

VI-083 - DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO

Alejandra Medina Arévalo⁽¹⁾

Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Maestría en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Jefe de Departamento de Investigación Aplicada en Residuos, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT.

Guillermo Encarnación Aguilar⁽²⁾

Ingeniero Químico Industrial de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Maestría en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Subdirector de Investigación sobre el Manejo Integral de los Residuos, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT.

Gustavo Solórzano Ochoa⁽³⁾

Ingeniero Industrial del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente en Guadalajara, Jalisco. Maestría en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Consultor independiente

Dirección⁽¹⁾: Av. San Rafael Atlixco No. 186 Colonia Vicentina Delegación Iztapalapa C. P. 09340 México, D. F. Edificio "W" Piso 2 UAM Iztapalapa. Teléfonos y Fax +52 (55) 56 13 38 21, 56 13 36 62, 59 70 55 26 y 58 04 46 00 Ext. 13316. E-mail: amedina@ine.gob.mx.

RESUMEN

Actualmente en el ámbito internacional se han desarrollado, o en su caso consolidado, diversos métodos y tecnologías orientadas, en principio a mejorar el manejo integral de los RSU generados, así como las condiciones de disposición final de los residuos que no pueden ser aprovechados. En ese sentido el estudio en mención surge como una necesidad de implementar acciones orientadas a establecer los criterios de modelación de escenarios que incida a la mejor selección de tecnologías de disposición final, bajo condiciones técnicamente factibles, económicamente viables y socialmente aceptables. Por lo que el presente estudio está orientado hacia el desarrollo de una base de datos con información de las diversas tecnologías de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos que sean apropiadas a las condiciones reales de México.

Se establecieron seis criterios para la evaluación de las tecnologías: técnicos, ambientales, legales, sociales, económicos y políticos, así como sus respectivas variables de evaluación: cumplimiento de la normatividad, desarrollo de normatividad, marco legal adecuado para las actividades, existencia de voluntad política, adquisición, proceso y administración de la tecnología con transparencia, coordinación entre los diferentes niveles de gobierno, adecuado para cada condición, disponibilidad de servicios técnicos nacionales, fácil operación y aplicación, por mencionar algunos, los cuáles son la base fundamental para una toma de decisión sobre bases técnico-científicas para la selección de tecnologías de disposición final.

PALABRAS CLAVE: Residuos sólidos urbanos, disposición final y criterios básicos.

INTRODUCCIÓN

La situación actual de los grandes volúmenes de generación de residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel mundial ha conllevado a una problemática compleja de resolver; debido entre otras causas, a los esquemas tradicionales de manejo, a la falta de infraestructura adecuada o laxa para su tratamiento y a la limitada asignación de recursos económicos para un manejo adecuado. En los países de primer mundo se están desarrollando e instrumentando sistemas de gestión centrados en estrategias de prevención y reducción de la generación de residuos, implantación de recolección selectiva para el tratamiento y reprocesamiento de las fracciones aprovechables (vidrio, cartón, papel, PET, orgánicos, entre otros) y el tratamiento de las fracciones no aprovechables mediante la valorización energética, limitando a la disposición final lo que ya no puede ser valorizado.

Aunado a lo anterior, existen varias dificultades para los tomadores de decisiones al momento de realizar las licitaciones para seleccionar una tecnología adecuada para la disposición final de los residuos, que sea acorde a sus condiciones y características, por lo que es necesaria la creación de una herramienta que sirva de apoyo.

OBJETIVO

Contar con una metodología de evaluación de tecnologías de disposición final, mediante la definición de criterios básicos que respondan a las características propias de cada lugar, basados en aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE DISPOSICIÓN FINAL

Para el establecimiento de la metodología de selección de tecnologías de disposición final se estableció la siguiente estrategia:

1. Se realizó una búsqueda bibliográfica de las tecnologías más utilizadas para disposición final a nivel nacional e internacional.
2. Se consultó a expertos nacionales e internacionales en tecnologías, a través de encuestas enfocadas a elementos técnicos, sociales, económicos y ambientales, con el fin de recabar los criterios que permitan establecer una estrategia de evaluación y selección de tecnologías de disposición final.
3. A partir de los resultados obtenidos en la consulta a expertos, se establecieron los criterios básicos que son considerados en diferentes lugares para seleccionar tecnologías.
4. Una vez determinados los criterios, se determinó la afectación, los datos obtenidos fueron incluidos en la matriz de criterios y elementos de afectación.
5. La aplicación de la metodología consistió en formular una maximización, identificando los criterios y los elementos de mayor afectación, para finalmente seleccionar la tecnología de disposición final más adecuada. Por lo que a partir de la modelación, la tecnología más viable fue la que presentó el menor valor numérico.

DESCRIPCIÓN DE LOS METODOS DE DISPOSICIÓN FINAL

Tradicionalmente la forma más común de disponer los RSU es en tiraderos, vertederos o botaderos a cielo abierto o controlados, y en menor grado en rellenos sanitarios, en la última década se han implementado métodos alternativos como: relleno sanitario seco, tratamiento mecánico biológico, bio-rellenos acelerados o metanogénicos, y relleno sanitario semiaerobio (método Fukuoka).

Relleno sanitario tradicional: Esta tecnología consiste en preparar el suelo para evitar la infiltración de lixiviados, utilizando un sistema impermeable artificial (geomembrana) o natural, así como la construcción de obras de control y monitoreo, tales como: pozos de venteo para el biogás y de observación del agua subterránea e instalaciones para la captación y tratamiento de los lixiviados. La operación consiste en colocar los residuos en celdas y capas compactadas, cubiertas con tierra arcillosa, utilizando maquinaria para su distribución y compactación (GTZ, 2002).

Las actividades de operación y mantenimiento del relleno sanitario deben continuar por lo menos hasta 25 años después de la clausura del mismo, requiriéndose actividades de captación, extracción, tratamiento y monitoreo de biogás, captación, tratamiento, disposición final y monitoreo del lixiviado, así como la captación de aguas pluviales y el monitoreo de acuíferos (GTZ, 2002).

Uno de los beneficios del relleno sanitario es el posible aprovechamiento del biogás, siendo factible acceder a Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), en rellenos grandes es autofinanciable el transformar el biogás en energía eléctrica. El relleno es una obra que requiere de una amplia superficie para su desarrollo, el área debe ser suficientemente grande para contener los residuos durante un periodo de 10 a 25 años. En la tabla No. 1 se enlistan las principales ventajas y desventajas.

Tabla No. 1. Ventajas y desventajas del relleno sanitario tradicional

Ventajas	Desventajas
<p>No requiere de personal especializado</p> <p>Existe experiencia nacional en la operación, de acuerdo a SEDESOL hasta 2004 se contaba con 88 rellenos sanitarios.</p>	<p>Requiere de una gran inversión para su instalación y construcción</p> <p>Al término de la vida útil, el sitio debe ser clausurado y se restringe el uso a la creación de área verde</p> <p>Mala percepción de la ciudadanía</p> <p>Requiere de un monitoreo de largo plazo</p>

Para realizar el cálculo de la construcción de un relleno sanitario, se deben tomar en cuenta diversos factores: costos del terreno, pago de salarios, costo de adquisición de material, entre otros. Un rango promedio de los costos de inversión se entre 2,300,000.00 USD para un relleno sanitario tipo A (recepción mayor a 100 ton/día); 1,200,000.00 USD para un relleno sanitario tipo B (recepción mayor a 50 y menor a 100 ton/día) y \$ 600,00.00 USD para un relleno sanitario tipo C (recepción mayor a 10 y menor a 50 ton/día).

Relleno sanitario seco: Tiene como principal objetivo acelerar la degradación de los residuos putrescibles y facilitar el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen de los mismos por la compactación en una prensa, una vez compactados se busca reducir los problemas ambientales, principalmente la generación de lixiviados y emisión de biogás. Esta tecnología contiene procesos, como la selección manual y separación completamente automatizada, hasta el encapsulado de ciertos fracciones de residuos con embalaje de plástico, los cuales se pueden adaptar a las necesidades locales, a la cantidad y a las propiedades de los residuos (GTZ, 2002).

Este tipo de tecnología comprende un sistema de compactación de RSU que incluye procesos de separación, trituración, tamizado y empaado de materiales reciclables, como papel, cartón, vidrio y residuos metálicos. Esta alternativa requiere de mayor número de equipos; tales como, prensas empacadoras, cintas de transportación del material, y cintas de sorteo para recuperación de los metales (GTZ, 2002).

Por otro lado, la compactación origina escurrimientos de líquidos (lixiviados), provenientes de la fracción orgánica de los residuos. La cantidad y composición de estos escurrimientos es variable; depende de la capacidad de las prensas de la planta procesadora y la fracción orgánica en los residuos. Posteriormente los líquidos se recolectan mediante una red de drenaje interior para ser enviados a un tanque de almacenaje para su control y tratamiento posterior o directamente a la laguna de evaporación ubicada en el mismo sitio del relleno sanitario (GTZ, 2002).

Al igual que cualquier proceso, esta tecnología presenta ventajas y desventajas, las cuales son enlistadas en la Tabla No. 2

Tabla No. 2. Ventajas y desventajas del relleno sanitario seco

Ventajas	Desventajas
Se extiende la vida útil del sitio de disposición final, colocándose aproximadamente 50 % más de residuos en el mismo espacio destinado con el sistema convencional.	Requiere de una gran inversión para su construcción
Se necesita menor cantidad de material de cobertura (20 cm de tierra por capa de 5 pacas de altura). Frecuentemente se requiere cubrir la parte superior de la pila de pacas, dejando el frente descubierto.	Requiere de instalaciones de captación y tratamiento de lixiviados y del biogás
Se reduce la dispersión de residuos ligeros (papeles, plásticos) por el viento.	Existe poca experiencia con esta tecnología a largo plazo
Se pueden lograr mayores alturas, alcanzando hasta 5.5 m de altura por capa	Desconocimiento de los tiempos de estabilización
Los problemas de hundimientos se reducen, por la mayor densidad y consistencia de las pacas.	El tiempo de monitoreo de biogás y de lixiviados de pos clausura es mucho más largo que en un relleno sanitario tradicional.
La apariencia es más aceptable en comparación con un relleno convencional.	Costo de operación más elevado que un relleno convencional, principalmente por los mayores consumos de energía y el mantenimiento de los equipos de compactación

Costos. Los costos de operación de acuerdo a experiencias previas son de 15.42 a 19.28 USD/ton, inversión de 3855.45 USD/ton y un costo de mantenimiento del 5% del costo de inversión/año (Durango, 2011)

Tratamiento mecánico biológico: Esta tecnología consiste en dos etapas: mecánica y biológica. En la mecánica se retiran los residuos reciclables, textiles, inertes y algunos otros que pudieran ocasionar problemas en el proceso, como animales muertos y objetos voluminosos. Posteriormente los residuos son homogenizados y humectados con lixiviados o agua residual para acelerar el proceso biológico posterior, el cual se lleva a cabo en pilas de descomposición aerobia hasta por 9 meses, minimizando la producción de biogás y lixiviados (Hüttner Elke et al, 2003).

Este tratamiento es utilizado para los residuos recolectados de forma mezclada, con el objetivo de disminuir su capacidad de biodegradación antes de depositarse en el relleno. En estos procesos se recuperan materiales y se obtiene un material orgánico estabilizado de calidad inferior al obtenido cuando se tratan residuos recolectados de forma selectiva, pudiéndose incinerar o depositar en relleno sanitario la fracción que ya no es biodegradable. En la Tabla No. 3 se enlistan las ventajas y desventajas.

Tabla No. 3. Ventajas y desventajas del tratamiento mecánico - biológico

Ventajas	Desventajas
Requiere poco terreno Producción en 12 semanas de mejorador de suelos	Requiere de una gran inversión para su construcción Poca o nula existencia de mercado del subproducto final

Los costo de inversión son de \$5.00 a 8.95 USD/ton, de 2.10 a 3.69 USD/ton para mantenimiento y de 1.54 a 9.34 USD/ton para operación (Hüttner Et al, 2003).

Bio-rellenos acelerados: En esta tecnología ocurre una “recirculación formulada” de lixiviados crudos, es decir previamente inoculados con agentes suplementarios, lo que permite acelerar el proceso de descomposición, aumentar el tiempo de retención celular y reducir el tiempo de estabilización de los residuos. Según el tipo de proceso de estabilización, los bio-reactores pueden ser clasificados en: bio-reactores anaerobios, bio-reactores aerobios y bio-reactores aerobio-anaerobios (mixtos) (Sánchez Gómez Jorge, 2005), en la Tabla No. 4, se muestran las características de cada uno.

Tabla No. 4. Tipo de proceso de estabilización de los bio-reactores

Tipo	Características
Bio-reactores Anaerobios.	Promueven y aceleran la estabilización de la materia orgánica mediante la adición de humedad en forma constante y uniforme en toda la masa de los residuos contenidos. La máxima producción de metano, ocurre cuando existe un contenido de humedad que va del 60% al 80% en peso. Se estima que la capacidad de absorción de humedad varía de 30 a 60 galones por yarda cúbica de residuos en base seca (16 al 29%). La humedad requerida, que puede ser proporcionada con los lixiviados, puede ser infiltrada mediante ductos horizontales, pozos verticales o riego superficial. Las condiciones óptimas para la producción de metano, ocurre cuando el pH es ligeramente mayor a 6. En condiciones donde la relación: Ácidos grasos volátiles (AGV)–Alcalinidad, es mayor a 0.25, se inhibe la generación de biogás.
Bio-reactores Aerobios.	El proceso de degradación que se lleva a cabo al interior de los residuos, es similar o análogo al composteo por vía húmeda, en donde los materiales biodegradables ante la presencia de humedad y aire, son estabilizados rápidamente, en un ambiente donde se presenta un incremento gradual de la temperatura, característica natural de los procesos aerobios. Previo a la inyección del aire, el lixiviado es bombeado a presión para ser infiltrado dentro de la masa de residuos mediante pozos de inyección, hasta alcanzar un contenido de humedad que varía del 50% al 70% en peso. Es recomendable iniciar la inyección de aire, una vez que se han alcanzado las condiciones óptimas de humedad (masa de residuos totalmente humedecida). Las temperaturas óptimas para la degradación de los residuos, al interior del bio-relleno, varían entre 140° y 160° F. La introducción del aire al interior de los residuos, se hace en forma forzada (a presión), empleando una red de tuberías perforadas que se instalan previamente dentro del bio- reactor. Las tasas de inyección de aire y humedad al interior de los residuos, son similares a las que se aplican en los sistemas aerobios de composteo tradicional. Conforme se lleva a cabo la estabilización de los residuos, la temperatura disminuye gradualmente, hasta alcanzar la etapa de "curado" o maduración de los mismos.
Bio-reactores Aerobio-Anaerobios (Mixtos)	Son aquellos que operan en condiciones semi-aerobias, al combinar los elementos y condiciones de operación de los sistemas aerobios y anaerobios; predominando por lo regular alguno de ellos sobre el otro.

El control de la recirculación de los lixiviados con esta tecnología es fundamental, ya que deben de inyectarse a las celdas de residuos sólidos, en la cantidad y en el tiempo que demande el proceso. Al término de la estabilización de los residuos, es posible abrir o minar las celdas de residuos para rescatar el material degradable ya estabilizado mediante un proceso de tamizado, para volver a depositar residuos en las celdas minadas (ya vacías); con lo cual es posible incrementar la vida útil del relleno sanitario, hasta en 3 veces su vida normal, tratar eficientemente los lixiviados y acelerar la producción de biogás (cuando los sistemas son anaerobios) (Sánchez Gómez Jorge. (2005). En lo que se refiere a las ventajas y desventajas de este proceso, estas se encuentran enunciadas en la Tabla No. 5.

Tabla No. 5. Ventajas y desventajas del tratamiento Bio-rellenos acelerados

Ventajas	Desventajas
Se tiene una alta tasa de generación de metano, por lo que puede ser captado y procesado para la generación de energía como una fuente alterna de energía eléctrica. El tiempo de estabilización de la materia orgánica se reduce de manera significativa. Factibilidad de acceder a los Certificados de Bonos de Carbono	La tecnología necesaria, no ha sido desarrollada completamente. Los costos de inversión, operación y mantenimiento son altos Se requiere de personal altamente capacitado para la operación

Los costos de inversión: se requiere de \$21,500.00 USD y para el costo por tonelada procesada \$8.00-\$19.00 USD/Ton.

Relleno sanitario semiaerobio (método Fukuoka): Es una propuesta tecnológica de relleno semiaerobio, donde se favorece un área de degradación acelerada de los residuos sólidos, la cual es una estructura que maximiza el potencial de degradación de materia orgánica, a partir de los microorganismos existentes en los residuos sólidos urbanos, y proporciona condiciones aerobias en la mayor parte del volumen de las celdas (Shimaoka Takayuki, 2010).

El método se basa en un sistema simple: Una red de tuberías perforadas (central y ramales) se colocan en el fondo de las celdas del relleno sanitario, a intervalos convenientes, para colectar los lixiviados generados. Dichas tuberías tienen un diámetro considerablemente amplio que las empleadas en un sistema convencional, y además están protegidas por una estructura de piedra.

La red de tuberías cumple una doble función: por un lado, los lixiviados pueden circular libremente desde la celda hasta el punto de descarga, y por el otro, el área no ocupada por los lixiviados (alrededor de 2/3 de diámetro) permite el paso constante de aire fresco al interior.

En cada intersección de la red de conducción de lixiviados, se instalan chimeneas de venteo de biogás, el cual estará compuesto principalmente por CO₂ y en menor proporción por N₂ y CH₄. La actividad microbiana incrementa la temperatura dentro de las celdas, generando corrientes de aire por convección, debido a la diferencia de temperaturas interiores y exteriores en el relleno sanitario. Promoviendo condiciones aerobias dentro de las celdas, la actividad microbiana se hace más eficiente, acelerando la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos sólidos y lixiviados (Theng Lee Chong, 2005).

Las principales ventajas y desventajas del relleno Fukuoka se enuncian en la Tabla No. 6

Tabla No. 6. Ventajas y desventajas del tratamiento Fukuoka

Ventajas	Desventajas
<p>Usa la capacidad de auto-purificación inherente de los procesos de degradación para estabilizar los residuos. La estabilización de los residuos se mejora, haciendo posible darle un uso final al relleno sanitario de forma más rápida y segura.</p> <p>Se reducen las emisiones de gases, como CH₄ y H₂S, contribuyendo también a la prevención del calentamiento global.</p> <p>Todo el sistema puede construirse y operar en una manera simple y costo-efectiva, ya que permite una gran libertad en la selección de tuberías y otros materiales.</p> <p>El relleno sanitario tipo semi-aerobio emplea un sistema dual de drenaje de lixiviados, permitiendo que las mismas tuberías sirvan como conductos para la ventilación de las celdas.</p> <p>Se disminuye la posibilidad de contaminación del suelo a causa de los lixiviados, ya que la velocidad de migración de los líquidos al suelo no depende de la permeabilidad de la capa impermeable.</p> <p>Por medio del sistema de captación de lixiviados, se evita la excesiva acumulación de los líquidos provenientes de la masa de residuos.</p> <p>El método Fukuoka no requiere de un compresor o una instalación equivalente para suministrar aire al interior de las celdas, eliminando también la necesidad del presupuesto para la instalación y el mantenimiento de dichos equipos.</p>	<p>La tecnología necesaria, no ha sido desarrollada completamente para países en vías de desarrollo. Los costos de inversión, operación y mantenimiento son altos.</p> <p>Se requiere de personal altamente capacitado para la operación.</p>

Costos. El capital de inversión requiere aproximadamente \$8.89 USD/tonelada depositada. Los costos de operación son de \$7.15 USD/toneladas dispuesta (Theng Lee Chong, 2005).

CONSULTA A EXPERTOS

Tradicionalmente la forma más común de disponer los RSU, es en vertederos a cielo abierto o controlados, y en menor grado en rellenos sanitarios, en la última década a nivel internacional se han implementado métodos alternativos como: relleno sanitario seco, tratamiento mecánico biológico, bio-rellenos acelerados y relleno sanitario semiaerobio (método Fukuoka).

Actualmente la problemática de la disposición de los RSU no radica en el hecho de tener insuficientes alternativas de gestión que la resuelvan; si no en la falta de disponibilidad de información que permita abordar los conflictos ambientales, y de manejo adecuado de los residuos, con perspectiva global de la situación en la que se encuentra el municipio, entidad federativa o localidad donde se establecerá la tecnología, debiendo considerar en ese sentido aspectos sociales, políticos, ambientales y económicos.

En la elaboración de la encuesta se considero aspectos de evaluación técnica, económica, social, ambientales y políticas, con el objeto de obtener la mayor información que determine las variables para la selección de una tecnología de disposición de los RSU.

La encuesta estuvo constituida de seis elementos: introducción, antecedentes, objetivo, instrucciones, llenado de información básica y criterios de selección. De acuerdo a lo siguiente:

- Introducción. Información de referencia para introducir al encuestado en aspectos generales acerca de la encuesta.
- Antecedentes. Presentación de los antecedentes nacionales, así como la naturaleza del proyecto.
- Objetivo. Presentación del objetivo de la aplicación de la encuesta.
- Instrucciones. Describe la estructura de la encuesta, el tipo de preguntas (opción múltiple, prioridad, abierta) y el procedimiento para responder cada pregunta.
- Información básica. En esta sección se registro la información referente a: Datos generales del encuestado (nombre, área de la administración pública/institución/empresa a la que pertenece, cargo, teléfono, correo electrónico, entidad federativa/municipio y país al que pertenece), experiencia del encuestado (grado académico, área y tiempo de experiencia en gestión de residuos) y experiencia del encuestado en alguna fase de la selección o implementación de alguna tecnología de RSU.
- Criterios para selección de tecnologías. Esta sección involucró preguntas básicas, donde el experto compartió desde su punto de vista, aquellas variables importantes a considerar para la selección e implementación de una tecnología; problemática asociada al manejo de los RSU; soluciones en la Gestión Integral de Residuos para atender la problemática identificada; herramientas o instrumentos útiles en la selección de una tecnología; criterios para la evaluación y selección; aspectos técnicos, sociales, económicos, financieros, ambientales y legales a considerar; opinión y recomendaciones para la implementación; y recomendación de la mejor tecnología de acuerdo a su experiencia

RESULTADOS DE LA CONSULTA

Este estudio fue aplicado a cinco sectores de expertos:

- Academia, aquellos expertos que pertenecen a una institución educativa o de investigación
- Gestión, consultores, asesores expertos en residuos
- Gobierno, funcionarios de gobierno tomadores de decisiones (Federal, Estatal y Municipal) y aquellos que pueden emitir una opinión técnica.
- Promotor y desarrollador de tecnologías, fabricantes y/o comercializadores de tecnologías de RSU
- Internacionales, expertos en residuos internacionales

Derivado de la aplicación de las encuestas, se obtuvo la participación de expertos alcanzó un valor de de participación de 59.67% (37 encuestas), distribuidos de acuerdo a su sector, tal como se menciona en la Figura No. 1.

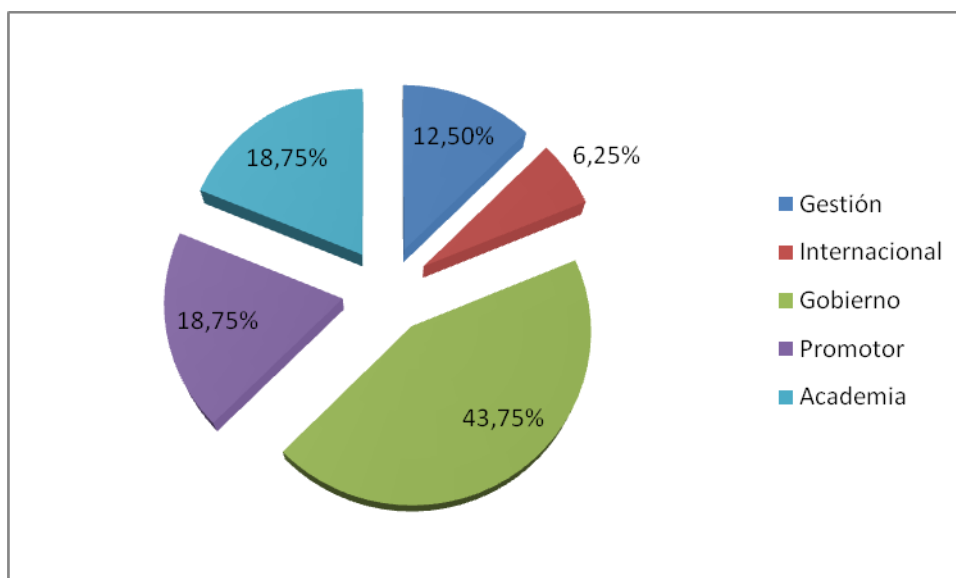


Figura No. 1. Sectores involucrados en la consulta de expertos

Los criterios de mayor importancia, de acuerdo a los expertos estos son: los técnicos, ambientales y económicos, tal como se puede apreciar en la Figura No. 2.

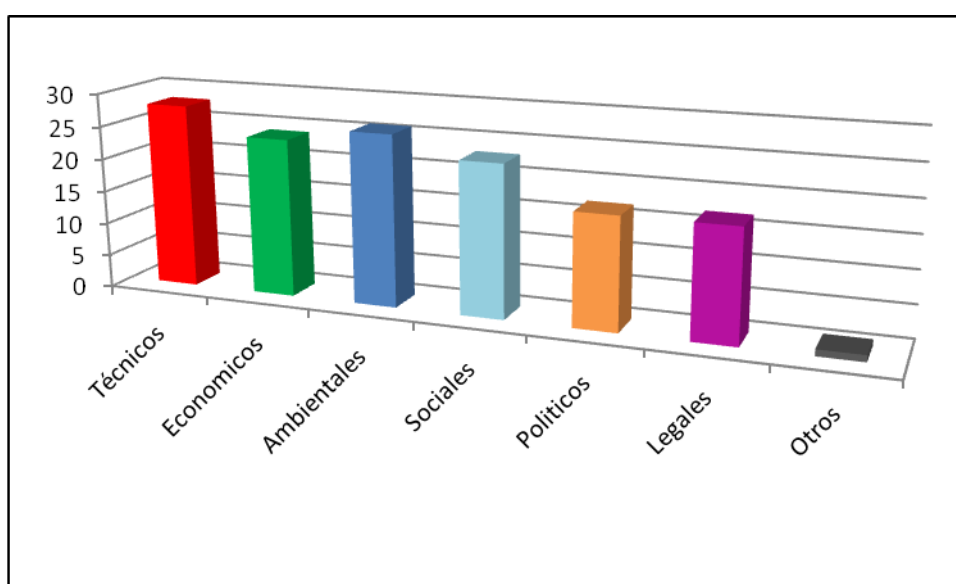


Figura No. 2. Criterios de mayor importancia según expertos

Los criterios técnicos más relevantes que se consideran al momento de seleccionar una tecnología son: que sea adecuada para cada condición, disponibilidad de servicios técnicos nacionales, fácil de operación y aplicación, tecnologías ya probadas e infraestructura y recursos suficientes. Ver Figura No. 3.

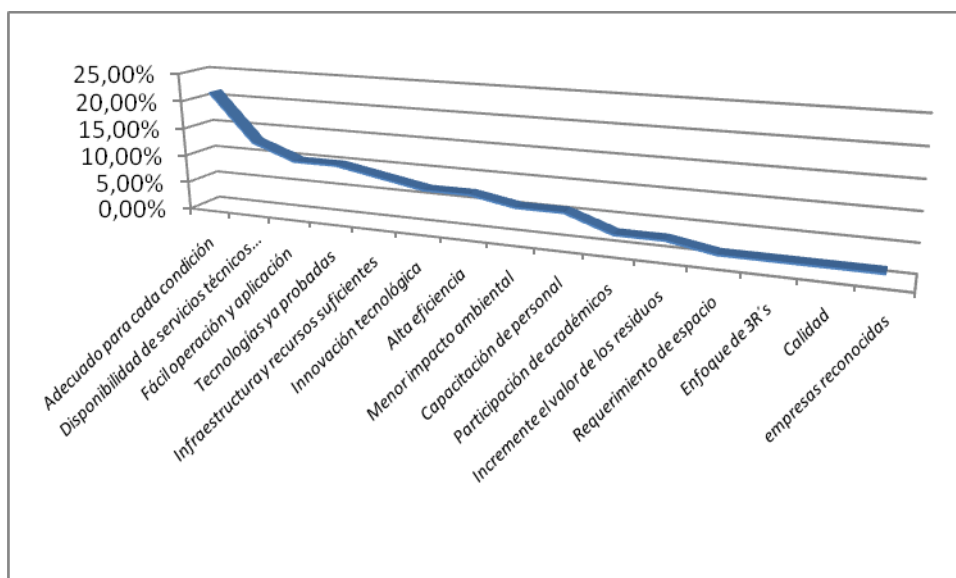


Figura No. 3. Criterios técnicos que se deben tomar en cuenta, de acuerdo a los expertos encuestados.

Con respecto a los criterios ambientales, los más mencionados fueron: menor impacto ambiental, cumplimiento de la normatividad, ambientalmente integral. El resto se enuncian en la figura No. 4.

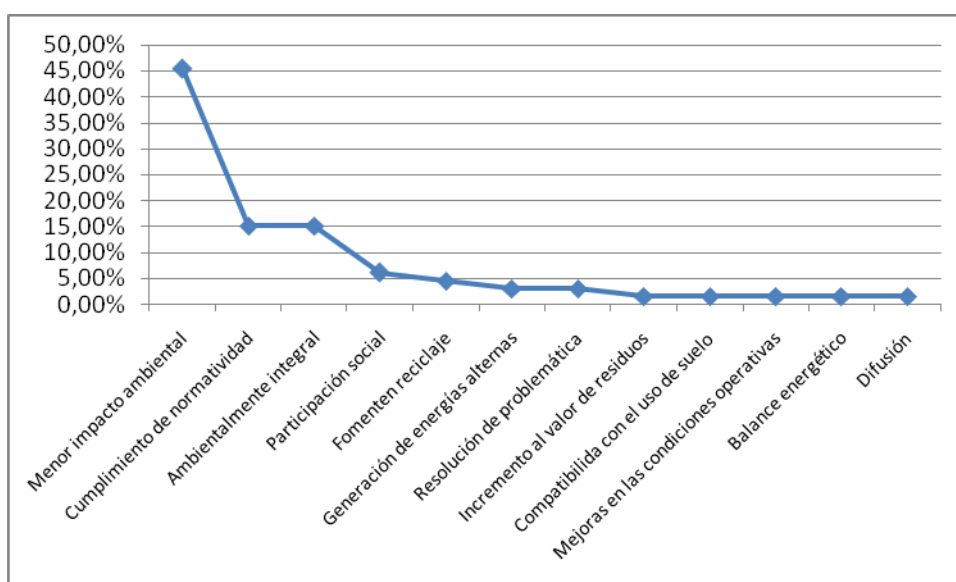


Figura No. 4. Criterios ambientales.

En lo que se refiere a los criterios económicos, los criterios con más menciones fueron: finanzas locales, relación costo-beneficio y tecnología este coordinada a procesos productivos. El resto se enuncian en la figura No. 5

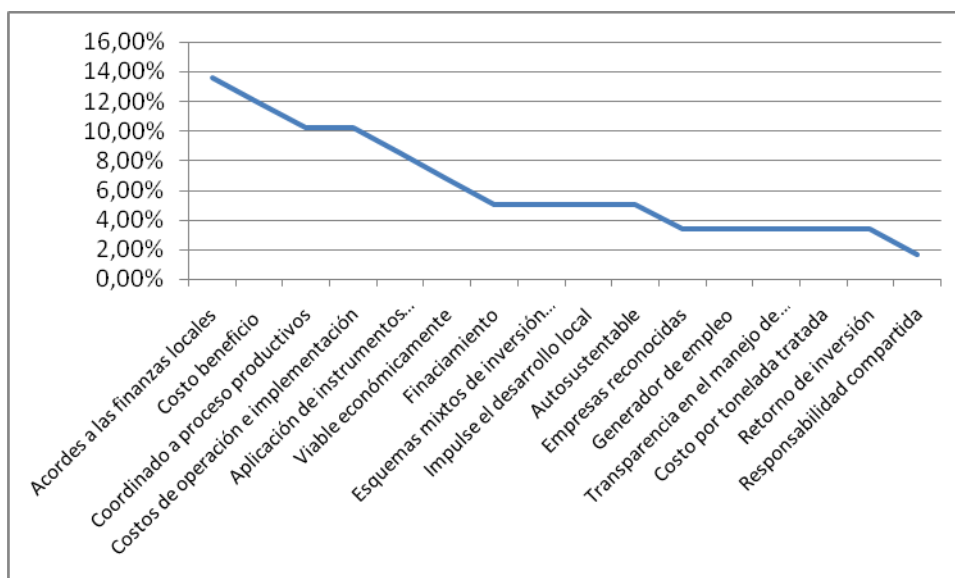


Figura No. 5. Criterios económicos a tomar en cuenta, de acuerdo a los expertos encuestados.

Los criterios sociales con más relevantes fueron: que sea socialmente aceptable, que fomente la participación ciudadana y que sea generador de empleos. El resto se enuncian en la figura No. 6.

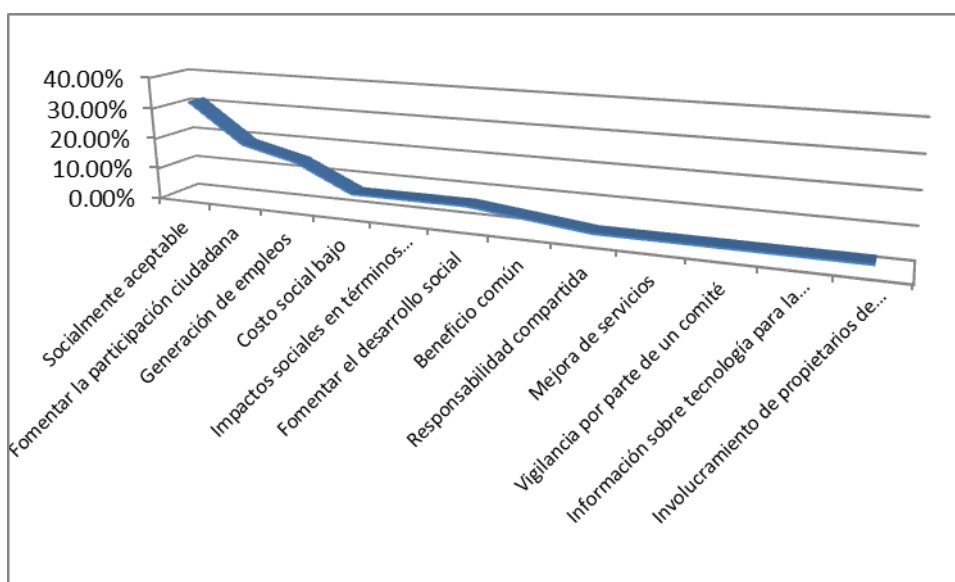


Figura No. 6. Criterios sociales a considerarse en la evaluación.

En lo relativo a criterios políticos, los más concurrentes fueron: que exista voluntad política, que la adquisición, proceso y administración de la tecnología tengan transparencia y que exista una eficiente coordinación entres los niveles de gobierno, los criterios políticos adicionales se enuncian en la figura No. 7.

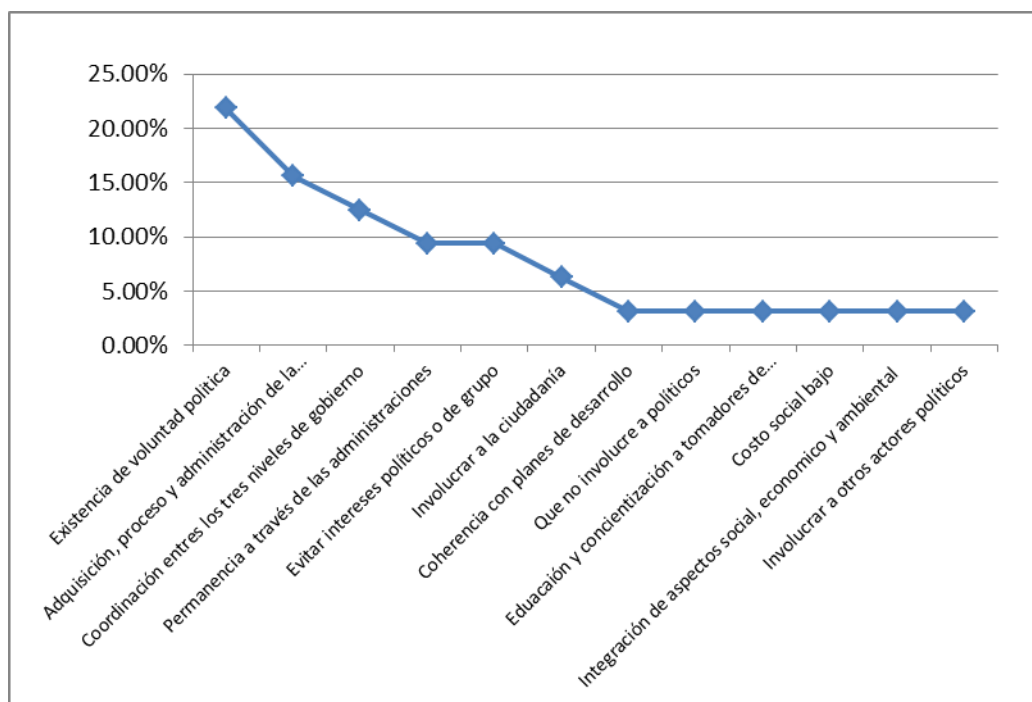


Figura No. 7. Criterios políticos.

En cuanto a los criterios legales, los más mencionados fueron: cumplimiento de la normatividad, desarrollo de normatividad y que exista un marco legal adecuado para las actividades, el resto se enuncian en la figura No. 8.

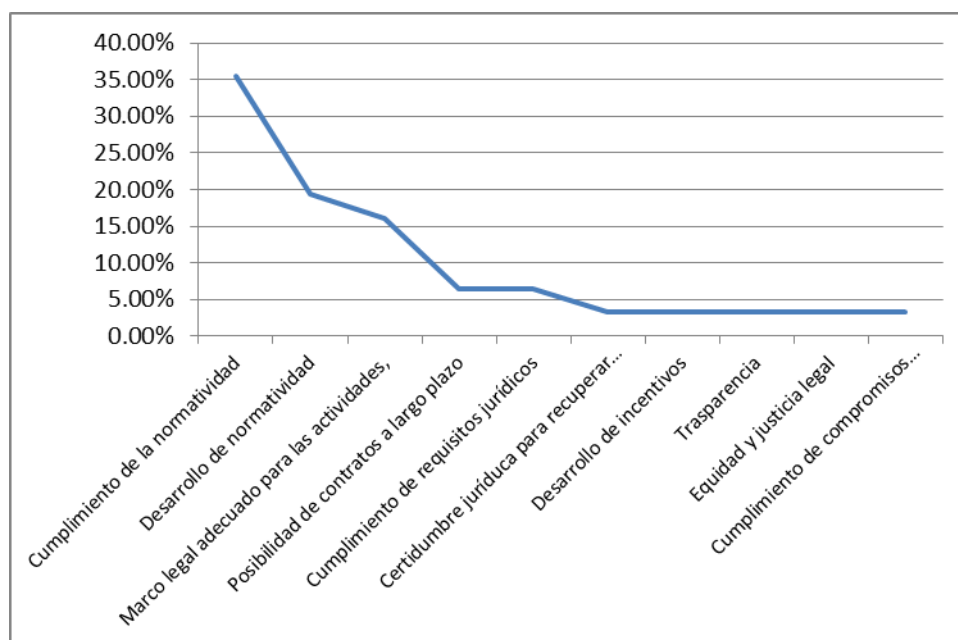


Figura No. 8. Criterios legales a considerarse en la evaluación.

MODELO DE MATRIZ DE EVALUACIÓN

Para una evaluación de los elementos en cada una de las tecnologías de disposición final, se deben establecer los siguientes rangos de afectación: nula, baja, media, alta y muy alta; con valores de 0.00 a 1.00; 1.01 a 2.00; 2.01 a 3.00, 3.01 a 4.00 y 4.01 a 5.00, respectivamente. Estas “calificaciones” se registran en la matriz de evaluación de elementos de los criterios por tecnología de disposición final, mostrada en la ecuación 1.

$$C_e = \sum (e_i)_j r_k$$

Ecuación 1

Donde:

C_e = Afectación de los elementos de los criterios

e = Elementos de los criterios (Cumplimiento de la normatividad, desarrollo de normatividad, marco legal adecuado para las actividades, existencia de voluntad política, adquisición, proceso y administración de la tecnología con transparencia, coordinación entre los tres niveles de gobierno, adecuado para cada condición, disponibilidad de servicios técnicos nacionales, fácil operación y aplicación, entre otros). Valores observados de la figura 3 a 8.

r = Evaluación de tecnologías de disposición final (relleno sanitario tradicional, relleno sanitario seco: tratamiento mecánico biológico, bio-rellenos acelerados, relleno sanitario semiaerobio (método Fukuoka))

La representación de matriz quedaría de la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{c} C_{tradicional} \\ C_{relleno\ seco} \\ C_{mecanico\ biologico} \\ C_{bio.relleno\ acelerados} \\ C_{fukoka} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{ccccc} 0.45 & 0.15 & 0.15 & 0.06 & 0.05 \\ 0.21 & 0.13 & 0.10 & 0.10 & 0.09 \\ 0.22 & 0.16 & 0.13 & 0.09 & 0.09 \\ 0.35 & 0.19 & 0.16 & 0.06 & 0.06 \\ 0.32 & 0.19 & 0.15 & 0.06 & 0.06 \\ 0.14 & 0.12 & 0.10 & 0.10 & 0.08 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} r_{ambiental} \\ r_{tecnico} \\ r_{politico} \\ r_{legal} \\ r_{social} \\ r_{economico} \end{array} \right\}$$

Para determinar la tecnología de disposición final más adecuada se debe utilizar la ecuación 2:

$$Max Z = \sum_{i=1}^n C_e C_i$$

Ecuación 2

Donde:

Z = Afectación de cada una de las tecnologías de disposición final

C_i = Porcentaje de afectación de cada uno de los criterios: ambiental, social, político, legal, técnico y económico, ver la Tabla No. 7.

Tabla No. 7. Calificaciones de los criterios (C_i)

Criterio	Porcentaje de afectación
Ambiental	19.12%
Social	16.91%
Político	12.50%
Legal	12.50%
Técnico	20.59%
Otros	00.74%
Económico	17.65%

Fuente: Resultado de las encuestas a expertos

$$MaxZ = [C_e] \left\{ \begin{array}{c} 0.1912 \\ 0.2059 \\ 0.1250 \\ 0.1250 \\ 0.1691 \\ 0.1765 \end{array} \right\}$$

La aplicación de la metodología consiste en formular una maximización, calificando los criterios por la afectación de acuerdo a los resultados de las encuestas a los expertos, para finalmente seleccionar la tecnología de disposición final más adecuada. Por lo que a partir de la modelación, la tecnología más viable es la que presenta el menor valor numérico.

CONCLUSIONES

Se realizó una búsqueda de las tecnologías de disposición final de residuos sólidos encontrándose que a nivel nacional, el relleno sanitario tradicional sigue siendo la actividad más recurrente como tecnología de disposición final.

La metodología aquí presentada es una herramienta útil para los tomadores de decisiones en el manejo de residuos sólidos urbanos, donde se involucraron aspectos sociales, técnicos, económicos, legales, políticos y ambientales; los cuales son de vital importancia para la aplicación exitosa de las tecnologías de disposición final.

El análisis multicriterio es una herramienta versátil que permite modelar diferentes tecnologías de disposición final.

Es necesario fomentar e involucrar a todos los actores en la toma de decisiones, en la medida de aumentar la participación, se obtendrán mejores decisiones, y en consecuencia un manejo integral de los RSU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMCRESPAC. (1998). Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos. Servicios de Tecnología ambiental S.A. (Grupo ICA). Impacto ambiental en rellenos sanitarios, México, DF.
2. Ekmekçioğlu M, Kaya T. y Kahraman C. (2010). Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste, *Waste Management*, 30:1729-1736.
3. G. Wehenpohl y C. Ambrosius. (2006). Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Experiencias de Nueve Años de Cooperación Técnica Alemana en México. México: 2006.
4. GTZ, (2002). Cooperación Alemana (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Reporte final, Alternativas de rellenos sanitarios, guía de toma de decisión. Noviembre 2002. Disponible en página web: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/alternativas.pdf>. Fecha de acceso: 3 de junio de 2011.
5. GTZ, (2003). Cooperación Alemana (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental (COMIA), Reporte final, La Basura en el Limbo: Desempeño de Gobiernos Locales y Participación Privada en el Manejo de Residuos Urbanos. México, 2003. Disponible en página web: <http://www2.gtzt.de/dokumente/bib/07-0126.pdf>. Fecha de acceso: 6 de junio de 2011
6. Hüttner Elke, Dilewski Gernod, Stretz Joachim, Janikowski Gabriela, Maak Dirk, Mohamad Aber, Mutz Dieter, Schenk Bernhard, (2003). Proyecto sectorial, tratamiento mecánico biológico para el tratamiento de residuos, Reporte final, Cooperación Alemana (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)), Alemania.
7. INEGI, 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Estadísticas. Medio ambiente. Residuos. Disponible en <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb126&s=est&c=21650>. Fecha de acceso: 13 de septiembre de 2011
8. Narro Ramírez Ana Elena. (1996). Aplicación de algunos modelos matemáticos a la toma de decisión, *Revista Política y Cultura*, Universidad Autónoma Metropolitana – Xochimilco, 6:183-198.
9. NOM-083-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
10. Sánchez Gómez Jorge. (2005). Bio rellenos metanogénicos; Opción sustentable para la disposición final de los residuos sólidos, 1º Congreso Interamericano de Residuos Sólidos, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS/DIRSA), pp. 1-15.
11. Shimaoka Takayuki. (2010). Estructura de rellenos sanitarios tipo semi aeróbico. Método Fukuoka. Universidad de Kyushu. Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA).
12. Soye K. y Plickert S. (2002). Mechanical-Biological Pre-Treatment of Waste – State of the Art and Potentials of Biotechnology, *Acta Biothechnologica*, 22(3-4):271-284.
13. Theng Lee Chong, 2005. Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis. Faculty of Environmental Studies, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM-

- Serdang, Selangor, Malaysia. Department of Civil Engineering, Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Johnan-ku, Fukuoka, Japan. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.008>
14. Visvanathan Chettiyappan, Tränkler Joseph, Chiemchaisri Chart. (2006). Mechanical biological pre-treatment of solid waste prior to landfill, Seminar on Regional Guidelines for Sustainable Management of Municipal Solid Wastes in Asia, Short course in sustainable solid waste management in Asia, Sri Lanka.