcción. Universidad Técnica de Machala. Unidad Académica de Ingeniería Civil Centro de Estudios de Posgrado. Machala - El Oro – Ecuador.
22. 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
23. Peña, R. (2021). Sistema de indicadores para la evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario [tesis de pregrado, Universidad de Holguín].
24. Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. Gestión y política pública, versión impresa ISSN 1405-1079. vol.22 no.2 México. Scielo.



25. Quispe Mendoza, Max Víctor (2016). Regulación del manejo de residuos sólidos en las unidades educativas del gobierno autónomo municipal de El Alto. Tesis para optar el título académico de Licenciatura en Derecho. Universidad Mayor de San Andrés Facultad de Derecho y Ciencias Políticas Carrera de Derecho. La Paz – Bolivia. Disponible en: <http://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/12008/TD%205078.pdf?sequence=1/>
26. Sánchez Tejada, G.M., Coble Castro, 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.
27. SEMARNAT, pagina web del Gobierno de Coahuila, Universidad de Sonora, Fundación Azul Ambientalista, Unsplash. (2021) ¿Qué es un relleno sanitario y cómo funciona? (<https://blog.vise.com.mx/que-es-un-relleno-sanitario-y-como-funciona/>)
28. West Systems (2020). Monitoreo Ambiental, Vertederos <https://www.westsystems.eu/es/monitoreo-ambiental/vertederos.html> (<https://blogs.x.uoc.edu/calidad-iso/indicadores-calidad-ambiental-imprescindibles/ISO,28/09/2015>, consultada en septiembre del 2021).
29. Zapata Muñoz, A.F. y Zapata Sánchez, 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>



ANEXOS

Anexo 1. Criterio de especialistas.

Encuesta 1: Determinación del coeficiente de competencia del grupo de especialistas inicialmente seleccionado.

Usted ha sido seleccionado como posible experto para ser consultado respecto al grado de relevancia de un sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario. Se necesita antes de realizarle la consulta, como parte del método empírico de investigación: consulta a expertos, determinar su coeficiente de competencia en este tema, a los efectos de reforzar la validez del resultado de la consulta que realizaremos. Por tal motivo, le pedimos que responda las siguientes preguntas de la forma más objetiva posible. Gracias.

Datos generales:

Nombrey apellidos: _____

Cargos que ha ocupado: _____

Cargos que ocupa: _____

Años de experiencia en la profesión: _____

Años de experiencia en la gestión ambiental: _____

Grado científico: _____

Título académico: _____

Pregunta 1: Marque con una cruz (X), en la tabla siguiente, el valor que se corresponde con el grado de conocimientos que usted posee sobre el tema: sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario. Considere que la escala que le presentamos es ascendente.

TABLA 1. Escala para la calificación del conocimiento que usted considera tener acerca del problema que se evalúa.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fuente: Elaborado por el autor.



Pregunta 2:

Realice una autovaloración del grado de influencia que cada una de las fuentes que le presentamos a continuación, ha tenido en su conocimiento y criterio sobre los sistemas de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario. Para ello marque con una cruz (X), según corresponda, en A (alto), M (medio) o B (bajo).

TABLA 2. Calificación de las fuentes de argumentación de acuerdo a la evaluación: A (alto), M (medio), B (bajo).

Fuentes de argumentación.	Grado de influencia de cada una de las fuentes.		
	A (alto)	M (medio)	B (bajo)
Análisis teóricos realizados por usted.			
Su experiencia obtenida.			
Trabajo de autores nacionales.			
Trabajo de autores extranjeros.			
Su propio conocimiento del estado del problema en el extranjero.			
Su intuición.			

Fuente: Elaborado por el autor.



TABLA 3. Tabla patrón.

Fuentes de argumentación.	Grado de influencia de cada una de las fuentes.		
	A (alto)	M (medio)	B (bajo)
Análisis teórico realizado por usted.	0.3	0.2	0.1
Su experiencia obtenida.	0.5	0.4	0.2
Trabajo de autores nacionales.	0.05	0.04	0.02
Trabajo de autores extranjeros.	0.05	0.04	0.02
Su propio conocimiento del estado del problema de la investigación.	0.05	0.04	0.02
Su intuición.	0.05	0.04	0.02

Fuente: Machín, F.O. (2020).



A continuación se muestra la tabla con la información recopilada de los especialistas a partir del apoyo en los valores de la tabla patrón y el cálculo de los coeficientes de competencia:

TABLA 4. Tabulación de los resultados de la encuesta de selección.

Experto No	Análisis Teórico	Experiencia	Autores Nacionales	Autores Extranjeros	Estado Actual	Intuición	ka	kc	Kc
1	0,1	0,2	0,01	0,01	0,01	0,04	0,37	0,6	0,485
2	0,2	0,5	0,04	0,04	0,05	0,05	0,88	0,9	0,89
3	0,3	0,4	0,04	0,04	0,05	0,05	0,88	0,9	0,89
4	0,2	0,4	0,02	0,04	0,05	0,05	0,76	0,9	0,83
5	0,1	0,2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,38	0,6	0,49
6	0,3	0,5	0,02	0,02	0,04	0,04	0,92	0,8	0,86
7	0,3	0,5	0,04	0,04	0,05	0,05	0,98	1	0,99
8	0,3	0,4	0,04	0,04	0,04	0,04	0,86	0,9	0,88

Fuente: Elaborado por el autor.

Anexo 2:

Encuesta 2: La presente encuesta tiene como objetivo someter a su valoración, la propuesta presentada sobre un sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario como parte del tema de tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Civil. Se anexa a esta encuesta dicha propuesta para que usted la consulte. En las tablas que presentamos a continuación, marque con una X la evaluación que considere tienen los aspectos que le enseñamos acerca de dicha propuesta y que se han definido tres dimensiones:

Dimensión 1: Aplicabilidad del sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.



Para su medición se utilizará la siguiente escala:

MA (Medianamente Aplicable)

A (Aplicable)

NA (No aplicable)

No	Aspectos	MA	A	NA
1	Existencia de los requerimientos técnicos y humanos para aplicar el sistema de indicadores.			
2	Claridad y precisión del sistema de indicadores propuesto.			
3	Aceptación de la propuesta por trabajadores de las entidades a fin y de la población en general.			

Dimensión 2: Eficiencia del sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.

Escala:

ME (Medianamente Eficiente)

E (Eficiente)

I (Ineficiente)

No	Aspectos	ME	E	I
1	Reducción de las afectaciones a los recursos naturales, entorno social e imagen urbana.			
2	Favorecimiento del logro del carácter educativo de la propuesta.			
3	Favorecimiento del proceso de inventario del ciclo de vida los vertederos de relleno sanitario con la propuesta del sistema de indicadores.			



Dimensión 3: Optimización del sistema de indicadores.

Escala:

MP (Medianamente Pertinente)

P (Pertinente)

NP (No Pertinente)

No	Aspectos	MP	P	NP
1	Si el sistema de indicadores sirve como buen instrumento teórico – práctico para el logro de las metas deseadas.			

TABLA 5. Tabulación de los resultados de los aspectos propuestos a la consulta de los especialistas sobre la aplicabilidad del sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.

Aspectos	Existencia de los requerimientos técnicos y humanos para aplicar el sistema de indicadores.			Claridad y precisión del sistema de indicadores propuesto.			Aceptación de la propuesta por trabajadores de las entidades a fin y de la población en general.		
	MA	A	NA	MA	A	NA	MA	A	NA
1	1				1		1		
2		1			1			1	
3		1			1			1	
4		1			1			1	
5	1					1		1	
6	1				1			1	
Total	3	3	-	-	5	1	1	5	-

Fuente: Elaborado por el autor.



TABLA 6. Tabulación de los resultados de los aspectos propuestos a la consulta de los especialistas sobre la eficiencia del sistema de indicadores para el inventario del ciclo de vida de los vertederos de relleno sanitario.

Aspectos	Reducción de las afectaciones a los recursos naturales, entorno social e imagen urbana.			Favorecimiento del logro del carácter educativo de la propuesta.			Favorecimiento del proceso de evaluación ambiental de los vertederos de relleno sanitario con la propuesta del sistema de indicadores.		
	ME	E	I	ME	E	I	ME	E	I
1	1				1			1	
2		1			1			1	
3		1			1			1	
4		1			1			1	
5	1			1				1	
6		1			1			1	
Total	2	4	-	1	5	-	-	6	-

Fuente: Elaborado por el autor.



TABLA 7. Tabulación de los resultados de los aspectos propuestos a la consulta de los especialistas sobre la optimización del sistema de indicadores:

Aspectos	Si el sistema de indicadores sirve como buen instrumento teórico – práctico para el logro de las metas deseadas.		
Expertos	MP	P	NP
1		1	
2		1	
3		1	
4		1	
5		1	
6		1	
Total	-	6	-

Fuente: Elaborado por el autor.

