

CAPÍTULO 12

Biorremediación de suelos afectado por residuos

Lucrecia Brutti¹, Marcelo Beltrán¹, Ernesto Giardina²

¹Instituto de Suelos CIRN-INTA de los Reseros y Nicolás Repetto s/n 1686 Hurlingham, Buenos Aires, ²Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453, Buenos Aires 1417, Argentina

Introducción

Problemática de los residuos a nivel mundial

La situación mundial referida a los residuos es variada y complicada, los países industrializados poseen diversos sistemas de tratamientos para sus residuos y poseen residuos tóxicos difíciles de manejar si no se realiza separación en origen. Los países con poca industrialización han manejado el tema de maneras diversas y en muchos casos directamente no existen políticas definidas al respecto. Esto trae como consecuencia basurales a cielo abierto donde se disponen todo tipo de residuo sin clasificar y donde los tóxicos son distribuidos en el suelo y en las aguas superficiales y hasta en las profundas por medio de los lixiviados que genera el material orgánico. El aire se contamina por generación de biogás o por quemas espontaneas o intencionales liberando dioxinas y furanos. El método más usado es el destino final de los residuos en rellenos sanitarios instalados y manejados con menor o mayor tecnología aplicada correctamente o no (Tchobanoglous *et al.*, 1994; Seoanez Calvo *et al.*, 1999)

Problemática de los residuos a nivel nacional

Argentina hace varios años ha comenzado con la separación en origen de los residuos domiciliarios y el resultado mejor se ha alcanzado en centros urbanos pequeños. El material orgánico es el principal actor en la producción de líquidos lixiviados alcanzando proporciones de hasta el 50 % en la basura domiciliaria. La descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos al interior del relleno libera agua y esta acarrea consigo contaminantes diversos y microorganismos de los demás

residuos. Así mismo el relleno sanitario es un reactor anaeróbico que genera biogás cuya principal composición es el metano, gas que si se elimina a la atmósfera es altamente contaminante

Destino de los residuos (reciclado, reuso y reducción)

La clasificación en origen del residuo urbano implica un nuevo destino que podría ser un reciclado como el caso de los envases de plástico, de cartón o de papel, también del orgánico cuando se destina a compostaje, elaboración de biogás o lombricompost. En ciertos casos con poco esfuerzo el residuo se reutiliza total o parcialmente como podría ser el caso de un electrodoméstico o de equipos electrónicos. En otros casos solo reducimos volumen por ejemplo armando fardos con los plásticos o también en el caso de algunos tratamientos citados para el material orgánico, compostaje, biogás, lombricompost su transformación también implica disminución de volumen y reuso (Alvarado *et al.*, 2010; Brutti, 2001; Brutti, 2003).

Legislación nacional y en la provincia de Buenos Aires Argentina

La Ley N° 1854 Gestión integral de residuos sólidos urbanos (2006), conocida como “Basura Cero”, tiene como principio la reducción progresiva de la disposición final de los residuos sólidos urbanos. El Decreto 639/07 (09/05/2007) reglamenta la Ley N° 1854, mientras que el Decreto 760/08 (01/07/2008) aprueba la reglamentación del artículo 9 de esa ley, modifica el decreto 639/07 y designa la autoridad de aplicación, entre otros conceptos.

La resolución 40/2011 de gestión integral de residuos sólidos urbanos es la norma del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) que marca el procedimiento para que los municipios de la provincia de Buenos Aires presenten sus programas de gestión integral de residuos sólidos urbanos.

La Resolución N°1143/2002 dictada por el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) regula la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) en rellenos sanitarios. Indica que estos deberán establecerse “en áreas cuya zonificación catastral sea Rural” y cómo deben ser la aislación de su base y taludes laterales, entre otros varios aspectos.

La Ley N° 13.592 Gestión integral de residuos sólidos urbanos (2006/2007) las bases de la gestión residuos sólidos y delimita las responsabilidades del gobierno provincial y los municipios. Por su parte, la Ley 13.657 suspende el artículo 12° y modifica el 8° de la Ley 13.592 y otorga más plazo para que los municipios “manifiesten su continuidad

o no con lo estipulado en el artículo 3° de la norma precitada y notificar de ello a CEAMSE y a la Autoridad Ambiental Provincial”.

La Ley 25.916 Gestión de residuos domiciliarios (desde 2004) establece que los centros de disposición final son los “especialmente acondicionados y habilitados por la autoridad competente para la disposición permanente de los residuos” y pide para su habilitación “la aprobación de una Evaluación de Impacto Ambiental, que contemple la ejecución de un Plan de Monitoreo de las principales variables ambientales durante las fases de operación, clausura y postclausura” de los rellenos sanitarios. Da plazo hasta 2019 (15 años) para la adecuación de las distintas jurisdicciones al conjunto de disposiciones de la ley.

Define al Consejo Federal de Medio Ambiente (COFEMA) como el “organismo de coordinación interjurisdiccional” en cuanto al manejo de residuos urbanos.

La Ley 25.675 Política ambiental nacional (desde 2002) le da marco al conjunto de las políticas ambientales en la Argentina. Establece una serie de principios ambientales como los de prevención, sustentabilidad y responsabilidad. Este último implica que los generadores de efectos degradantes del ambiente son responsables de los costos de las acciones preventivas y correctivas de recomposición.

La Ley 25.612 Gestión integral de residuos industriales y de actividades de servicios (desde 2002) establece los presupuestos mínimos sobre el tratamiento de los residuos industriales –de los que excluye a los residuos domiciliarios, biopatogénicos, radiactivos y derivados del uso normal de aviones y embarcaciones– y crea registros de sus generadores.

La ley 24.051 de residuos peligrosos (desde 1992) regula todo lo relacionado con los residuos peligrosos, desde cómo se definen hasta su transporte y disposición final. Crea el Registro Nacional de Generadores y Operadores de Residuos Peligrosos.

La Constitución Nacional en su artículo 41 (desde 1994) consagra el derecho “a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano” y obliga a recomponer el daño ambiental. También manda a las autoridades a proveer “información y educación ambientales”.

En la legislación chilena el título VI Del Cierre y Abandono en su artículo 53 del Decreto Sanitario N.º 189 del 18/08/05. Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básica en los rellenos sanitarios establece que el plan de Cierre debe destacar al menos lo siguiente:

-
- a. Obras y actividades, tales como la mantención de la cobertura final y del sistema de intercepción perimetral de escorrentías superficiales.

- b. Operación, mantención y seguimiento de los sistemas necesarios para ciertos riesgos para la salud y el medio ambiente, tales como los de manejo de lixiviados y biogás.
- c. Operación y mantenimiento de los sistemas de monitoreo y control.
- d. Uso y destino futuro del relleno sanitario incluidas las obras y actividades que se realizarán.



Figura 1. De izquierda a derecha planta productora de electricidad a partir del biogás del relleno sanitario del Complejo Ambiental Norte III y etapa cerrada con recuperación natural de la vegetación. Foto: Lucrecia Brutti.

Residuo orgánico urbano

En lo referente a rellenos sanitarios, el residuo orgánico que llega aquí proviene de las podas de parques y jardines, de los cortes de césped y de los restos de los hogares, restaurantes, mercados y ferias libres, de residuos alimenticios. Podría incluirse el material de las agroindustrias.

Los tratamientos controlados de los residuos orgánicos implican métodos aeróbicos como el compostaje (en sistema abierto o cerrado) y lombricompostaje o anaeróbico como la producción de biogás. El compostaje incompleto denominado sanitización que podría continuar en un proceso de lombricultura. La incineración para obtener vapor de agua y destinarlo a calefacción como es el caso de la ciudad de Uppsala en Suecia.

Los rellenos sanitarios son lugares ideales para realizar estos procedimientos dado que necesitan materia orgánica degradada y estabilizada para mejorar la calidad de los suelos que se utilizan en sus etapas de cierre parcial o total.

Tratándose del relleno sanitario que necesitaría cerrarse por etapas y recuperar el área, el compostaje sería una opción. Según la normativa de calidad de compost

chilena N.º 2880 se define compost al producto constituido principalmente por materia orgánica que resulta del proceso de compostaje.

El proceso de compostaje implica la biodegradación controlada de la materia orgánica de las materias primas. Las materias primas son en este caso residuos, productos o subproductos de origen animal o vegetal factibles de ser compostado.

Los rellenos sanitarios pueden recibir residuo domiciliario y todo aquel que se les semeje por lo tanto las podas de ramas, los cortes de césped, el material orgánico limpio de las ferias de frutas y hortalizas podrían ser usados para ser transformado para estos fines al igual que los lodos de depuradoras de aguas servidas domiciliarias que no incluyan vertido industrial (Brutti, 2001; Alvarado *et al.*, 2002).



Figura 2. Planta clasificadora de residuos en el Parque de Tecnologías Ambientales de San Juan, Argentina. Foto: Lucrecia Brutti.

Clasificación de los residuos en origen

La separación de residuos puede hacerse en origen o en lugares especiales con maquinarias clasificadoras. Por costo y por resultado final en cuanto a calidad y rendimiento es conveniente la separación en origen.



Figura 3. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Bajo mesada con tachos para separación de residuos domiciliaria. Contenedores para clasificación de residuos en lugar de acopio (Estocolmo, Suecia). Acopio de residuos clasificados en la CEAMSE, Complejo Ambiental Norte III. Clasificación de residuos en San Juan Capital, Argentina.

Relleno sanitario

Un relleno sanitario es una obra ingenieril que implica un estudio de impacto ambiental anterior a su establecimiento. Un trabajo de construcción, otro de operación, un cierre y un monitoreo operacional de la tarea y sus externalidades durante y con posterioridad al cierre (Tchobanoglous, 1994).

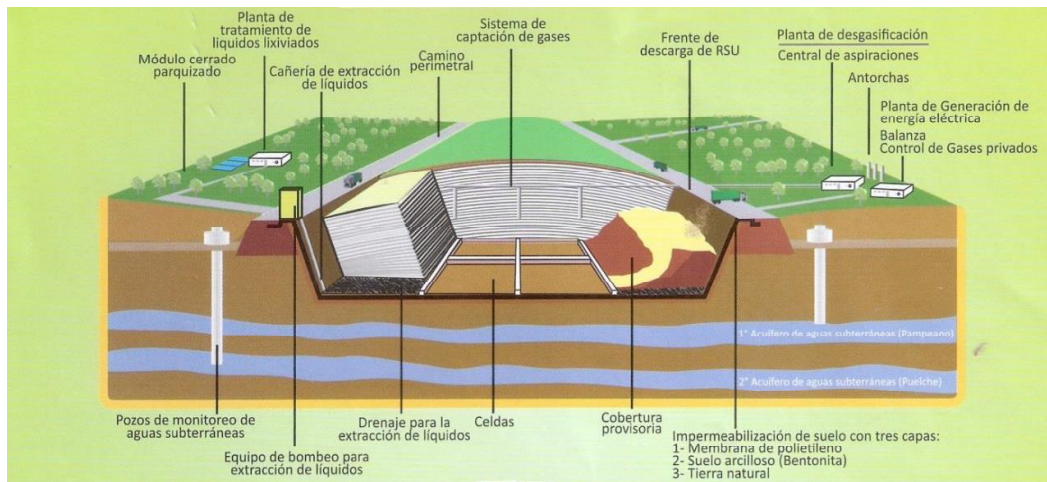


Figura 4. Esquema de un relleno sanitario construido bajo la normativa vigente contemplando el manejo de las externalidades que afectan al ambiente y con el aprovechamiento del biogás.

Como se había comentado lo más conveniente es la clasificación *in situ* de los residuos, la separación en origen. Este procedimiento toma tiempo y necesita educación de la población.

En Argentina hay ejemplos exitosos en distintas provincias como el caso de Federal y Crespo en la provincia de Entre Ríos, Rauch en la provincia de Buenos Aires, La ciudad de San Juan en la provincia del mismo nombre. El CEAMSE en Buenos Aires.



Figura 5. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Relleno sanitario en actividad, disponiendo y compactando. Etapa de relleno sanitario completada mostrando los taludes y el trabajo de la máquina de mantenimiento de la superficie.

Externalidades de un relleno sanitario, los contaminantes. Componentes tóxicos.

Cuando se aborda la problemática de los rellenos sanitarios casi siempre se hace hincapié sobre todo lo que tiene que ver con la calidad y cantidad de materiales que se vuelcan en ellos, pecando no pocas veces, por la falta de entendimiento de lo que sucede dentro del relleno con tales materiales.

Una de las externalidades que producen los rellenos sanitarios son los líquidos lixiviados. Pero, ¿qué son esos lixiviados? Según Cruz *et al.*, 2001 los lixiviados son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de composición. El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante de un relleno. En la bibliografía, existen numerosos estudios en los que se presentan evidencias de cómo estos líquidos pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas (Cossu *et al.*, 2001; Ding *et al.*, 2001), por lo que la

estimación de su producción a lo largo de la vida del relleno sanitario y la variación de su composición son datos valiosos para planear adecuadamente las obras de control que minimicen impactos negativos al medioambiente. (Jensen y Christenssen, 1999; Kennedy y Everett, 2001).

El lixiviado de un relleno sanitario es un agua residual compleja, con considerables variaciones en la composición y el flujo volumétrico (Trebouet *et al.*, 2001).

Si bien es cierto que la calidad del lixiviado está en función de la composición de los materiales volcados en él, los procesos, junto con el manejo de estos y las condiciones ambientales, y particularmente físicas del lugar, hacen al resultado final, definiendo entonces si hay contaminación o no, y qué tipo de daño y sobre qué o quiénes. (Borzzaconi *et al.*, 1996).

Otro aspecto por demás saliente dentro de los rellenos (su funcionamiento) está en función de la cantidad de oxígeno del proceso de descomposición, la edad del relleno, así como la capa, segmento o sector del cual estemos hablando.

En la evolución de los rellenos existen (y muchas veces coexisten) etapas acidogénicas con otras metanogénicas, de ahí la importancia de utilizar algunos materiales ricos en Ca como para moderar estas etapas como para no generar problemas aún más serios.

Pero ¿qué es un relleno sanitario?

Cuando se habla de relleno sanitario, se hace referencia a un sitio de disposición final de residuos. Los mecanismos de ingeniería de los rellenos sanitarios pretenden reducir los impactos negativos de los residuos en el medioambiente. Estos están compuestos básicamente por una suerte de depresión en el terreno elegido para tal fin, cubierta dicha depresión por una membrana inferior, junto con un sistema de recolección de líquidos (lixiviados), un sistema de recolección de gases, y en algunos casos, una cobertura. Pero quede claro que no necesariamente todos los rellenos sanitarios cuentan con esta serie de elementos.

Tal membrana inferior, por lo general está constituida por polietileno de alta densidad (PEAD), y por debajo de ella, puede también contener una o más capas de arcilla.

Respecto del sistema de colección de líquidos, sabemos que consiste en caños ubicados en el fondo del relleno. El líquido ingresa dentro de estos caños, y debido a la inclinación propia del terreno, o bien la que por ingeniería haya sido dada, por gravedad, o succionados con bombas, debería ser dirigido hacia la planta de tratamiento de líquidos, cuando existe. Y aquí encontramos otra arista importante referida a la peligrosidad de los rellenos sanitarios. Si bien no existe un modelo exclusivo en la construcción de un relleno, podríamos orientar nuestra atención hacia que todos los lixiviados y las aguas residuales generadas pasaran por la planta de

tratamiento de lixiviados, de manera que finalmente se busque obtener un efluente que cumpla con los requerimientos ambientales exigidos por la autoridad ambiental competente. Algunos sistemas de tratamiento de los lixiviados están conformados por un desarenador (pretratamiento), por dos lagunas de sedimentación (tratamiento primario), por el tratamiento biológico (tratamiento secundario) y el tratamiento físico – químico (tratamiento terciario). Procesos que se ubicarán en la parte más baja del relleno.

Para someter el lixiviado al tratamiento secundario y posteriormente el terciario, debería existir una estación de bombeo desde la laguna de sedimentación, de manera que las impulsara hacia el tratamiento secundario. Así mismo, después de tratado el lixiviado en la planta, sería conveniente contemplar la posibilidad de que este efluente se bombee a un sistema de riego para las plantas ornamentales sembradas en toda el área del relleno.

El cubrimiento es una capa de protección que procura frenar la entrada de agua, y así evitar la formación de más lixiviado. Está formada generalmente por una membrana plástica o una capa arcillosa, cubierta por una capa de arena o suelo muy permeable, tapada a su vez por una capa de tierra fértil.

Eugenio Giraldo, ingeniero civil, de la Universidad de Los Andes. MSc. Ingeniería Ambiental y Ph. D. en Ingeniería Ambiental, University of Massachusetts, EUA; profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Los Andes, en su trabajo “Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, avances recientes”, aclara que “A pesar de la creciente conciencia mundial sobre la necesidad de Reducir, Reusar y Reciclar los materiales que fluyen a través de la sociedad, la implementación real de estas políticas ha encontrado numerosos obstáculos que han impedido su materialización en hechos concretos. Parte del problema se encuentra en la poca internalización de los costos ambientales en que se incurre en la producción de bienes que finalmente se descartan convirtiéndose en residuos. La comparación final sobre qué hacer con un bien descartado se hace en términos de las alternativas para su manejo final, –mas no en los impactos ambientales que generó su producción, distribución y uso–, siendo con frecuencia la alternativa más económica su disposición en un relleno sanitario”.

Quedaría claro, a través de lo expresado hasta ahora, que la problemática casi se circunscribe al tratamiento de los lixiviados. Si bien entonces existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante, se podría concluir sin temor a equivocarnos que estos contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de

sustancias tóxicas como, metales pesados y constituyentes orgánicos. Características por demás importantes ya que nos indican qué es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento. No obstante ello, desde el punto de vista de la selección de la tecnología, somos conscientes de que existen otras características, cualidades y atributos que, sin ser necesariamente contaminantes, pueden afectar el funcionamiento de los procesos de tratamiento.

Volviendo otra vez sobre el tópico “calidad de los lixiviados”, es común encontrar concentraciones mucho mayores de DBO (demanda biológica de oxígeno), amoníaco, metales y sustancias precipitables; ello encierra implicancias por demás importantes en la operatividad y el rendimiento de los procesos de tratamiento; debiendo recurrir a adaptaciones sobre tecnología conforme a casos y cuestiones locales. Consecuencia de ello, los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios que han sido recientemente rellenas producen un lixiviado altamente contaminante, denominado lixiviado joven. (Giraldo, 2001).

Cuadro 1. Características conceptuales de un líquido lixiviado.

Característica	Lixiviado joven	Lixiviado viejo
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoníaco	Muy alto	Alto
Fósforo	Usualmente deficiente	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy altos	Bajos
Sales disueltas	Muy altas	Relativamente bajas
Agentes incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy altos	Bajos
Metales pesados	Muy altos	Bajos

DBO: demanda bioquímica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno

Fuente: Universidad de los Andes. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. Eugenio Giraldo.



Figura 6. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Piscina de percolado en el CEAMSE, Buenos Aires, Argentina. Piscina liquido percolado relleno sanitario cerrado Lepanto, San Bernardo, Chile. Bandejas de evaporación de líquidos percolados, relleno Sanitario Santiago Poniente, Chile. Fotos: Lucrecia Brutti.

Entonces, en cuanto a alternativas de tratamiento se podrá deducir hasta ahora que existen no pocos sistemas que combinan distintas tecnologías, muchas de ellas sobre la prueba-error, sabiendo que los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales también se han propuesto como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Estos tienen la ventaja de la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pretratamiento, hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse.

Entonces, si la problemática radica en la acumulación de precipitados, en la combinación de las lagunas y de los humedales, pueden manejar adecuadamente muchos de los problemas donde, además de precipitados, encontraríamos la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos, y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas.

Un muy breve análisis de costos respecto de tecnologías para el tratamiento de lixiviados deja en claro que dicha tecnología ha probado ser muy competitiva en

comparación con otras alternativas, mientras tales análisis financieros tengan en cuenta los costos de capital, de operación y de mantenimiento de los sistemas. De tal forma que se puedan llegar a conclusiones respecto al costo real por volumen de lixiviado tratado en un relleno sanitario, y mientras también se tengan en cuenta el valor del costo del terreno para utilizar para tal fin. Pero a partir de la premisa que en tales terrenos por la naturaleza misma de los diseños de los rellenos sanitarios, en donde existe la necesidad de tener áreas de amortiguamiento visual, de ruido, y de olores, estas áreas, que usualmente están localizadas en los alrededores del relleno, podrían utilizarse como parte de los sistemas naturales de tratamiento; en especial en el caso de los humedales, según indica Eugenio Giraldo.

En el caso de los humedales artificiales, su aplicación al tratamiento de los lixiviados es relativamente nueva, debiendo buscar experiencias en Estados Unidos y en Europa principalmente.

Se descarta del presente comentario que el tratamiento de los lixiviados de los rellenos sanitarios es un problema difícil de atacar, tal vez, sin exageración, uno de los problemas más desafiantes en la ingeniería del tratamiento de las aguas residuales. Y ello queda al descubierto a través de la gran cantidad de tecnologías y de investigación que se vienen realizando. Por suerte aún hay mucho campo para la innovación. Queda claro que lo más racional sería no producir lixiviados, o bien producir lixiviados con cualidades menos contaminantes. Sin embargo, conforme a comentarios del ingeniero Giraldo, esta solución se podrá dar cuando se mire de una manera global el flujo de materiales en la sociedad y se internalicen los costos ambientales en todo el ciclo de los materiales, desde su producción, transformación, distribución, uso y descarte. Mientras tanto es muy probable que los lixiviados continúen siendo un problema apremiante de la sociedad.



Figura 7. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Emplazamiento de pilas y máquina volteadora. Acopio de material degradado. Foto: Lucrecia Brutti.

Cierre de un relleno colmatado de basura o de una etapa en un relleno sanitario

El plan de cierre de un relleno sanitario se lleva a cabo una vez completada la capacidad del relleno y su objetivo es que este siga funcionando eficazmente como una unidad para el control ambiental de los residuos durante un período, que en promedio podría extenderse a unos 25 años; si bien existen rellenos sanitarios de Europa donde luego de 100 años hay producción de biogás. (UCV 1997).

La idea sería biorremediar la zona si bien aquí jugarían dos conceptos: el primero se define como bioprofilaxis caso en el cual se utilizan tecnologías que evitan la contaminación, y el segundo concepto es la biorremediación que implica aplicar un conjunto de metodologías que principalmente se valen de la biología y devuelven un ser natural al que estaba o similar. (Beider y Brutti, 2015).

Un programa de cierre debe contemplar:

- a) Diseño de cobertura final.
- b) Programas de monitoreo de gases.
- c) Programa de manejo de líquidos lixiviados.
- d) Programa de monitoreo de aguas subterráneas.
- e) Programa manejo de aguas lluvia.

- f) Programa de medición asentamientos.
- g) Recuperación del área.

A continuación se desarrollan los puntos que se relacionan con la temática de este libro

a) Diseño de la cobertura final

Es la estructura que se instala sobre la cobertura normal de la celda una vez que han finalizado las obras de recepción y disposición de residuos. Esta asegura el confinamiento de la masa de residuos al interior del relleno sanitario. (EMERES, 1995 y 2000).

La función de la cobertura es la siguiente:

- Como barrera entre los residuos confinados y la agresividad del medio externo, ya sea infiltración de aguas lluvia, vientos, proliferación de vectores, presencia de personas o animales que puedan alterar el normal desarrollo de la estructura del relleno.
- Como barrera entre el medioambiente y la agresividad potencial de los residuos; sean salida incontrolada de gases, peligro de incendios o explosivos, levantamiento de residuos por efecto del viento y posibles afloramiento de líquidos percolados.

Sobre la cobertura de 25 cm que va sobre la última celda del relleno, comienza la instalación de una capa de material homogéneo, bien graduado, con un coeficiente de permeabilidad de aproximadamente 10^{-4} cm/seg. El material utilizado está exento de bolones, ladrillos, escombros y basura. El espesor final de esta cobertura es de 40 cm, colocados en el terreno en capas de 20 cm, el que es compactado con maquinaria adecuada. Posteriormente se coloca una lámina de polietileno de baja densidad de 0,2 mm de espesor en planchas de un ancho mínimo de 10 metros traslapando los empalmes al menos 50 cm. La finalidad de esta lámina es proteger la integridad de la capa de 40 cm, actuando como una barrera que impide la infiltración de agua que puede provocar erosión en la estructura. El sello intermedio y final se realiza empleando tierra arcillosa que tenga un grado de permeabilidad adecuado para evitar infiltración de aguas lluvias. (Botadero Plazuelas, 2009).

g) Recuperación del área

Es la etapa final y una de las más importantes del plan de cierre de un relleno sanitario, la cual debe cumplir con lo establecido en la normativa ambiental vigente. Esta comienza a ejecutarse una vez terminadas las operaciones que se realizan dentro del plan de cierre del relleno sanitario, las que se relacionan con la obra en ejecución de la cobertura final. (Espinace *et al.*, 1988).

Los objetivos que se persiguen con un plan de recuperación del área son básicamente dos:

- Proteger la cobertura final que podría ser dañada por efecto de los agentes erosivos del viento y de las precipitaciones.

- Mejorar considerablemente el entorno, dando origen a áreas verdes que permitan devolver el paisaje natural que estaba antes de ser construido el relleno sanitario.

Según Tchobanoglous (1994), como es deseable tener espacios abiertos en las zonas urbanas, los rellenos sanitarios cerrados representan una oportunidad única para la recuperación del terreno, a través del establecimiento de parques, zonas de recreo, reservas naturales, jardines botánicos, canchas de golf, producción de cosechas e incluso complejos comerciales. La selección del uso final de un relleno sanitario clausurado depende de las necesidades de la comunidad y de los fondos disponibles para el proyecto de recuperación. Por ejemplo, los parques con pocas atracciones y con un hábitat destinado a la fauna requerirían menos inversiones que campos de golf y zonas de recreo multifuncional.

Todos los usos finales mencionados anteriormente tienen una cosa en común: requieren de una revegetación para lograr satisfacer el objetivo de proteger la salud humana y el medioambiente. Los objetivos de recuperación son muy claros, pero esto no quiere decir que debemos dejar de reflexionar brevemente en torno al tema de la dificultad en cuanto a seleccionar la metodología y el sistema de recuperación más adecuado. Las experiencias indican que hay posturas distintas entre diferentes tendencias de ingenieros y especialistas con experiencia en el tema. La dificultad para seleccionar la metodología y el sistema de recuperación se explica por cuatro razones:

- Las condiciones del emplazamiento del relleno sanitario.

- Las condiciones previas en las que se encuentra el terreno, las cuales son necesarias para desarrollar proyectos de recuperación.

- La recuperación no se produce inmediatamente, sino que tiene lugar durante un largo período, aproximadamente 25 años. Esto se traduce en depositar mucho tiempo, trabajo y dinero en el mantenimiento del área. No existen todavía experiencias suficientes para saber cómo proceder mejor.

No existe una solución única de recuperación del área de un relleno sanitario, sino que existen variadas tendencias tecnológicas, niveles de desarrollos del conocimiento y criterios para enfrentar el tema. Esto indica que todavía no se ha encontrado la tecnología más adecuada que proceda a recuperar el área de un relleno sanitario (Espinace *et al.*, 1990).



Figura 8. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo forestación y cancha de fútbol, establecimiento de doca (*Mesembrianthemum chilensis*) en el relleno sanitario cerrado de Lepanto, San Bernardo, Chile.

Factores que limitan el crecimiento de las especies vegetales en un exrelleno sanitario controlado.

Los siguientes factores citados por Tchobanoglous (1994) limitan el crecimiento de las especies vegetales establecidas en exrellenos sanitarios controlados:

a) Toxicidad de los gases generados para las raíces

Los principales gases producidos por la descomposición de los residuos en un exrelleno sanitario clausurado son el CO_2 y CH_4 . Se ha comprobado que altas concentraciones de CO_2 son directamente tóxicas para las plantas, aunque el CH_4 aisladamente no es fitotóxico. Su daño proviene de su capacidad para provocar el desplazamiento del oxígeno, produciéndose condiciones anaerobias que son perjudiciales para las plantas. Estos dos elementos representan el 95 % del volumen total y el 5 % restante está compuesto por sulfuro de hidrógeno, el amoníaco, el hidrógeno, mercaptano, etileno, entre otros. El H_2S y el C_2H_4 son fitotóxicos para las plantas. (Harte *et al.*, 1995).

b) Bajo suministro de oxígeno

El espacio poroso del suelo está constituido por poros grandes que retienen oxígeno y por poros pequeños que retienen humedad entre lluvias y riegos. Los procesos de compactación del suelo con maquinaria pesada en los rellenos reducen dicho espacio y perjudican el buen crecimiento de las plantas que depende del suministro de oxígeno en sus raíces.

c) Baja capacidad de intercambio catiónico

Se relaciona con la habilidad del suelo para absorber y retener nutrientes. La materia orgánica coloidal y las arcillas son los principales puntos de intercambio catiónico. Los suelos utilizados en los rellenos sanitarios carecen de materia orgánica siendo incapaces de absorber y retener nutrientes así como de prevenir su lixiviación fuera de la zona de raíces.

d) Bajo contenido de nutriente

El suelo utilizado para la cobertura final de un relleno sanitario normalmente procede de la fuente más fácilmente disponible y más barata. Como consecuencia los suelos tienen una baja calidad de textura y de contenido nutricional.

e) Baja capacidad para retener agua

La capacidad de un suelo para retener agua depende de su propiedad física; la textura del suelo y la compactación son los factores más importantes. La compactación con maquinaria pesada reduce el tamaño de los poros y evita la entrada y la retención en el suelo de cantidades adecuadas de agua.

f) Baja humedad del suelo

Con la técnica de la compactación en los rellenos sanitarios disminuye el espacio poroso, provocando una disminución en la capacidad del suelo para retener el agua y se incrementa la escorrentía, provocando la erosión y suelos más secos. La discontinuidad del suelo proviene de la laminación de los residuos y del material de cobertura y puede impedir la subida del agua a través del suelo por capilaridad.

La erosión es otro factor que limita el establecimiento de especies vegetales en exrellenos sanitarios controlados y pueden mencionarse los siguientes factores que provocan este problema:

1) Erosión provocada por el agua de lluvia

El agua de lluvia escurre en capas poco profundas más o menos uniformes a lo largo de la superficie del talud del relleno. Mientras mayor es el desnivel y la longitud del talud mayor es la velocidad del agua que escurre y por lo tanto mayor es la posibilidad de que se produzcan problemas de erosión en el suelo.

2) Erosión provocada por el viento

La acción del viento puede levantar y romper la carpeta final de cubrimiento del relleno sanitario.

Cubierta de suelo en el programa de recuperación del área

El tipo de destino agrícola forestal que se pretenda dar a un antiguo relleno sanitario será en función del grado de estabilidad del terreno y del espesor de la capa final de cubrimiento. Si en el relleno sanitario terminado se van a sembrar algunas especies vegetales en particular, el espesor de la capa de cubrimiento final de tierra debe ser suficiente y debe presentar condiciones de soporte vegetal adecuadas para las especies que se van a sembrar. En la mayoría de los casos es suficiente un recubrimiento final de suelo de aproximadamente 60 cm bien compactado. Según el tipo de especie arbórea o arbustiva que se desee introducir puede ser necesario que el recubrimiento final requiera un espesor mayor.

Es importante considerar la disposición que debiera tener la cobertura final del relleno sanitario para mantener una cubierta vegetal sin la incidencia mayor de gases y metales pesados, asegurando así un mayor desarrollo de las especies implantadas para lo cual es de vital importancia la adecuada eliminación de gases del vertedero. En relación con lo anterior, es también importante considerar el espesor de la cubierta final donde se desarrollarán las especies vegetales. Se estima que un espesor de 50-60 cm sería suficiente para la vegetación pratense y 70-80 cm para la arbustiva. (Espinace *et al.*, 1990; Trellez, 1976).

El programa de recuperación del área en un exrelleno sanitario incluye la preparación del sustrato o cobertura de suelo como una mezcla de materiales que posea básicamente las siguientes características:

- Mejor equilibrio entre macroporos y microporos.
- Mejor intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera.
- Mejor retención y movimiento de agua en el suelo.
- Buena infiltración del agua en el suelo.
- Buen drenaje y permeabilidad.
- Buen desarrollo de la estructura y de los agregados.
- Buena respuesta a la erosión.
- Buen contenido de materia orgánica.
- Buena relación físico-química.
- Buena capacidad de intercambio catiónico.

Construir la cubierta de suelo donde se desarrollaran las especies herbáceas establecidas necesita su tiempo y para que esto ocurra es fundamental incorporar materia orgánica sobre la cubierta de suelo donde se depositarán las semillas y

crecerán las raíces de las plántulas. Esta materia orgánica conviene que esté previamente estabilizada y ello se consigue con un proceso de degradación controlado que se puede obtener a través del material de compostaje. La siembra de especies herbáceas exige el aporte de una capa vegetal y un abonado orgánico o químico. Se considera que la incorporación de materia orgánica estabilizada es la solución más económica, sencilla y de mejores resultados dado que mejora la actividad química, física y biológica del suelo. El compost es utilizado en la recuperación del terreno ya que tiene la propiedad de mejorar la estructura del suelo, buena capacidad de retener agua y la posibilidad de facilitar la movilidad de los nutrientes en el suelo. (Brutti, 2004).

Se utilizan terrazas como estructuras de relleno para nivelar el terreno en laderas y pendientes inclinadas que funcionan como mecanismos de control de drenaje al actuar como una superficie permeable que aumenta la filtración del agua y reduce el escurrimiento y la erosión en el suelo. Los terraplenes de la terraza deben tener un cruce gradual con la pendiente para permitir tanto la filtración como el escurrimiento gradual del agua superficial. Se debe tener cuidado con compactar todas las áreas del terraplén para hacerlas estables y usar una cubierta vegetal adicional para hacerla más estable. (Sharma y Lewis, 1994).

El suelo es un ser vivo, un recurso natural formado por miles de años que además de servir como sustento para las plantas, hospeda un sistema biológico activo – microorganismos– que participa en el ciclo de los nutrientes para los cultivos (Beider y Brutti, 2015). El hombre debe ofrecer sobre el cofre de basura un suelo para que las plantas y los organismos vivos que lo habitan tengan soporte, aireación, nutrientes y agua. Es conveniente imaginar al menos los tres horizontes principales del suelo y tratar de imitarlos.



Figura 9. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, riego por cintas en el terreno del relleno sanitario cerrado, impermeabilizado, Lo Errazuriz. Zona empastada (*Bromus unioloides*, *Cynodon dactylon*, *Eragrostis lugens*, *Stypa hialina*) con especies espontaneas del lugar. Cultivos de plantas aromáticas, medicinales y calabazas. Foto: Lucrecia Brutti.

Experiencias de recuperación del área

Experiencia 1

Los objetivos del plan de cierre del relleno sanitario de Los Vásquez-San Miguel de Tucumán, Argentina, que funcionó entre 1996 hasta 2004 se definieron así:

1. Aislamiento o confinamiento ambiental.
2. Reducción del pasivo ambiental.
 - 2 a. Generar metodologías ambientalmente viables y técnicamente efectivas mediante la investigación y desarrollo biotecnológico.
 - 2 b. Desarrollar proyectos alternativos que posibiliten el financiamiento externo.

La cobertura final se hizo con suelo proveniente de las excavaciones en el nuevo centro de San Miguel de Tucumán, la cual presenta en su composición arcilla de

fundamental importancia para la impermeabilización somital, luego de esta capa de aproximadamente de 50 cm se depositó tierra negra apta para la siembra y crecimiento de la alfombra vegetal (Venney *et al.*, 2005).

Experiencia 2

En el exrelleno sanitario de Lo Errázuriz la recuperación del área se trabajó como un parque más, ya que a los inicios del año 1987 se carecía de antecedentes para aplicar un criterio de selección de las especies para utilizar. Originalmente se estableció un parque que privilegió las especies nativas y actualmente cuenta con especies arbóreas tales como eucaliptus (*Eucaliptus globulus* y *E. camaldulensis*), acacias (*Acacia caven*, *A. melanoxylon*, *A. Dealbata*), fresno común (*Fraxinus excelsior*), miosporo (*Miosporum sp.*), melia (*Melia azedarach*), parquinsonia (*Parkinsonia aculeata*), quillay (*Quillaja saponaria*), pimienta (*Schinus molle*). En los taludes doca (*Mesembryanthemum chilensis*) y rayo de sol (*Mesembrianthemum gramineum*), en los sectores anegadizos diente de león (*Taraxacum officinalis*), en un sector pantanoso tifa (*Typha sp.*). Las especies herbáceas que tiene actualmente el parque son la festuca (*Festuca sp.*), ballica (*Lolium sp.*), trébol (*Trifolium sp.*), pasto bermuda (*Cynodon sp.*). Todas estas especies introducidas son las que han mostrado un mejor desarrollo durante el proceso de reinserción. El área recuperada funciona actualmente como un área verde y una zona de juegos infantiles que tiene a cargo la Empresa Metropolitana de Residuos Sólidos (Brutti, 2004). El mantenimiento de la carpeta herbácea se realizó con alfombras de césped cultivadas en el invernadero con un método sustentable de producción sobre polietileno en bandejones separados por listones de madera y con riego presurizado en abanico (Brutti y Alvarado, 2008).



Figura 10. De arriba hacia abajo. Jardín al ingreso de las oficinas, plantando doca (*Mesembryanthemum chilensis*), arborización de taludes, corte de césped. Relleno Sanitario cerrado Lo Errazuriz.

Experiencia 3

Balardini (1995) trabaja en Italia con más de 21 especies, determinó que las especies arce (*Acer negundo*), aliso italiano (*Alnus cordata*), carpe negro europea (*Ostrya carpinifolia*), encino del pantano (*Quercus rubra*) y acacio (*Robinia pseudoacacia*) presentaron una sobrevivencia del 100 % después de 4 años de evaluación en el relleno sanitario. Así mismo la especie aliso (*Alnus glutinosa*), fresno de flor (*Fraxinus ornus*) presentaron altos niveles de sobrevivencia de los árboles los que superaron el 70 %. (La Marca *et al.*, 1995).

Experiencia 4

El manual de operaciones para el plan de cierre del basurero actual de San Juan de Nicaragua 2004 se refiere al mantenimiento de un Plan de Cierre (Min. De Amb y Rc. Nat.). Por un lado, algunos tipos de cubierta vegetal (césped o grama) pueden requerir la limpieza por lo menos dos veces al año. La limpieza puede ayudar en la supresión

de la mala hierba y estimular el crecimiento, puede aumentar el vigor de cierta especie de hierba. Por otro lado, ciertos tipos de cubierta (hierba o césped nativos) requieren la limpieza con menos frecuencia (una vez cada tres años) y pueden ser convenientes para ciertos tipos de clima e instalaciones donde es preferible un requerimiento de bajo mantenimiento. Para ciertos tipos de cobertura vegetales la fertilización puede ser necesaria para sostener un crecimiento vegetal deseable. Los tiempos de fertilización se deben basar en el tipo presente de cubierta.

La fertilización puede ser necesaria para ciertas hierbas, mientras que la vegetación nativa puede requerir poco o nada de fertilizante una vez establecida. Los insecticidas se pueden utilizar para eliminar las poblaciones de insectos perjudiciales para la vegetación. Los insecticidas se deben seleccionar y aplicar cuidadosamente considerando los potenciales efectos sobre la calidad del agua superficial.

Después de la capa de arcilla se cubrirá con 30 centímetros de tierra negra de alto contenido de materia orgánica a fin de sembrar pastos, árboles, o arbustos mejorando así las condiciones paisajísticas

Las especies forestales que se utilizaran deberán tener como mínimo 50 cm de altura, poseer buenas características morfológicas y fisiológicas, además de adaptarse muy bien a la zona, ser capaces de soportar condiciones de suelo y contaminación poco favorables, con raíces superficiales.

Las especies que se pueden utilizar son las siguientes: *Acacia decumens*, *Allnus jurulensis*, *Fraxinus* sp., *Viburnum pichinchense*, *Joseanthus crassilanatus*, quillotocto (*Tecoma stans*), acacia japonesa, además de otras como zapallo, algodón y árboles forrajeros como el nacedero (*Trichanthera gigantea*) y el chachafruto (*Erythrina edulis*) o las que la autoridad ambiental recomiende según las condiciones ecológicas del sector. La siembra de los árboles debe realizarse en forma triangular (tresbolillo) con distancias de 3 metros entre planta y planta.

Es de competencia del municipio realizar el control y seguimiento en cuanto a este proceso mediante el mantenimiento mensual de las especies arbóreas aquí sembradas durante los tres próximos años.

Bibliografía

ALVARADO, P.; SANTIBAÑEZ, C.; VARNERO, M.; BRUTTI, L. 2002. Evaluación económica de una planta de compostaje de residuos vegetales, con diversos sistemas de manejo. 53 Congreso Agronómico de Chile, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

ALVARADO, P.; MARTIN, A.; BRUTTI, L.; PÉREZ, A. 2010. Humus de lombriz, reemplazando a la turba, en fórmulas de sustratos para la producción de plantines de hortalizas. Segundo Congreso Argentino de Sustratos Concordia, 02-05 de noviembre de 2010, Entre Ríos.

BALLARDINI, P. 1995. The Environmental Regeneration of Landfill Site: Inventory of The Arboreal Patrimony. Sardinia, 95 Fifth International Landfill Symposium, 02-06 de octubre de 1995, S Margherita di Pula, Cagliari, Italia.

BEIDER, A.; BRUTTI, L. 2015. Bioremediación: Una cruzada para recuperar las tierras deterioradas. INTA informa 2015, Año XIII N.º 151 / Marzo 2015 ISSN: 2362-5287

BORZZACONI, L.; LÓPEZ, I.; OHANIAN, M.; VIÑAS, M. 1996. Degradación anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y post-tratamiento aerobio, IV Seminario-Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas.

BRUTTI, L.; ALVARADO, P. 2008. Sistema de producción sustentable de alfombras de césped utilizando diversos sustratos orgánicos 5.º Congreso Argentino de Floricultura y Plantas Ornamentales, 04-07 de noviembre de 2008, Corrientes.

BRUTTI, L. 2004. Recuperación de suelo de un ex relleno sanitario. CD de la Conferencia Técnica "Relleno sanitario para América Latina". Buenos Aires, Argentina.

BRUTTI, L.; VALLEJOS, V. 2012. Uso de biosólidos en la rehabilitación de áreas en el relleno sanitario Santiago Poniente, Chile Revista electrónica chilena, Avances en Ciencias e Ingeniería vol. 3 N.º1 ISSN: 0718-8706.

BRUTTI, L. 2001. Sistemas de compostaje: factores críticos del proceso de compostaje, disco compacto correspondiente al Seminario Taller Internacional Manejo de Residuos Sólidos orgánicos para una agricultura limpia, Centro de Agricultura y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

BRUTTI, L. 2003. Aprovechamiento de biogas de los rellenos sanitarios. Mini foro empresario IBEROEKA, 30 y 31 de julio de 2003, Buenos Aires.

COSSU, R.; HAARSTAD, K.; LAVAGNOLO, M.; LITTARU, P. 2001. Removal of municipal solid waste COD and NH4-N by phyto-reduction: A laboratory-scale comparison of terrestrial and aquatic species at different organics.

CRUZ, R.; ORTA, M.; SÁNCHEZ, J.; ROJAS, M. 2001. Estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios mediante un balance de agua en serie, Memorias del AMCRESPAC, Querétaro, México.

DING, A.; ZHANG, Z.; FU, J.; CHENG, L. 2001. Biological control leachate from municipal landfill, Elsevier Science Ltd, (disponible: www.elsevier.com/locate/ecoleng. Visitado el 10 de octubre de 2016).

EMPRESA METROPOLITANA DE RESIDUOS SÓLIDOS (EMERES). 1995. Programa de cierre ex relleno sanitario Lo Errazuriz. Santiago, Chile.

ESPINACE, R.; PALMA, J. 1990. Problemas Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios, Revista Ingeniería Civil del CEDEX, N.º 77, Edición octubre, noviembre y diciembre, Madrid, España.

ESPINACE, A.R.; OLAETA, C.J.A.; PRADO, M.O.; SZANTO, N.M. 1988. Utilización de vertederos controlados. Informe final presentado al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico

(FONDECYT), Proyecto Fondecyt N.º 408. Santiago Chile.

GIRALDO, E. 2001. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. Revista de ingeniería, (14), 44-55.

HARTE, J.; HOLDREN, C.; SCHNEIDER, R.; SHIRLEY, C. 1995. Guía de las sustancias contaminantes. El libro de los tóxicos de la A a la Z. Editorial Grijalbo S.A., México D.F.

JENSEN, D.; CHRISTENSEN, T. 1999. Colloidal and dissolved metals in leachates from four danish Inasfills, Water Residual, Vol. 33, N.º.9, Reino Unido.

KENNEDY, L.; EVERETT, J. 2001. Microbial degradation of simulated landfill leachate: solid iron/sulfur interaction, Elsevier Science Ltd, (disponible: www.elsevier.com/locate/ecoleng/aer. Visitado el 26 de noviembre de 2016.

LA MARCA, O.; SANESI, G.; GAMBI, L. 1995. Study of the Vegetation in Landfill Restoration Project: First Result. Sardinia, 95 Simposio Internacional Landfill, de 02 al 06 de octubre de 1995, S Margherita di Pula, Cagliari, Italia.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y LOS RECURSOS NATURALES. Agencia Española de Cooperación Internacional. Proyecto Araucanía Río San Juan 2004, Manual de operaciones y Plan de Cierre del Basurero actual de la localidad de San Juan de Nicaragua. Río San Juan. Managua. Nicaragua, (disponible: www.bvsde.org.ni consultado 15 de junio de 2015)

PLAN DE CIERRE BOTADERO PLAZUELAS. 2009. Disponible: www.laflorida-narino.gov.co consultado 14 de julio de 2015.

SHARMA, H.D.; LEWIS, S.P. 1994. Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills-Design and Evaluation, Wiley, Nueva York.

SEOANEZ CALVO, M.; CHACON AUGE, A.; GUTIERREZ DE OJESTO, A.; ANGULO AGUADO, E. 1999. Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión. Ediciones Mundi-Prensa.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, VIGIL, S. 1994. Gestión integral de residuos sólidos. Vol. 2. M^c Graw – Hill. Madrid, España.

TREBOUET, D.; SCHLUMPF, J.; JAQUEN, P.; QUEMENEUR, F. 2001. Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical-nanofiltration processes, Elsevier Science Ltd, (disponible: www.elsevier.com/locate/waters. Consultado 14 de julio de 2015

TRELLEZ, R. 1976. Aspectos sobre la selección, implantación y mantenimiento del tapiz de cobertura de rellenos sanitarios. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. BS. AS., Argentina.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO, ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN. 1997. Diseño de un plan de cierre y rehabilitación de áreas utilizadas como vertederos o rellenos sanitarios. Informe Final. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).

VENNEY, M.; GIMENEZ, M.; LOPEZ, F. 2005. Plan de Cierre del Relleno Sanitario Los Vázquez, S.M. de Tucumán. Empresa Transportes 9 de Julio S.A. (Disponible: www.bvsde.patio.org/bvsacd/ISWA/plan.pdf consultado 23 de julio de 2015.