

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR UASB PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE EMBUTIDOS CÁRNICOS.”

Andrés Erazo, Gustavo Salvador.

RESUMEN

Se diseñó un reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de la industria de elaboración de embutidos cárnicos con base a un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 19 horas, un volumen total de 23 litros. Para el arranque del reactor se utilizó un manto de lodos anaerobio con zeolitas, cloruro de aluminio, fosfato de calcio y fosfato de amonio como inóculo. La proporción fue de 10% de lodo y 90% de agua residual, a un caudal de 20 mL/min. El reactor se alimentó en forma continua. El tiempo de activación de las bacterias y arranque fue de 40 días. El porcentaje de remoción de materia orgánica denominado DQO fue de 91,97%, en DBO 68,15 % y ST de 80,15%. Se hizo un análisis bacteriano obteniendo los siguientes grupos: bacterias anaerobias mesófilas 2.8×10^6 (UFC/g), *Enterobacterias* 1.3×10^4 (UFC/g), *Pseudomonas* 1.0×10^5 (UFC/g). Se mantuvo la temperatura constante del sistema a 35°C mediante un sistema de automatización PID y existe un pH constante, otra variación en el estudio fue utilizar un pre-filtrado. La conclusión de este estudio para obtener gran eficiencia del reactor UASB SE-K01 se basa en el diseño del reactor, remoción de contaminantes, reducción de parámetros ambientales y una alta tasa de digestión anaerobia.

Palabras clave: reactor UASB, agua residual, digestión anaerobia, parámetros ambientales.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales de la industria de fabricación de embutidos cárnicos es una problemática ambiental, económica y social, sobre la cual existen muchas investigaciones y trabajos para incorporar e innovar dichos sistemas. El presente estudio propone la incorporación de la tecnología UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) a escala de laboratorio para el funcionamiento y depuración de aguas residuales, de esta forma se promoverá el conocimiento y el desarrollo de una nueva tecnología para el tratamiento de aguas contaminadas con residuos provenientes de este tipo de industrias.

La elaboración de productos cárnicos implica la generación de aguas residuales, las mismas que están cargadas de componentes como: contaminantes orgánicos, nutrientes y grasas que afectan al ambiente. Son productos preparados sobre la base de una mezcla de carne picada de res, pavo, ave o cerdo condimentados con sal, especias, aditivos y grasa animal que son introducidos en tripas (artificiales o sintéticas) resistentes. De acuerdo a la clasificación industrial internacional los embutidos se encuentran en la categoría C-1010.22 que hace referencia al procesamiento de productos cárnicos

El proyecto tiene la finalidad de construir un reactor UASB para un tratamiento eficaz de aguas residuales provenientes de la elaboración de embutidos cárnicos y cumplir

con los límites de la ley establecidos con la Ordenanza Metropolitana del Distrito Municipal de Quito N° 213 y el TULAS (Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria), de esta forma se crea una estrategia válida para un mejor manejo del agua, no se alteran los ecosistemas y se garantiza la conservación del recurso.

La utilización de agua en procesos industriales debe incluir el tratamiento y reúso del agua, disminuir costos, y reducir al mínimo el uso de agua potable o de cauce natural. En el Ecuador, el 6,3% de las aguas residuales promedio recibe algún tipo de tratamiento, siendo a nivel urbano el 7% y a nivel rural el 5%.

Antiguamente las aguas residuales eran vertidas directamente sobre cuerpos receptores naturales como los ríos, lagos, mares, océanos, etc. Los efluentes generan un cambio en la estructura de los ecosistemas y contaminación del medio ambiente, con la finalidad de remediar y corregir estas alteraciones de las condiciones naturales se ha creado estrategias de conservación del agua (Gallego M, 2006)

La industria de embutidos cárnicos involucra una serie de procesos que requieren el consumo de grandes cantidades de agua y al mismo tiempo se generan residuos. La mezcla de los residuos y el agua generan las aguas residuales; que se definen como agua que ha sido modificada por el uso industrial, doméstico y agricultura entre otros (Nemerow & Avijit, 1998; Gallego M. R., 2006).

El tratamiento biológico de agua se puede realizar por bacterias anaeróbicas o aeróbicas, en el presente trabajo se plantea el uso de la tecnología del reactor anaeróbico

UASB para efluentes de la industria de alimentos.

El concepto y sistema del reactor UASB fue propuesto por el profesor Gatzke Lettinga de la Universidad de Wageningen en Holanda en 1970, que se basa en la depuración de aguas residuales mediante la digestión anaerobia de bacterias a través de un flujo ascendente. Con el paso de los años esta tecnología ha sido renovada con el fin de mejorar y garantizar el tratamiento de aguas residuales, obteniendo agua libre de contaminantes que se pueda reutilizar en procesos o a su vez para el vertido en cuerpos receptores eliminando riesgo a la salud y ambiente (Conil P. , 2013).

La digestión anaerobia está caracterizada por una serie de procesos bioquímicos, en la cual microorganismos en ausencia de oxígeno ayudan a tratar residuos orgánicos en una serie de fases:

La primera fase se denomina hidrólisis en la cual compuestos orgánicos complejos como los polisacáridos, proteínas y carbohidratos son reducidos a azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Las siguientes fases son la acidogénesis y acetogénesis en donde los grupos intermedios son degradados por bacterias acidogénicas a ácidos grasos volátiles. Por último está el proceso de metanogénesis, donde, las bacterias acetoclásticas y hidrogenotróficas producen metano por la conversión del acetato y la vía del H_2 - CO_2 . (Gerardi, 2003)

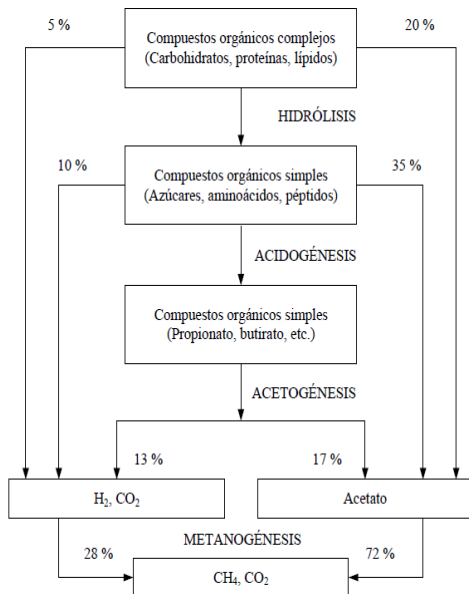


Gráfico N°. 1: Fases de la Digestión Anaerobia
Fuente: Specce, 1996

Los reactores de tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), desde su inicio se ha planteado de la forma cilíndrica, con el objetivo de tener una distribución uniforme en el interior del reactor. Un reactor cilíndrico evita la existencia de zonas muertas; es decir, lugares donde el agua queda empozada. Los reactores tubulares se utilizan generalmente para reacciones gaseosas como también para reacciones en fase líquida, dicha estructura favorece a la transferencia de masa y energía (Towler & Sinnott, 2008).

El reactor UASB SE-K01 se mantiene en constante funcionamiento. La entrada de afluente al reactor está determinada de acuerdo al caudal de la bomba, tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica volumétrica. La bomba recomendada según varios autores es una bomba peristáltica.

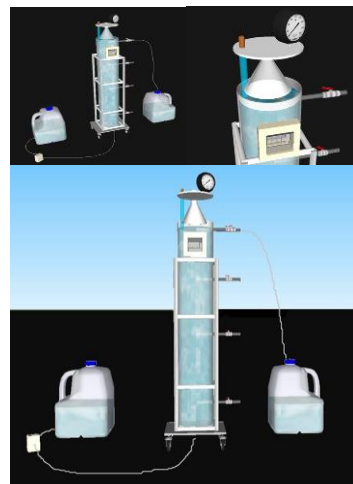


Gráfico N°. 8: Modelo en 3D del Reactor UASB SE-K01

Elaborado: Erazo & Salvador, 2014

La eficiencia del proceso dentro del reactor depende directamente de la temperatura, esta variable es el factor ambiental determinante en la digestión anaerobia, debido a que ésta altera la actividad enzimática de las bacterias (Van Haandel & Lettinga, 1994). Las temperaturas óptimas del proceso se encuentra en el rango mesófilo ($30^{\circ}C - 40^{\circ}C$).

La variación del pH es una variable significativa en la concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV), los mismos que influyen en la producción de gas metano (Caicedo, 2006).

Se utilizan una serie de parámetros ambientales para la medida de la concentración orgánica de aguas residuales, los dos métodos más frecuentes para determinar necesidades de oxígeno en aguas residuales son el DBO y DQO.

Tabla N°. 3: Tabla de Sólidos

Sólidos	Determinación
Sólidos Sedimentables	Indican la cantidad de sólidos en el agua que pueden sedimentarse a partir de un volumen de muestra dada en un periodo de tiempo.
Sólidos En Suspensión	La diferencia de peso de un sólido filtrado, por el cual se hace pasar a la muestra.
Sólidos Totales	Se secan en un rango de temperatura de 103-105°C. Permite estimar la cantidad de materia disuelta y en suspensión que lleva una muestra de agua.

Fuente: Henry, 1999

Los sulfatos en un reactor anaeróbico pueden ser un gran problema para la producción del gas metano debido a que las bacterias metanogénicas compiten por el mismo sustrato con las bacterias sulfato-reductoras.

El nitrógeno amoniacal $N-NH_3$ está presente en el agua residual, en los lodos y también se puede producir en las reacciones que se llevan a cabo dentro del reactor.

Los cloruros se encuentran en el agua natural y proceden de la dilución de los suelos y rocas, además se presentan por la inclusión de aguas negras. La presencia de concentraciones altas representan un problema en la calidad de agua (Coral, 2013).

Los fenoles son sustancias derivadas del fenol (hidroxibenceno o bencenol), son sustancias muy tóxicas en estado puro, los tratamientos mecánicos o por electrocoagulación no tienen efecto sobre los fenoles, se pueden encontrar en aguas residuales con aceites (Irving & Lewis, 1989).

Los detergentes son sustancias tensoactivos y anfipáticas con la propiedad química de eliminar manchas y muy utilizados para la limpieza, al igual conocidos como sulfonatos de alquilbenceno lineales (Irving & Lewis, 1989)

Los aceites y grasas son conocidos como sustancias solubles en hexano, poseen elevado peso molecular. Su presencia en el agua indica el aumento de DQO

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es un indicador de la materia ionizable total que se encuentra en el agua. La unidad de la medida de la conductividad son los microsiemens por centímetro (Cardenas Leon, 2010)

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz. Las partículas insolubles que producen la turbidez, pueden presentarse por procesos de arrastre, movimientos de tierras, vertidos de aguas residuales o industriales (American Society Testing Materials, 1988)

El color es un parámetro físico que no siempre es un indicativo de contaminación. Es necesario diferenciar entre el color verdadero, debido al material de la solución y el color aparente debido a la materia suspendida (Coral, 2013)

MATERIALES Y MÉTODOS

El reactor que se construyó en el presente estudio es un ejemplar de escala laboratorio de forma cilíndrica para el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria de embutidos cárnicos; al mismo que se le denominó como UASB SE-K01.

El UASB SE-K01 se describe como un cilindro de 1,5 metros de altura y un diámetro de 14 cm, lo que permite manejar un contenido volumétrico de 23 litros. El material empleado para la construcción del reactor fue el polimetilmetacrilato (PMMA) comercialmente conocido como vidrio acrílico o plexiglás.

Tabla N°. 13: Dimensiones del Reactor UASB SE-K01

Reactor UASB SE-K01		
Parámetros	Valor	Unidades
Tiempo de Retención Hidráulica	0,80 d	Días
	19,2	Horas
Caudal	20,00	ml/min
	0,0012	m³/h
	0,0288	m³/d
Demanda Química de Oxígeno	4621,8	mgDQO/L
	4,62	kgDQO/m³
Carga Orgánica	3,28	kgDQO/m².d
Dímetro del Reactor	14	cm
Radio del Reactor	7	cm
Volumen de Reactor	23040,00	ml
	0,02304	m³
Área del Reactor	153,94	cm²
	0,015	m²
Altura efectiva del reactor	149,67	cm
	1,5	m
Flujo másico	0,13	kgDQO/d
Carga Hidráulica	0,08	m/h
Velocidad de flujo en la campana	0,31	m/h
Velocidad ascendente de flujo	0,08	m/h
Campana		
Área de abertura	38,48	cm²
Ancho de la abertura	0,94	cm
Área de campana	115,45	cm²
Radio mayor de la campana	6,06	cm
Ancho de campana sin radio menor	4,56	cm
Ancho interno de campana	3	cm
Altura de chimenea	7,90	cm
Deflectores		
Traslape	1,41	cm
Ancho de deflectores	2,34	cm
Longitud de deflector	7,5	cm

Elaborado: Eraso & Salvador, 2014

Se analizaron los parámetros ambientales: DQO, DBO, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos fijos, sólidos sedimentables, N-NH₃, turbidez, pH, conductividad, sulfatos, color, fenoles, sustancias solubles en hexano, sustancias solubles en azul de metileno, cloruros. Mediante metodología APHA y HACH.

En el análisis estadístico se utilizó el método de la T-pareada mediante el programa estadístico SPSS, este método se empleó para comprobar la significancia de los resultados obtenidos en un tratamiento.

RESULTADOS

El reactor UASB SE-K01 fue construido en vidrio acrílico de forma cilíndrica, las dimensiones del reactor corresponden a los cálculos especificados para el diseño de

reactores UASB. El diseño dependió de acuerdo a la necesidad del tratamiento, es decir, de acuerdo a las características del agua a tratar y el tiempo de retención.



En la tabla N°17 y N°18 se analizaron los parámetros después del tratamiento anaeróbico.

Parámetros	Unid.	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Std	Límites(a)	Método
DQO	mg/L	210,5	356	100	84,25545	240	SM 5520B
DBO	mg/L	145,5	206	105	34,35501	120	SM 5210D
ST	mg/mL	0,0003744	0,000629	0,000092	0,000139	1000	SM 2540B
SS	mg/mL	0,0000434	0,00009	0,000012	2,17E-05	95	SM 2540D
SF	mg/mL	0,000331	0,000573	0,000029	0,000141	N/A	SM 2540E
Ssed	Mg/L	0,0153333	0,05	0,01	0,014075	10	SM 2540F
Sulf	mg/L	1,5	3	0	0,99043	400	HACH 680
N-NH3	mg/L	0,055	0,147	0,012	0,039987	1	HACH TNT 830
pH		6,3	6,91	5,74	0,294089	5-9	SM 4500
Conductividad	µS/cm	1320,5	2279	1046	327,7455	N/A	SM 2510B
Turbidez	FAU	131	320	40	88,11248	100	HACH 3750
Color	Pt-Co	860	1560	500	454,3127	100	HACH 8025

Parámetros	Unid.	Valor	Límites (a)	Método
Sustancias solubles en azul de metileno	mg/L	0,020	0,5	SM 5540C
Sustancias solubles en hexano	mg/L	<0,8	100	SM 5520B
Fenoles	mg/L	0,013	0,2	SM 5530B
Cloruros	mg/L	1,64	250	SM 4500 Cl-B

La tabla N°17 contiene todos los valores resultantes de la medición de los parámetros ambientales de las 15 muestras resultantes del reactor UASB SE-K01 presentando el promedio, valor máximo, valor mínimo y la desviación estándar. La tabla desglosada de todos los resultados obtenidos en los análisis

finales del agua tratada se pueden ver en el Anexo 3.2.

El análisis del DQO es el parámetro más incluyente para determinar la eficacia de un tratamiento de aguas residuales. El promedio de DQO en la caracterización final fue de 210,5 mg/L que al compararlo con la medición inicial se obtuvo un porcentaje del 91%. En el estudio de Lettinga, Rebac, & Zeeman (2001), se presenta una tabla con los valores de eficiencia para los diferentes tratamientos anaerobios (ver Anexo 1.3). En la tabla se propone una eficiencia entre el 49% y 80% para tratamiento de aguas residuales proveniente de la industria de cárnicos en un reactor UASB. Las condiciones del reactor UASB mencionado son similares a las propuestas para el reactor UASB SE-K01 (COV: 1-10, HRT: 16). Al evaluar la eficiencia del reactor UASB SE-K01 con respecto a otros autores, se determinó una alta tasa de remoción del DQO y una óptima viabilidad del tratamiento anaerobio (Grant & Lin, 1995).

El DBO promedio en el caso del reactor UASB SE-K01 es de 145,5 mg/L comparando con los límites permisibles de la normativa metropolitana es de 146 mg/L en descargas al alcantarillado por lo cual se demuestra una efectividad del tratamiento anaerobio. Según el estudio de reactores UASB para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario los valores finales se reducen de 30000 mg/L a 2000 mg/L con una efectividad del 50% del reactor mucho más baja que el UASB SE-K01 que es de 68,15% (Caicedo, 2006).

Los sólidos totales en promedio del reactor UASB SE-K01 son 0,0003744 mg/L y la normativa del TULAS indica 1000 mg/L, obteniendo una remoción de 80,15% por lo

cual el reactor tiene una buena sedimentabilidad.

Los sólidos sedimentables en promedio del reactor UASB SE-K01 son 0,0000434 mg/L y la normativa metropolitana indica como límite permisible 10 mg/L, obteniendo una remoción de 89,82% por lo cual el reactor mantiene una buena estabilidad de lodos.

Los sulfatos en promedio del reactor UASB SE-K01 son 1,5 mg/L y la normativa metropolitana indica como límite permisible 400 mg/L, obteniendo una remoción de 69,74%. Comparando con un estudio de competencia de la biomasa sulforreductora a partir de lodo metanogénico en reactores UASB donde se obtuvo 310 mg/L, se indica una mayor actividad metanogénica (Gallegos & Celis, 2010)

El N-NH₃ en promedio del reactor UASB SE-K01 son 0,055 mg/L y la normativa TULAS indica como límite permisible 1 mg/L, obteniendo una remoción de 77,86%. Comparando con un estudio de oxidación electroquímica de la leche por reactores UASB donde se obtuvieron 1480 mg/L, la remoción es más eficiente (Wang & W, 2001)

La turbidez y el color en promedio del reactor UASB SE-K01 son 131 FAU y 860 Pt-Co respectivamente y la normativa TULAS indica como límite permisible 300 FAU y 1000 Pt-Co, obteniendo una remoción de 68,28 % y 72,98%.

Los resultados microbiológicos de la caracterización de grupos bacterianos presentes el reactor fueron:

Parámetros	Unidades	Resultados	Técnica	Método
Bacterias Aerobias mesófilas	UFC/g	1.4 x 10 ³	Recuento en placa	MMI-02/AOAC 990.12
Bacterias Anaerobias mesófilas	UFC/g	2.8 x 10 ⁶	Recuento en placa	MMI-25/AOAC 990.12
<i>Enterobacterias</i>	UFC/g	1.3 x 10 ⁴	Recuento en placa	MMI-04/AOAC 990.12
<i>Pseudomonas spp</i>	UFC/g	1.0 x 10 ⁵	Recuento en placa	AOAC 972.23
Bacilos formadores de endosporas	UFC/g	1.1 x 10 ⁶	Recuento en placa	AOAC 980.31
Bacterias Ácido Lácticas	UFC/g	3.9 x 10 ⁴	Recuento en placa	AOAC 986.33

Para los resultados estadísticos se analizó la prueba de T-pareada descrita en la tabla N°22.

T-pareada									
					95% Intervalo de Confianza				
		Promedio	Desv. Std	Error.Stnd.Med	Mínimo	Máximo	t	df	Sig.(p)
Par 1	DQO In vs DQO Out	2417,7	1158,85	299,21	1775,9	3059,45	8,08	14	.000
Par 2	DBO In vs DBO Out	311,2	61,77	15,95	276,99	345,41	19,51	14	.000
Par 3	ST In vs ST Out	0,00113	0,0014	0,00038	0,00073	0,00023	4,16	14	.001

Elaborado: Erazo & Salvador, 2014

Con los datos obtenidos en los análisis para el DQO y DBO se obtuvo un valor *p* menor a 0.0001 lo que se considera a los resultados muy altamente significativos, lo que implica que el bioreactor posee un eficiencia óptima debido a sus características y diseño, mientras que, para el análisis de la t pareada en el parámetro de Sólidos Totales el resultado se considera altamente significativo, lo que implica que para este parámetro el bioreactor sigue siendo bueno, pero no tan eficiente como para DQO y DBO.

El costo operacional del reactor UASB SE-K01 por tratamiento de 19 horas, con un caudal de 20ml es de 0,1796 USD en comparación a otros reactores y tratamientos anaerobios es una mejor opción.

CONCLUSIONES

Para el diseño se concluye que es preciso determinar las variables: volumen del reactor (*V_r*), tiempo de retención hidráulica (*TRH*) y caudal (*Q*). En el reactor UASB SE-K01 se fijó el tiempo de retención hidráulica *TRH* de 19 horas, caudal *Q* de 20 mL/min y volumen *V_r* de 23 L.

La eficiencia del reactor UASB SE-K01 alcanzó un total de 82% en la remoción de los parámetros analizados (DQO, DBO, ST, Ssed, Turbidez y Color). Por lo tanto, se concluye que este porcentaje es muy bueno para este tipo de reactores.

La caracterización microbiológica demostró que el proceso anaerobio incrementa la biodegradabilidad de contaminantes en el agua residual de embutidos cárnicos. Se encontraron organismos anaerobios mesófilos 2,8 x 10⁶(UFC/g), los mismos que participan en el proceso de digestión anaerobia. La presencia de *Enterobacterias* 1.3 x 10⁴(UFC/g) y grupo de bacterias *acidolácticas* de 3.9 x 10⁴(UFC/g) infieren como un indicador de actividad hidrolítica y acidogénica

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de optimización del reactor UASB SE-K01 y su modo de operación.
- Construir nuevos prototipos con un material de uso industrial para poder escalar el proyecto y sus costos
- Analizar costos de un reactor a escala pequeña vs escala industrial, tomando en cuenta la rentabilidad del proceso o la eficiencia del proceso.
- Realizar experimentaciones con otro tipo de aguas residuales.
- Realizar una caracterización e identificar las especies presentes en el reactor UASB.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albim Alh. (2013). Albim Alh Bomba Peristáltica . Recuperado el 26 de Mayo de 2014, de

- http://www.albinpump.com/albindoc/brochures/ALH_Brochure_ES.pdf
- Altamira, R., Marín, J., & E, C. (2005). Degradación de fenoles totales durante el tratamiento biológico de aguas de producción petroleras. *Ciencia* v.13 n.3 Maracaibo, 1-6.
- American Society Testing Materials. (1988). Standard Test Methods for Turbidity of Water. USA.
- APHA, A. (1992). Metodos Normalizados para el analisis de agua y aguas residuales. New York: American Public Health Association Inc.
- Arango, O., & Sanches, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios de tipo UASB. *Facultad de Ciencias Agropecuarias Vol 2*, 1-8
- Chan, Y, C. (2009). A review on anaerobic-aerobic treatment on industrial and municipal wastewater. *Chem.Eng.J*, 1-18.
- Chaplin, M. (2006). Do we underestimate the importance of water in cell biology? *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 861-866.
- Conil, P. (2000). Avances conceptuales para el tratamiento de las aguas residuales. *Revista Gaceta Ambiental*, 24-41.
- Conil, P. (2008). La tecnologia anaerobia U.A.S.B en el tratamiento de las aguas residuales domesticas: 10 años de desarrollo y maduración en America Latina. *BIOTEC Waterloo Belgica*, 1-26.
- Nemerow, N.L & Avijit. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Madrid: Ediciones Diaz de Santos.
- Norman, G., & Streiner, D. (1998). Bioestadística. España: Harcourt Brance.
- PAHO. (2003). Basic Health Indicator Data Base. WHO.
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Indices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52.
- Pfanz, M. (2010). World Water Day: Dirty kills more people than violence, says UN. Lamu, Kenya: The Christian Science Monitor.
- Presidencia de la República del Ecuador. (2008). Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria. Quito.
- Qasim, S. (2000). Wastewater Treatment Plants: Planning, design and operation. Boca Raton: CRC Press.
- Leonard, N. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Lettinga, G. (1986). New technologies for anaerobic treatment. *Wat.Sci.Tech*, 41-53.
- Lettinga, G., & Hulshoff, L. (1989). Diseño de reactores anaerobios para tratamiento de aguas residuales solubles no complejas. Cali : Seminar Criterios de diseño para sistemas de tratamiento anaerobio UASB, Universidad del Valle.
- Lettinga, G., Hobma, S., W, H., De Zeeuw, W., De Jong, P., Grin, P., & Roersma, R. (1983). Design Operation and Economy of Anaerobic Treatment. *Water Science & Technology*, 15, 177-195.
- Lettinga, G., Rebac, S., & Zeeman, G. (2001). Challenge of Psychrophilic Anaerobic avicultura/manejo/articulos/tratamiento-biologico-aguas-residuales-t1481/124-p0.htm

