

CAPÍTULO 8

GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

AUGUST BONMATÍ

8.0 Introducción

Se pueden definir los **Residuos Sólidos Urbanos** como “los residuos producidos en los domicilios particulares, comercios, oficinas y edificios públicos”.

A su vez, estos se suelen clasificar en **residuos domiciliarios** y **residuos comerciales**. La gestión de los residuos comerciales, debido a la gran cantidad generada, se suele separar de los domiciliarios, para así evitar la saturación del sistema de gestión de los residuos domiciliarios.

8.1 Generación y gestión de residuos sólidos urbanos (RSU)

8.1.1 Generación y composición de los RSU

El volumen de residuos sólidos urbanos generado depende de factores tales como el nivel de vida de la población, de que se trate de una zona rural o urbana, del nivel de consumo, etc. De manera general, se puede afirmar que la generación de residuos es mayor en zonas urbanas, en zonas con un nivel de consumo elevado y en áreas de gran desarrollo industrial.

Así, encontramos valores de generación de RSU *per capita* que van desde 1,6 kg persona⁻¹ día⁻¹, en países altamente industrializados hasta apenas 0,37 kg persona⁻¹ día⁻¹ en países con un nivel de industrialización bajo y población mayoritariamente rural.

Los residuos sólidos urbanos incluyen residuos no peligrosos o inertes, como pueden ser materia orgánica, papel y cartón, vidrio, plástico, metales, madera, textiles, etc., y residuos peligrosos (normalmente en pequeñas cantidades) tales como medicamentos caducados, tubos fluorescentes, neumáticos, baterías, disolventes, pinturas, electrodomésticos, etc.

La composición de los RSU también varía por zonas. La diferencia más destacable es que, en zonas rurales y en países menos industrializados, la fracción orgánica (considerando únicamente los restos de comida) es mucho mayor. En la tabla 8.1

se puede observar la composición típica de los RSU de un municipio en Nicaragua y la de una región de la Unión Europea.

Componente	Nicaragua	Cataluña
Fracción orgánica (restos comida)	82,3 %	45,0 %
Papel y cartón	4,0 %	25,0 %
Plástico	8,5 %	7,0 %
Metales férricos y no férricos	1,0 %	4,0 %
Vidrio	1,2 %	8,0 %
Otros residuos	3,0 %	11,0 %

Tabla 8.1.- Composiciones típicas de los RSU en Nicaragua (Centroamérica) y Cataluña (Unión Europea). Fuente: Elaboración propia a partir de Flores et al. (2003) y *Agència de Residus de Catalunya* (2006).

8.1.2 Gestión de residuos sólidos urbanos

Un dato técnico muy importante para planificar la gestión de los residuos es conocer la cantidad y las características (densidad y composición) de los residuos sólidos que se generan en las viviendas, comercios, mercados, escuelas, etc. A continuación se describen brevemente las etapas que integran la gestión de los residuos sólidos urbanos.

8.1.2.1 Actividades en origen

Las actividades en origen comprenden la selección, la manipulación y el almacenamiento de los residuos. Los métodos de manipulación y almacenamiento variarán dependiendo de que se realice o no una recolección selectiva y de su frecuencia. Así, si no existe recogida selectiva, se precisará un único recipiente para el almacenamiento primario, con una capacidad acorde con el volumen de generación. Por el contrario, en caso de recogida selectiva, se necesitarán diversos recipientes según las fracciones separadas en origen.

8.1.2.2 Recolección

Hay dos aspectos que es importante definir en la recolección de los residuos: el modelo y el sistema de recolección.

- **Modelos de recolección.** Existen dos modelos principales de recolección:
 - **Recolección en masa.** Los residuos se recogen mezclados, sin que haya una selección en origen, y normalmente tampoco una selección posterior. Cuando la recolección de residuos no cubre a

toda la población, los residuos no recolectados suelen ser vertidos sin ningún tipo de control en lugares tan inapropiados como los cauces de los ríos o las zonas baldías, o bien son quemados al aire libre. Cabe indicar que, en estos casos, existe un reciclaje informal de gran parte de los residuos (latas, plásticos, etc.) en el lugar de origen o en el propio vertedero, de una manera no reglada y con los consiguientes riesgos sanitarios para las personas que lo realizan. Por otra parte, los restos de comida se suelen utilizar para alimentar al ganado o a los animales de compañía.

- **Recolección selectiva.** En este caso, la recolección de los residuos se realiza por fracciones. Habitualmente, se separan las siguientes fracciones: vidrio, papel y cartón, envases ligeros (latas y plásticos), fracción orgánica y rechazo.
- **Sistemas de recolección.** Existen básicamente dos sistemas de recolección: contenedores en la calle y recolección domiciliar o puerta a puerta.
- **Contenedores.** En este caso, se disponen contenedores en las calles, de tal manera que la población ha de llevar los residuos generados en su domicilio hasta los puntos donde están dispuestos los contenedores. El número de contenedores y la tipología de los residuos que se recolectan en ellos dependen del modelo de gestión. Se encuentran sistemas con un único contenedor (**recolección en masa**) hasta sistemas con cinco contenedores (vidrio / papel + cartón / envases ligeros (plástico + latas) / fracción orgánica / rechazo). El número de habitantes por contenedor es muy variable, desde los 100-150 habitantes/contenedor hasta los 250-350 habitantes/contenedor. El sistema de contenedores es el más extendido en las grandes ciudades, ya que ordena el sistema de recolección y mejora mucho las condiciones higiénicas de la población. Los inconvenientes más destacables son las quejas de los vecinos próximos a los puntos de recolección, debido a la presencia de vectores sanitarios (perros, gatos, ratas) o a los malos olores, entre otras, y la alta inversión inicial (en contenedores y equipos de recolección) y de mantenimiento (en equipos, en sustitución de contenedores por deterioro, vandalismo o robo, etc.). Así mismo, para que el índice de recuperación de materiales se mantenga en un nivel aceptable, es necesario realizar frecuentes campañas de sensibilización a la población.
 - **Recolección domiciliar o puerta a puerta.** En este caso, cada uno de los domicilios dispone de un contenedor identificado que se deposita en el exterior de la vivienda momentos antes de su recolección. En función de las fracciones que se recolecten en el municipio, cada día de la semana se recolecta una tipología de residuos determinada. Este modelo de recolección requiere una mayor implicación de

la población, pero los índices de recuperación de materiales son mucho más altos.

Existen otros sistemas de recolección no clasificables directamente dentro de estos dos grupos. En muchas ocasiones, en un mismo municipio, coexisten los dos modelos. El modelo se elige en función de factores tales como la tipología de las viviendas, el tipo de residuo recolectado, etc.

- **Unidades de recolección e itinerario.** Es tan importante elegir unas unidades de recolección adecuadas a las características del residuo recolectado y a las características de la población (capacidad del vehículo, medidas que permitan el paso por las calles, tipo de caja, personal necesario), como optimizar la relación distancia recorrida/número de camiones.

Otras consideraciones son la frecuencia, horarios, topografía urbana, tráfico (determina la velocidad del vehículo), recorridos que inicien y terminen en el centro de descarga, etc.

8.1.2.3 Transferencia

Cuando el volumen de residuos a transportar a las plantas de tratamiento y la distancia a recorrer hasta ellas son muy grandes, los residuos se suelen transferir de los pequeños camiones de recogida a camiones mayores con objeto de optimizar el transporte. Esta operación se realiza en los centros de transferencia y consta básicamente de tres etapas: descarga, compactación y carga en el camión de mayor tamaño.

8.1.2.4 Plantas de separación y reciclaje

Este tipo de plantas se instalan en aquellos lugares donde se quiere recuperar materiales a pesar de que no se realice una recolección selectiva, o también como complemento a los sistemas donde está implantada la recolección selectiva. En ellas se pretende recuperar la mayor cantidad de material con el objetivo de reciclarlo. No obstante, es necesario evaluar la conveniencia de su instalación ya que los índices de recuperación no son muy elevados, y las condiciones laborales acostumbran a ser duras (altos riesgos sanitarios, confort deficiente, etc.).

Los materiales que se suelen separar en estas plantas son los siguientes: plásticos (PEAD, PET, PVC, film), férricos, no férricos (aluminio), papel y cartón.

Hay una serie de equipos que se encuentran frecuentemente en las plantas de separación/selección (electroimán, ciclón, trómel, etc.). No obstante, una gran parte de la selección se realiza manualmente.

8.1.2.5 Tratamiento y disposición final

Los sistemas de tratamiento y disposición final se describirán con detalle en los apartados siguientes.

8.2 Elaboración de planes de gestión de RSU

Las etapas que comprenden la elaboración de un Plan de Gestión de Residuos se enumeran a continuación.

8.2.1 Organización local para el desarrollo del Plan de Gestión de Residuos

Es necesario identificar los actores sociales que van a participar en la elaboración del plan y articular su participación. Los actores principales en el proceso son, entre otros:

- **Población.** Normalmente se articula a través de asociaciones no gubernamentales, comités cívicos y vecinales.
- **Administración local** (municipalidad). Normalmente es la responsable de la gestión de los residuos.
- **Administración provincial o nacional.** En función de las competencias establecidas en las leyes de residuos, su participación e implicación será mayor o menor.
- **Centros de formación** (universidades, centros de capacitación, etc.). Disponen de personal formado para colaborar en la redacción del Plan.
- **Empresa y sector privado.** La gestión de los residuos la puede realizar directamente la administración local, pero en muchos casos se contrata a empresas mixtas o privadas.
- **Medios de comunicación.** Inciden fuertemente en la opinión pública y constituyen aliados indispensables para abordar temas de educación, debate y difusión.

Asimismo, es necesario crear la organización necesaria para elaborar el Plan de Gestión. Normalmente se establecen dos grupos de trabajo:

- **Comité asesor.** Es el que establece las directrices políticas del Plan y establece los consensos entre los distintos actores involucrados.
- **Comité técnico.** Es el encargado de elaborar el Plan de Gestión en base a las pautas marcadas por el comité asesor.

8.2.2 *Diagnóstico de la gestión actual de los residuos*

Con la finalidad de establecer el punto de partida del Plan de Gestión, es necesario evaluar de una manera integral el estado del sistema de gestión de residuos sólidos actual. Este diagnóstico integral ha de comprender los siguientes puntos:

- **Caracterización del área de estudio:** contexto legal, marco socio-económico, contexto eco-geográfico, actividad económica (industrial, comercial, etc.), educación, salud pública, servicios básicos, organización social.
- **Aspectos administrativos y financieros:** organismos involucrados en la gestión de los residuos y sus interrelaciones, el personal empleado directamente, edictos municipales u otras normas legales, presupuesto y ejecución del mismo y el sistema económico (impuestos municipales, inversiones estatales, etc.) para financiar la gestión de los residuos.
- **Aspectos técnico-operativos:** comprenden la revisión de los métodos y eficiencia de cada una de las etapas del sistema de gestión de residuos (caracterización de los residuos, almacenamiento, recolección, transporte, estaciones de transferencia, centros de tratamiento y disposición final).

8.2.3 *Establecimiento del alcance y objetivos del Plan de Gestión*

Las conclusiones del diagnóstico que se ha realizado previamente servirán de base para establecer el alcance y objetivos del “Plan de Gestión”. Los aspectos claves a definir son:

- **Identificación del área geográfica y periodo de planificación.** En función del tamaño de los núcleos urbanos, el Plan se establece a nivel municipal, comarcal o intercomarcal (sin olvidar que normalmente se desarrollará en el marco de un Plan Nacional de Residuos, que marcará las directrices generales).
- **Selección de la tipología de residuos que se consideran.** Además de los residuos domiciliarios, se ha de considerar la conveniencia de incluir o elaborar planes particulares para el resto de residuos que se generan en la municipalidad (residuos de construcción, residuos comerciales, residuos vegetales de parques y jardines, residuos sanitarios, etc.),
- **Establecimiento del nivel de servicio que se desea alcanzar, objetivos y metas del Plan.** Indirectamente, al establecer el nivel de servicio y, en consecuencia, los objetivos y metas, se establecen las necesidades de inversión y recursos necesarios para asegurar la calidad y cobertura deseadas.

8.2.4 Identificación y evaluación de alternativas

Con ellas se busca dar respuesta al “qué hacer” para lograr los objetivos planteados. De esta manera, es necesario identificar y evaluar alternativas para cada uno de los puntos estudiados en el diagnóstico de la situación de la gestión de residuos. A modo de ejemplo, y sin ser exhaustivos, algunas consideraciones al respecto son:

- **Aspectos administrativos y financieros.** Incluyen: (i) evaluar la participación del sector privado, (ii) fomentar la creación de microempresas de gestión de residuos y (iii) diseñar campañas de educación ambiental y participación de la población.
- **Aspectos técnico-operativos.** Se evaluarán alternativas para cada una de las etapas de gestión de los residuos. Algunos aspectos importantes son: (i) el modelo de recolección y fracciones seleccionadas en origen, (ii) las unidades de recolección (tipo y cantidad de vehículos, etc.) y (iii) la necesidad de estaciones de transferencia, centros de tratamiento y rellenos sanitarios.
- **Erradicación de los sistemas informales de recuperación de residuos existentes.** La mejor alternativa para eliminar la recuperación informal de residuos en vertederos y calles es diagnosticar el sistema establecido (personas involucradas, tipología de residuos recuperados, precios y vías de comercialización, etc.), lo que permitirá diseñar estrategias para incorporar a los recuperadores en el nuevo sistema de gestión, fomentando la formación de microempresas, cooperativas u otras, brindando asesoría técnica, estableciendo condiciones mínimas de seguridad e higiene, etc.
- **Evaluación de la sostenibilidad financiera.** Probablemente, este sea el reto más importante al que se han de enfrentar las municipalidades. Con este fin, se evaluarán económicamente las alternativas que sean factibles social y políticamente y que cumplan con los objetivos planteados.

8.2.5 Elaboración del Plan de Acción

El Plan de Acción es el documento final que recoge todas las actividades necesarias a corto, medio y largo plazo para cumplir los objetivos y alcances definidos. Entre otras cosas, el Plan de Acción debe identificar las actividades prioritarias, sus correspondientes requerimientos de inversión, los responsables de cada actividad y los indicadores de avance de los productos parciales y finales.

8.2.6 Ejecución y monitoreo del Plan de Acción

Finalmente, para la ejecución del Plan de Acción es necesario disponer del presupuesto necesario y tratar de asegurarlo, como mínimo, durante el período de planificación.

Por otro lado, el monitoreo de la implantación y alcance de los objetivos planteados es una tarea imprescindible y que se debe realizar de manera abierta y participativa (como mínimo han de participar todos los agentes identificados en las etapas de elaboración del Plan de Gestión).

8.3 Tratamientos biológicos

Este apartado describe los tratamientos biológicos aplicables a la fracción orgánica de los residuos municipales. Se describen ampliamente el compostaje y la digestión anaerobia, para terminar con unos breves apuntes sobre lombrihumus y bocashi.

Las sustancias orgánicas que forman parte de los residuos municipales, domésticos o comerciales, se pueden descomponer biológicamente bajo condiciones controladas, hasta llegar a un estado suficientemente estable que permita su almacenamiento y utilización sin efectos secundarios indeseables. Las condiciones controladas confieren una mayor velocidad al proceso, reducen sus incertidumbres y consiguen un producto final homogéneo. El proceso de descomposición se puede conducir básicamente de dos formas:

- **en condiciones aerobias** (en presencia de O_2), degradando la materia orgánica directamente a CO_2 , estabilizando la materia orgánica más recalcitrante y obteniendo un producto estable con alta calidad como abono orgánico (**compost**),
- **en condiciones anaerobias** (en ausencia de O_2), degradando parcialmente la materia orgánica a CH_4 y CO_2 (biogás) y estabilizando parcialmente la materia orgánica.

Las dos tecnologías se pueden implantar de manera independiente o combinada. Hay experiencias en las que, en una primera etapa, se aplica la digestión anaerobia para obtener biogás y se sigue con un proceso de compostaje (maduración) para estabilizar completamente la materia orgánica y obtener un compost de alta calidad.

Independientemente de que el proceso sea aerobio o anaerobio, un sistema de tratamiento biológico consta de las siguientes etapas:

- **Pre-tratamiento.** Operaciones previas al proceso biológico, para adecuar el residuo y permitir un desarrollo adecuado del proceso. En función

del tipo de residuo y de la tecnología aplicada, el pre-tratamiento puede ser más o menos intenso. El pre-tratamiento incluye normalmente la eliminación de impropios, la trituración, la mezcla con aditivos (material estructurante, co-substratos, etc.), la homogenización, el ajuste de humedad, etc.

- **Tratamiento/s biológico/s** (se describirán en los siguientes apartados).
- **Post-tratamiento.** Su objetivo es refinar las características del producto obtenido. Algunas de las posibles operaciones son la clasificación según tamaño, la eliminación de impurezas, el ajuste de humedad, las mezclas con fertilizantes inorgánicos, etc.

8.3.1 Compostaje

Una de las definiciones más completas de compostaje es la siguiente: *“Descomposición biológica aeróbica bajo condiciones controladas para obtener un producto con una alta calidad y suficientemente estable para su almacenaje y su utilización sin efectos secundarios (compost)”*

Tal como indica la definición, se trata de un proceso biológico aerobio. Por lo tanto, es necesario mantener las condiciones óptimas para que los microorganismos responsables del proceso de descomposición, se puedan desarrollar. La presencia de oxígeno es, en este caso, la condición imprescindible para que se dé el proceso.

Otro punto importante a destacar de la definición, es que el objetivo del proceso es la obtención de un producto estable de calidad, el compost. Esto nos indica que todos los esfuerzos tienen que centrarse en la obtención de un compost de calidad, que pueda ser útil en la agricultura como enmienda de suelos y fuente de nutrientes. En la figura 8.1 se muestra de manera esquemática el proceso de compostaje.

8.3.1.1 Campo de aplicación del compostaje y características del compost

El proceso de compostaje se puede aplicar a una gran variedad de residuos: biosólidos (lodos) de depuradoras de aguas residuales municipales e industriales, residuos ganaderos (estiércol), residuos vegetales de parques y jardines, residuos de industrias agroalimentarias y fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

Tal como se puede ver, el compostaje se puede aplicar a residuos con características muy diversas (diferentes relaciones C/N, contenidos en humedad, nutrientes, etc.). En muchos casos, no obstante, es necesario mezclar residuos con propiedades complementarias para que el proceso se desarrolle adecuadamente.

Para que un compost se considere de calidad, debe tener las siguientes características: (i) aspecto y color aceptables, (ii) higienización correcta, (iii), nivel bajo de impurezas y contaminantes, (iv) nivel alto de componentes agrónomicamente útiles (N, P, K, etc.) y (v) composición constante.

De esta manera, el uso de un compost de calidad reporta una serie de beneficios: (a) mejora las propiedades físicas del suelo (porosidad, estructura.), (b) aumenta la capacidad tampón del suelo, (c) añade nutrientes al suelo (N, P, K, etc.), aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la capacidad de retención de agua, (d) reduce la toxicidad de algunos compuestos, se forman quelatos y complejos organometálicos que secuestran estas sustancias tóxicas y (e) soporta y favorece el crecimiento de la flora microbiana del suelo.

De igual manera, si la calidad no es adecuada, entraña una serie de riesgos: (1) presencia de contaminantes (metales pesados), (2) materia orgánica no estabilizada y (3) presencia de sustancias fitotóxicas.

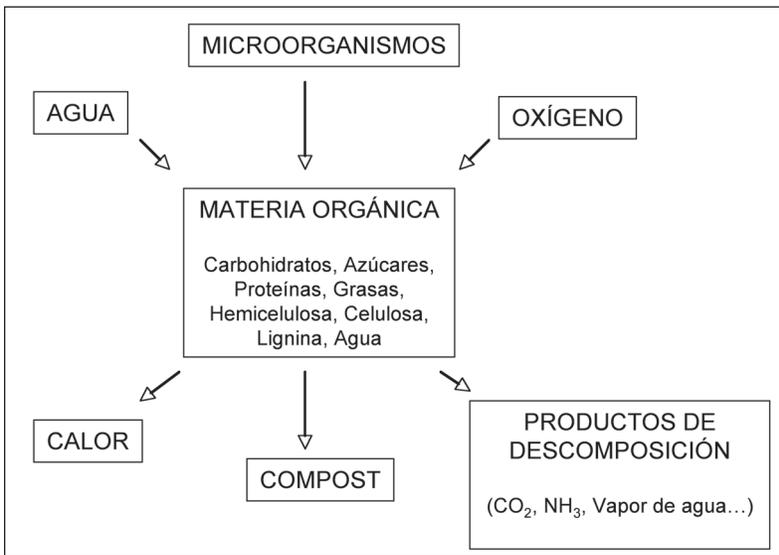
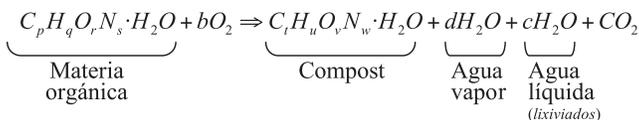


Figura 8.1.- Proceso de compostaje. Fuente: Adaptado de Haug, 1993

8.3.1.2 El proceso de compostaje

La ecuación general del proceso de compostaje es la siguiente:



La composición de la materia orgánica y, por tanto, los valores de los coeficientes dependen de cada tipo de residuo y de las condiciones del proceso.

El proceso de compostaje se divide en dos ETAPAS independientes, pero con un cierto grado de simultaneidad y velocidades diferentes: descomposición y maduración.

- Descomposición. Las moléculas orgánicas e inorgánicas más sencillas se descomponen rápidamente, provocando un aumento rápido de la temperatura, que pasa de un rango mesofílico (<50°C) a un rango termofílico (>50°C). Es interesante que se mantenga el rango termofílico durante un tiempo suficiente para asegurar la inactivación de los patógenos y la destrucción de semillas de malas hierbas y de huevos y larvas de insectos.
- Maduración. En esta etapa, se forman macromoléculas nuevas (ácido húmico, ácido fúlvico, etc.) y los compuestos más lentamente degradables continúan su descomposición, formando ácidos grasos. Es necesario dejar tiempo suficiente para que se degraden estos ácidos, pues son fitotóxicos.

Todos los factores que afectan a los microorganismos afectan al proceso. Estos factores se verán influenciados por las CONDICIONES AMBIENTALES (en función de la tecnología y del control del proceso, se tendrá un mayor o menor control sobre ellos) y por las características del residuo. Las condiciones ambientales a tener en cuenta durante el proceso son las siguientes:

- Oxígeno y aireación. El oxígeno es esencial para la actividad biológica, ya que se trata de un proceso aerobio. Su consumo varía a lo largo del proceso, dependiendo de la temperatura, la humedad, el tiempo de degradación y la porosidad de la masa.

Hay diferentes métodos para incorporar oxígeno a la masa en descomposición. Al ser la característica más relevante, acostumbra a utilizarse para clasificar los sistemas de compostaje.

- Humedad. El rango óptimo de humedad para que se desarrolle adecuadamente el proceso es de entre un 40 y un 60%. Humedades superiores desplazan el aire de los poros y limita su circulación, generando problemas de anaerobiosis. Humedades inferiores disminuyen la actividad microbiana, incrementando el tiempo de proceso o incluso parándolo cuando la humedad es muy baja. En el proceso de compostaje, hay generación de humedad como resultado de la descomposición de la materia orgánica y evaporación, por el aumento de la temperatura, resultando un balance hídrico negativo. Esto implica la necesidad de añadir agua a lo largo del proceso.

La adición de material estructurante permite regular la humedad, ya que absorbe parte de la humedad o la libera según lo necesite el proceso y, a su vez, aumenta la porosidad permitiendo la circulación del aire.

- Temperatura. Tal como se ha indicado anteriormente, la descomposición inicial es un proceso exotérmico, lo que produce un incremento rápido de la temperatura hasta valores superiores a los 50°C. Se recomienda un período mínimo de entre una y dos semanas en régimen termofílico para asegurar una buena higienización. Durante la etapa de maduración, la temperatura decrece paulatinamente hasta alcanzar la temperatura ambiente. La evolución típica de la temperatura en un proceso de compostaje se puede ver en la figura 8.2.

El seguimiento de la temperatura permite controlar el proceso y determina, junto con otros parámetros, los volteos, los riegos o la programación del sistema de aireación forzada.

- Nutrientes. Los más importantes son el carbono (fuente de energía para los microorganismos), el nitrógeno (necesario para la estructura celular) y los macro y micronutrientes (necesarios para el crecimiento de los microorganismos).

La relación C/N es el parámetro más importante para que se desarrolle adecuadamente el proceso. Se consideran óptimos los valores de C/N comprendidos entre 25 y 35:

- Si $C/N > 35$, el proceso reduce su velocidad hasta que se consume el C excedente,
- Si $C/N < 25$, la velocidad del proceso no se ve afectada, pero hay pérdidas elevadas de nitrógeno (en forma amoniacal) hasta que se alcanzan relaciones C/N adecuadas.

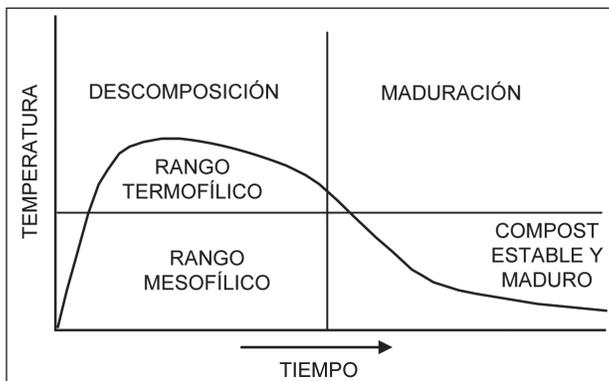


Figura 8.2.- Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de equilibrar la relación C/N, se mezclan residuos de diferentes orígenes (**co-substrato**). Así mismo, interesa que la masa en descomposición tenga una porosidad suficiente para permitir el paso del oxígeno (**material estructurante**). En el caso de la fracción orgánica de los residuos municipales, se suelen utilizar restos de poda. Hay dos aspectos a considerar: el tamaño al que se trituran los restos vegetales (han de aportar C y dar estructura a la masa) y las proporciones en que se mezclan. Las relaciones habituales residuo/estructurante en volumen son 2/1, 1/1 y 1/3 dependiendo del residuo a tratar.

- pH y conductividad. El pH y la conductividad son otros dos factores a tener en cuenta. Conductividades elevadas y un pH alejado de la neutralidad pueden limitar el crecimiento de los microorganismos.
- Flora microbiana. La flora microbiana responsable del proceso de compostaje es muy variada. Incluye bacterias, actinomicetes, hongos, protozoos y algas. Raramente es un factor limitante, por lo que no se suele inocular durante el proceso. Los microorganismos proceden, de manera natural, de la atmósfera, del agua, del suelo y del propio residuo. La flora bacteriana es la más variada y se encuentra localizada en toda la masa del residuo. Los hongos y los actinomicetes se encuentran en las partes superficiales de la masa de residuos (a 5-15 cm de la superficie) y son los responsables de la descomposición de sustancias complejas como la celulosa y la lignina.

8.3.1.3 Tecnologías de compostaje

El compostaje se puede llevar a cabo por medio de sistemas que van desde los muy simples tecnológicamente, con un control mínimo sobre el proceso, hasta los altamente tecnificados, con un control *on-line* de los parámetros de proceso. Los sistemas se suelen agrupar en:

- **Sistemas Abiertos.** Estos sistemas se basan en la formación de un montón de residuo de forma trapezoidal (con el material estructurante correspondiente) de una altura de entre 1,2 y 1,8 m. La altura de la masa en descomposición es el parámetro clave del sistema. Se necesita suficiente altura para conservar el calor generado y acelerar el proceso, pero un exceso de altura reduce la porosidad de la masa y, consecuentemente, provoca problemas de anaerobiosis. Cuando el aporte de aire se realiza por volteo de la masa de residuos, con la maquinaria especialmente diseñada para este fin (volteadora) o con el sistema del que se disponga, se habla de pilas dinámicas. Si la incorporación de aire se realiza mediante impulsión o aspiración, se habla de pilas estáticas (Figura 8.3).

- **Sistemas Cerrados.** Estos sistemas confinan el material en reactores cerrados. De esta manera, se ocupa menos espacio y hay un mayor control sobre el proceso (temperatura, humedad, oxígeno). Asimismo, permiten un mayor control de las emisiones de sustancias indeseables (NH_3 , malos olores, etc.). Habitualmente, solo se confina el proceso en la etapa inicial de descomposición y la maduración posterior se realiza en un sistema abierto.

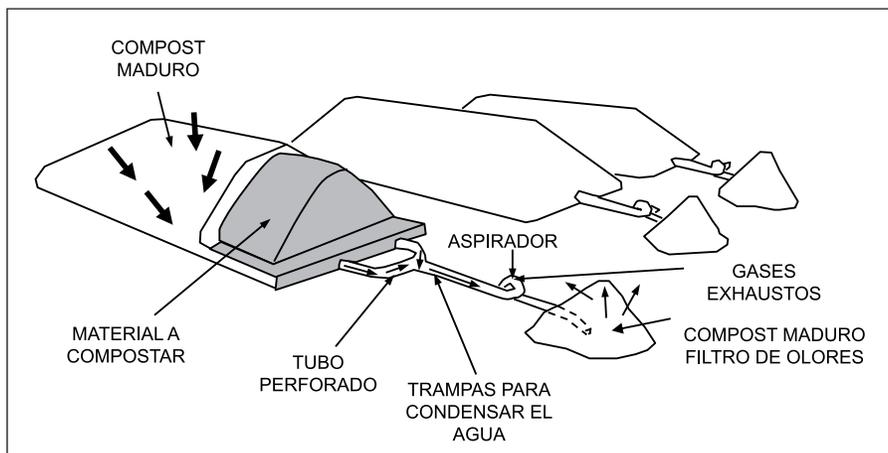


Figura 8.3.- Pilas de compostaje estáticas con aspiración de aire. Fuente: Adaptado de Tchobanoglous, 1994.

8.3.1.4 Emisiones secundarias

Otro aspecto importante a considerar en el compostaje son las emisiones que se producen a lo largo del proceso.

- **Emisiones líquidas (lixiviados).** El origen de los lixiviados es el exceso puntual de humedad de la masa en descomposición. Este exceso de agua puede proceder del propio residuo o de la lluvia. Su control, tal como se ha indicado anteriormente, se realiza mezclando otros residuos que absorban agua. Asimismo, es recomendable realizar el proceso de compostaje sobre una superficie que impida la infiltración de los lixiviados en el subsuelo y disponer de una balsa impermeable donde se puedan almacenar. Normalmente, los lixiviados se reciclan para humedecer la masa de residuos en el momento en que su humedad disminuye. En el caso que se generen en exceso, es necesario depurarlos, ya que tienen una elevada carga orgánica y conductividad.
- **Emisiones gaseosas.** Los principales gases que se emiten en el proceso

de compostaje y que, normalmente, son los responsables de olores desagradables son:

- Amoníaco: implica una pérdida de calidad del compost ya que se pierde nitrógeno y provoca impactos ambientales como la lluvia ácida.
- SH_2 , CH_4 y Ácidos Grasos Volátiles (AGV), indicadores de condiciones anaeróbicas que, por lo tanto, aparecen cuando el proceso no se desarrolla adecuadamente.
- Compuestos orgánicos volátiles.

Cuando el proceso de compostaje se realiza en condiciones óptimas (mezcla correcta de residuo y material estructurante, aireación y humedad adecuadas, etc.), las emisiones gaseosas son mínimas. No obstante, en muchos casos, es necesario disponer de algún sistema para controlarlas (biofiltros o lavadores ácidos).

8.3.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia puede definirse como: “Proceso microbiológico anaerobio (ausencia total de oxígeno) donde la materia orgánica se degrada progresivamente, por una población bacteriana heterogénea, hasta metano y dióxido de carbono”.

Este tipo de descomposición no es más que una fermentación catalizada por bacterias específicas, que sucede espontáneamente en la naturaleza y de la cual se tienen las primeras noticias gracias a Volta (1776). Es el origen del gas de los pantanos, del gas natural de los yacimientos subterráneos e incluso del gas producido en los estómagos de los rumiantes. La figura 8.4 muestra un esquema del proceso anaerobio.

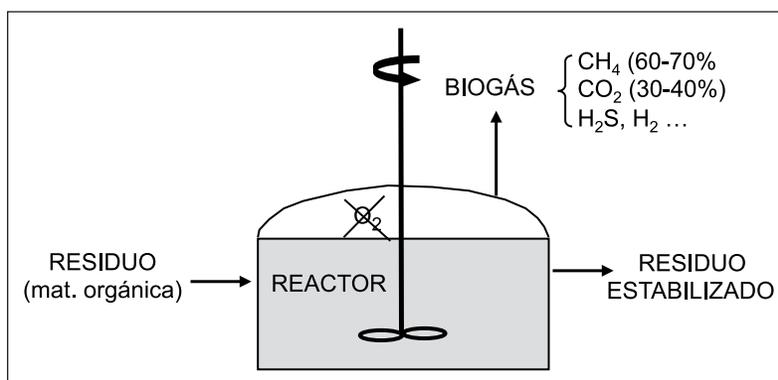


Figura 8.4.- Proceso de digestión anaerobia. Fuente: elaboración propia.

8.3.2.1 Campo de aplicación de la digestión anaerobia

En general, la digestión anaerobia se puede aplicar a cualquier residuo. No obstante, cuanto mayor sea su contenido en materia orgánica, mayor será la producción de biogás y más apropiado (rentable económicamente) será este tratamiento (Tabla 8.2).

Los residuos a los que habitualmente se aplica la digestión anaerobia son:

- **Residuos sólidos:** fracción orgánica de los residuos municipales, estiércol, lodos estaciones depuradoras de aguas residuales, etc.
- **Aguas residuales con alta carga orgánica:** aguas de industrias agroalimentarias (procesamiento de aceite, pescado, ingenios de azúcar, etc.).
- **Aguas residuales urbanas** (baja carga orgánica): su aplicación se limita a los ámbitos geográficos donde la temperatura se mantiene elevada a lo largo de todo el año.

Como principales ventajas de la digestión anaerobia podemos citar: (i) elimina los malos olores, (ii) estabiliza y mineraliza parcialmente la materia orgánica, (iii) tiene un balance energético positivo (generación de biogás), (iv) homogeniza la composición del residuo y (v) logra una higienización parcial.

Asimismo, cabe indicar que este proceso es más sensible que el compostaje (es necesario conocer mejor el proceso y controlar más parámetros) y que tiene un mayor coste de implantación (necesidad de un reactor estanco, equipos para aprovechar el biogás, etc.).

Residuo	Sólidos volátiles (%)	Producción biogás (Nm ³ Mg ⁻¹)
Estiércol	10-20	25-45
Fracción orgánica residuos municipales	20-30	150-240
Lodos EDAR	2-4	17-22
Residuos proceso aceite soja	90	800-1000
Aceite residual de pescado	80-85	350-600
Residuos matadero	15-20	50-70
Suero de leche	7-10	40-55

Tabla 8.2.- Potencial de producción de biogás de determinados residuos. Fuente: elaboración propia.

8.3.2.2 El proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia se desarrolla en tres ETAPAS diferentes, pero con un cierto grado de simultaneidad, donde intervienen diferentes grupos de microorganismos (Figura 8.5):

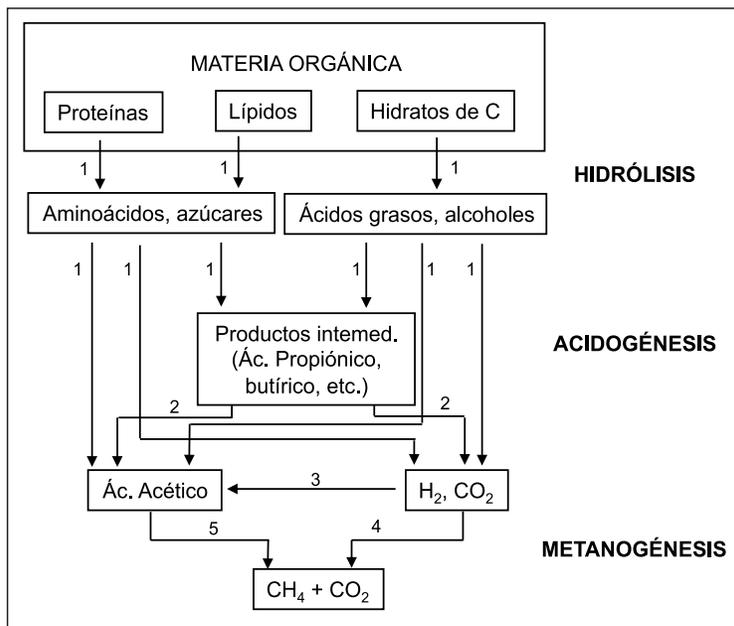


Figura 8.5.- Etapas de la digestión anaerobia. Bacterias responsables de la digestión: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas, 2) Bacterias acetogénicas (productoras de hidrógeno), 3) Bacterias homoacetogénicas (consumidoras de hidrógeno), 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas, 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Fuente: elaboración propia.

- **Hidrólisis.** En esta etapa, los polímeros orgánicos complejos son degradados por un grupo de bacterias facultativas (sobreviven en condiciones de aerobiosis) mediante enzimas exocelulares: celulasas, lipasas, amilasas, proteasas, etc.
- **Acidogénesis.** La degradación de las sustancias intermedias hasta ácidos grasos de cadena corta o volátiles u otros compuestos sencillos como los alcoholes, corre también a cargo de un grupo de bacterias facultativas. Esta etapa comprende también la degradación de las sustancias intermedias hasta ácido acético (acetogénesis).
- **Metanogénesis.** En esta última etapa, se forma el metano gracias a un grupo de bacterias llamadas metanogénicas. Estas son anaerobias estrictas (la presencia de oxígeno inhibe su crecimiento) y muy sensibles

a tóxicos e inhibidores. La formación del metano se realiza a través de dos rutas metabólicas:

- metanogénesis acetoclástica, a partir de la degradación del ácido acético
- metanogénesis hidrogenófila, a partir del H_2 y del CO_2

De la misma manera que en el compostaje, todos los FACTORES AMBIENTALES que afectan a los microorganismos, en este caso anaeróbicos, afectan al proceso:

- Humedad. Para un correcto desarrollo de la digestión anaerobia, se necesita una humedad superior al 75%, ya que las reacciones metabólicas se desarrollan en medio líquido. Este grado de humedad permite también una distribución homogénea de nutrientes y microorganismos.
- pH. A pesar de que cada uno de los grupos de microorganismos que toman parte en el proceso anaerobio tiene un rango propio de pH óptimo, el proceso se desarrolla correctamente si el pH está próximo a la neutralidad.
- Poder tampón (buffer). El poder tampón se define como la capacidad de un sistema de amortiguar la modificación del pH. La principal sustancia que amortigua las modificaciones de pH es el bicarbonato. Se considera que es suficiente un poder tampón superior a $1,5 \text{ gl}^{-1} \text{ CaCO}_3$.
- Potencial redox. El potencial redox es un indicador de la presencia/ausencia de oxígeno. La digestión anaerobia se desarrolla en un ambiente fuertemente reductor (ausencia de oxígeno). Los potenciales redox óptimos son inferiores a los -350 mV . No obstante, el proceso se puede desarrollar hasta valores próximos a los -200 mV .
- Nutrientes. Como para todo proceso biológico, es imprescindible la presencia de macronutrientes (N, P, K) y micronutrientes en concentraciones adecuadas. Hay que destacar que el exceso de nitrógeno (en forma amoniacal) provoca problemas por inhibición de las bacterias metanogénicas.
- Estabilidad, inhibición y toxicidad. Para que la digestión anaerobia se realice de manera adecuada, es necesario que las etapas que conforman el proceso se desarrollen encadenadamente y a velocidades similares. Por ejemplo, la generación de ácidos en la etapa acidogénica tiene que ser similar al consumo de estos por parte de las bacterias metanogénicas; una acumulación de ácidos provocaría la inhibición del proceso. Así mismo, concentraciones elevadas de determinadas sustancias (AGV, NH_3 , H_2S , determinados iones, metales pesados, antibióticos, desinfectantes) pueden provocar fenómenos de inhibición y/o toxicidad.

- Temperatura. El proceso anaerobio se puede desarrollar a tres rangos de temperatura: psicrófilo, mesófilo y termófilo. En general se puede afirmar que a mayor temperatura mayor velocidad de proceso, no obstante, es aconsejable que la temperatura sea próxima a la óptima en cada uno de los rangos:
 - Psicrófilo: T^a óptima = 20°C
 - Mesófilo: T^a óptima = 37°C
 - Termófilo: T^a óptima = 55°C
- Tiempo de retención. Se define como el tiempo que el sustrato (residuo) pasa dentro del reactor, sometido a la actividad de los microorganismos. Por lo tanto, a mayor tiempo de retención más degradación de la materia orgánica y mayor generación de biogás. No obstante, se debe llegar a un compromiso entre el tiempo de retención y la inversión necesaria para la construcción del reactor.
- Agitación. La agitación del residuo dentro del reactor para posibilitar el contacto entre los microorganismos y el residuo es clave para el proceso. La agitación ha de ser suficientemente enérgica para producir una mezcla homogénea, pero no ha de ser tan intensa que rompa los agregados bacterianos. La agitación puede ser mecánica o neumática, mediante la compresión e inyección del biogás generado.

8.3.2.3 Tipologías de reactores

En la figura 8.6 se pueden observar diferentes reactores anaerobios. En función de las características de los residuos se utilizará uno u otro. En general, para residuos con un alto contenido en sólidos, se operará de manera discontinua o con **reactores de mezcla completa** o **flujo pistón** sin retención de biomasa. Cuando el residuo a tratar sea más líquido y con menor contenido en materia orgánica, se operará en continuo y con reactores que retengan biomasa (filtros, UASB, lecho fluidizado, etc.).

8.3.2.4 Valorización del biogás

Una de las ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás y su aprovechamiento como fuente de energía. El **Poder Calorífico Inferior (PCI)** del biogás es de aproximadamente 5600 Kcal m⁻³. En la figura 8.7 se esquematizan los usos más frecuentes del biogás y el tratamiento previo que requieren. Cuando el biogás se quema directamente en cocinas o similares, se debe tener la precaución de que el lugar esté suficientemente ventilado, para evitar acumulaciones de H₂S ya que, en función de su concentración, puede ser tóxico.

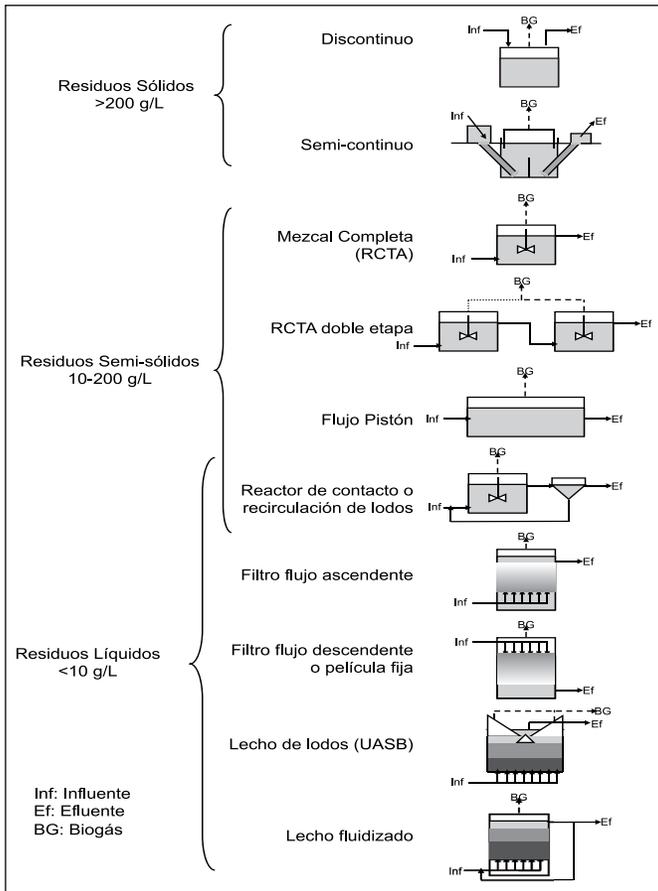


Figura 8.6.- Tipos de reactores y sistemas de digestión. Fuente: elaboración propia.

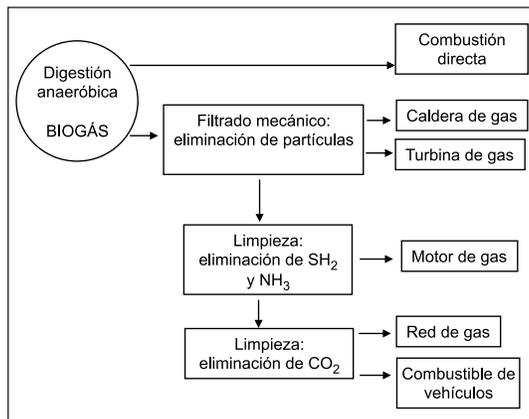


Figura 8.7.- Aprovechamiento energético del biogás. Fuente: elaboración propia.

8.3.3 Otros procesos biológicos

8.3.3.1 *Lombrihumus*

El lombrihumus es un abono orgánico elaborado con lombrices capaces de reciclar todo tipo de materia orgánica. En el proceso se obtiene humus, carne y harina de lombriz. En lombricultura, las principales especies de lombrices utilizadas son *Lumbricus rubellus*, *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) y *Eisenia andrei*. La lombriz roja californiana es la más común en América Latina, utilizándose a gran escala en Cuba, Argentina, Chile, Perú y en el sur del Ecuador.

Estas lombrices transforman los minerales no asimilables presentes en los residuos orgánicos en nitratos y fosfatos directamente asimilables por las plantas. Las lombrices excretan aproximadamente un 60% de la materia orgánica descompuesta que ingieren en forma de humus de lombriz, **lombrihumus** o **vermicopost**.

El lombrihumus originado es un fertilizante orgánico, biorregulador y corrector del suelo, cuya característica fundamental es la bioestabilidad. Es de un color negruzco, granulado, homogéneo y con un olor agradable a humus. El elevado porcentaje de ácidos fúlvicos y húmicos que contiene no son producidos por el proceso digestivo de la lombriz, sino por toda la actividad microbiana que tiene lugar durante el periodo de maduración.

En el proceso de producción de humus de lombriz es esencial tener en cuenta las características biológicas de la lombriz y las condiciones ambientales óptimas para su desarrollo. La lombriz habita en los primeros 50 cm del suelo y, por lo tanto, es muy sensible a cambios climáticos. Además es fotofóbica, por lo que no deben tocarle directamente los rayos ultravioletas del sol, que la perjudican gravemente. Las condiciones ambientales para su desarrollo se resumen a continuación:

- **Humedad.** La humedad óptima del sustrato se encuentra entre el 70 y el 80 %, para facilitar la ingestión de alimento y el deslizamiento del animal a través del material. Si hay un exceso de humedad, se originarán condiciones de anaerobiosis, mientras que un déficit provocará la muerte de la lombriz.
- **Temperatura.** El rango óptimo oscila entre los 12 y los 25 °C, aunque las lombrices pueden soportar temperaturas puntuales inferiores o superiores.
- **pH del sustrato.** Se debe estabilizar en torno a la neutralidad (6,8-7,2).

El proceso de producción y cría de lombrices consta de las siguientes etapas:

- **Precompostaje del material orgánico.** Es muy importante hacer una degradación previa del material (ya sean residuos orgánicos, estiércol, etc.) porque, si no, las elevadas temperaturas a las cuales se llegaría durante la fermentación de la materia orgánica, al inicio del proceso, matarían a las lombrices.
- **Siembra de las lombrices.** Se siembran las lombrices cuando la temperatura del material ha bajado hasta unos 30 o 35°C. Se necesita una cantidad de 600 a 700 lombrices m⁻³, lo que corresponde aproximadamente a unos 200 gm⁻³. El alimento (residuo a tratar) se les subministrará en capas delgadas (5 a 10 cm), cada 10 o 15 días, dependiendo de la cantidad de residuo orgánico que se vaya degradando.
- **Obtención del lombrihumus.** Primero, es necesario retirar las lombrices del lecho. Con este fin, se disponen trampas para atraer a las lombrices y agruparlas para poder extraerlas. Una vez retiradas las lombrices, se recoge el lombrihumus y se expone al sol para reducir la humedad hasta el 40 % antes de tamizarlo. El tiempo necesario para obtener lombrihumus depende principalmente de la densidad de lombrices. Sembrando 1 kg de lombrices por m³, se puede obtener lombrihumus en 80 días.

8.3.3.2 *Bocashi*

Bocashi es un nombre de origen japonés, cuyo significado es “materia orgánica fermentada”. El bocashi experimenta un proceso de descomposición similar al del compost, con la diferencia de que tiene como base de activación un inóculo de microorganismos efectivos, que favorecen el proceso de fermentación ácido-láctica, y otros ingredientes agregados con el objetivo de acelerar la descomposición. Su elaboración requiere entre 10 y 15 días.

Los microorganismos efectivos forman un cultivo microbiano mixto de especies benéficas seleccionadas (bacterias acidolácticas, levaduras, bacterias fotosintéticas y actinomicetos), que se utilizan como inóculo para hacer varios tipos de abonos y también para depurar aguas residuales y aguas superficiales contaminadas.

Existen numerosas formas de preparar los abonos orgánicos fermentados tipo bocashi. No solo varía el procedimiento, sino también los componentes que se utilizan para su elaboración. Normalmente, se disponen capas de residuos orgánicos triturados, como cascarilla de arroz, tierra, gallinaza o estiércol,

carbón, pulidora de arroz o cal, y se humedecen con una mezcla de agua, melaza e inóculo.

El producto final de la etapa de fermentación es un abono orgánico de color gris claro, seco y con un aspecto de polvo arenoso y de consistencia suelta, con un olor característico a azúcares fermentados.

8.4 Procesos termoquímicos

en este apartado se introducen los principios básicos de los sistemas de aprovechamiento térmico de los residuos, comúnmente denominados “combustión” o “incineración”.

Los sistemas de aprovechamiento térmico son una alternativa a considerar para el tratamiento de los residuos recolectados en masa, o para aquellas fracciones de residuos que no se pueden valorizar y cuyo destino final sería, por lo tanto, un relleno sanitario.

A pesar del rechazo social generalizado, estos sistemas de tratamiento ofrecen ventajas innegables como una gran reducción de masa y volumen de los residuos y la posibilidad de recuperar energía.

No obstante, también hay que considerar sus inconvenientes, motivo del alto rechazo social: (a) formación de emisiones indeseables (gaseosas y sólidas), (b) necesidad de instalaciones complejas y caras (es necesario disponer de equipos para recuperar la energía y controlar las emisiones) y (c) no son aplicables a residuos con un alto contenido de humedad.

8.4.1 Clasificación de los procesos termoquímicos

Los sistemas de tratamiento termoquímico se pueden clasificar en función de los requisitos de oxígeno. Así tenemos:

- **Combustión (Incineración).** Operación unitaria que utiliza la descomposición térmica, vía oxidación de la materia carbonosa de un combustible, con la cantidad necesaria de oxígeno para que se dé una combustión completa.
- **Gasificación.** Combustión parcial del combustible bajo condiciones subestequiométricas de oxígeno, para generar un gas combustible que contiene monóxido de carbono, hidrógeno, metano, hidrocarburos gaseosos, etc.
- **Pirólisis.** Proceso térmico en ausencia total de oxígeno (proceso utilizado antiguamente para producir carbón).

Actualmente, el único proceso implantado a escala industrial para el tratamiento de residuos municipales es la combustión. Los sistemas de gasificación y pirólisis están todavía en desarrollo, por lo que únicamente se describirá el proceso de combustión.

8.4.2 Principios de la combustión

Tal como se ha indicado anteriormente, la combustión es un proceso químico en el que, a través de una serie de reacciones, se produce calor. Para que estas reacciones tengan lugar, se deben cumplir una serie de condiciones: (i) atmósfera oxidante (necesidad de un exceso de O_2), (ii) alta temperatura, (iii) un tiempo de contacto mínimo, y (iv) turbulencia para que se dé un buen contacto entre el residuo y el O_2 .

Los combustibles contienen fundamentalmente tres elementos oxidables: carbono, hidrógeno y azufre. Durante el proceso de combustión, estos elementos se combinan con el oxígeno del aire y forman sus correspondientes óxidos, desprendiendo calor según las ecuaciones siguientes:



Para calcular las necesidades de oxígeno de un determinado residuo y así poder diseñar el sistema de incineración, es necesario conocer la composición elemental de los residuos a tratar, y hacer alguna simplificación.

El primer paso para calcular el **aire de operación**, es determinar el aire mínimo necesario para una **combustión completa**, es decir, para una completa oxidación del carbono, hidrógeno y azufre, y no obtener productos parcialmente oxidados, como puede ser el monóxido de carbono (CO). A este volumen de aire se le denomina **aire teórico**, y se calcula mediante las reacciones de oxidación teóricas, asumiendo que la composición del aire es constante y que los gases de combustión se comportan como gases ideales.

La cantidad de aire teórico es, en la mayoría de los casos, insuficiente por lo que normalmente se trabaja con un determinado exceso de aire, llamado **aire de operación**. El exceso de aire acostumbra a tener valores máximos del 50%. Una cantidad mayor de aire puede provocar problemas por disminución de la temperatura en el horno.

8.4.2.1 Generación de calor

La incineración de residuos tiene por objetivo no solo una máxima reducción del volumen, sino también la recuperación del calor que se genera. En este sentido, es interesante conocer la capacidad de generar calor del residuo para diseñar los equipos de recuperación de calor.

La capacidad de generar calor por parte de un combustible (en nuestro caso el residuo) se describe mediante el **Poder Calorífico Superior (PCS)** y el **Poder Calorífico Inferior (PCI)**, que se definen de la siguiente manera:

- **Poder Calorífico Superior (PCS)**. Calor de combustión por unidad de peso de combustible, cuando el combustible está completamente seco.
- **Poder Calorífico Inferior (PCI)**. Calor de combustión por unidad de peso de combustible, cuando el combustible contiene agua. En este caso, parte del calor generado se consume evaporando el agua.

La relación entre estos dos parámetros se expresa en la ecuación siguiente:

$$PCI = PCS - c \times M$$

donde las unidades del PCI y PCS son cal/gr., M son los gr. de agua que contiene el residuo mas el agua que se forma y c es el calor latente de cambio de estado, líquido-vapor, del agua (577 cal g^{-1}).

8.4.2.2 Emisiones gaseosas

Una de las principales preocupaciones de los sistemas de incineración es la generación de emisiones, que pueden ser perjudiciales para el hombre y el medio ambiente. Esto ha motivado la elaboración de un gran número de leyes que regulan los límites máximos de emisión. Las principales sustancias que actualmente están reguladas en los diferentes países son las siguientes: ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), partículas, metales pesados (Hg, Cd, Ti, As, Ni, etc.), dioxinas y furanos.

8.4.3 Instalaciones de combustión (incineradoras)

En la figura 8.8 se muestra un esquema del proceso de combustión en una incineradora. Tal como se puede ver, esta consta de las siguientes partes: (i) recepción y almacenaje de los residuos, (ii) horno de combustión, (iii) generación de vapor y energía, (iv) depuración de gases y (v) evacuación de cenizas y escorias.

Los elementos de que consta un horno de combustión son los siguientes (Figura 8.9):

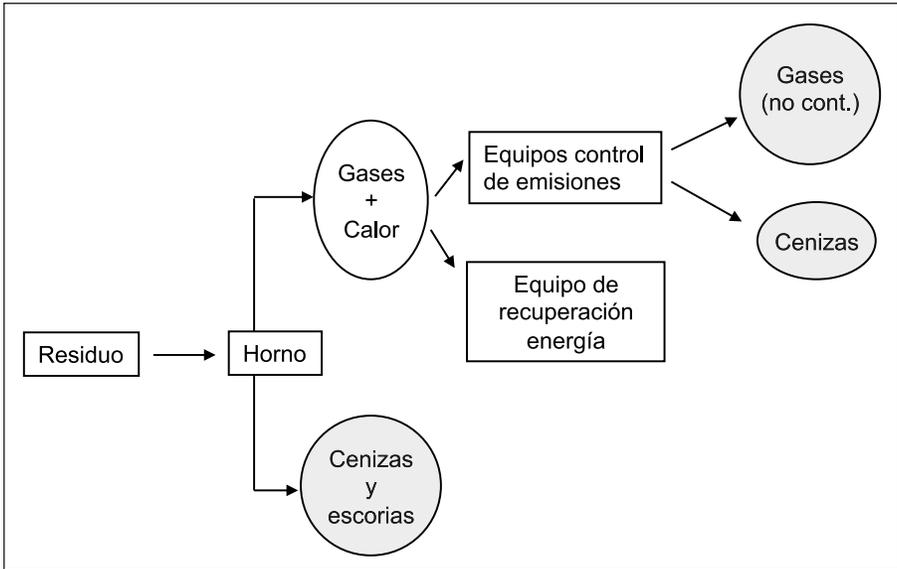


Figura 8.8.- Esquema del proceso de combustión. Fuente: elaboración propia.

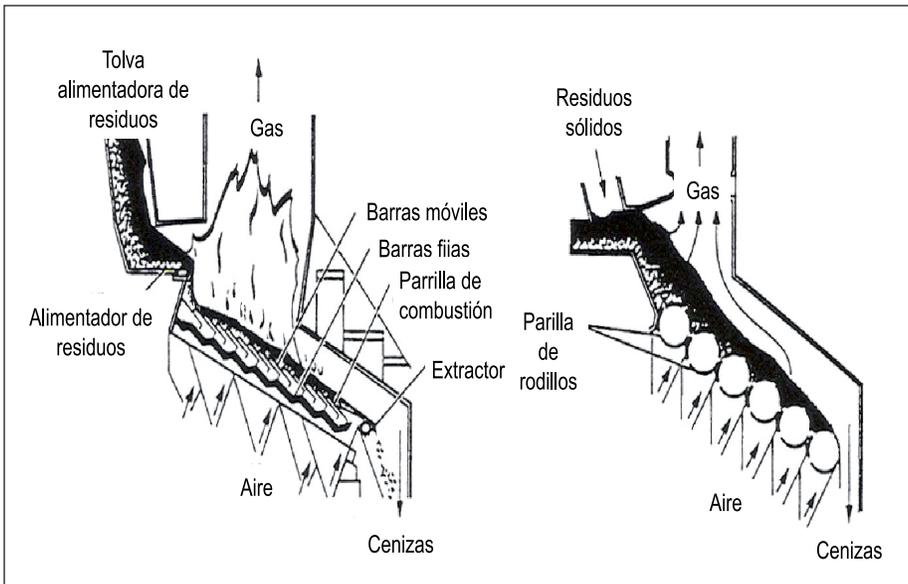


Figura 8.9.- Hornos de parrillas para el tratamiento de residuos sólidos urbanos. Fuente: Tchobanoglous, 1994.

- **Entrada de combustible primario** adecuada para la entrada de los RSU.
- **Entrada de aire** convenientemente diseñada para mantener en depresión la fosa de almacenaje de residuos y así evitar los malos olores.
- **Entrada de combustible secundario.** En caso de que la temperatura de combustión descienda por debajo de los 900°C, se añade un combustible complementario para mantenerla a ese nivel.
- **Parrilla** donde se disponen los residuos y se vehiculan a lo largo del horno.
- **Salida de humos** hacia los equipos de recuperación de energía y depuración.
- **Salida de cenizas y escorias.** Normalmente se sumergen en agua para sellar el horno por la parte inferior y enfriar la masa de cenizas y escorias.

8.4.3.1 Generación de energía

Las etapas de generación de energía en una planta de combustión son dos:

- **Recuperación de calor y generación de vapor**, que se realizan mediante un intercambiador de calor y una caldera para generar vapor.
- **Generación de energía eléctrica**, habitualmente por medio de turbinas de vapor. La energía generada dependerá de la cantidad de residuos incinerados y de su poder calorífico inferior.

Normalmente, la energía obtenida se consume en la propia planta y el exceso se vende a la red de distribución.

8.4.3.2 Control de emisiones

Los equipos de control de las emisiones son uno de los elementos más importantes y que implican una mayor inversión en una incineradora.

Los límites de emisiones son cada vez más estrictos, fruto de los avances en sistemas analíticos y en los equipos de control, lo que en los últimos años ha obligado a realizar inversiones constantes en renovación de los equipos de control.

Los equipos más habituales para el control de las emisiones se recogen en la tabla 8.3

Emisiones	Equipos de control
Partículas	En muchos casos se instalan en serie <ul style="list-style-type: none"> • Ciclones • Electrofiltros • Filtros de mangas
Ácidos (HCl, HF, etc.)	Sistemas de neutralización con CaO o lechada de cal. Existen tres sistemas diferentes: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema seco • Sistema semiseco • Sistema húmedo
CO y otros compuestos orgánicos	La mejor estrategia para evitar su generación es proporcionar suficiente oxígeno, turbulencia y temperatura para conseguir una combustión completa
Metales Pesados, SO ₂ , dioxinas y furanos	Carbón activo
NOx	Sistemas de inyección de NH ₃ <ul style="list-style-type: none"> • Reducción selectiva no catalítica (SNCR) • Reducción catalítica selectiva (SCR)

Tabla 8.3.- Equipos para el control de emisiones en incineradoras. Fuente: elaboración propia.

8.5 Rellenos sanitarios

En este apartado se describen las características de un relleno sanitario o depósito controlado, así como las etapas de su explotación: planificación, construcción, explotación y sellado final.

Los nombres que reciben los sistemas de aislamiento de residuos son muy diversos y varían en función de las medidas de control ambiental de que dispongan. Los sitios de disposición no controlados reciben, entre otros, el nombre de **botaderos** o **vertederos a cielo abierto**; cuando disponen de medidas de control ambiental reciben los nombres de **relleno sanitario** o **depósito controlado**.

Históricamente, el vertido y aislamiento de los residuos es el método más utilizado, por ser considerado el más económico. Esto es cierto únicamente si no se consideran los costes derivados de sus impactos sobre el entorno ni el necesario control tras la clausura del vertedero.

Los posibles impactos que un relleno sanitario puede generar, si no está bien diseñado, construido y explotado son:

- **Emisiones incontroladas de gases:** olores (H_2S), gases con efecto invernadero (CH_4) o perjudiciales para la salud (compuestos orgánicos volátiles).
- **Emisiones incontroladas de lixiviados.** Estos pueden afectar las aguas freáticas y/o superficiales.
- **Reproducción de vectores sanitarios:** ratas, moscas, mosquitos, etc.

Así pues, es necesario supervisar tanto la zona aireada (zona entre la superficie del suelo y el freático) como la zona freática, así como la calidad el aire.

Algunas definiciones importantes sobre los rellenos sanitarios son las siguientes:

- **Relleno sanitario.** Instalación física utilizada para la evacuación de residuos, diseñada y explotada para minimizar los impactos sobre el ambiente y la salud humana.
- **Celda.** Volumen de material depositado (normalmente en un día), aislado mediante material de cobertura.
- **Cobertura.** Material (suelo natural, áridos, compost) dispuesto en una capa de entre 15 y 30 cm encima de los residuos. Su objetivo es evitar el vuelo de los residuos (plásticos), prevenir la entrada o salida de vectores sanitarios y controlar la entrada de agua.
- **Capa final de cobertura o sellado.** Se aplica a toda la superficie del vertedero. El objetivo es interceptar la infiltración de agua y soportar la vegetación superficial implantada para sellar el vertedero. Consiste en diversas capas de tierra y otros materiales de un grosor aproximado de 60 cm.
- **Terrazas.** Para mantener la estabilidad del relleno y disponer los equipos de recuperación de gases, se suelen hacer terrazas. La altura de las terrazas es función del tipo de residuos y de la localización y disposición del relleno y se suelen construir cuando se superan alturas de 1,2 a 1,8 m.
- **Lixiviados.** Líquido que se infiltra a través de los residuos depositados y que se emite o se acumula en el fondo del relleno. Su origen es la humedad que contiene el propio residuo, la precipitación y la escorrentía no controlada. Los lixiviados contienen los componentes solubles de los residuos y los resultantes de las reacciones de degradación. Su composición es muy variable, en función de la edad del vertedero (estado de descomposición de los residuos que contiene).
- **Gas de vertedero.** Gas producido en el interior del relleno como resultado de la degradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos depositados. Su composición es variable. Contiene mayoritariamente CH_4 y CO_2 y pequeñas proporciones de N_2 , O_2 , NH_3 y otros gases.

- **Instalaciones de control.** Capas diarias y finales de cobertura, instalaciones de recolección de gases y lixiviados, así como las instalaciones de tratamiento de los mismos.
- **Clausura.** Actividades destinadas a la clausura de la zona, una vez completada la operación de explotación y cobertura final.
- **Control post-clausura.** Actividades asociadas a la supervisión y mantenimiento, una vez clausurado el relleno. Es aconsejable que el control se mantenga entre 30 y 50 años.

8.5.1 *Clasificación de los rellenos sanitarios*

Los rellenos sanitarios se clasifican, según el método, en tres tipos:

- Relleno de celda excavada o zanja. Cuando la capa freática es profunda, se excava la celda en profundidad. En este caso, la tierra que se ha vaciado se utiliza como material para la cobertura diaria y final.
- Relleno de superficie o zona. Cuando no se puede excavar, porque la capa freática es muy superficial o por cualquier otro motivo, los residuos, después de preparar el terreno, se disponen en superficie formando terrazas.
- Relleno de vaguada o ladera. Los residuos se disponen en la intersección entre dos vertientes opuestas de un valle o en una ladera. Es sumamente importante que no se sitúe en el cauce de un río.

8.5.2 *Planificación de los rellenos sanitarios*

Los principales puntos a definir a la hora de planificar la construcción de un relleno sanitario para gestionar los residuos de un determinado municipio o área geográfica, son: (i) caracterizar los residuos, principalmente su composición, y densidad, (ii) determinar el volumen de residuos generados y (iii) determinar la vida útil del relleno, que normalmente se calcula de entre 10 y 20 años.

Una vez definidos estos puntos, queda por decidir la localización del relleno sanitario, tarea normalmente complicada, no solo porque debe cumplir unas condiciones técnicas mínimas, sino también porque normalmente provoca un fuerte rechazo social.

En la elección de la localización de un relleno sanitario, debemos tener en cuenta lo siguiente:

- **Distancia de transporte** desde el punto de generación al relleno, ya que determina los costes de transporte.

- **Restricciones de localización** evitando la proximidad a núcleos habitados, cursos y nacientes de agua, etc.
- **Disponibilidad suficiente de terreno.** No solo se tiene que considerar la superficie necesaria para depositar los residuos que previsiblemente se generen durante la vida útil del depósito, sino también la superficie necesaria para las instalaciones de control de lixiviados, gases, etc.
- **Criterios de accesibilidad.** El acceso de tránsito pesado tiene que ser posible o en todo caso fácil de adecuar.
- **Condiciones del suelo, topografía e hidrogeología de las aguas superficiales**
- **Condiciones climáticas.** Es importante conocer, entre otras cosas, los vientos dominantes y el régimen de lluvias, ya que estos determinarán la forma de explotación.
- **Condiciones geológicas e hidrogeológicas.** No son aconsejables las zonas de fallas o con actividad volcánica o con freáticos superficiales.
- **Uso final del relleno una vez clausurado.** Es interesante planificar qué uso final se quiere dar al relleno sanitario una vez finalizada su vida útil, ya que ello puede influir en su diseño y explotación.

8.5.3 *Diseño y construcción*

El diseño y construcción del relleno debe basarse en los estudios preliminares de la zona, en las normas de construcción (requerimientos de aislamiento del vaso, recuperación del gas del vertedero, etc.) y en la supervisión y control del medio ambiente. Las etapas de construcción son:

- Preparación de la zona. En esta primera etapa se construyen los accesos al vertedero, los drenajes superficiales para desviar la escorrentía superficial, los edificios auxiliares y la báscula de control de acceso y se delimita y se restringe el acceso mediante una valla perimetral.
- Preparación de la zona de vertido. La preparación de la zona de vertido se inicia con la excavación de la zanja o vaso y con el aislamiento del fondo y de los laterales. Normalmente, existen normas técnicas de cumplimiento obligado para el aislamiento de los vasos.

En esta etapa, también se instala el sistema de drenaje y almacenaje de lixiviados y se inicia la instalación del sistema de recuperación de los gases. Normalmente, este último se va instalando durante el periodo de explotación del vaso, para iniciar la recuperación del gas tras la clausura total o parcial.

8.5.4 Explotación

Durante la explotación del vertedero, es necesario planificar la operación (horarios, adecuación de la celda y planificación del vertido) y se debe controlar el gas generado y los lixiviados.

8.5.5 Gas de vertedero

La materia orgánica que contienen los residuos se degrada en condiciones anaerobias, una vez depositada en el relleno sanitario, generando lo que se llama gas de vertedero. Habitualmente, el gas generado está saturado de humedad y tiene un PCS de entre 890 y 1223 kcal m⁻³. En la tabla 8.4 se puede observar la composición típica del gas de vertedero.

Componente	Volumen (%)
CH ₄	45-60%
CO ₂	40-60%
N ₂	2-5%
Sulfuros, NH ₃	< 1%
H ₂ , CO, COV	< 0,1 %

Tabla 8.4.- Composición típica del gas de vertedero. Fuente: Tchobanoglous, 1994.

Las etapas de generación del gas y la evolución de la composición de los lixiviados se pueden ver en la figura 8.10. Normalmente, se considera un total de cinco etapas:

- **Ajuste inicial.** En esta etapa hay una degradación aeróbica hasta que se consume el O₂ existente.
- **Fase de transición.** En esta etapa se establecen las condiciones anaeróbicas. La concentración de O₂ disminuye y la de CO₂ aumenta. La concentración de ácidos grasos volátiles en los lixiviados se incrementa.
- **Fase ácida:** La concentración de ácidos en los lixiviados es máxima, lo que implica un aumento importante de la materia orgánica (DQO) y un pH en muchos casos inferior a 5. Las concentraciones de CO₂ y de H₂ en el gas aumentan.
- **Fase metanogénica.** En esta etapa se registra la máxima generación de metano. Es la etapa más larga y en la que es necesario recuperar el gas. La DQO de los lixiviados y la concentración de AGV disminuyen y el pH aumenta hasta valores próximos a la neutralidad.
- **Fase de maduración.** La generación de metano disminuye progresivamente y la concentración en materia orgánica de los lixiviados es baja pero difícilmente biodegradable.

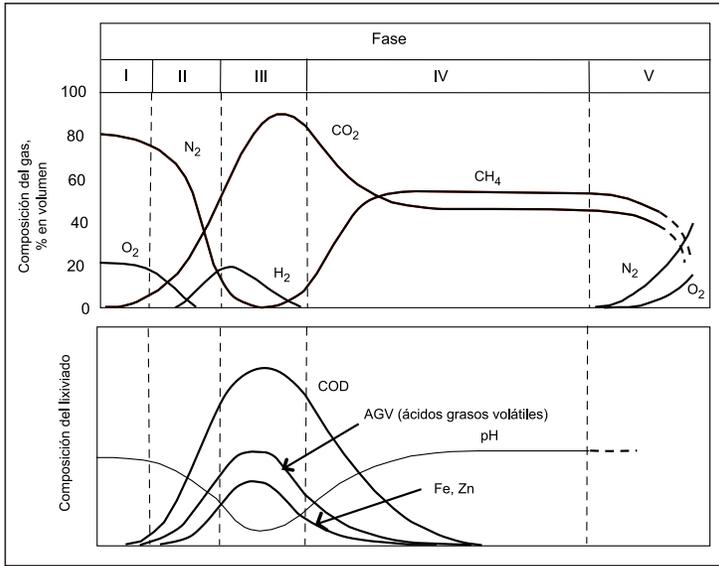


Figura 8.10.- Evolución de la generación del gas de vertedero y composición de los lixiviados: I) ajuste inicial, II) fase de transición, III) fase ácida, IV) fermentación del metano y V) fase de maduración. Fuente: Tchobanoglous, 1994.

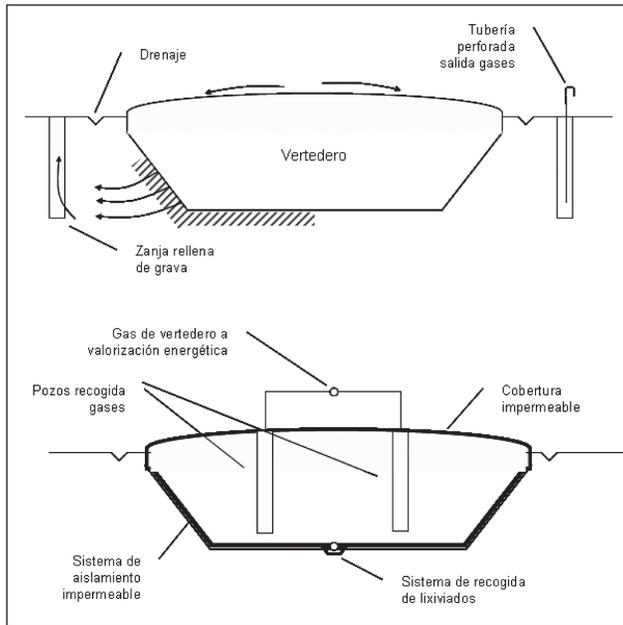


Figura 8.11.- Sistemas de recuperación de gas: a) zanja de intercepción perimetral, b) pozos de recogida de gases. Fuente: Tchobanoglous, 1994.

La duración de cada etapa es función de la humedad del residuo y de la proporción, en los residuos, de materia orgánica fácil o lentamente biodegradable. La primera se degrada en 5 años y la segunda en un período comprendido entre los 5 y los 20 años.

La presión en el interior del relleno es normalmente superior a la presión atmosférica, lo que hace que el gas se mueva de manera natural hacia el exterior (control pasivo). No obstante, en algunas ocasiones, cuando la producción de gas es muy reducida, puede ser necesario forzar su extracción (control activo).

La recuperación del gas se puede realizar mediante **zanjas de intercepción perimetral**, cuando el depósito no está aislado, o mediante **pozos de recuperación de gases** cuando el vertedero está aislado (Figura 8.11).

El gas recuperado, cuando se produce en pequeñas cantidades, se debe quemar en una antorcha. Si la producción es elevada, se puede estudiar la rentabilidad económica de instalar motores de cogeneración para producir energía eléctrica.

8.5.6 *Lixiviados*

El cálculo de los lixiviados que se generan en un relleno sanitario se hace mediante un balance de agua, en el que tenemos:

- **Entradas.** Agua filtrada superiormente, agua aportada por el residuo y agua aportada por el material de cobertura.
- **Salidas.** Pérdidas por la parte inferior vaso, agua consumida en la formación de gas, pérdidas por vapor de agua, evaporación durante el vertido y capacidad de campo del depósito.

El control de estos lixiviados se realiza mediante (Figura 8.12): (i) el aislamiento del fondo y las paredes del vaso del vertedero, (ii) la instalación de un sistema de drenaje para extraer el lixiviado que se genera, (iii) una cobertura con material de baja capacidad de infiltración (arcillas, etc.) y (iv) una gestión correcta de las aguas superficiales (drenajes para evitar la escorrentía superficial, etc.).

8.5.7 *Clausura y control post-clausura*

Una vez terminada la vida útil de un relleno sanitario, es necesario clausurarlo mediante la cobertura final. El objetivo es sellar el vertedero par evitar la entrada de agua. La configuración típica es: (i) tierra vegetal (60 cm), (ii) geotextil, (iii) capa de drenaje (arena, 30 cm), (iv) geomembrana, (v) arcilla compactada (60 cm), (vi) tierra compactada (30 cm) y (vii) residuos.

Durante el control post-clausura, se debe seguir manteniendo y explotando los sistemas de control y aprovechamiento del gas del vertedero y de los lixiviados.

En función del uso que se prevea dar a la zona, hay que tener en cuenta las características estructurales (deslizamientos de tierra) y el asentamiento del vertedero (puede haber pérdidas de volumen de hasta el 30-40%).

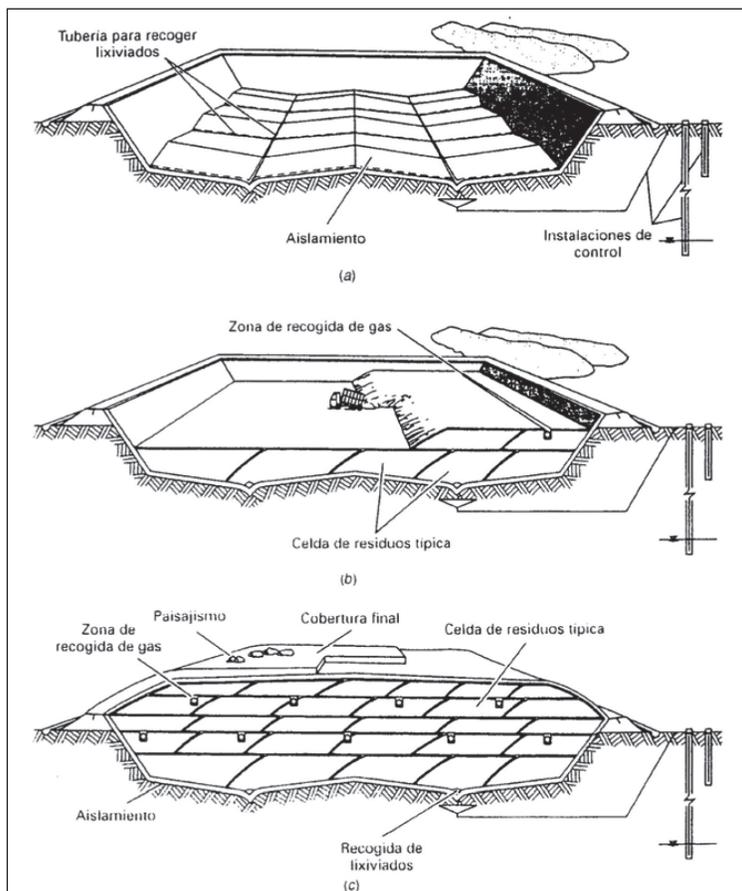


Figura 8.12.- Explotación de un depósito controlado: a) excavación y preparación de un vaso para el vertido de residuos, (b) vertido de residuos sólidos y c) sección del vertedero clausurado. Fuente: Tchobanoglous, 1994.

8.6 Referencias

- Bollo E. (1999). "Lombricultura: una alternativa de reciclaje". Quito. Ecuador.
- Davis M.L. and Cornwell D.A. (1991). "Introduction to environmental engineering". McGraw-Hill, New York.
- Díaz L.F., Savage G.M., Eggerth L.L, y Golueke C.G. (1993). "Composting and recycling municipal solid waste". Lewis Publishers, cop. Boca Raton.

- Freeman H.M. (1998). "Standard Handbook of hazardous waste treatment and disposal". 2nd Edition. McGraw-Hill. New York.
- Glynn H.J.G. and Heinke G.W. (1999). "Ingeniería Ambiental". Prentice Hall Hispanoamericana, SA. México.
- Haug R.T. (1980). "Compost engineering: principles and practice". Technomic Publishing, cop. Lancaster.
- Haug R.T. (1993). "The Practical Handbook of Compost Engineering". Lewis Publishers.
- LaGrega M.D., Buckingham P.L. and Evans J.C. (1995). "Gestión de residuos tóxicos: tratamiento, eliminación y recuperación de suelos". McGraw-Hill, Madrid.
- Masters G.M. (1991). "Introduction to environment engineering and science". Prentice-Hall.
- Mata-Alvarez J. (2003). "Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. IWA Publishing". Cornwall.
- Peavy H.S., Rowe D.R. and Tchobanoglous G. (1985). "Environmental engineering". McGraw-Hill, New York.
- Restrepo J. (1996). "Abonos orgánicos fermentados. Experiencias de agricultores en Centroamérica y Brasil". San José.
- Soliva M. (2001). "Compostatge i gestió de residus orgànics. Estudis i monografies" 21. Diputació de Barcelona, Àrea de Medi Ambient. Barcelona.
- Stafford P.H. (1980). "Methane production from waste organic matter". CRC, Pres, IMC., Boca Raton, Florida.
- Spellman F.K. (1997). "Wastewater biosolids to compost". Technomic Publishing CO. Inc, Lancaster-Basel.
- Tchobanoglous G., Theisen A. and Vigil S. (1994). "Gestión Integral de Residuos Sólidos". McGraw Hill, Madrid.
- Tchobanoglous G. and Kreith A. (2002). "Handbook of solid waste management". 2n edition. McGraw Hill, New York

EN RED

Agència de Residus de Catalunya:

<http://www.arc-cat.net/es/home.asp>

European compost network:

<http://www.compostnetwork.info/>

Consejo Nacional del Ambiente- Perú:

<http://www.conam.gob.pe/Modulos/Home/index.asp>

Institute for Prospective Technological Studies:

<http://www.jrc.es/home/index.htm>

The European Anaerobic Digestion Network:

<http://www.adnett.org/index.html>

Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook:

<http://www.makingenergy.com/Dairy%20Waste%20Handbook.pdf>

Ciberamérica- Información por países de la gestión de residuos:

<http://www.cpmlnic.org.ni/quienes.htm>