



EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y PERSPECTIVAS FUTURAS DEL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS

HISTORICAL EVOLUTION AND FUTURE PROSPECTS OF THE ACTIVATED SLUDGE SYSTEM

Laura Victoria Gutiérrez Montoya¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua

¹laura.gutierrez@dacia.uni.edu.ni <https://orcid.org/0009-0008-8717-3911>

(Recibido/received: 23-septiembre-2024; aceptado/accepted: 28-noviembre-2024)

RESUMEN: El sistema de lodos activados es un sistema biológico, implementado para el tratamiento de aguas residuales industriales, agrícolas y domésticas; se fundamenta en la degradación de la materia orgánica utilizando las bacterias heterótrofas facultativas presentes; para lograr comprender el mecanismo bioquímico y microbiológico detrás de este proceso y utilizarlo a favor de la depuración de las aguas residuales, además de acoplarlo con un sistema hidráulico transcurrieron 120 años de investigaciones y avances, que son descritos a nivel general en este artículo; esto se realizó a través de la elaboración de un estado del arte y evaluación de antecedentes, dónde los principales hallazgos científicos son contractados en aspectos biológicos que incluye la fundamentación bioquímica, componente hidráulico, principales problemáticas en los factores ambientales y una evaluación de perspectivas a futuro dentro del componente biotecnológico para el aprovechamiento de los subproductos del proceso.

PALABRAS CLAVE: Biomasa activa; criterios hidráulicos; biotecnología en lodos activados; remediación ambiental.

ABSTRACT: The activated sludge system is a biological system, implemented for the treatment of industrial, agricultural and domestic wastewater; it is based on the degradation of organic matter using the facultative heterotrophic bacteria present; to understand the biochemical and microbiological mechanism behind this process and use it in favor of wastewater purification, in addition to coupling it with a hydraulic system, 120 years of research and progress, which are described at a general level in this review article; this was carried out through the development of a state of the art and background evaluation, where the main scientific findings in biological aspects are contracted, including the biochemical basis, hydraulic components, main problems in environmental factors and an evaluation of future perspectives within the biotechnological component for the use of by-products of the process.

KEYWORDS: Active biomass; hydraulic criteria; biotechnology in activated sludge; environmental remediation

INTRODUCCIÓN

La evolución tecnológica ha permitido el progreso de la sociedad a través del tiempo, los sistemas de tratamiento de aguas residuales no han sido la excepción de esto, principalmente los sistemas biológicos, pues durante muchos años estos mecanismos no eran comprendidos a profundidad por el grado de complejidad que implicaba su manejo; en el caso particular de este sistema, transcurrieron décadas para el pronunciamiento acerca de un tratamiento que involucraba la producción de una masa activada con microorganismos no patógenos capaces de estabilizar la materia orgánica de una forma eficiente, utilizando los recursos mínimos y con los mecanismos de remoción más altos de la época (Shanahan, 2006). Una de las fascinaciones y precisamente la parte más compleja de su estudio fueron los mecanismos microbiológicos y bioquímicos implicados, como la ruta de degradación por las bacterias heterótrofas facultativas.

Desde la propuesta antecesora de Smith, (1872) previo al descubrimiento oficial y patente por parte de Arden y Lockett, (1914) hasta propuestas más recientes como la de Rittman y McCarty, (2010) que involucra sistemas solares fotovoltaicos para aminorar los costos energéticos y las investigaciones de Moeller y Tomasini, (2004); Díaz-Rodríguez *et al.*, (2016) donde se plantea el aprovechamiento de los subproductos generados por la estabilización de la materia orgánica para aplicaciones biotecnológicas. Los avances sustanciales, corresponden a una parte de la evolución histórica del proceso de lodos activados, implementado en la actualidad en más de 900 plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo domésticas e industriales, con sus diversas variantes en el proceso (flóculos, biopelículas y gránulos).

La búsqueda de información se realizó tanto en idioma español e inglés, los operadores booleanos implementados corresponden a AND (y) y OR (o), para las palabras claves y variables específicas delimitadas, se utilizó bases de datos científicas como: ScienceDirect, Scopus Taylor y Francis y Springer, con la palabra clave “lodos activados” “microbiología en los procesos aerobios”, “sistemas de tratamiento antecesores”; las variables específicas para delimitar la búsqueda eran “bioquímica”, “criterios hidráulicos”, “perspectivas” y aquellas relacionadas con su aplicación, diseño e implementación dentro del componente de ingeniería sanitaria para depuración de aguas residuales. Posterior a la revisión bibliográfica se realizó una línea de tiempo, considerando los estudios en conjunto, teorías científicas, planteamientos teóricos, mejoras e implementaciones en el proceso a nivel microbiológico y sanitario. El objetivo del artículo de revisión es documentar a través de un escrito integral y consolidado la evolución del sistema de lodos activados para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y sus perspectivas a futuro, que permitan una mayor comprensión en la vinculación de los mecanismos hidráulicos, ambientales y biológicos, así como el planteamiento de la potencial problemática ambiental, ocasionada por la naturaleza del proceso productivo, algo que no había sido previsto hasta hace algunos años y es objeto de interés ante la creciente demanda y las estrategias de gestión ambiental del mismo.

DESARROLLO

Los lodos activados son un proceso biológico empleado en el tratamiento de aguas residuales convencional, que consiste en el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculos en un depósito agitado, aireado y alimentado con el agua residual, que es capaz de metabolizar como nutrientes los contaminantes biológicos presentes en esa agua (Alpírez et al., 2017).

El sistema de lodos activados que conocemos en la actualidad es bastante práctico, sencillo y funcional, sin embargo, ha enfrentado una serie de cambios, mejoras y modificaciones a través de la historia. Aunque su descubrimiento directo se le atribuye a (Arden y Lockett, 1914); de acuerdo a Méndez et al., (2004) “El primer indicio de aireación de aguas residuales en un circuito cerrado corresponde al Dr. Roberto Angus Smith, en su publicación de 1872 como una hipótesis planteada, sin embargo, se tenía total certeza de esto hasta principios de la década de 1870 cuando lo oficializó en su segunda publicación y lo demostró a través de una serie de ensayos”. (Smith, 1872) establece que el aire, corresponde a una composición gaseosa abundante y rica en nitrógeno independientemente de su grado de su contaminación favorece a la oxidación de diversa materia orgánica, principalmente los macronutrientes, presentes en la mayoría de efluentes de aguas residuales sobre todo en las de origen doméstico. Smith concluye que la aireación directa y continua de aguas residuales en tanques, acelerará los procesos de degradación de materia orgánica, además esto podría ser implementado en las aguas residuales cuyo origen es un proceso agrícola, como camaroneras, granjas avícolas, plantas de procesamiento de cárnicos y tenerías.

Evolución histórica

Con los principios establecidos por (Smith, 1872) diversos investigadores estudiaron la influencia de la aireación en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. De acuerdo a Martin (1927) “Un éxito algo mayor fue obtenido en estudios de filtros aireados oficialmente conducidos en la estación experimental de Lawrence en 1890 donde se planteó que las unidades de película fija fueron más receptivas al estímulo de la aireación a causa de su biomasa existente, mientras que los tanques de aireación propuesto por Smith eran menos eficientes por la carencia de materia biológica de forma permanente, puesto que no se aplicaba el principio de reactor de lecho fijo”.

Durante los próximos años, la importancia de un principio suspendido para tratamiento biológico mejorado se hizo más aceptado. Estudios realizados por Mather y Platt (1893) revelaron que precipitando impurezas acumuladas en el fondo de tanques de aireación se proporcionaba una marcada mejora del tratamiento disponible. En su presentación a la Real Academia de Ciencias Británicas en 1905, Adeney reforzó esta creencia de que recolectando materia en descomposición se aceleraría la capacidad de tratamiento (Pearse, 1938; Adeney, 1905; Mather y Platt, 2015).

El proceso Fowler ¿Adelantado a su época?

Experimentos de Gilbert John Fowler sobre la aireación de aguas residuales en 1897 también produjeron un efluente claro, pero con depósitos de sedimentación rápida de materia orgánica. Sin embargo, Fowler personalmente creía que el proceso actual no había mejorado y su posición acerca de la metodología planteada por Mather y Platt en 1893 era que se trataba de un proceso con eficiencias de remoción demasiado bajas y altas cargas de materia orgánica en la fracción de sedimentos que podían ser aprovechadas; para Fowler las impurezas de las aguas residuales debían solubilizarse o disolverse en la matriz del gas de la aireación, sólo así se obtendría un tratamiento eficiente con un efluente libre de depósitos de sedimentación y no serían necesarios procesos de separación física para el tratamiento posterior, lo que incrementaba significativa los costos (Peck, 1923) y creaba una fracción de sólidos significativa que no era aprovechada y se convertía en una problemática ambiental y de salud pública por los volúmenes generados.

Fowler se centró en prestarle mayor atención al proceso de aireación para tener un proceso acoplado con altos índices de eficiencia (Babbitt, 1928). Dicha investigación recibió descredito puesto que el proyecto piloto no había tenido los resultados esperados, en la actualidad Aleman y Prakasam (2015) plantean que de haberse continuado con la línea de investigación de Fowler prestando mayor atención al proceso de aireación, quizás no sería necesario el uso de equipos para la sedimentación de partículas, pues se encontrarían suspendidas en un lecho aireado, es decir un intercambio a nivel molecular en la matriz del sólido sería lo idóneo en la depuración.

No se continuó con la propuesta de Fowler para solubilización de partículas y se prestó mayor atención a la influencia de la presencia de biomasa. Hacia 1910, las ventajas de airear aguas residuales en presencia de humus biológico o limo se iniciaron tratando de encontrar un reconocimiento generalizado. En el estudio clásico New York a gran escala Black y Phelps (1910), decidieron abandonar los medios de roca gruesa a favor de espacios muy reducidos de madera para conseguir una mayor superficie para la acumulación de limo, que se consideraba un depurador natural de las aguas residuales.

La unidad piloto New York era una versión aireada similar a la de Smith, que también había utilizado madera, pero esta vez el proceso se daba en un estanque cerrado; con esta investigación Black y Phelps concluyeron que el proceso de aireación de aguas residuales se podría forzar en sistemas de estanques y que daba como resultado una reducción en la concentración de compuestos aromáticos volátiles (Black y Phelps, 1910).

Clark y Gage también hicieron algo similar en la Estación de estudios experimentales del laboratorio de Lawrence Massachusetts entre 1912 y 1913. Compararon las eficiencias del tratamiento aireado en botellas inoculadas con suspensiones de algas contra los obtenidos en tanques llenos con pizarra empaquetada como lecho (concepto lecho fijo pizarra), no pretendiendo quitar ningún mérito este concepto en realidad debe atribuirse a (Dibdin, 1912) pues fue quien continuó con la línea de investigación, luego de haber fracasado en aireación simple en 1884; Dibbin concluyó finalmente que la biomasa se debe encontrar en un lecho fijo

que nombro cama biológica, la noción final fue combinar aireación con tratamiento biológico en un lecho de pizarra.

Clark y Gage fueron quienes descubrieron que los organismos se podían cultivar en botellas y en tanques parcialmente llenos con pizarra para techos separados una pulgada aproximadamente y que estos crecimientos resultaban realmente significativos en la calidad de agua a la salida del sistema. Entre 1913 y 1915 Clark y Gage trabajaron en conjunto con Adams perfeccionando el proceso planteado por (Dibbin, 1912); concluyeron que la masa biológica (cama biológica) era el centro del proceso de purificación del agua, pero que esta era finita y que a medida que disminuía incrementaba el contenido de sólidos en la suspensión final, sin embargo, Clark, Adams y Gage (1915), no plantean la recirculación de los lodos como la solución a este problema y tampoco estaba acoplado el sistema de sedimentación para evitar precisamente la suspensión de partículas, es decir, hasta este momento no se había acoplado el componente biológico con una solución de origen hidráulico.

Fowler, fue llamado a los EE. UU para revisar un problema de contaminación en el puerto de Nueva York en este viaje, había tenido la oportunidad de presenciar los experimentos realizados en la Estación de estudios experimentales del laboratorio de Lawrence Massachusetts, donde se concibió el uso de un cultivo de biomasa en suspensión (Fowler y Mumford, 1913). La conclusión final con el estudio era que se obtenían resultados exitosos en aireación de un cultivo suspendido en sistema inoculado con sales de hierro y una semilla bacteriana denominada M-7. Su esquema de tratamiento secuencial empleó un "tanque de aireación" y un clarificador, pero una falta de sólidos hizo necesario un proceso continuo de inoculación con los organismos M-7, encareciéndolo totalmente (Shanahan, 2006).

En este punto, habían transcurrido 31 años desde que el Dr. Smith examinó por primera vez la aireación de las aguas residuales. Nunca se tuvo la visión simple de acumular una suspensión la biomasa a través del reciclaje de sólidos, por lo tanto, la revelación por los estudiantes de Fowler: Arden y Lockett, en mayo de 1914, que estos sólidos de humus deben acumularse en lugar de desecharlo resultó ser una "bomba" sin calificar. Usando ciclos de llenado y extracción, estos últimos autores proporcionaron la primer demostración y pronunciamiento acerca de un tratamiento al que llamaron lodos activados porque involucraba la producción de una masa activada con microorganismos no patógenos capaces de estabilizar aeróbicamente la materia orgánica en aguas residuales. Su propuesta inicial fue notablemente avanzada, de hecho, su presentación abordó temas como la energía, el manejo de lodos a través de recirculación, un sistema de purga y la sensibilidad de nitrificar organismos, además los autores planteaban condiciones de operación como la temperatura y pH (Arden y Lockett, 1914); (Arden y Lockett, 1915).

Arden y Lockett presentaron dos trabajos en 1914 y 1915 que suministraron más información sobre los siguientes temas: capacidades de operación, sistema de flujo continuo, disminución de los impactos perjudiciales de desechos comerciales, niveles de aireación utilizando tubos lisos y tejas porosas, intensidades de aireación requeridas, y bioaclimatación masiva. A principios de

1915 se anunció que se había aplicado con éxito el proceso de lodos activados a 302 m³/d (80 000 gpd) de flujo en Salford, Inglaterra. La figura 1, hace referencia a este momento histórico.



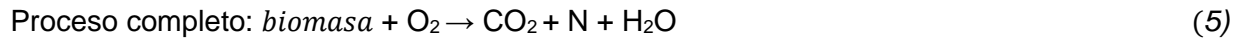
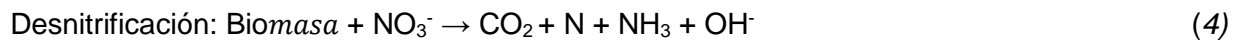
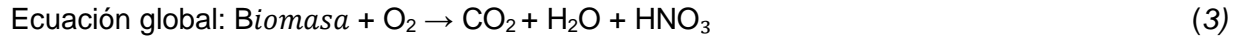
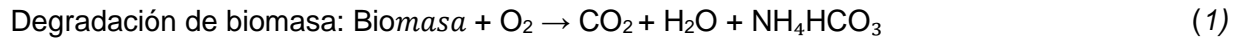
Figura 1. Construcción del primer sistema de lodos activados para la ciudad de Salford, Inglaterra. Fuente: Jones y Attwood, 1914.

Los años de controversia legal (1915 a 1935) fueron marcados por dos intensos debates técnicos. El primero se ocupaba de los sistemas de aireación y el segundo debate estaba centrado en el comportamiento del proceso; la aireación fue significativa desde el principio, incluso los mejores investigadores de lodos activados eran muy conscientes de que los requisitos de las demandas de energía jugarían un papel importante en la determinación del costo y la eficacia del proceso. Por un lado, varios investigadores creían que todo el transporte de oxígeno se debía dar en la superficie del líquido y que la aireación mecánica es el mecanismo óptimo de transferencia de gas; este punto de vista fue contrarrestado por otro grupo que consideraba la aireación fusionada como el sistema ideal (Kessener y Rib, 1934; Pearse, 1938; Kinnicut, 1919).

Aspectos biológicos

La actividad enzimática biológica fue considerada inicialmente por muchos investigadores como el principal mecanismo de transferencia, en ese tiempo se consideraban a los protozoarios y bacterias como los protagonistas en la composición fangos activados. Los protozoos son un indicador de calidad y agente para mejorar la claridad del efluente, la investigación realizada había establecido en esencia y de forma clara el mecanismo biológico detrás del proceso de lodos activados, como la parte primordial y el factor determinante en la remoción de carga contaminante. La digestión aerobia en el sistema corresponde a la degradación de los lodos orgánicos en presencia de oxígeno para permitir que los microorganismos presentes en los lodos conviertan la materia orgánica en dióxido de carbono y agua, y el amoníaco y los grupos amino

en nitrógeno. De acuerdo a (Lauer, 2021) los cambios bioquímicos en un digestor aeróbico siguen las ecuaciones de la 1 a la 5:



Moeller y Tomasini (2004) determinaron cuales son los microorganismos principales implicados en el proceso y la ruta bioquímica para su degradación. El proceso básico consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con una población microbiana mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema airado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal, se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen lentamente por metabolismo microbiano, proceso conocido como estabilización. En esta parte el material nutriente se oxida a sustancias simples como el anhídrido carbónico (mineralización), y parte se convierte en materia celular microbiana o biomasa (proceso metabólico de asimilación). Parte de la masa microbiana se descompone a su vez mediante un proceso llamado respiración endógena.

El proceso oxidativo suministra la energía necesaria para la operación de los procesos de adsorción y asimilación. Una vez que se alcanza el grado de tratamiento que se desea, la masa microbiana floculenta conocida como lodo activado, se separa del agua residual por asentamiento, por lo general, en recipientes separados, especialmente diseñados para ello. La etapa de separación se conoce como clarificación o sedimentación. El sobrenadante de la etapa de separación es el agua residual tratada y debe estar virtualmente libre de 171 sólidos. La mayor parte del lodo asentado en la etapa de separación se regresa a la etapa de aeración para mantener la concentración de los microorganismos en el tanque de aeración al nivel necesario para un tratamiento efectivo y para que actúe como un inóculo microbiano (Moeller y Tomasini, 2004).

Los microorganismos que se pueden encontrar en el licor mezclado de un sistema de lodos activados en las zonas tropicales, se enumeran en la tabla 1, por su clasificación a nivel de taxón eucariótico.

Tabla 1. Microorganismos identificados en el sistema de tratamiento de lodos activados

<i>Bacterias bioindicadoras</i>	<i>Protozoarios</i>	<i>Microalgas</i>
Gallionella sp	Amoeba	Cianofíceas/Cyanophyta
Spirillum sp.	Suctoria	Clorofíceas/Chlorophyta

Thiopedia sp.	Ciliados libres	Criptoficeas/Cryptophyta
Zooglea ramígera.	Ciliados fijos	Crisoficeas/Cryptophyta
Bacterias bioindicadoras	Protozoarios	Microalgas
Microthrix parvicella.	Ciliados reptantes	Diatomeas/Diatoms
Nocardia sp.	Rotíferos	Dinoficeas/Dinophyta
Sphaerotillus natans.		Euglenoficeas/Euglenophyta
Streptococcus sp.		Xantoficeas/Xantophyta

Fuente: Adaptado de (Moeller y Tomasini, 2004)

El sistema de lodos activados de 1940

Con los principios biológicos, fisicoquímicos y el mecanismo de transferencia gas-liquido establecido se dio un proceso de mejora progresivo para el sistema de lodos activados. Otras innovaciones en la década de 1940 y principios de la década de 1950 resultó en los Procesos de Kraus y biosorción. Solo en 1944, hubo dos adiciones a la creciente lista de procesos modificaciones: tratamiento de alta tasa y el proceso específico correspondiente a esa fecha. Aunque el primero es actualmente bien reconocido, el proceso "Z" se ha desvanecido en oscuridad y por una buena razón. Con la intención de promover mejoras en la sedimentación, el proceso "Z" dosificaba continuamente el tanque de aireación con fibras de asbesto. Con el descubrimiento de la acción cancerígena del asbesto-cemento en 1974, este proceso resultó ser una revelación pues existían un sin número de mecanismos de lodos activados operando con el proceso Z durante décadas que podían ser causa indirecta del incremento de cáncer en la región norte de Inglaterra por lo que se retiraron y se prohibió su uso a lo inmediato (Pasveer, 1959; Becerra et al., 2020).

Aspectos hidráulicos

Durante la década de los años 80, se trabajó en conjunto para la optimización del sistema de lodos activados, sin embargo, no se cuenta con un compendio de esto; se sabe que se centraron en resolver las principales problemáticas como la inoculación de los microorganismos en la masa de lodos o masa biológica, la recirculación de los fangos, costos energéticos, tiempos de aireación y un sistema físico para la depuración de las aguas. Es así como a principios de los años 90 (Metcalf, Eddy y Tchobanoglous, 1991) establecen el sistema clásico de lodos activados (Figura 2), que consta de un sistema de suministro de aire, tanque de aireación, clarificador, recirculación de lodos y agua tratada. El tratamiento biológico de lodos activados se implementó en masas, especialmente en aguas residuales domésticas y para finales del año 2005 estaban presentes en más de 500 sistemas de tratamiento a nivel global (Ramalho, 2007).

La velocidad es uno de los criterios claves al momento del diseño de un sistema de lodos activados, esta depende de las características del lodo presente y de sus respectivas cargas hidráulicas aplicadas. Conforme lo establece Jenkins y Wanner (2014), para reactores que operan con un lodo de tipo flóculento, como los que se suelen implementar en el país y cargas

orgánicas entre 5 a 6 kg DQO/m³ las velocidades ascendentes medias deben de estar en el orden de 0.5 a 0.7 m/h; en el caso de que sea un lodo de tipo granular las velocidades ascendentes pueden ser significativamente mayores, por un rango de 10 m/h.

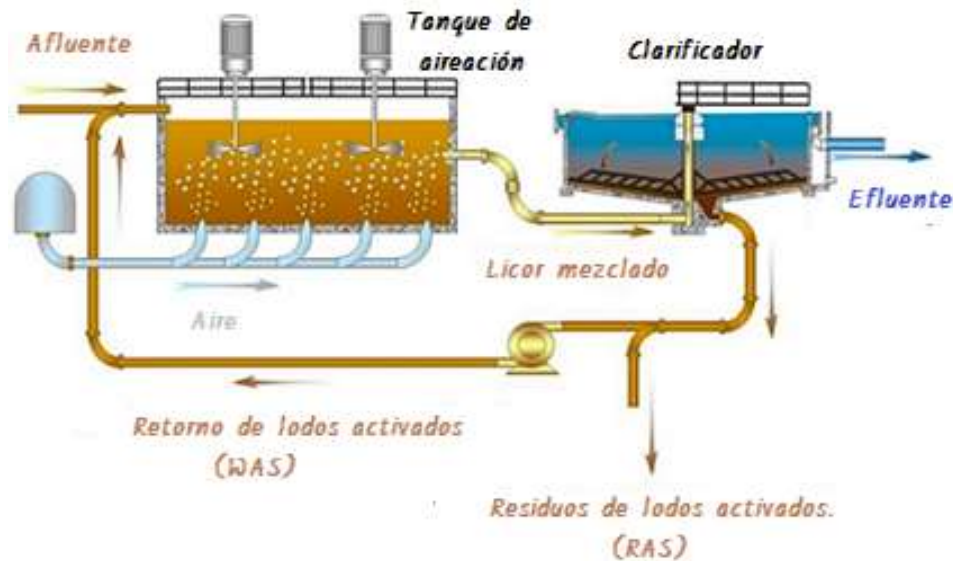


Figura 2. Esquema del sistema de lodos activados empleado en la actualidad
Fuente: Construcción y vivienda, 2021.

En la actualidad, gracias a diversos estudios el sistema de lodos activados cuenta con criterios y parámetros de diseño definidos que garantizan su funcionamiento hidráulico y biológico. En la Tabla 2, se presentan los principales criterios de diseño, para un modelo de flujo variante, según Arroyave, Cardona y Agudelo, (2013) “Estos parámetros no varían significativamente para régimen de flujo constante”.

Jenkins y Wanner (2014), expresan que existen una serie de variantes dentro de la evaluación hidráulica, es concerniente explicar que el sistema convencional se refiere a un sistema de reactor biológico, con su clarificador secundario, la variante de mezcla completa se refiere a una configuración de un reactor de aireación que se caracteriza por introducir las aguas residuales y el lodo activado de retorno en todo el tanque; el sistema de aireación extendida es una modificación del proceso de lodos activados que facilita la digestión aeróbica de los lodos dentro del sistema de aireación, a través de aireación activa por tiempos prolongados.

Tabla 2. Criterios de diseño para un sistema biológico de lodos activados

Concepto	Modelo de flujo		
	Variante		
	Convencional	Mezcla completa	Aireación extendida
Tiempo de retención de sólidos	5 – 15, días.	5 – 15, días.	20 – 30, días.
Relación de carga orgánica a sólidos	0,2 – 0,4 kg, DBO ₅ /kg SSVLM/día	0,2 – 0,6 kg, DBO ₅ /kg SSVLM/día	0,05 – 0,15 kg, DBO ₅ /kg SSVLM/día
Carga volumétrica	0,32 – 0,64 kg, DBO ₅ /m ³ /día.	0,8 – 1,92 kg, DBO ₅ /m ³ /día.	0,1 – 0,4 kg, DBO ₅ /m ³ /día.
Tiempo de retención hidráulico	4 – 8, horas.	3 – 5, horas.	18 – 36, horas.

Concepto	Modelo de flujo		
	Variante		
	Convencional	Mezcla completa	Aireación extendida
Tasa de recirculación	25 – 75, %.	25 – 100, %.	60 – 100, %.
Relación de producción de lodos	Mayor a 0,6 kg SSV/kg DBO removida	Mayor a 0,6 kg SSV/kg DBO removida	Mayor a 0,5 kg SSV/kg DBO removida

Fuente: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento, 2015

Se debe considerar que los criterios de diseño establecidos para el sistema de lodos activados se obtuvieron de datos experimentales, realizados inicialmente en laboratorio a condiciones controladas, sin embargo, lo idóneo para algunos criterios en particular como el tiempo de retención hidráulica, tasa de recirculación, retención de sólidos, será analizarlos particularmente para cada sistema, y utilizar los criterios como valor de referencia, aunque esto encarezca de forma significativa los costos de diseño garantizara un proceso óptimo adecuado a los factores ambientales y sociales (Jenkins y Wanner, 2014).

Desafíos y perspectivas futuras

Las potenciales problemáticas, formas de aprovechamiento, variantes y mejoras en el proceso para el sistema de lodos activados en la actualidad está enfocada primordialmente en un aspecto clave “Biotecnología”. La remediación ambiental en los diversos factores, es posible gracias a los microorganismos presentes en el sistema de lodos activados en la investigación de Cortazar-Martínez *et al.*, (2012) “La degradación y mineralización completa del colorante con principio activo de compuestos xenobióticos, fue posible por la biosorción aeróbica con un consorcio microbiano aislado de la fracción de recirculación en un sistema de lodos activados”.

A nivel global la generación de gases de efecto invernadero es un factor que ha preocupado a toda la comunidad científica, en el año 2023 se emitieron 278 millones de toneladas de CO₂ equivalentes (World Meteorological Organization, 2024), donde el sector industrial aporta un 9,10%. Las emisiones están vinculadas con las fuentes de generación, entre estas los sistemas de tratamiento de aguas residuales, sobre todo aquellos que implican la degradación anaerobia de la materia y la presencia de lagunas ya sean de tipo anaerobias, facultativas o de maduración.

La emisión de gases de efecto invernadero característicos del sistema de degradación orgánica provoca afectaciones al microclima local de las plantas de tratamiento que implementan esta tecnología, además de la evidente contaminación del aire, problemas en el sistema respiratorio de las poblaciones aledañas y afectaciones al componente biótico, el sistema que plantea Díaz-Rodríguez *et al.*, (2016) es revolucionario, novedoso y con evidente aplicación de biotecnología en ingeniería sanitaria, el aprovechamiento de los hongos filamentosos y bacterias heterótrofas presentes en la fracción de residuos (Figura 2) como material de empaque, en un biofiltro escurrido, para la desulfuración del gas natural con una efectividad de remoción superior al 80 %, para diferentes concentraciones de este contaminante y su potencial aprovechamiento para los mismos gases generados en el proceso, es solo una de las múltiples bondades en el campo de la biotecnología.

A nivel operativo, la disposición final de la fracción de recirculación, posterior a su aprovechamiento no representa un factor de circularidad en el componente de economía ambiental, en la actualidad constituye a una problemática, pero se podría potencializar como una oportunidad a nivel de procesamiento industrial. (Arroyave, Cardona y Agudelo, 2013) demuestran a través de su investigación que las 19 cepas nativas aisladas en la fracción de recirculación de un sistema de lodos activados, pueden ser sintetizados intracelularmente para producir polihidroxicanoatos, poliésteres naturales que se han convertido en una excelente alternativa para reemplazar los plásticos convencionales pues son biocompatibles y biodegradables, además en corto tiempo pueden ser reducidos a dióxido de carbono y agua.

Chambi *et al.*, (2019), brinda una solución práctica y efectiva para la acumulación de cianobacterias y hongos de tipo filamentosos en las paredes del reactor, en este caso puntual se realizó una caracterización de bacterias y hongos filamentosos, utilizando modelos matemáticos para predecir los usos potenciales en ecología microbiana. Estos microorganismos se pueden implementar para la remediación de suelos contaminados provenientes del sector de la industria minera metálica por su potencial capacidad de bioremediación de metales pesados como el mercurio, arsénico, plomo y cadmio; además de esto se puede acondicionar este proceso incrementando la comunidad microbiana para condiciones climáticas adversas que disminuyen la eficiencia del sistema, particularmente altitudes superiores a los 3 000 m.s.n.m, condiciones gélidas, humedades excesivas e intrusión por salinidad en las zonas costeras.

Dentro del saneamiento ambiental y condiciones técnicas de operación es importante destacar la investigación ejecutada por Chambi *et al.*, (2019), que potencialmente resuelve una de las principales problemáticas para ambos casos y es la implementación en algunas regiones de Latinoamérica, por el desafío que implica trabajar a condiciones de altitud significativas (+ 3 000 m.s.n.m) que disminuyen la carga de microorganismos por las condiciones termófilas de aislamiento, esto se puede adecuar con inoculación de microorganismos para su posterior proliferación; estos mismos microorganismos, por sus características filogenéticas y fisiológicas son remediadores de pasivos ambientales, principalmente los ocasionados por la actividad industrial.

CONCLUSIONES

Los criterios generales a nivel estructural, hidráulico, microbiológico y bioquímico en el diseño del sistema de lodos activados fueron abordados en el presente artículo, el alcance primordial era la estructuración de una línea de tiempo que permitiese una comprensión a detalle de todos los criterios involucrados en el diseño, evaluación e implementación del sistema de lodos activados, a través del tiempo desde la fundamentación teórica, hasta los avances realizados en la última década.

El desarrollo histórico del sistema de lodos activados ha sufrido una evolución desde la propuesta original de Smith en 1872, pero todas las mejoras, modificaciones y correcciones han perseguido el mismo objetivo: Un proceso optimizado donde se minimicen los recursos y se incrementen considerablemente las eficiencias de remoción. El sistema como tratamiento secundario que se implementa en la actualidad es el resultado de casi 150 años de investigaciones, independientemente de sus costos de operación, la credibilidad de este no debe pasar desapercibida particularmente en nuestro país donde las condiciones climáticas juegan a favor para su implementación.

REFERENCIAS

- Adeney, W. (1905). The importance of biologic process in wastewater treatment. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 15(1).
- Aleman, J., y Prakasam, T. (2015). Reflections on seven decades of activated sludge. *Water Pollution Control Federation*, 55(5), 436-443. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/25041901>
- Alpírez, J., Avilés, K., Castillo, H., Pinzón, I., Poveda, R. M., y Vallester, E. (2017). Evaluación de un sistema biológico de lodos activados a escala de laboratorio. *Revista de Iniciación Científica*, 3(1), 50-57. Recuperado a partir de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1697>
- Arden, E y Lockett, W. (1914). Experiments on the Oxidation of Sewage without the Aid of Filters. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 33, 523-580.
- Arden, E y Lockett, W. (1915). The Oxidation of Sewage Without the Aid of Filters, Part II. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 33, 111 – 122.

- Arroyave, A. L., Cardona, M., y Agudelo, L. M. (2013). Identificación de cepas nativas con potencial para obtención de polihidroxialcanoatos-(phas) en lodos activados. *Biotecnología en el Sector agropecuario y Agroindustrial*, 11(1), 69-76. ISSN-e 1909-9959.
- Babbitt, H. (1928). *Sewerage and Sewage Treatment* (3ra ed). John Wiley and Sons, Inc.
- Becerra, D., Arteaga, B. L., Ochoa, Y. E., Barajas-Solano, A. F., García-Martínez, J. B., y Ramírez, L. F. (2020). Acople de fotocatalisis heterogénea y proceso biológico aerobio de lodos activados para tratar aguas residuales con contenido de Clorpirifos. *Ingeniería y Competitividad*, 22(1), 1-12. ISSN 0123-3033.
- Black, E., y Phelps, B. (1910). Brooklyn Sewage Experiment Station. *The Review of English Studies, Oxford Academic*, 74, 826.
- Buswell, A y Long, H. (1923). Microbiology and Theory of Activated Sludge. *The Review of English Studies, Oxford Academic*, 90, 119.
- Chambi Apaza, R., Chambi Torres, K., Deza Chavez, N., Mamani Coyla, E., Mamani Quispe, J. M., & Esmeralda Quispe, F. (2019). Avances y perspectivas para la optimización de microorganismos relevantes y limitación de bacterias filamentosas en lodos activados: una revisión. Disponible en: <http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/62>
- Clark, J., Adams, W., y Gage, P (1915). Sewage Aeration at Lawrence and Manchester Compared. *The Review of English Studies, Oxford Academic*, 71, 367-450.
- Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. (2015). Criterios de diseño para sistemas de tratamientos de aguas residuales. *México: IWA Publishing*
- Cortazar-Martínez, A., González-Ramírez, C. A., Coronel-Olivares, C., Escalante-Lozada, J. A., Castro-Rosas, J., & Villagómez-Ibarra, J. R. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y ciencia*, 28(2), 187-199. ISSN 0186-2979.
- Díaz-Rodríguez, Y., Casellas Ortega, R., Rodríguez Muñoz, S., Fernández Santana, E., & Mustelier Pérez, S. P. (2016). Biofiltración del gas natural cubano en soporte orgánico con lodos activos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(2), 68-78. ISSN 1680-0338.
- Dibdin, J (1912). The Slate Bed Treatment of Sewage. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 32(1) 55-59.
- Environmental Protection Agency EPA. (2010). Progress Report: Scientific Publication. *Science and Research*, Washington United States of America.
- Fowler y Mumford. (1913). The Bacterial Clarification of Sewage. *Microbiology society*. 44, 287-300.
- IWA. (2008). Biological Wastewater Treatment-Principles, Modelling and Design. *IWA Publishing*.
- Jones, J y Attwood, I. (1914). Improvements in or Connected with Apparatus for the Purification of Sewage and Analogous Liquids. English Patent No. 19-916.

- Jenkins, D., & Wanner, J. (Eds.). (2014). *Activated sludge-100 years and counting*. IWA publishing.
- Kessener, H y Rib, F. (1934) Comparison of Aeration Systems for the Activated Sludge Process. Sew - Works Official Document (6ta ed).
- Kinnicut, L. (1919). *Sewage Disposal* (1ra ed). John Wiley and Sons Inc.
- Lauer, J. (2021). Una estrategia para optimizar la digestión aerobia: un proceso cíclico. *INVENT Environmental Technologies, Inc*.
- Martin, J. (1927). *The Activated Sludge Process* (4ed). MacDonald and Evans, London.
- Mather y Platt. (2015). Science Collection of Mather y Platt Limited Pioneers y Engineers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 47(1), 1-150.
- Metcalf, L., Eddy, H. P., y Tchobanoglous, G. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (4ta ed). New York: McGraw-Hill.
- Méndez, L., Miyashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M., y Carrasco N. (2004). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas*. 7(14), 74-83.
- Moeller, G., y Tomasini, A. C. (2004). Microbiología de lodos activados. *Memorias curso internacional de sistemas integrados de tratamiento de aguas residuales y su reuso para un medio ambiente sustentable*. Bogotá: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Pasveer, A. (1959). A Contribution to the Development in Activated Sludge Treatment. *Air and Water Pollution IWA Official*, 4(1)
- Pearse, L. (1938). Modern Sewage Disposal. *Text of Recognition of Federation of Sewage Works Associations*, New York.
- Peck, W. (1923). Economics of the "Activated Sludge Process." *The Review of English Studies, Oxford Academic*, 90, 522.
- Ramalho, R. (2007). *Introduction to wastewater treatment processes* (2da ed). Finland: IWA Publishing.
- Rittman, B y McCarty, P. (2010). *Biología del medio ambiente: Principios y aplicaciones* (4ta ed). McGraw-Hill Education, 299-370
- Shanahan, P. (2006). Water and Wastewater Treatment Engineering. Civil and Environmental Engineering MIT Open Course Ware. Disponible en <https://ocw.mit.edu/courses/1-85-water-and-wastewater-treatment-engineering-spring-2006>.
- Smith, R. (1872). Air and Rain the Beginnings of a Chemical climatology. *Official text of British Society of Science*. 15(3).
- World Meteorological Organization, WMO. (2024). Informe global sobre las emisiones de gases

de efecto invernadero y sus proyecciones de crecimiento. Informe oficial de ente gubernamental. Disponible en: <https://wmo.int/es/news/media-centre/las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-se-disparan-una-vez-mas-nuevo-record-en-2023>

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Laura Victoria Gutiérrez Montoya: Es Ingeniero Químico, egresada de la Maestría en Ciencias Ambientales con Mención en Ingeniería Ambiental del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA-UNI). Ha desarrollado proyectos de ingeniería sanitaria, gestión y evaluación ambiental en el sector energético, así como aplicaciones de la biotecnología en el sector agrícola y ambiental, para la gestión integral de sustancias contaminantes y recursos hídricos. Actualmente labora como docente en el Programa Académico de Ingeniería Industrial, DACIA-UNI.