

Análisis de los sistemas anaeróbicos para la purificación lixiviados de rellenos sanitarios y la generación de energía renovable: reactores UASB, sistemas anammox y bioceldas

Analysis of anaerobic systems for landfill leachate treatment and renewable energy generation: UASB reactors, anammox systems and biocells

Doménica Selena-Mesías¹; Nataly Solís-Salas¹; Rodny Peñafiel-Ayala¹

¹Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, Ambato-Ecuador, Email: rd.penafiel@uta.edu.ec

DOI: <http://dx.doi.org/10.31243/id.v15.2022.1600>

Resumen

Los rellenos sanitarios son utilizados como disposición final de los desechos de la población en el mundo, no obstante, el problema que se presenta es la aparición de lixiviados debido a la transferencia de agua a través de los residuos sólidos conteniendo alta carga orgánica, concentración de amonio y demás metales pesados generando gran preocupación ambiental. En este artículo se analiza mediante revisión bibliográfica los tratamientos biológicos anaerobios para la purificación de lixiviados de vertederos presentando buenos resultados en la remoción de contaminantes debido a sus sistemas con operación simple y de bajo costo, además destacan por su buen rendimiento para la producción de biogás que es de gran importancia para reutilizarlo como fuente de energía generando un ahorro económico. El estudio se enfoca en los siguientes sistemas: reactores UASB, sistemas anammox y bioceldas.

Palabras clave:

Tratamiento anaerobio, biorreactor de vertedero, UASB, anammox, biogás.

Abstract

Landfills are used as final disposal of waste from the population in the world, however, the problem that arises is the generation of leachates due to the transfer of water through the solid waste containing high organic load, concentration of ammonium and heavy metals creating environmental concern. This article analyzes through a literature review the anaerobic biological treatments for the purification of leachates from landfills. These processes largely remove water pollutants, are simple and generate low operation costs. These systems also stand out for their good performance to produce biogas which can be reused as a source of energy generating economic savings. The study is aimed at the following systems: UASB reactors, anammox systems and biocells.

Keywords:

Anaerobic treatment, landfill bioreactor, UASB, anammox, biogas

Introducción

El vertido de desechos en los rellenos sanitarios es uno de los mayores retos que deben enfrentar las autoridades ambientales por el potencial efecto contaminante que trae consigo, encontrándose seriamente amenazado el medio ambiente, en gran parte por un mal de manejo de los residuos en los vertederos afectando los recursos agua y suelo **(Ayala, 2018)**. Por esta razón se deben establecer procesos de depuración de los diferentes componentes contaminados producidos en el manejo de los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios. La putrefacción natural de estos residuos depositados en vertederos en contacto con el agua infiltrada produce un líquido tóxico de coloración negra, conocido como lixiviado, el cual debe ser tratado apropiadamente por su alto nivel de contaminación. **(Zafra & Romero, 2019)**.

El lixiviado es un fluido producido por la interacción entre los residuos sólidos en descomposición y el agua de lluvia. Esto provoca una mezcla con alta contaminación de materia orgánica, el cual se percola a través del vertedero **(Ayala, 2018)**. Este tipo de agua residual se origina por el gran contenido de humedad que contienen los desechos al ponerse en contacto con agua de lluvia **(Andreja et al., 2015)**.

Los factores más relevantes de la generación del lixiviado son la evaporación, la transpiración, escorrentía que se penetra en el relleno proveniente del agua de lluvia, la humedad del suelo y la cobertura que posee el vertedero **(Cárdenas et al., 2020)**. Siendo la precipitación y la humedad inicial de los residuos las mayores causantes de su generación **(Chelliapan et al., 2020)**.

Los lixiviados que no son tratados pueden mezclarse con aguas subterráneas o superficiales, causando graves daños debido a que contienen una elevada concentración de compuestos orgánicos medidos en base al análisis de DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno) y carbón orgánico total **(Montesinos, 2015)**. Así mismo, el lixiviado presenta compuestos inorgánicos como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , NH_4^{+} , Cl^{-} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-} y metales (Fe, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) **(Filho, 2017)**

Otro factor contaminante que se produce en los vertederos es el biogás subproducto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, por lo que este debe ser monitoreado para tener un manejo adecuado evitando riesgos ambientales. En la actualidad, la captura de biogás para su conversión en energía eléctrica es ampliamente aplicada **(Escamilla, 2019)**. Desde el punto de vista ambiental esto genera un doble aporte no solo ayuda con la eliminación de gases de efecto invernadero sino la aprovecha biogás como combustible para generar electricidad generando ahorros económicos **(Blanco, 2017)**.

El volumen de biogás producido va a depender de la humedad presente en los residuos, condiciones climáticas, edad del lixiviado, cantidad de materia orgánica y su compactación **(Najera, 2011)**.

Muchos países en Latinoamérica no cuentan con métodos adecuados de tratamiento lixiviados poniendo en riesgo los recursos naturales, por lo que resulta de gran interés el estudio de nuevas tecnologías que han sido desarrolladas a nivel mundial destacándose los tratamientos biológicos anaeróbicos por su alta eficiencia en remoción de carga orgánica y bajo costo con la intervención de microorganismos que degradan la materia orgánica **(Zafra & Romero, 2019)**.

El análisis de las tecnologías de tratamiento biológico de lixiviados es fundamental para su aplicación a

escala real en vertederos municipales, con el propósito de aplicar las mejores opciones de tratamiento de lixiviados y minimizando el impacto ambiental. La presente investigación se evaluó comparativamente mediante la revisión de artículos científicos los siguientes procesos de depuración de lixiviados de rellenos sanitarios: reactores UASB, sistemas anammox y bioceldas.

Desarrollo histórico de cada tecnología

Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

Los reactores UASB (uplow anaerobic sludge bed or blanket) empezaron a ser estudiados en la década de los 70 por el Dr. Gatzke Lettinga (**Hernández, 2018**) por la necesidad de optimizar la calidad de lixiviados desechados donde, a partir de experiencias con filtros aeróbicos propuso reemplazar el medio de soporte por un separador trifásico (**Amaguaya, 2019**), al principio se utilizaron para la extracción del almidón en la producción de papas y para obtener azúcar de la remolacha. Poco después se realizaron estudios en Holanda a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales (**Almeida et al., 2018**).

Este tipo de biorreactor fue implementado primero en países Latinoamericanos como Colombia diseñando el primer reactor a escala piloto siguiendo los parámetros de estudios anteriores y posteriormente se instaló una planta a escala real (**Loja & Quezada, 2017**). Posteriormente México para el tratamiento de aguas residuales municipales, tiempo después se realizaron los primeros estudios a escala piloto en Brasil (**Márquez & Martínez, 2011**).

En base a las experiencias en los países Latinos se implementó más adelante en Estados Unidos y países europeos como India, Egipto, China donde se mejoró algunas limitaciones en la configuración de estos reactores (**Eia, 2012**).

Oxidación anaerobia del ion amonio (Anammox)

La oxidación del amonio mediante condiciones anaerobias fue propuesta por Broda en 1977, mediante cálculos termodinámicos y el ciclo de vida del nitrógeno, ya que hasta ese momento solo había sido posible la oxidación en condiciones aerobias (**Peralta y Serrato, 2017**).

Pero fue Mulder et al. (1995) que lo confirmó mediante el tratamiento anammox conocido así por sus siglas en inglés (*Anaerobic Ammonium Oxidation*) estudiado en un reactor desnitrificante de lecho fluidizado a escala piloto que operaba para degradar los residuos de una planta de producción de levadura (**Leal, 2015**), donde se explica el comportamiento de las bacterias anammox (**Sultana, 2016**).

Van de Graaf et al. (1996) demostró la presencia de bacterias autótrofas que intervienen en la reacción de anammox, determinando que se debía usar cultivo con nitrito para su crecimiento. Además, se aclaró la ruta de conversión de amoniaco a nitrógeno gaseoso (**Leal, 2015**).

Actualmente existen más de 100 plantas en todo el mundo, en su mayoría se ubican en Europa seguido de Estados Unidos, indicando así que el interés por esta tecnología va en aumento (**Val del Río, 2105**).

Biorreactor de vertedero

La adición de humedad o lixiviados recirculados en los vertederos, la propuso Pohland en la década de 1970

que posteriormente se denominó biorreactor de vertedero (landfill bioreactor), mientras que Cheremisinoff y Morresi en 1976 mencionaron que el lixiviado recirculado mejorará la degradación de residuos y generación de gas (Feng, 2015).

Alfred P. Leuschner (1989) fue quien planteó que mediante la recirculación de lixiviados se logra una mejor degradación de la materia orgánica de los residuos, generando así un ambiente favorable para los microorganismos al interior del vertedero.

Fue así como Jesús Rodríguez en 1999 realizó una tesis doctoral donde planteó un biorreactor a escala piloto para la digestión anaerobia de residuos mediante la recirculación de lixiviados obteniendo resultados favorables al reducir la carga orgánica de los lixiviados.

A partir del 2001 comenzaron a funcionar 4 biorreactores de vertedero a gran escala con el objetivo de investigar el impacto en la biodegradación y estabilización de residuos sólidos, pero fue en el 2014 que la Oficina de Investigación y Desarrollo de Estados Unidos, ORD (de sus siglas en inglés Office of Research and Development), publicó el "Permiso de operaciones de biorreactores de vertederos" (EPA, 2018).

2. Fundamentos del tratamiento anaeróbico de lixiviados (biorreactores UASB, sistemas anammox y bioceldas)

Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

El reactor de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente trabaja de forma continua donde el afluente ingresa por la parte inferior del reactor y fluye a través de un manto de lodo que sube por acción de los gases generados, de tal manera que se va tratando conforme asciende (Ibáñez & Bayona, 2018). Presenta un separador trifásico GLS (gas, sólido, líquido) ubicado en la parte superior cuyo objetivo es separar el flujo tratado (ver figura 1), el cual sale por una tubería ubicada en la zona lateral (Salmerón, 2020). El biogás producido por la degradación se evacúa por la campana trifásica y el lodo retorna a la zona de digestión (Maldonado & Cajiao, 2017).

La degradación anaeróbica que se produce dentro del reactor es un proceso biológico donde las bacterias anaeróbicas digieren la materia orgánica con el objetivo de obtener energía para sobrevivir y generar gas metano (Rizvi et al., 2018). El proceso de digestión

se puede explicar con la reacción:

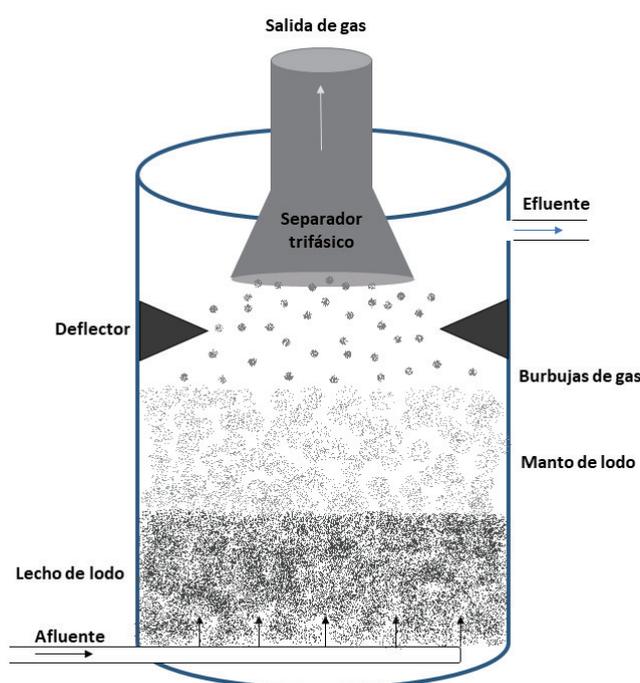
Materia orgánica \longrightarrow Nuevas Células + Energías para las células + CH₄ + CO₂ + Otros productos

Al interior del tanque reactor se forman 3 zonas para el tratamiento de lixiviados según Orozco & Zambrano, 2020: La zona de lecho de lodos, el cual se va al fondo del biorreactor lugar donde se encuentra la concentración de microorganismos formándose una biomasa en forma de gránulos que degradará el material orgánico y donde se producirán las reacciones bioquímicas.

Encima se encuentra el manto de lodo, capa con una menor velocidad de sedimentación, donde se encuentran los microorganismos distribuidos al interior del UASB, además presenta una menor concentración de lodos (**Castro, 2018**).

En la parte superior está la zona de reposo donde los lodos y gránulos que se han desprendido de la parte inferior se asientan nuevamente en el lecho (**Dutta et al., 2018**).

Figura 1. Esquema del biorreactor anaerobio de flujo ascendente (UASB). El afluente se depura por interacción del lecho y manto de lodo.



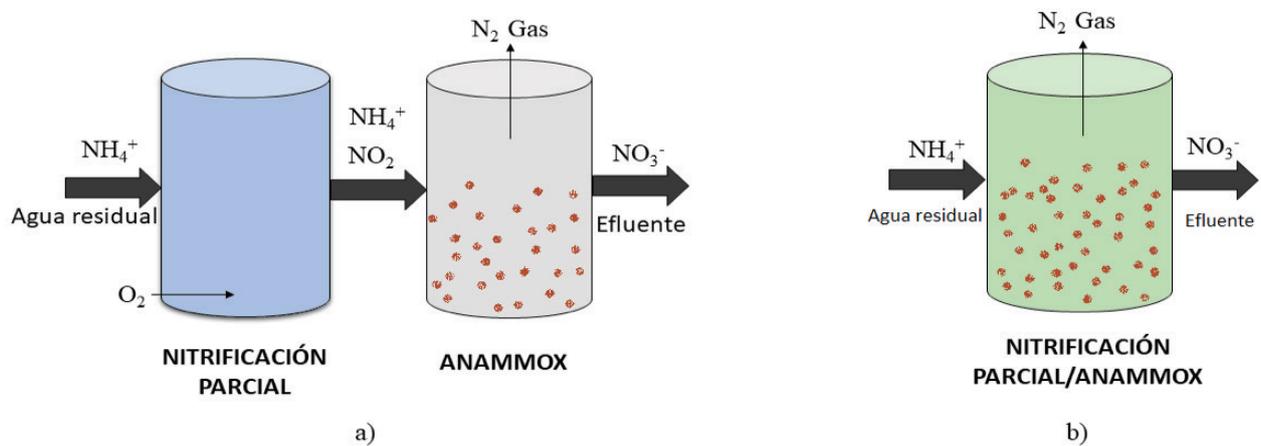
2.1. Oxidación anaerobia del ion amonio (anammox)

Esta tecnología es usada primordialmente para el tratamiento de lixiviados maduros que contienen una DQO no biodegradable y una elevada concentración de nitrógeno (**Ahmad et al, 2020**). El nitrógeno amoniacal de los lixiviados se debe principalmente a la hidrólisis y amonificación de los residuos orgánicos en presencia de nitrógeno (**Wu, 2021**).

El proceso anammox no puede darse por si solo debido a que necesita un efluente rico en amonio y nitrato, por lo que se requiere antes un sistema pre-oxidación de amonio a nitrito (50-60% de amonio) para su posterior conversión en N₂ (**Alzate, 2019**).

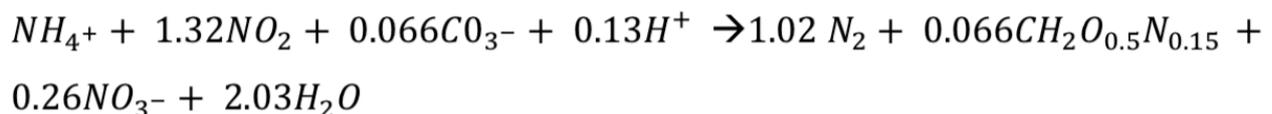
Por lo tanto, el proceso de eliminación del amoniaco se da en dos pasos (ver figura 2) el primero es la nitrificación parcial que es la conversión de amonio en nitrito por bacterias oxidantes de amonio (**Cho, 2020**), después actúa entonces el proceso de anammox donde el amonio restante reacciona con el nitrito generando gas dinitrógeno, eliminando intermediarios de óxidos nitrosos que causan el efecto invernadero (**Montesinos, 2015**).

Figura 2. Esquema del sistema anammox.



Nota: (a) de dos etapas y (b) de una sola etapa.

El proceso lo realizan bacterias anammox que son las encargadas de usar amonio (NH_4) como donante y nitrito (NO_2) como receptor de electrones para transformarlo gas nitrógeno (N_2) bajo condiciones anóxicas utilizando dióxido de carbono como fuente sin necesidad de materia externa (Gamoñ et al., 2019). Su crecimiento se debe a la fijación de dióxido de carbono (Ni & Zhang, 2013). Según Montesinos (2015) la reacción química del proceso de anammox es:



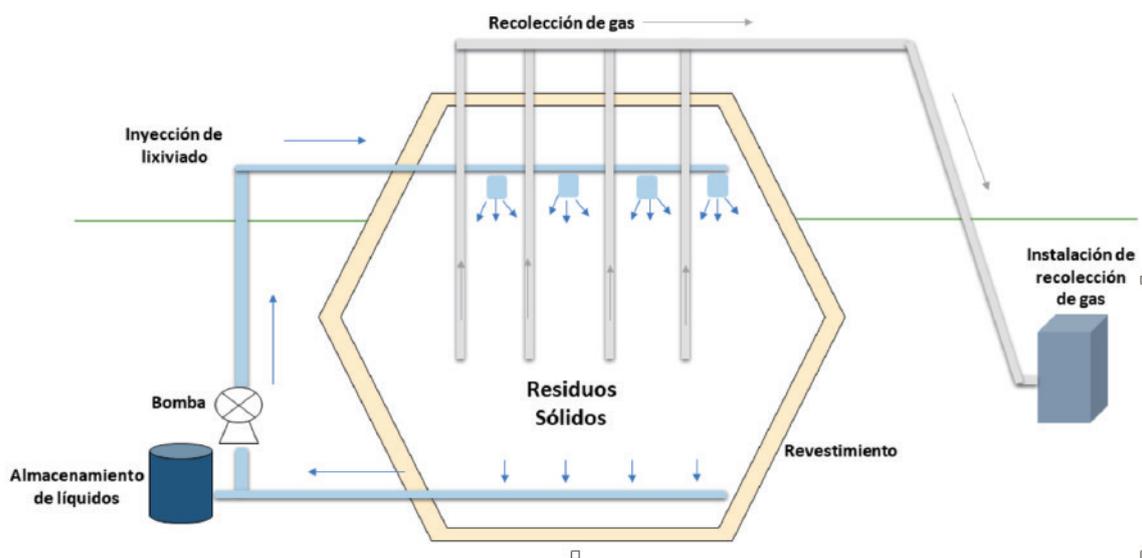
Biorreactor de vertedero (landfill bioreactor)

Es un biorreactor anaeróbico donde el lixiviado se recircula y así aumentar la humedad (40-60%) de la masa de desechos acelerando la biodegradación de los residuos del relleno sanitario mediante bacterias anaerobias (Addario & Ruggeri, 2016). Se genera una mayor velocidad de producción de biogás, el cual puede ser capturado evitando el efecto invernadero (ver figura 3).

El objetivo de estos vertederos es la rápida descomposición de los desechos creando condiciones favorables en la masa con lo que se pretende mantener estable a los residuos por un mayor tiempo evitando contaminaciones ambientales que al no descomponerse podría causar infiltraciones en el suelo (Rodrigo, 2020). A comparación de los rellenos sanitarios habituales donde se acumulan capas secas de basura (Lakshmikanthan & Sivakumar Babu, 2017) mediante el biorreactor de vertedero anaerobio el lixiviado es recolectado, almacenado, tratado y recirculado facilitando así según Chembukavua et al (2019):

- una rápida descomposición de los residuos
- lograr que las concentraciones de los contaminantes en el lixiviado estén dentro de los límites permisibles, en una corta duración
- la generación rápida de biogás que podría utilizarse para generar energía

Figura 3. Diagrama esquemático del vertedero de biorreactores anaeróbicos. Recirculación de lixiviado y rápida generación de biogás.



Factores operacionales

A continuación, se presenta la tabla 1, donde se ha comparado los factores operacionales de las tres tecnologías de tratamiento de lixiviados: biorreactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), oxidación anaerobia del ion amonio (anammox) y biorreactor de vertedero (landfill bioreactor).

Tabla 1. Factores operacionales de las tecnologías anaerobias para el tratamiento de lixiviados

Parámetro	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Oxidación anaerobia del ion amonio (anammox)	Biorreactor de vertedero (landfill bioreactor)
pH	6,5 - 8	6,7 - 8,3	6,8 - 8,0
Temperatura (°C)	30 - 38	20 - 43	20 - 45
Oxígeno disuelto (mg/L)	0-2,10	<0,1	0-0,18
Retención hidráulica	1 - 3 días	1 - 5 días	-
Humedad (%)	-	-	40 - 70
DQO del afluente (mg/L)	45.000	<40.000	30.000 - 70.000

Nota: (-) no aplica en el reactor

Se observa que el rango de temperatura de operación de los biorreactores UASB es ligeramente inferior que el de la otras tecnología, mientras que el tiempo de retención hidráulica de los sistemas anammox es ligeramente superior al tiempo de residencia de los rectores UASB (Rizvi et al., 2018), (Gamoñ et al., 2019). El rango de concentración de DQO del afluente que se alimenta a biorreactores de vertedero es ligeramente superior al alimentado de las otras tecnologías, mientras que el pH y la concentración de oxígeno disuelto son similares en los tres tipos de reactores (Addario & Ruggeri, 2016), (Ni & Zhang, 2013).

Ventajas y desventajas de cada tecnología

La tabla 2 indica las ventajas y desventajas encontradas en cada una de las tecnologías de tratamiento de lixiviados analizadas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las tecnologías para el tratamiento de lixiviado

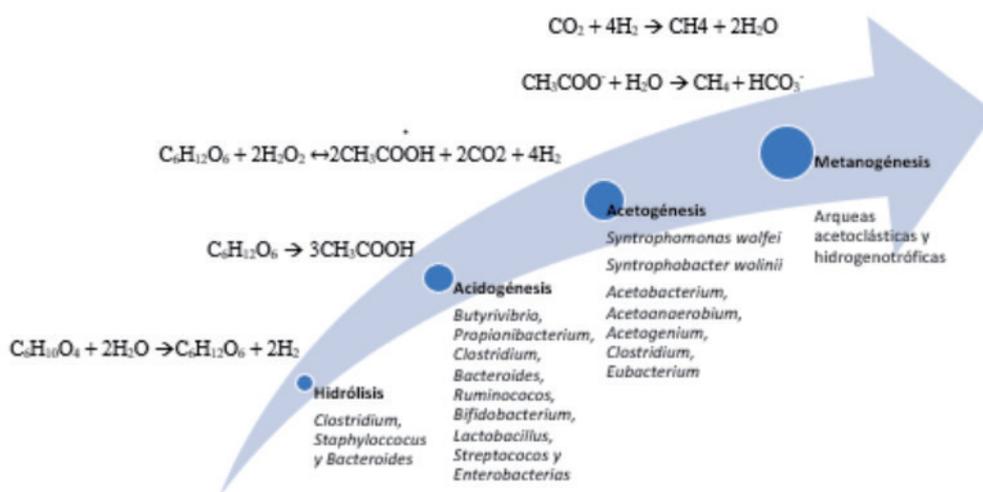
Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	<ul style="list-style-type: none"> -Simplicidad para montar el sistema con una menor producción de lodos. -Costos operacionales bajos a comparación de otros tratamientos (Dutta et al., 2018). -Fácil operación y mantenimiento. -Los lodos que se encuentran al interior del reactor pueden durar por largos periodos, la biomasa puede preservarse sin necesidad de que este constantemente alimentando hasta por un par de meses (Quispe, 2019). -Menor gasto energético ya que no se requiere agitadores mecánicos debido a que la turbulencia al interior del reactor es causada naturalmente por las burbujas generadas del biogás (Alayon, 2020). -El proceso de digestión se realizan en un mismo tanque sin necesidad de utilizar más compartimentos adicionales (Hoyos 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> -Tiempo elevado requerido para la puesta en marcha de reactor y su estabilización (Veiga, 2015) -Se genera sulfuro de hidrógeno provocando malos olores debido a la presencia de sulfatos. -La existencia de ciertos minerales disueltos y amoniaco presentes producen toxicidad durante el consumo de materia orgánica de los microorganismos (Reyes, 2015). -Sensible a la presencia de agentes tóxicos y a los cambios de temperatura y pH en el medio (Giraldo, 2020). -La acumulación de materia en el reactor ocasiona un grave problema, taponando los compartimentos por donde pasa el efluente con lixiviado produciendo un colapso (Álvarez, 2006).
Oxidación anaerobia del ion amonio (Anammox)	<ul style="list-style-type: none"> -No necesita de una fuente de carbono orgánico, ya que las bacterias anammox utilizan como donador de electrones al amoniaco (Leal, 2015). -Las bacterias empleadas se vuelven inactivas si presentan condiciones poco favorables para sobrevivir pero rápidamente se activan bajo condiciones favorables (Cho & Nguyen, 2020). -Al tratarse de un proceso autótrofo no necesita de materia orgánica por lo que genera un ahorro en la adición de reactivos (Val del Río, 2014). -Generan un 85% menos de lodo (Garrido y Paredes, 2019). 	<ul style="list-style-type: none"> -Largo periodo de puesta en marcha por el lento crecimiento de las bacterias anammox ($\mu_{max}=0,065 \text{ d}^{-1}$) las cuales presentan alta sensibilidad bajo condiciones operacionales dentro del reactor, además que se muestran vulnerables ante otros microorganismos que compiten por el mismo sustrato (Roldán, 2018). -Se requieren aguas residuales con baja relación de carbono/nitrógeno menor a 5 ya que la materia orgánica podría inhibir el proceso (Val del río, 2014). -Baja eficiencia en la degradación de materia orgánica

<p>Biorreactor de vertedero (landfill bioreactor)</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Rápida estabilización de la fracción orgánica facilitando la producción de biogás en un menor tiempo (Addario & Ruggeri, 2016). -Descomposición microbiana acelerada de los residuos disminuyendo el volumen de los desechos (Cossu & Grossule, 2018). -Reduce el efecto invernadero ya que disminuye la emisión de gases al ambiente (Kasubaska & Wzorek, 2017). -Mayor capacidad de espacio para los desechos debido al rápido asentamiento en el periodo de funcionamiento (Rodrigo et al., 2020). -Los desechos tratados y estabilizados pueden venderse como abono, además si el vertedero cierra la tierra puede ser utilizada al instante (Kasubaska & Wzorek, 2017). -Mayor sostenibilidad por lo que permite la posible reutilización de la tierra (Hecham, 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> -Filtración de lixiviados cuando el líquido es incorporado a una alta presión o cuando la velocidad del caudal es mayor (Mathew, 2013). -El contenido de amoníaco es un problema ya se encuentra continuamente recirculando por lo que no logra ser degradado completamente al interior del reactor (Rodrigo, 2020). -Incremento de olores e inestabilidad física de la masa de desechos debido al aumento de humedad (Grossule, 2018). -Costo elevado de puesta en marcha debido a que es un trabajo de ingeniería donde se debe realizar instalaciones de tuberías e incremento en los costos de operación y monitoreo (Tolaymat & Morris, 2014).
---	---	--

5. Microbiología de la degradación de contaminantes orgánicos en lixiviados de rellenos sanitarios

En la degradación de materia orgánica de lixiviados intervienen bacterias anaerobias estrictas y facultativas durante las distintas etapas biológicas de digestión según (**García, 2016**):

Figura 4. Etapas biológicas de digestión



Nota: Representación de las etapas biológicas de digestión, reacciones químicas y microorganismos que intervienen.

Como se muestra en la figura 4 la primera etapa es la hidrólisis en donde intervienen bacterias hidrolíticas acidogénicas, mediante la generación de enzimas extracelulares transforman moléculas complejas en moléculas solubles degradables (Chelliapan et al., 2020). En la acidogénesis, mediante fermentación, los sustratos hidrolizados se convierten en ácidos orgánicos, la glucosa se convierte en ácido acético (Ibáñez & Bayona, 2018). En la acetogénesis los ácidos grasos generados son digeridos convirtiéndose en H₂, CO₂ y ácido acético. Se genera ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono (Vélez, 2020). En la última etapa, la metanogénesis, un 30 % del metano se transforma usando hidrógeno, mientras que el otro 70% es generado por la conversión del acetato (Jesús, 2017)

Para la eliminación de amonio presente en los lixiviados se emplean bacterias Anammox quimiolitotróficas anaeróbicas obligadas las cuales son un grupo diferente ya que las reacciones ocurren en una membrana celular llamada Anammoxozoma, sitio en el cual se da el catabolismo del anammox (Kumar et al, 2017).

Mediante técnicas moleculares se han detectado grupos específicos de microorganismos no cultivables. Se clasificaron dentro del Dominio Bacteria, pertenecientes al Filo Planctomycetes y en el Orden de los Planctomycetales y Brocadiales, donde constan las siguientes especies bacterianas:

Tabla 3. Especies bacterianas anammox reportadas en diferentes estudios

Bacterias reportadas en diferentes estudios	Fuente bibliográfica
<i>Candidatus Brocadia sinica</i> <i>Candidatus Brocadia brasiliensis</i>	(Araujo, et al., 2011)
<i>Candidatus Brocadia anammoxidans</i> <i>Candidatus Kuenenia stuttgartiensis</i> <i>Candidatus Scalindua wagneri</i> <i>Candidatus Anammoxoglobus propiuniua</i> <i>Candidatus Jettenia asiática</i>	(Sultana, 2016).
<i>Candidatus Brocadia fulgida</i>	(Hendrickx, et al., 2014)

Las especies *Candidatus Brocadia* y *Candidatus Kuenenia* son los organismos que se encuentran con mayor frecuencia en los enriquecimientos de plantas de tratamiento de aguas residuales y reactores de anammox a gran escala. Tienen forma de cocos con diámetro en un rango de 800 a 1100 nm, presentando una coloración naranja por la concentración de citocromos en el interior de sus células (Leal, 2015).

El proceso anammox está estimulado por el óxido nítrico, hidracina e hidroxilamina que cumplen la función de intermediarios creando una fuerza motriz de protones a través de la membrana, que es utilizada para generar ATP (Gonzalez et al, 2018).

Existen dos vías para la biotransformación del nitrógeno en las bacterias anammox según análisis de Wu (2020). La primera vía metabólica el nitrito (NO₂) se reduce a hidroxilamina (NH₂OH), para después combinarse con amonio formando así la hidracina (N₂H₄). Un ejemplo de esto se produce en la bacteria *Candidatus Brocadia*. La segunda vía el nitrito (NO₂) se reduce a óxido nítrico (NO), posteriormente se

combina con el amoniaco para formar hidracina. La bacteria *Candidatus Kuenenia* presenta este proceso. En las dos vías después de la formación de hidracina esta es oxidada a nitrógeno gaseoso.

Escalado de la tecnología

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del escalado de las tecnologías de tratamiento de lixiviados analizadas, en perspectiva de su aplicación a escala piloto y a gran escala.

Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

Tabla 4. Reactores UASB a escala piloto en rellenos municipales para el tratamiento de lixiviados

Ubicación	Volumen del reactor (L)	Resultados obtenidos	Fuente
Ecuador	-	Remoción de DBO de 83,73% y DQO 74,97% mientras que para el nitrógeno amoniacal se obtuvo una reducción de 86,30%.	(Arias et al., 2020).
Colombia	5	Valores de DQO disminuyeron en un 80% mientras que el DBO un 87%.	(Caicedo, 2006)
Ecuador	10,8	Se obtuvo un 82% en reducción de DBO mientras que el DQO disminuyó un 75%, además el Nitrógeno amoniacal se redujo en un 85, 61 %.	(Amaguaya, 2019)
Perú	7,5	Remoción de DQO del 76,90%.	(Castro, 2018)
India	1,5	Se logró una eficiencia de remoción de 67 y 91% de DQO. Sin embargo, se determinó que la biomasa presenta sensibilidad por lo que se debe tener un monitoreo constante de inhibidores tóxicos.	(Singh & Mittal, 2012)

Nota: (-) dato no especificado en el estudio

Tabla 5. Reactores UASB a gran escala en rellenos municipales para el tratamiento de lixiviados

Ubicación	Volumen (m ³)	Resultados obtenidos	Fuente
India	38,48	Remoción de 51% para DQO, 56% para DBO y 54% para TSS, además de ser capaz de generar biogás entre 0,20-0,40 m ³ kg ⁻¹ DQO eliminado.	(Gaur et al, 2017)
Colombia	-	Resultados satisfactorios con remoción del 66% de DBO 5, 52% de DQO y 60 % de SS. Además de una producción de 82,4% de Metano.	(Salasar et al., 2018)
Cuba	38,48	Porcentajes de eliminación de DBO y DQO satisfactorios.	(Cárdenas et al, 2020)
India	5000	Remoción de DQO del 74%, DBO del 75% y SST del 75%	(Gandarillas et al, 2017)

Nota: (-) dato no especificado en el estudio

Oxidación anaerobia del ion amonio (anammox)

Tabla 6. Estudios a escala laboratorio del proceso anammox

Ubicación	Reactor empleado	Volumen del reactor (L)	Porcentaje de eliminación de nitrógeno amoniacal (%)	Fuente
Polonia	SBR	20	86	(Tomaszewski et al, 2018)
China	UASB	4,46	87,5	(Zhang & Zhou, 2006).
China	MBBR	-	>90	(Li et al, 2018).
Turkia	CSTR	2,3	78	(Akgul et al, 2013)
Vietnam	Reactor híbrido HAR	5	>90	(Nath et al, 2014)

Nota: (-) dato no especificado en el estudio

Tabla 7. Estudios a gran escala del proceso Anammox

Ubicación	Volumen	Reactor empleado	Resultados Obtenidos	Fuente
Holanda	70 m ³	Sharom-Anammox	Lento crecimiento de biomasa generando problemas técnicos y operativos Funcionamiento estable a altas cargas orgánicas	(Abma 2007)
Suecia	256 m ³	MBBR	Remoción de nitrógeno >80%	(Dimitrova, 2020)
Alemania	165 m ³	Planta mejorada combinando lodos activados y carbón activado biofilm	Eliminación total de nitrógeno amoniacal del 94%	(Azari, 2017).

Biorreactor de vertedero (landfill bioreactor)

Tabla 8. Estudios a escala laboratorio del biorreactor de vertedero

Ubicación	Resultados obtenidos	Fuente
Italia	Resultados favorables en la disminución de DBO y DQO, sin embargo, no se obtuvo gran porcentaje de biogás	2016).
México	Baja eficiencia en la disminución del contenido de metales pesados. Aceleración en la biodegradación de la materia orgánica.	(Berriela et al, 2015)
India	Se logró una eliminación del 54% del contenido de carbono y un 99% de DQO del lixiviado	(Patil & Singh, 2016)
India	Se aceleró la tasa de producción de metano en un 25%. El tiempo de degradación de los residuos se redujo en un 25% a comparación del vertedero anterior.	(Mali et al, 2012).

Tabla 9. *Estudios a gran escala del biorreactor de vertedero*

Ubicación	Resultados obtenidos	Fuente
Canadá	Se mejoró el asentamiento de residuos y resultó en una recuperación del espacio aéreo del 30%, que sirvió para verter más residuos.	(Warith, 2002)
Estados Unidos	Se logró una producción de biogás más rápida, un aumento de las tasas de sedimentación y una disminución acelerada de la concentración de ciertos contaminantes.	(Abdallah & Kennedy, 2013).
Países Bajos	La biodegradación se logró en 4 años con un 90% de reducción del material orgánico	(Oonk et al. 2013)
Korea	Efectos positivos de la nitrificación ex situ + desnitrificación in situ. Estabilización acelerada de residuos	(Chung et al. 2015)

7. Retos de la tecnología, aspectos a desarrollar

Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)

La ineficiencia que presenta comúnmente el reactor UASB se debe a fallas en el diseño hidráulico y geometría que impiden tener un buen desempeño en la remoción de lixiviado, por lo que para su dimensionamiento a gran escala se deben tomar en cuenta como parámetros de diseño fundamental (Gandarillas, 2017).

El principal reto para la implementación de estos reactores en zonas frías es la temperatura debido a que si es menor a 25°C la actividad microbiana se ve afectada. Se han realizado estudios con temperaturas psicrófilas (<20°C) que han dado resultados poco satisfactorios por lo que debe ser un indicio para futuras investigaciones (Jacobo, 2019).

El periodo de arranque del reactor UASB ha venido siendo un desafío para quienes lo han llevado a gran escala, desde sus inicios el periodo de tiempo ha sido extenso, sin embargo, en estudios recientes se ha visto disminuido. A pesar de esto sigue siendo un problema para su puesta en marcha (Castro, 2019).

Oxidación anaerobia del ion amonio (Anammox)

Uno de los principales retos para ampliar la aplicabilidad del sistema PN-Anammox se ha centrado en aguas residuales con altas relaciones DQO / N, ya que los efluentes

industriales contienen en muchos casos concentraciones de materia orgánica que pueden afectar negativamente el desempeño del proceso (Kumar, 2017).

Las bacterias anammox son muy difíciles de aislar en un cultivo puro ya que crecen en una mezcla de poblaciones bacterianas teniendo una gran dificultad para una utilización a gran escala debido a la falta de disponibilidad de biomasa suficiente para el proceso, por lo que varios estudios se han realizado para el cultivo independiente de esta bacteria que aún siguen en desarrollo (Ni et al., 2020).

El descubrimiento de nuevas especies de bacterias anammox que tienen propiedades especiales llama la atención de investigadores de todo el mundo entre ellas *Brocadia sinica* que junto con bacterias anammox dependientes de sulfato permitan tener una mayor eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal (**Quoc et al., 2015**).

Biorreactor de vertedero (landfill bioreactor)

Uno de los desafíos que ha venido enfrentando los biorreactores de vertedero es la acumulación de amoníaco en el lixiviado y al interior del vertedero, a pesar de que la recirculación de lixiviado ayuda en el proceso aun si sigue habiendo una degradación lenta a gran escala (**Grossule, 2018**).

La infraestructura de los biorreactores de vertederos es uno de los aspectos a desarrollar que aún siguen estando en análisis para su implementación a gran escala debido a las posibles fugas de lixiviados de los lados del relleno sanitario (**Byun, 2019**).

Otro aspecto que aún debe seguirse estudiando es el aumento de la presión del líquido en el revestimiento, ya que en estudios realizados han aumentado potencialmente el riesgo de contaminación del agua subterránea debido a la recirculación de lixiviados (**Hecham, 2016**).

8. Análisis de costos

Los biorreactores UASB presentan una alternativa rentable debido a que el proceso se lo realiza en un solo tanque y no se requieren de equipos para el control del proceso de elevada sofisticación. A escala industrial los costos de inversión de la planta de tratamiento de tipo UASB están alrededor de 300 000 a 750 000 USD cuando la capacidad del reactor es de 1000 m³ (**Bermúdez, 2003**).

Por otro lado, por lo general el sistema anammox se lo realiza en dos etapas elevando así los costos puesto que se emplean dos reactores en el primero la nitrificación parcial de amonio y en el reactor siguiente el proceso anammox. Se estima que el proceso anammox cuesta \$ 4.09 por cada kg de nitrógeno eliminado según análisis de Fux y Siegrist (2004).

Los costos generales para los biorreactores de vertedero pueden ser de dos a cuatro veces mayor que un vertedero convencional (**Grossule, 2018**), debido a que los rellenos sanitarios de biorreactores están diseñados y operados con un estándar más alto. En un biorreactor con un tamaño de 0,20 ha con 7700 toneladas de residuos se reportan valores de 959 000 USD.

Bibliografía

- Ahmad, I., Abdullah, N., Chelliapan, S., Yuzir, A., Koji, I., Al-Dailami, A., & Arumugham, T. (2020). Effectiveness of Anaerobic Technologies in the Treatment of Landfill Leachate. In *Solid Waste Management*. IntechOpen. doi:10.5772 / intechopen.94741
- Abdallah, M., & Kennedy, K. (2013). Advanced Monitoring and Control of Anaerobic Digestion in Bioreactor Landfills. *Biodegradation - Engineering and Technology*. 162-186. doi:10.5772/55715
- Abma, W. R., Schultz, C. E., Mulder, J. W., Van der Star, W. R. L., Strous, M., Tokutomi, T., & Van Loosdrecht, M. C. M. (2007). Full-scale granular sludge Anammox process. *Water Science and Technology*, 55(8-9), 27-33.
- Addario, M., & Ruggeri, B. (2016). Landfill Bioreactor Technology for Waste Management. *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*, 211–235. doi:10.1007/978-981-10-0150-5_8
- Akgul, D., Aktan, C.K., Yapsakli, K. et al. (2013). Treatment of landfill leachate using UASB-MBR-SHARON-Anammox configuration. *Biodegradation* 24, 399–412. <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9597-y>
- Alzate Marín, J. C. (2019). Remoción biológica de nitrógeno por nitrificación y desnitrificación aeróbica en reactor de cargas secuenciales SBR (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata)
- Amaguaya, G. (2019). “Diseño De Un Sistema Biológico Para La Depuración De Lixiviados Generados En El Relleno Sanitario De Porlón.” (Tesis de Grado). Repositorio Institucional- Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.
- Arias, F. E., Amaguaya, E. G., Carrera, L. S., & Rodríguez, A. A. (2020). Diseño de un biorreactor tipo UASB para el tratamiento de lixiviados provenientes de residuos urbanos. *Ciencia Digital*, 4(3), 138-151. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1306>
- Ayala R., A. (2018). Facultad de Ingeniería Facultad de Ingeniería. Ucv, 0–116. mayor que un vertedero convencional (
- Grossule, 2018), debido a que los rellenos
- Azari, M., Walter, U., Rekers, V., Gu, J.-D., & Denecke, M. (2017). More than a decade of experience of landfill leachate treatment with a full-scale anammox plant combining activated sludge and activated carbon biofilm. *Chemosphere*, 174, 117–126. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.123
- Berriela, M. D. C. H., Hernández, M. C. D., de la Fuente, J. L., Delgado, O. B., & Márquez-Benavides, L. (2015). Efecto del volumen y frecuencia de la recirculación de lixiviados en el contenido de metales pesados en lixiviados y residuos degradados. *VSIR-REDISA*
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos. Argentina: BID. Recuperado el, 5.
- Cárdenas, T., Santos, R. F., Contreras, A. M., Rosa, E., & Correa -Cortés, Y. (2020). Diseño de una planta para el tratamiento del lixiviado en Vertedero de Sagua La Grande. *Tecnología Química*, 40(2), 413–427.
- Castro, J. (2018). Evaluación de la remoción de materia orgánica en un reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Huancavelica (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1648>.
- Caicedo Messa, F. J. (2006). Diseño, construcción y arranque de un reactor USB piloto para el

tratamiento de lixiviados. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3413/franciscojaviercaicedomessa.2006.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Chelliapan, S., Arumugam, N., Md. Din, M. F., Kamyab, H., & Ebrahimi, S. S. (2020). Anaerobic treatment of municipal solid waste landfill leachate. *Bioreactors*, 175–193. doi:10.1016/b978-0-12-821264-6.00011-5
- Cho, Sunja & Kambey, Cicilia & Nguyen, Van Khanh. (2020). Performance of Anammox Processes for Wastewater Treatment: A Critical Review on Effects of Operational Conditions and Environmental Stresses. *Water* 12, no. 1:20. <https://doi.org/10.3390/w12010020>
- Chung J, Kim S, Baek S, Lee N-H, Park S, Lee J, Lee H, Bae W (2015) Acceleration of aged-landfill stabilization by combining partial nitrification and leachate recirculation: a field-scale study. *J Hazard Mater* 285:436–444
- Dimitrova, I., Dabrowska, A., & Ekström, S. (2020). Start-up of a full-scale partial nitrification-anammox MBBR without inoculum at Klagshamn WWTP. *Water Science and Technology*. doi:10.2166/wst.2020.271
- Dutta, A., Davies, C., & Ikumi, D. S. (2018). Performance of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and other anaerobic reactor configurations for wastewater treatment: A comparative review and critical updates. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 67(8), 858–884. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.090>
- Escamilla, P. E. (2019). Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1), 32- 44.
- Filho. (2017). Lixiviado de aterro sanitário: alternativas de tratamento para o cenário brasileiro. 1 recurso online (246 p.). Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331746>>. Acesso em: 3 set. 2018.
- Gamoń, F., Tomaszewski, M., & Ziemińska-Buczyńska, A. (2019). Ecotoxicological study of landfill leachate treated in the ANAMMOX process. *Water Quality Research Journal of Canada*, 54(3), 230–241. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2019.042>
- Gandarillas R., V., Saavedra, O., Escalera, R., & Montoya, R. (2017). Revisión De Las Experiencias En El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas Mediante Reactores Uasb En Cochabamba-Bolivia Comparadas Con Las De Latinoamérica, India Y Europa. *Investigacion & Desarrollo*, 17(1), 83–98. <https://doi.org/10.23881/idupbo.017.1-7i>
- Garcia, N. (2016). Tratamiento biológico de aguas residuales industriales mediante reactores anaerobios de alta eficacia biological treatment of industrial wastewater by means of high efficiency anaerobic reactors. [Universidad Autónoma de Madrid]. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/677073/garciamancha_delgado_ureña_nuria.pdf?sequence=1
- Gaur, R.Z., Khan, A.A., Lew, B. et al. Performance of Full-Scale UASB Reactors Treating Low or Medium Strength Municipal Wastewater. *Environ. Process.* 4, 137–146 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0208-0>
- Gonzalez-Martinez, A., Muñoz-Palazon, B., Rodriguez-Sanchez, A., & Gonzalez-Lopez, J. (2018). New concepts in anammox processes for wastewater nitrogen removal: recent advances and future prospects. *FEMS microbiology letters*, 365(6), fny031.
- Ibáñez, R., & Bayona, B. (2018). Biológico , Reactor UASB y humedal superficial , (Tesis de Grado) Univerisdad de la Salle, Sotaquirá - Boyacá.

- Karapidakis, E. S., Tsave, A. A., Soupios, P. M., & Katsigiannis, Y. A. (2010). Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(3), 599-608.
- Kumar, M., Daverey, A., Gu, JD y Lin, JG (2017). *Procesos de Anammox*.
- *Desarrollos actuales en biotecnología y bioingeniería* (págs. 381-407). Elsevier.
- Leal, C. D. (2015). *Avaliação do efeito de diferentes relações DQO/N sobre o processo anammox e viabilidade da aplicação do processo como pós-tratamento de efluente de reator UASB tratando esgoto doméstico. (Dissertação em Saneamento). Universidade Federal De Minas Gerais. Programa De Pós- Graduação Em Saneamento, Belo Horizonte.*
- Li, H., Han, K., Li, Z., Zhang, J., Li, H., Huang, Y., ... Wang, Y. (2018). Performance, granule conductivity and microbial community analysis of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors from mesophilic to thermophilic operation. *Biochemical Engineering Journal*, 133, 59–65. doi:10.1016/j.bej.2018.01.029
- López Vázquez, CM, Buitrón Méndez, G., García, HA y Cervantes Carrillo, FJ (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. *Water Intelligence Online*, 16, 9781780409146. doi: 10.2166 / 9781780409146
- Mali Sandip T, Khare Kanchan C, Biradar Ashok H (2012) Enhancement of methane production and bio-stabilization of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill. *Bioresour Technol* 110:10–17
- Montesinos, A. V. (2015). *Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos (Tesis Doctoral)*. Repositorio Digital-Universidad Da Coruña.
- Nájera-Aguilar, Hugo & Neftalí, Ma & Rojas-Valencia, María. (2011). *Manejo de biogás y lixiviados en rellenos sanitarios del centro del país, un panorama general*. Universidad Nacional Autónoma de Méxic. Escuela de Ingeniería Ambiental.
- Nhat, P. T., Biec, H. N., Mai, N. T. T., Thanh, B. X., & Dan, N. P. (2014). Application of a partial nitrification and anammox system for the old landfill leachate treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95, 144-150.
- Orozco-Barrantes, V., & Zambrano-P., D. (2020). *Determinación de lixiviados de relleno sanitario de San Ramón y selección de su sistema de tratamiento. (Tesis de grado)*. Repositorio Digital- Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Patil, B. S., C, A. A., & Singh, D. N. (2016). Simulation of municipal solid waste degradation in aerobic and anaerobic bioreactor landfills. *Waste Management & Research*, 35(3), 301–312. doi:10.1177/0734242x16679258
- Rizvi, H., Ali, S., Yasar, A., Ali, M., & Rizwan, M. (2018). Applicability of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for typical sewage of a small community: its biomass reactivation after shutdown. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(8), 1745–1756. <https://doi.org/10.1007/s13762-017- 1537-2>
- Salazar-Larrota, L., Uribe-García, L., Gómez-Torres, L., & Zafra-Mejía, C. (2018). Analysis of the efficiency of UASB reactors in a municipal wastewater treatment plant. *DYNA (Colombia)*, 86(209), 319–326. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.70332>
- Singh, V., & Mittal, A. K. (2012). Toxicity and treatability of leachate: application of UASB reactor for leachate treatment from Okhla landfill, New Delhi. *Water Science and Technology*, 65(10), 1887-1894.
- Sultana, S. (2016). *Molecular and Kinetic Characterization of Anammox Bacteria Enrichments and Determination of the Suitability of Anammox for Landfill Leachate Treatment. (Master's Thesis)*. Oregon State University. Chemical, Biological and Environmental Engineering.

- Tomaszewski, Mariusz & Cema, Grzegorz & Twardowski, Tomasz & Ziemińska-Buczyńska, Aleksandra. (2018). Performance of the anammox sequencing batch reactor treating synthetic and real landfill leachate. *E3S Web of Conferences*. 44. 00179. 10.1051/e3sconf/20184400179.
- Vélez, E. (2020). “Análisis Del Reactor Anaeróbico De Flujo Ascendente (Uasb) Para Aprovechamiento Energético En Pequeñas Unidades Agroproductivas En Imbabura.” In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Warith, M., 2002. Bioreactor Landfills: experimental and field results. *Waste Management* 22 (1), 7–17.
- Wu, G., Zhang, T., Gu, M., Chen, Z. y Yin, Q. (2020). Revisión de las características de la bacteria anammox y estrategias para la puesta en marcha de anammox para la gestión sostenible de los recursos de aguas residuales. *Ciencia y Tecnología del Agua*. doi: 10.2166 / wst.2020.443
- Zafra, C., & Romero, D. (2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 125–147. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a8>
- Zhang, H., & Zhou, S. (2006). Treating leachate mixture with anaerobic ammonium oxidation technology. *Journal of Central South University of Technology*, 13(6), 663–667. doi:10.1007/s11771-006-0005-9