

CAPÍTULO

23



Sistemas integrados para el manejo de aguas residuales en el medio rural

POR
Carlos ESPINOSA JIMÉNEZ
Vecellio FOCA

Introducción

Clásicamente, el manejo de las aguas residuales implica su recolección, depuración y disposición final. La recolección se hace mediante alcantarillados o redes de tuberías, la depuración mediante reactores biológicos o químicos, y la disposición final en cuerpos receptores. Esta secuencia clásica se plantea para el medio urbano. En el medio rural, este planteamiento no siempre es posible debido a realidades muy particulares que allí se presentan, realidades como la población dispersa no nucleada, efluentes agroindustriales con altas cargas orgánicas y altas emisiones másicas, permanente o temporal escasez del recurso hídrico, restricciones del servicio eléctrico y potencialidad del reuso de los subproductos y los efluentes.

En este contexto se presentan los sistemas integrados como una opción que puede perfectamente armonizar las realidades particulares del medio rural con el manejo de las aguas residuales.

La filosofía de los sistemas integrados

La filosofía de los sistemas integrados proviene del medio rural asiático, en donde se ha practicado por siglos. Los sistemas integrados se definen como una combinación de procesos y prácticas por las que el uso óptimo de recursos es logrado vía reciclaje de desechos. El reciclaje de desechos, a su vez, se alcanza mediante la recuperación y el reuso de los nutrientes y la energía. La aplicación de los sistemas integrados permite un buen balance entre la utilización de recursos, el reuso y la protección del ambiente (Espinoza, 2010). Este balance está ausente en áreas urbanas densamente pobladas donde el alto consumo y producción de desechos es sostenido por la importación a gran escala de energía y nutrientes hacia el ambiente urbano. En una ciudad, por ejemplo, la energía consumida (alimentos, energía eléctrica y combustibles) es producida fuera de la ciudad y de igual manera sus desechos (aguas residuales y basuras) son procesados, depurados y dispuestos fuera de ella. La ausencia de procesos de reuso de energía, nutrientes y otros componentes de valor de los desechos urbanos, ha generado serios problemas de salud pública y del ambiente.

Se hace necesario entonces desarrollar conceptos y procesos integrados para la minimización, recuperación y reuso de desechos en áreas urbanas y rurales, en países desarrollados y en vías de desarrollo.

Tecnologías involucradas

Las tecnologías involucradas en los sistemas integrados para el manejo de las aguas residuales en el medio rural son fundamentalmente la biotecnología anaerobia, los sistemas lagunares y los humedales construidos.

Biotecnología anaerobia

En el tratamiento de líquidos residuales, la biotecnología anaerobia tiene la ventaja de producir biogás con alto contenido de metano, generar bajos volúmenes de lodo y establecer costos razonables de inversión, operación y mantenimiento. En los últimos años, estas ventajas comparativas han despertado el interés por los sistemas de tratamiento basados en reactores anaerobios para su implementación en el medio rural.

En un ambiente anaerobio, la degradación de polímeros orgánicos requiere cuatro grupos de bacterias que cohabitan como poblaciones mixtas en la mayoría de los ecosistemas anaerobios. Cada una de estas poblaciones se especializa en llevar a cabo una parte del metabolismo de compuestos orgánicos que finalmente resultan en la formación de metano, dióxido de carbono e hidrógeno molecular (Bitton, 1994). Clásicamente, las cuatro fases del metabolismo anaerobio se ilustran en la FIGURA 1, en la cual se distinguen las cuatro etapas o fases, a saber:

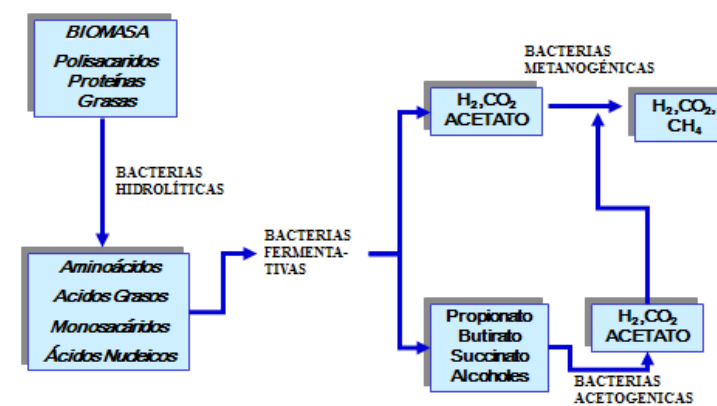


FIGURA 1
Integración de las cuatro etapas del Metabolismo Anaerobio. Fuente: Tomado de Sanabria (1998)

Hidrólisis

Es efectuada en sistemas anaerobios principalmente por bacterias del género *Clostridium*. Estas bacterias segregan exoenzimas que transforman los compuestos orgánicos complejos a sus unidades más sencillas como aminoácidos, ácidos grasos, azúcares y ácidos nucleicos, entre otros. Cuantitativamente, los polímeros más importantes son los carbohidratos, la celulosa y el almidón.

Fermentación

Las unidades más sencillas producto de la hidrólisis son sometidas a una primera fermentación, a partir de la cual se obtiene acetato, formiato, dióxido de carbono, hidrógeno molecular, además de succinato, propionato y butirato.

Acetogénesis

Algunos de los productos originados en la fermentación son transformados a acetato. Además, se produce una fermentación de ácidos orgánicos y alcoholes hasta dióxido de carbono y butirato.

Metanogénesis

Finalmente, las bacterias metanogénicas convierten en metano el acetato, el hidrógeno molecular y el dióxido de carbono.

Reactores representativos de la biotecnología anaerobia con potencialidad de uso en el medio rural son el tanque séptico, el tanque Imhoff, el filtro anaerobio y el reactor anaerobio de manto de lodo y flujo ascendente (UASB), Van Haandel (1994) y Veenstra (1997).

Sistemas lagunares

Los sistemas lagunares son reactores de biomasa suspendida conformados por estanques o lagunas y están consideradas entre las tecnologías pioneras en el tratamiento y depuración de aguas residuales. Clásicamente, los sistemas lagunares se clasifican en lagunas aeróbicas (de maduración o pulimento), lagunas facultativas y lagunas anaeróbicas. La **TABLA 1** presenta las características más relevantes de estos sistemas.

TABLA 1. Características más relevantes de los sistemas lagunares. Elaboración propia basada en la experiencia y revisión bibliográfica

Tipo	Carga orgánica	Afluente	Propósito	Dimensiones
Aeróbica	85-170 Kg DBO/ha.d	Tratado en otros procesos previos y con bajas cargas orgánicas	Pulir el efluente Remoción de patógenos	Profundidad de 30 a 45 cm
Facultativa	22-67 Kg DBO/ha.d	Agua residual cruda. Efluente primario ó tratado en procesos previos	Remoción de materia orgánica	Profundidad 1,2 a 2,5 m. Área de 4 a 60 ha
Anaeróbica	160-800 gDBO/m ³ .d	Efluentes agroindustriales y agropecuarios	Remoción de altas cargas de materia orgánica	Profundidad de 2,5 a 5 m.

Fuente: Elaboración propia

Humedales construidos

Un humedal construido es un complejo sistema compuesto de agua, sustrato, plantas (vasculares y algas), restos vegetales (principalmente material vegetal caído de las plantas), invertebrados (principalmente insectos de larvas y gusanos) y una compleja fauna microbiana (los más importantes son las bacterias). Los mecanismos para mejorar la calidad de las aguas son numerosos e interrelacionados, e incluyen sedimentación, filtra-

ción, precipitación química, transformaciones químicas, adsorción, intercambio iónico, absorción de nutrientes por las plantas y microorganismos, predación y muerte progresiva de patógenos, Espinosa (2004), Espinosa (2014) y Keddy (2000). La **TABLA 2** resume los principales mecanismos de remoción y transformación de contaminantes en humedales construidos.

Según la clasificación de la IWA (2000), las lagunas con plantas acuáticas son consideradas como humedales.

TABLA 2. Resumen de los principales mecanismos de remoción y transformación en humedales construidos para los contaminantes presentes en las aguas residuales municipales (modificado de Crites, 2000)

Contaminante	Sistema de flujo libre (HFSL)	Flujo subsuperficial (HFS)
Compuestos orgánicos biodegradables	Biodegradación por bacterias aerobias, facultativas y anaerobias de DBO soluble, adsorción, filtración y sedimentación de la DBO particulada.	Bioconversión por bacterias facultativas y anaerobias en las plantas y detritos de la superficie.
Sólidos suspendidos	Sedimentación, filtración.	Filtración, sedimentación.
Nitrógeno	Amonificación seguida de nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal y volatilización.	Amonificación seguida de nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización. Adsorción mátrica.
Fósforo	Sedimentación, asimilación vegetal.	Filtración, sedimentación, asimilación vegetal.
Metales pesados	Adsorción de las plantas y detritos de la superficie, sedimentación, asimilación vegetal.	Adsorción de las raíces de las plantas y detritos de la superficie, sedimentación, asimilación vegetal.
Organismos patógenos	Muerte progresiva, predación, radiación UV, sedimentación, excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas.	Muerte progresiva, predación, sedimentación, excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas.

Fuente: Modificado de Crites, 2000

Ejemplos de sistemas integrados

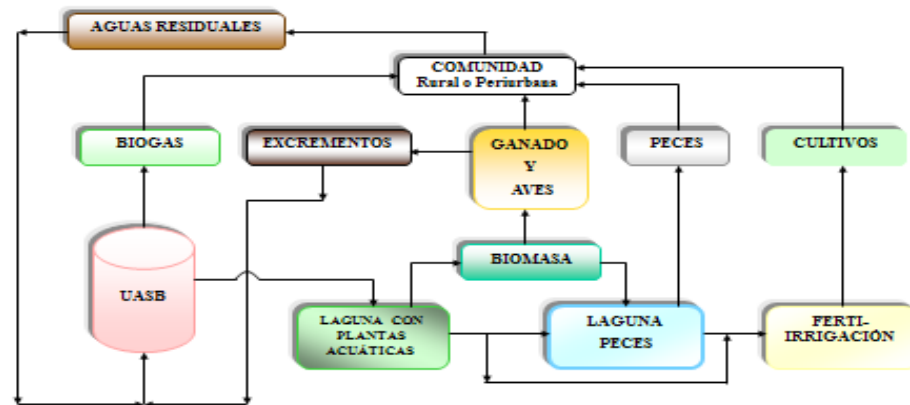
Dentro de la filosofía de los sistemas integrados es posible plantear sistemas muy simples y prácticos, desde transformar desechos orgánicos vegetales en compostaje para mejorar suelos agrícolas, hasta sistemas más complejos como el que se muestra en la Figura 2.

Fuente: Tomado y adaptado de Espinosa (1998) y Cubillos et al (2000)

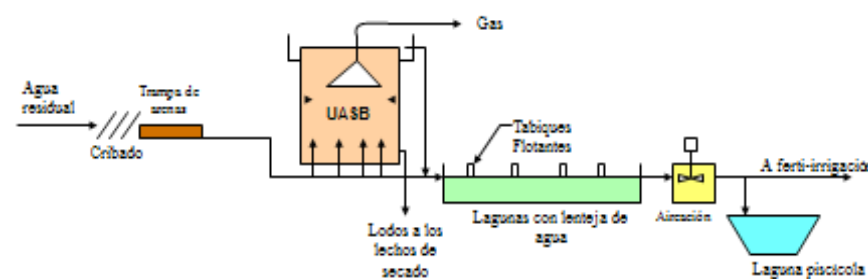
En este planteamiento, una comunidad rural o periurbana genera líquidos residuales

FIGURA 2

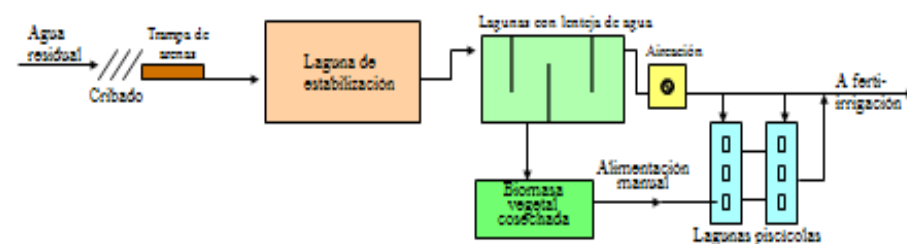
Reuso de nutrientes y energía mediante sistema integrado, reactor anaerobio UASB combinado con laguna con plantas acuáticas y ferti-irrigación



eminentemente domésticos, los cuales son depurados en un reactor anaerobio de alta tasa (UASB). El biogás del UASB es aprovechado por la comunidad cerrando un ciclo. El efluente del reactor anaerobio puede alimentar una laguna con plantas acuáticas y aguas, y debajo de ella una laguna piscícola. La biomasa de la laguna con plantas acuáticas puede a su vez ser forraje para animales (ganado y aves) y alimento para los peces. La proteína del ganado y las aves es consumida por la comunidad y sus excrementos pueden ser digeridos en el reactor anaerobio UASB, cerrando así dos ciclos más. La laguna piscícola produce pescados, proteína que es consumida por la comunidad cerrando otro ciclo. El efluente de la laguna con peces puede ser utilizado en ferti-irrigación de cultivos, los cuales son aprovechados por la comunidad, cerrándose así otro ciclo. Un planteamiento como este es perfectamente posible en una comunidad rural o periurbana. La **FIGURA 3 Y 4** ilustran otros sistemas integrados perfectamente posibles en el medio rural, enfocados bajo la óptica del reúso de efluentes y subproductos.

**FIGURA 3**

Sistema UASB + Laguna con lenteja + Laguna piscícola + Ferti-irrigación (Sección longitudinal). Fuente: Elaboración propia

**FIGURA 4**

Sistema laguna de estabilización + laguna con lenteja + lagunas piscícolas + ferti-irrigación (vista en planta)

Es importante destacar que la generación de subproductos (biogás, biomasa vegetal, lodos biológicos) en un sistema integrado implica necesariamente su reuso o entrada como materia prima para otros procesos en el medio rural. Así, por ejemplo, el biogás metano (CH_4) debe ser aprovechado como combustible transformándolo así en dióxido de carbono (CO_2) y disminuyendo su poder como gas de efecto invernadero; la biomasa (lenteja de agua, bora u otra macrofita) debe ser utilizada como forraje o alimento para peces y animales de corral, y los sólidos biológicos deben ser debidamente procesados y dispuestos en predios agrícolas como mejoradores de suelos. Polprasert (1996), Gordon (2000).

Perspectivas

La perspectiva de los sistemas integrados para el manejo de las aguas residuales en el medio rural es prometedora. Mediante la implementación de los sistemas integrados se “minimizan” los desechos orgánicos en el medio rural, ya que se fundamentan en el reuso de efluentes y subproductos. Se requiere para su implementación un cambio de paradigmas, una nueva concepción de los “desechos”, ya que bajo esta filosofía, los “desechos” son “subproductos” o insumos de entrada a otros procesos “de producción”. La generación de biogás con alto valor energético (CH_4) puede ser de gran utilidad en un medio rural donde la disponibilidad de energía eléctrica suele ser restringida y costosa. El uso de sólidos biológicos (lodos biológicos de los reactores anaerobios) debidamente procesados y dispuestos en predios agrícolas como mejoradores de suelos, puede aportar fertilidad a los suelos agrícolas y mejorar su estructura. Los efluentes depurados pueden ser reusados en “ferti-irrigación” en predios agrícolas, mejorando el balance hídrico local, especialmente en épocas de estiaje. La biomasa vegetal producida (macrófitas acuáticas) contiene buenos porcentajes proteicos en peso seco, y además son proteínas con apropiados balances de aminoácidos. En Venezuela, actualmente se implementan granjas ecológicas y Núcleos de Desarrollo Endógenos (NUDE), los cuales se fundamentan en la filosofía de los sistemas integrados.

■ Referencias

- Bitton, G. (1994). *Wastewater microbiology*. New York: John Wiley and Sons. USA.
- Crites, R., Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Santafé de Bogotá: Mc Graw Hill.
- Cubillos, A., Espinosa, C., Rivera, G. y Sanabria, J. (2000). Reactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias. Mérida: CIDIAT.
- Espinosa, C. (1998). *Efectos del pretratamiento anaerobio (UASB) en las características físico-químicas de un sistema de lagunas duckweed en serie - Tesis de Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cali: Universidad del Valle.
- Espinosa, C. (2004). *Humedales Construidos*. Mérida: CIDIAT.
- Espinosa, C. (2010). *Notas del curso "Sistemas Integrados para el manejo de aguas residuales en el medio rural"*. Especialización GARTA. Mérida: CIDIAT.
- Espinosa, C. (2014). *Notas del curso "Fitorremediación en Aguas"*. Especialización GARTA. Mérida: CIDIAT.
- Gordon, E. (2000). *Notas del curso "Uso de humedales para el tratamiento de efluentes industriales y domésticos"*. Doctorado en Ecología. Facultad de Ciencias. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- IWA (2000). *Constructed wetlands for water pollution control. Scientific and Technical Report # 8*. International Water Assotiation. UK.
- Polprasert, C. (1996). *Organic waste recycling*. Chichester: John Wiley and Sons.
- Keddy, P.A. (2000). *Wetland Ecology: principles and conservation*. Cambridge.
- Sanabria, J. (1998). *Microbiología ambiental para ingenieros*. Cali: Universidad del Valle.
- Van Haandel, A., Lettinga, G. (1994). *Anaerobic sewage treatment*. New York: John Wiley and Sons.
- Veenstra, S., Polprasert, C. (1997). *Wastewater Treatment. Lecture Notes EE010/97/1*. Delf: IHE-Delft.