

Área del Conocimiento de Agricultura

DISEÑO DE UN REACTOR ANAEROBIO CON MANTO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN MATADERO

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico

Elaborado por:

Tutor:

Br. Keysi del
Carmen Urrutia
Mendoza
Carnet: 2012-42179

Br. Hansell Josué
Rivas López
Carnet: 2015-0416U

MSc. Ing. Sergio
Enrique Álvarez
García

27 de Junio de 2024
Managua, Nicaragua

AGRADECIMIENTOS

A Dios que nunca me dejo sola en el camino, a mi tutor **MSC. Ing. Sergio Enrique Álvarez García** por todo el acompañamiento y apoyo brindado. A mi compañero de monografía **Br. Hansell Rivas** por la paciencia y la perseverancia en el trayecto de culminación. A mis docentes por el apoyo brindado en el aprendizaje adquirido. A mis compañeros de clases por compartir su tiempo y sus conocimientos. A mi hermana **Arq. Celeste Urrutia** que su apoyo fue muy fundamental. A cada una de las personas que de alguna manera estuvieron pendiente y aportaron esfuerzos y conocimientos para llevar a cabo la culminación de esta monografía.

Keysi Urrutia

En primer lugar, agradecer a Dios por guiar nuestros pasos, por brindarnos inteligencia, perseverancia y darnos las fuerzas para culminar la carrera universitaria. A cada docente de la carrera de Ingeniería Química, principalmente a mi tutor **MSc. Ing. Sergio Enrique Álvarez García** por su orientación y apoyo durante cada una de las etapas en la realización de este trabajo monográfico. A mi madre **Tq. Ligia del Socorro López Saravia** por su ardua labor y sustento incondicional en mi formación personal y académica. A mi familia en especial mi **tía** y **hermanos**. A **Br. Keysi Urrutia** por alentarme en la recta final y, por último, pero no menos importante a aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este trabajo de tesis.

Hansell Rivas

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo principal el diseño de los elementos básicos que componen un reactor anaerobio con mantos de lodos de flujo ascendente conocido como reactor UASB, para ello se caracterizó el agua residual de entrada al reactor parámetros tomados de un matadero (pH, temperatura, caudal, DBO, DQO, SST, nitrógeno total, aceite y grasas). Se determinó las dimensiones de los elementos principales del reactor teniendo un volumen de $720 m^3$, con un tiempo de retención hidráulico TRH de 20.83 horas y una altura del reactor de 6 m. se estableció una carga orgánica volumétrica COV de $4.08 \text{ kg DQO}/ m^3 d$ se evaluó la eficiencia del porcentaje de remoción en términos de DQO y DBO obteniendo 76.51% y 84.66% respectivamente. Se obtuvo como subproducto del proceso una producción de lodos de 367.2745 kg SST/d y una producción de biogás principalmente metano $65.55 \text{ kg } DQO_{CH_4}/d$.

DEDICATORIA

A Dios por darme las fuerzas y mostrarme el camino correcto en los momentos difíciles, a mi familia por apoyarme y aconsejarme para seguir adelante siempre y en especial a mi esposo, hijos, madre y hermanas por su amor y apoyo.

Keysi Urrutia

A mi madre que se han sacrificado por mi bienestar y a quien le debo el ser quien soy que con mucho esfuerzo y dedicación me ha sacado adelante. Y a mi padre **Lic. Secundino Antonio Rivas Miranda** que en paz descanse.

Hansell Rivas

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
DEDICATORIA	III
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL:.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	3
III. MARCO TEÓRICO	4
3.1 EL REACTOR UASB.	4
3.2 EL REACTOR UASB EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	5
3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL TRATAMIENTO ANAERÓBICO.	7
3.4 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO CONCEPTUAL.	8
3.4.1 Características del agua residual.....	8
3.4.2 Consideraciones y suposiciones.	10
3.5 VOLUMEN DEL REACTOR.	11
3.6 VELOCIDAD DE REACCIÓN.	11
3.7 TIEMPO DE RESIDENCIA.	11
3.8 CINÉTICA QUÍMICA.	11
3.9 ORDEN DE REACCIÓN.	11
3.10 TIEMPO DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS.	11
3.11 PRODUCCIÓN ESPERADA DE GAS METANO.	12
3.12 REACTORES ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE (UASB).....	12
3.13 ARRANQUE.	12
3.14 MANTENIMIENTO.	12
IV. MATERIALES Y METODOS.....	13
4.1. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS Y BIOLÓGICAS DEL AGUA RESIDUAL A TRATAR EN EL REACTOR UASB PARA DESCRIBIR EL PROCESO DE DISEÑO.	13
4.2. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA ESTABLECER LA CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA A TRATAR EN EL REACTOR UASB PARA DEFINIR LA CONCENTRACIÓN APLICADA DE ENTRADA AL REACTOR.	14
4.3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR LAS DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL REACTOR UASB PARA LA ELABORACIÓN DE LOS PLANOS A PARTIR DE LOS CÁLCULOS DE DISEÑO.....	14
4.4. EVALUAR LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL REACTOR UASB DE CONTAMINANTES EN EL AGUA TRATADA PARA UNA BUENA CALIDAD DEL EFLUENTE.....	19
V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	20
CRITERIOS DE DISEÑO DEL REACTOR UASB.....	20
5.1 PARÁMETROS PRIMARIOS DE DISEÑO.....	20
5.2 PARÁMETROS AMBIENTALES.....	21
5.3 PARÁMETROS QUE AFECTAN EL DISEÑO Y LA OPERACIÓN.	21
5.4 SUPOSICIONES BÁSICAS.	21
5.5 PROCESO DE DISEÑO.	23
VI. CONCLUSIONES	29

VII.	RECOMENDACIONES	30
VIII.	NOMENCLATURA	31
IX.	BIBLIOGRAFÍA	32
X.	ANEXOS	35
	10.1 MÉTODOS ESTÁNDAR PARA EL ANÁLISIS DE AGUA Y AGUAS RESIDUALES.	35
	10.2 PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR.	43
	10.3 TRATAMIENTO PRELIMINAR.	43
	10.4 POST-TRATAMIENTO.	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fundamentos del reactor UASB.	5
Tabla 2. Ventajas del tratamiento anaeróbico.	7
Tabla 3. Desventajas del tratamiento anaeróbico.	8
Tabla 4. Información básica necesaria para diseñar el reactor UASB.	9
Tabla 5. Valores máximos permisibles de disposiciones de vertido de aguas residuales provenientes de los mataderos.	9
Tabla 6. Comparación entre el artículo 32 decreto 21-2017 y el agua residual de entrada al reactor UASB.	13
Tabla 7. Tiempo de residencia hidráulica para un reactor UASB de una altura de 4 metros para el tratamiento de aguas residuales industriales.	15
Tabla 8. Velocidades de flujo ascendente recomendados para el diseño de los reactores UASB.	15
Tabla 9. Directrices para determinar el área de influencia de los distribuidores de flujo en el reactor UASB.	15
Tabla 10. Criterios de diseño para reactores UASB.	16
Tabla 11. Pasos a seguir en el diseño del reactor UASB.	17
Tabla 12. Datos de entrada del reactor UASB.	20
Tabla 13 Lista de parámetros importantes del diseño del reactor UASB.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático del reactor UASB.	4
Figura 2. Proceso de tratamiento de agua residual industrial del matadero que incluye el reactor UASB y una etapa de post-tratamiento aeróbico.	6
Figura 3. Procesos unitarios en dos plantas de tratamiento de aguas residuales industriales con diferentes sistemas de tratamiento secundario. arriba: lodos activados. abajo: reactor UASB.	6
Figura 4. Maqueta del separador GSL donde se pueden ver detalles de diseño (izquierda: corte transversal: derecha: vista de planta).	40
Figura 5. Los separadores GSL.	40
Figura 6. Partes del separador GSL.	41
Figura 7. Distribución uniforme del influente del reactor UASB.	41
Figura 8. Tubos de descarga en exceso en el interior del reactor UASB.	42
Figura 9. Lechos de secado de lodos anaeróbicos.	43
Figura 10. Rejas (izquierda) y desarenador (derecha) requeridos para el tratamiento preliminar de la PTARI basada en el reactor UASB.	44

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales, especialmente los reactores anaerobios con manto de lodos de flujo ascendente (UASB), han crecido en madurez, ocupando una posición destacada en varios países tropicales en vista de sus condiciones de temperatura favorables. Sin embargo, esta gran aceptación ha llevado frecuentemente al desarrollo de proyectos y puesta en marcha de plantas de tratamiento con serios problemas conceptuales. En este sentido, este diseño brinda información relacionada con los principios, elementos de diseño y la operación de los sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales.

El reactor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), es un reactor anaerobio de flujo ascendente de alta eficiencia. Normalmente, el reactor UASB es utilizado en procesos primarios para la estabilización de la materia orgánica inicial. Es utilizado tanto en plantas de tratamiento de aguas residuales doméstica (PTARD) como en plantas de tratamiento de aguas industriales (PTARI). Siendo el segundo que se desarrolló un diseño de un reactor para el uso de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales.

El principio fundamental del proceso de tratamiento es la formación de una biomasa con alta actividad microbológica, permitiendo alto rendimiento en los procesos de estabilización, considerando los límites para las reacciones anaerobias, y un tiempo de detención hidráulica relativamente corto, y así el líquido es dirigido para el tratamiento complementario, donde se procede a la continuación de los procesos de oxidación de la materia orgánica presente en estos líquidos, en muchos casos el proceso de lodo activado con remoción de nutrientes.

En Nicaragua uno de los principales impactos ambientales que sufren, son los recursos hídricos como lo son lagos, ríos, lagunas y cuencas, por causa de los desechos de las aguas residuales industriales y aguas residuales domésticas, afectando al medio ambiente y la salud de los habitantes. Según los censos de población y vivienda, el 15.2% de los hogares no disponen de servicio sanitario con un 4.3% en la zona urbana y 30.5% en la zona rural. En la capital Managua el 2.4% de los hogares no cuentan con servicio sanitario, estas aguas son vertidas a calles y cauces llegando a un cuerpo receptor sin ningún tratamiento (www.inide.gob.ni, 2012).

Los mataderos causan contaminación ambiental por la sangre, grasas y desechos orgánicos que se descomponen y el mal olor por la descomposición orgánica por no seguir lineamientos para el tratamiento de residuos y reducción de la contaminación. Una de la principal contaminación del matadero en estudio es el desecho de las aguas residuales se hicieron mediciones de parámetros fisicoquímicos para verificar la calidad del agua.

La falta de tecnología de tratamientos de aguas residuales en los diferentes sectores del país del sector industrial deja estas aguas servidas o aguas grises a la disposición del ambiente, las cuales producen un nivel de contaminación al agua que puede manifestar la presencia de sólidos, desechos orgánicos, detergentes, jabones y grasas.

Nuestra propuesta de diseño pretende desarrollar una alternativa que ayude a implementar a las tecnologías de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) mediante el diseño de un reactor UASB, con el fin de tener una mejor efectividad de remoción en los contaminantes de altas cargas orgánicas, por lo que se requiere el uso de estos sistemas óptimos de bajo impacto ambiental y económico y amigables con el medio ambiente.

El diseño de este reactor, contribuye al medio ambiente, a la salud de los habitantes de los alrededores por causa de los desechos de estas aguas contaminadas, al cuerpo receptor de este efluente, además es un proceso que tiene como subproductos una fuente de energía biogás y lodo para abono orgánico usado en la agricultura.

II. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos que se desarrollan en este diseño.

2.1 Objetivo General:

- ✓ Diseñar un reactor UASB, para un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales que obtenga una buena eficiencia de remoción de contaminantes.

2.2 Objetivos Específicos:

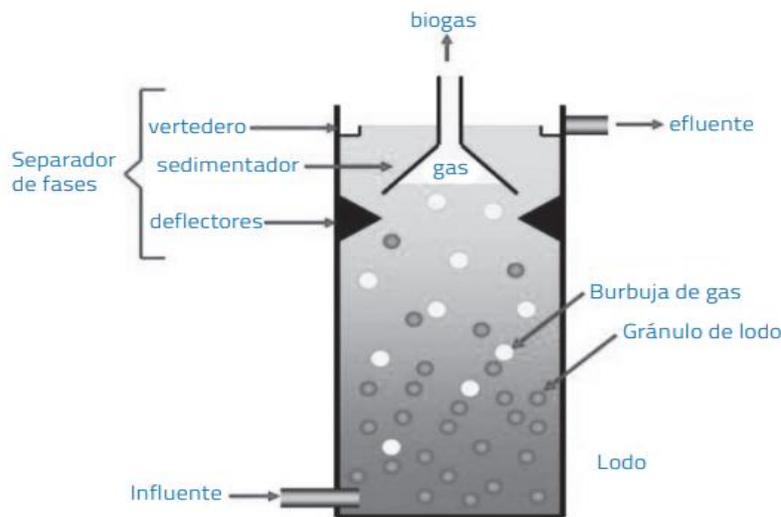
- ✓ Caracterizar las propiedades químicas, físicas y biológicas del agua residual a tratar en el reactor UASB para describir el proceso de diseño.
- ✓ Establecer la carga orgánica volumétrica a tratar en el reactor UASB para definir la concentración aplicada de entrada al reactor.
- ✓ Determinar las dimensiones de los elementos principales del reactor UASB para la elaboración de los planos a partir de los cálculos de diseño.
- ✓ Evaluar la eficiencia de remoción del reactor UASB de contaminantes en el agua tratada para una buena calidad del efluente.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 El reactor UASB.

El éxito del concepto del reactor UASB radica en el establecimiento de un denso manto de lodo en la zona inferior, en el cual tienen lugar la totalidad de los procesos bacterianos que conducen a la eliminación de la contaminación orgánica. Este manto o lecho de lodo se forma por acumulación de sólidos suspendidos y bacterias en crecimiento. La turbulencia generada por el flujo de aguas residuales industriales (ARI) que ingresa al reactor y el burbujeo ocasionado por la producción de biogás son suficientes para asegurar un buen contacto entre el ARI y la biomasa bacteriana (ver esquema en la figura 1).

Figura 1. Diagrama esquemático del reactor UASB.



Bajo ciertas condiciones, se observa el desarrollo de flóculos y gránulos bacterianos densos con excelentes propiedades de sedimentación que no son susceptibles de ser lavados fuera del reactor por el flujo ascendente aplicado, dentro de un amplio rango de velocidades ascensionales. La turbulencia natural que se origina por la producción de biogás provee mezclado interno y asegura un buen contacto efluente-biomasa en los sistemas UASB. Los fundamentos en los que se basa el funcionamiento de un reactor UASB se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Fundamentos del reactor UASB.

Flujo ascendente del efluente a tratar.
Generación de un manto de lodos floculento o granular.
Buenas propiedades de sedimentación del lodo, si no está expuesto a agitación mecánica intensa.
Contacto con el sustrato provisto por la agitación del propio gas producido y por el flujo ascendente del influente.
Retención de gránulos en el dispositivo de separación gas-sólido (en contra de la velocidad ascensional y la producción de biogás). Pendiente del separador: 50°

3.2 El Reactor UASB en el Tratamiento de Aguas Residuales.

Diversas configuraciones de proceso son posibles para el diseño de una planta de tratamiento en la que se incluya un reactor UASB como etapa principal de tratamiento biológico. El reactor UASB puede reemplazar parcial o totalmente muchas de las unidades requeridas en sistemas aeróbicos convencionales (tales como barros activados o lechos percoladores), pero siempre es necesario considerar la utilización de desarenadores, rejas de distintos diámetros para la retención de materiales gruesos, y lechos para el secado de los barros biológicos generados (figura 2). El efluente de los reactores UASB normalmente necesita tratamiento adicional para remoción de demanda química y/o bioquímica de oxígeno (DQO/DBO), material orgánico coloidal, patógenos, olores, entre otros parámetros de calidad del efluente, para alcanzar las normas específicas de descarga o reúso. Este post-tratamiento puede ser llevado a cabo en sistemas aeróbicos tales como las lagunas de estabilización u otros métodos convencionales (lodos activados, lechos percoladores, etc.) (figura 2).

En la figura 2 se muestra la planta del tratamiento del matadero que incluye el reactor UASB, el proceso tiene un pretratamiento rejas, desarenador, para eliminar sólidos en suspensión y arenas sedimentada, un caudalímetro para medir el caudal de entrada al reactor y un pos-tratamiento aeróbico para reducir la carga de DQO y DBO. La incorporación de una etapa anaeróbica reduce los requerimientos de superficie de todo el sistema de tratamiento (ver comparación entre un sistema aeróbico y uno anaeróbico en la figura 3). El resultado final es una planta de tratamiento que es más pequeña, más fácil de operar que un sistema aeróbico convencional, requiere menos insumos, unidades de tratamiento y así poder optimizar los procesos de tratamiento de ARI y produce gas como fuente de energía.

Figura 2. Proceso de tratamiento de agua residual industrial del matadero que incluye el reactor UASB y una etapa de post-tratamiento aeróbico.

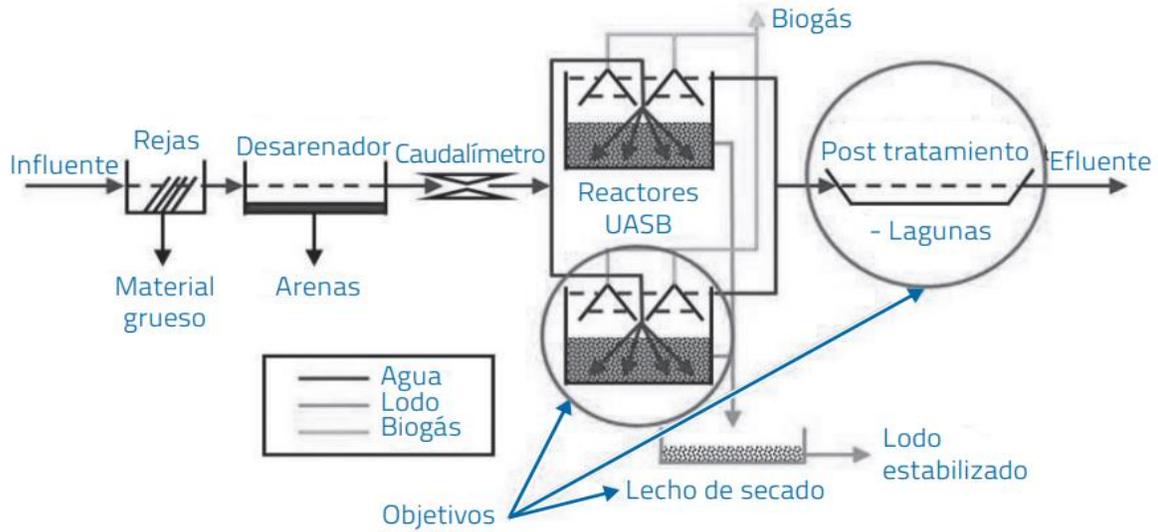
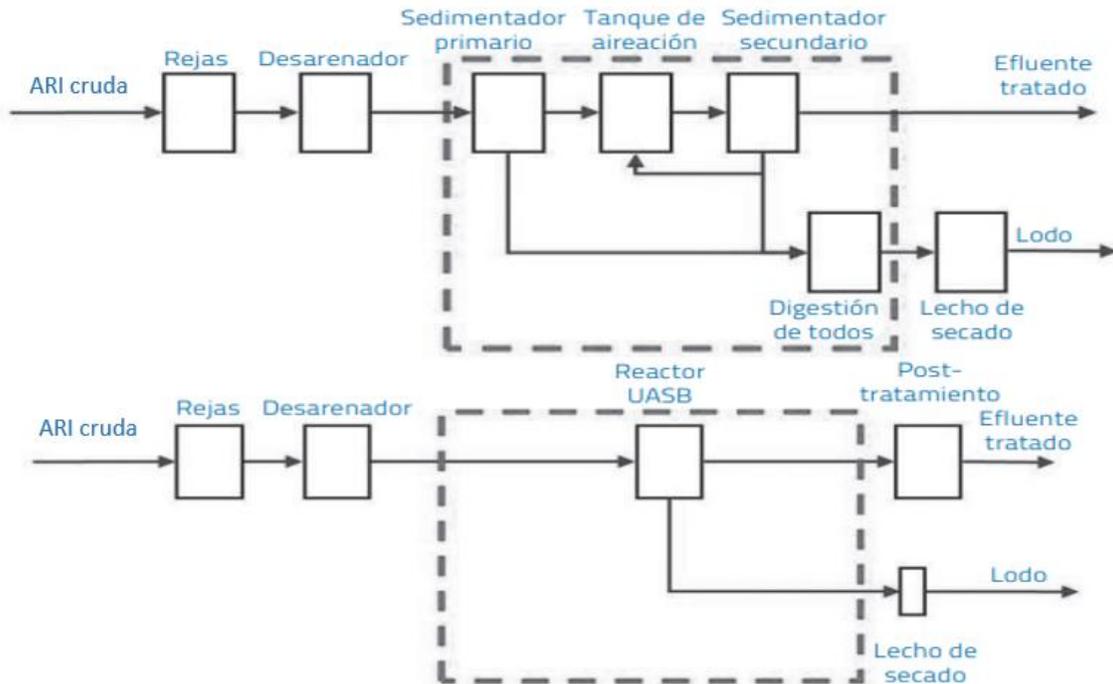


Figura 3. Procesos unitarios en dos plantas de tratamiento de aguas residuales industriales con diferentes sistemas de tratamiento. arriba: lodos activados. abajo: reactor UASB.



3.3 Ventajas y desventajas del tratamiento anaeróbico.

Las ventajas y desventajas del tratamiento anaeróbico (en particular sistemas UASB), se resumen en las (tablas 2 y 3).

Tabla 2. Ventajas del tratamiento anaeróbico.

Ventajas	Alta eficiencia. El sistema puede alcanzar buenas eficiencias de remoción a altas cargas y bajas temperaturas.
	Simplicidad. La construcción y operación de los reactores anaeróbicos es relativamente simple.
	Flexibilidad. El tratamiento anaeróbico se puede aplicar fácilmente a pequeña o gran escala.
	Bajos requerimientos de espacio. El área necesaria para instalar un reactor anaeróbico es baja, sobre todo cuando es posible tratar altas cargas orgánicas.
	Bajo consumo de energía. El consumo de energía es prácticamente despreciable, ya que no se necesita calentar el influente para alcanzar la temperatura de operación y las operaciones de planta pueden realizarse por gravedad. Por otra parte, se produce energía durante el proceso en forma de gas metano.
	Baja producción de lodo biológico. La producción de lodo es más baja que en los métodos aeróbicos, debido a las bajas tasas de crecimiento de las bacterias anaeróbicas. El lodo que se produce está completamente estabilizado para disposición final y tiene buenas condiciones de deshidratabilidad. Puede ser preservado por largos períodos de tiempo sin una reducción significativa de la actividad metanogénica, permitiendo su uso como inóculo para “sembrar” otros reactores.
	Bajos requerimientos de nutrientes y productos químicos. Especialmente en el caso de líquidos cloacales, es posible mantener un pH adecuado y estable sin la adición de químicos. Macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes están presentes en general en los líquidos cloacales, mientras que no hay compuestos tóxicos.

Tabla 3. Desventajas del tratamiento anaeróbico.

Desventajas	Baja remoción de patógenos y nutrientes. Los microorganismos patógenos son sólo removidos parcialmente, excepto los huevos de helmintos, los cuales son capturados efectivamente en el manto de lodo. La remoción de nutrientes tampoco es completa, por lo que se requiere post-tratamiento para ello.
	Larga puesta en marcha. Debido a las bajas tasas de crecimiento de las bacterias anaeróbicas, la puesta en marcha de un reactor anaeróbico lleva mucho tiempo, en comparación con un sistema aeróbico, siempre y cuando no haya un buen inóculo disponible.
	Posibilidad de malos olores. Durante el proceso anaeróbico se produce sulfuro de hidrógeno, sobre todo cuando existe alta concentración de sulfatos en el influente. Para evitar la producción de malos olores se requiere un manejo adecuado del biogás.
	Necesidad de post-tratamiento. Para alcanzar los límites de volcamiento impuestos en general por las leyes ambientales, es necesario algún tipo de post-tratamiento.

3.4 Consideraciones previas al diseño conceptual.

El diseño de reactores UASB está basado en dos aspectos:

- ✓ Características del agua residual (por la industria).
- ✓ Consideraciones y suposiciones (por el diseñador).

3.4.1 Características del agua residual.

La composición de las aguas residuales y el caudal son parámetros cruciales para un diseño adecuado. Es importante esforzarse para que los valores utilizados para el diseño sean correctos y reflejen la realidad local lo mejor posible. En general, los valores promedio no son confiables para un diseño seguro. Las variaciones diarias, semanales, mensuales, estacionales, e incluso anuales son a veces decisivas para la elección de los parámetros correctos de diseño. En caso de que sea necesario, se deberá realizar un muestreo adecuado para recolectar la información faltante sobre cada uno de estos parámetros.

Cuando no hay datos confiables disponibles, el diseñador tiene que recurrir a información de carácter general. Las características básicas de las aguas residuales necesarias para el diseño de los reactores se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Información básica necesaria para diseñar el reactor UASB.

Parámetro	Valor Promedio
pH	7.00
Temperatura (°C)	20.00
SST (Sólidos Suspendido Totales) (mg/L)	300.00
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) (mg/L)	600.00
DQO (Demanda Química de Oxígeno) (mg/L)	900.00
Caudal (m ³ /d)	1500.00

Los valores límites se establecen de acuerdo el artículo correspondiente en rangos y valores máximos permisibles para los vertidos de aguas residuales provenientes de los mataderos a nivel industrial. Artículo 32 Decreto 21-2017 (<http://www.inaa.gob.ni>, 2017).

Tabla 5. Valores máximos permisibles de disposiciones de vertido de aguas residuales provenientes de los mataderos.

Parámetros	Unidades	Permisible
pH		6-9
SST	mg/L	180
SS	ml/L	1
DBO	mg/L	150
Nitrógeno Total	mg/L	50
DQO	mg/L	300
Aceites y Grasas Totales	mg/L	30

Materia orgánica.

La materia orgánica presente en las ARI muestra generalmente una biodegradabilidad relativamente baja, con una DBO en cantidades cercanas al 70% de la DQO. Los procesos biológicos de tratamiento son, en principio, factibles bajo estas circunstancias. Se puede decir que, si la biodegradabilidad es 50% o más, los métodos de tratamiento biológicos son factibles. Es importante notar aquí que la DBO es una medida de la biodegradabilidad aeróbica (es una prueba realizada con bacterias aeróbicas). En la mayoría de los casos puede ser utilizada como un indicador de la biodegradabilidad anaeróbica (como es en el caso de las ARI).

Temperatura.

La temperatura media anual del ARI debería estar por encima de los 20°C, para que sea tratable mediante digestión anaeróbica. Sin embargo, es importante observar que la temperatura de las aguas residuales durante el invierno es crucial, y la duración del período frío tiene que ser tenida en cuenta en el diseño.

pH.

Generalmente, el pH de las ARI está cerca de la neutralidad (alrededor de 6-9). En estas aguas residuales existe generalmente una buena capacidad buffer, por lo cual no es necesario corregir el pH, como en el caso de algunas ARI.

Caudal.

El caudal que será utilizado para el diseño proviene del matadero, el consumo de agua es un parámetro altamente variable y depende de muchos factores como clima, ingresos, disponibilidad de agua, etc. Los valores estándares usados en muchos países varían entre 1500 m³/d (Fernandez & Seghezzo, 2015).

3.4.2 Consideraciones y suposiciones.

Independientemente del nivel de exactitud y detalle de los datos de partida, el diseñador de un reactor UASB tiene que hacer siempre un cierto número de suposiciones de partida sobre las cuales se basará todo el diseño conceptual. Si en algún momento del diseño se descubre que alguna de las suposiciones no se aplica, se debe revisar el diseño. Es importante que las suposiciones de partida se expliciten claramente en el documento final para dar más transparencia al proceso de diseño y por razones legales (reducir al mínimo las demandas potenciales). Las suposiciones de partida son tan importantes como los datos en términos de su influencia en el diseño final del reactor UASB.

Para este estudio en particular, se realizaron las siguientes suposiciones:

- El influente se trató anaeróbicamente sin acondicionamiento previo (acidificación, control del pH, calefacción o adición de nutrientes). Como en cualquier planta de tratamiento de aguas residuales, al diseño del reactor UASB es necesario agregar procesos unitarios de tratamiento preliminar (rejas, desarenadores, medición de caudal, etc.).
- Las fluctuaciones de caudal no representan una limitación seria para el funcionamiento del reactor UASB y, por lo tanto, se utilizó un valor de caudal promedio como parámetro de diseño, a menos que la industria indique lo contrario.
- La biodegradabilidad del ARI (en términos de DQO total) es de aproximadamente un 75%.
- La concentración de sólidos suspendidos totales SST en el influente no obstaculiza la operación.

- La temperatura de trabajo media es de 34.09°C, con un período más frío durante el invierno que no afectará perceptiblemente la eficiencia del reactor.
- El influente no contiene cantidades importantes de grasas y aceites que puedan interferir en el funcionamiento del reactor.
- El influente no contiene ningún compuesto tóxico o inhibitorio.
- La eficiencia de remoción para DQO y DBO está en el orden del 70 al 85%.
- No hay necesidad de agregar macro y micro nutrientes porque las aguas residuales contienen concentraciones suficientes de estos compuestos.
- El reactor está limitado por la carga hidráulica y el diseño conceptual inicial se basa en un tiempo de retención hidráulica (TRH) de aproximado 21 h.

3.5 Volumen del reactor.

El volumen del reactor, es el volumen necesario para que una reacción se lleve a cabo, este varía dependiendo del tipo de reactor el cual se esté diseñando y de la reacción que se esté llevando a cabo (Fogler, 2008).

3.6 Velocidad de reacción.

Se puede definir como velocidad de reacción a la rapidez con la se consume cierta cantidad de moles de un compuesto o elemento químico, por unidad de tiempo o por unidad de volumen (Fogler, 2008).

3.7 Tiempo de residencia.

Se toma al tiempo de residencia como, el tiempo necesario para que se dé una reacción con cierto grado de conversión (Fogler, 2008).

3.8 Cinética química.

Es el estudio de las velocidades de reacciones químicas y los mecanismos de reacción. En el estudio de la ingeniería de las reacciones químicas, se junta el estudio de la cinética química con los reactores en los cuales se llevan a cabo dichas reacciones (Fogler, 2008).

3.9 Orden de reacción.

Como el orden se refiere a expresiones de velocidad determinadas experimentalmente. Puede tener un valor fraccionario y no tiene por qué ser un número entero (Levenspiel, 2004).

Por ejemplo: KCa^n en donde n es el orden de la reacción.

3.10 Tiempo de retención de sólidos.

Es un parámetro fundamental en el diseño y operación de los procesos anaerobios. En general, se requieren valores mayores a de 30 d de TRS para procesos a 30°C para un tratamiento efectivo, este valor incrementa conforme descienda la temperatura.

3.11 Producción esperada de gas metano.

Entre más carga orgánica tenga un agua residual mayor cantidad de metano se generará por volumen de líquido tratado para proveer cantidades relativamente altas de energía que eleven la temperatura del líquido. La cantidad de metano producida por unidad de DQO convertida en condiciones anaerobias es de 0.35 L CH₄/ g DQO en condiciones estándar (0°C a 1 atm).

3.12 Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (UASB).

La abreviación U.A.S.B. se define como upflow anaerobic sludge blanket o reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente. Esta tecnología proveniente de Bélgica y Holanda, es aplicada especialmente al tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica. El reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodo describe un reactor de biopelícula fijas en medio de empaque o soporte, con una cámara de digestión que tiene flujo ascendente y a cierta altura se desarrolla un manto de lodos anaerobios que es altamente activa y en el cual se da la estabilización de la materia orgánica del afluente hasta CH₄ y CO₂. (Caicedo, 2006).

3.13 Arranque.

La problemática del arranque de un reactor anaerobio consiste en mantener las condiciones adecuadas para el crecimiento de la biomasa los nutrientes necesarios, puede variar dependiendo del origen del agua y en el caso de las aguas residuales industriales, los valores de los diferentes componentes se encuentran balanceados, normalmente la concentración de éstos es muy baja, particularmente para el desarrollo de la biomasa anaerobia por lo que el crecimiento resulta excesivamente lento produciendo un arranque muy prolongado. (Pacheco & Magaña, 2003). La baja producción de biomasa en relación al sustrato consumido, ($Y = 0.18 \text{ Kg SSV} / \text{Kg DQO removida}$) hace necesaria la inoculación. (Pacheco & Magaña, 2003).

3.14 Mantenimiento.

El operador debe revisar diariamente que las tuberías de entrada al reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) no estén obstruidas por algún cuerpo extraño como botellas, plástico, madera o basuras. En caso de encontrar algún objeto debe proceder a retirarlo con una pala curva o con un rastrillo. El operador lavará, la superficie del RAFA una vez a la semana como mínimo con la misma agua tratada a presión. El reactor anaerobio de flujo ascendente se purgará cuando se encuentre saturado, esto lo indicará la excesiva salida de lodos en el área de efluencia. La purga consistirá en la extracción de lodos del registro del RAFA mediante una bomba especializada para lodos, esta purga se realizará aproximadamente dos años y medios o tres después de la fecha de arranque.

El lodo generado podrá ser succionado (bombeado) dejando un residuo de unos 0.15 a 0.20 m, ya que esta capa contendrá suficientes bacterias para iniciar una nueva colonia digestora.

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1. Métodos y procedimientos para la caracterización de las propiedades químicas, físicas y biológicas del agua residual a tratar en el reactor UASB para describir el proceso de diseño.

Las principales propiedades químicas, físicas y biológicas del agua residual que se trató y que son necesarias para el diseño del reactor UASB son:

- pH (potencial de hidrogeno).
- Temperatura (°C).
- SST (sólidos suspendidos totales) (mg/L).
- DBO (demanda bioquímica de oxígeno) (mg/L).
- DQO (demanda química de oxígeno) (mg/L).
- Caudal (m^3/d).

A continuación, se presenta el punto de muestreo y recolección de las muestras de del agua residual de entrada al reactor UASB del matadero.



Los datos de entrada de las características del agua residual de entrada al reactor. Tabla comparativa del artículo 32 decreto 21-2017 y el agua residual de entrada al reactor. Estos parámetros se establecieron de acuerdo a valores promedios de tres muestras y tres corridas para cada parámetro.

Tabla 6. Comparación entre el artículo 32 decreto 21-2017 y el agua residual de entrada al reactor UASB.

Parámetros	Unidades	Agua Residual	Permisible
pH		9.86	6-9
SST	mg/L	1700	180
SS	ml/L	-	1
DBO	mg/L	1527.41	150
Nitrógeno Total	mg/L	180.21	50
DQO	mg/L	3544.75	300
Aceites y Grasas Totales	mg/L	318.10	30

Para la determinación de estas propiedades se utilizaron los métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales, los cuales se presentan en el Anexo.

4.2. Métodos y procedimientos para establecer la carga orgánica volumétrica a tratar en el reactor UASB para definir la concentración aplicada de entrada al reactor.

Caudal Medio: (Garcia, 2022).

$$Q_{medio} = Q + (\%Fugas \times Q) \quad \text{Ecuación 1}$$

%fugas=20%

Caudal de Diseño:

$$Q_{diseño} = Q_{medio} \times FMD \quad \text{Ecuación 2}$$

Factor medio de diseño: FMD= 1.5

La carga orgánica volumétrica es un factor de diseño en los reactores UASB y es el producto del gasto por la concentración de la materia orgánica (DQO) del agua residual alimentada diariamente al reactor, dividido entre el volumen efectivo del reactor (Metcalf & Eddy, 2003).

$$COV = \frac{Q \times S_0}{V} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

COV= tasa de carga orgánica volumétrica (kg de DQO/m³. d).

Q= gasto (m³ /d).

S₀= concentración de sustrato en el afluente (kg de DQO/m³).

V = volumen total del reactor (m³).

4.3. Métodos y procedimientos para determinar las dimensiones de los elementos principales del reactor UASB para la elaboración de los planos a partir de los cálculos de diseño.

Desde el punto de vista práctico, el diseño conceptual del reactor UASB, los parámetros de diseño se dividieron en tres grupos:

- a) Parámetros primarios de diseño.
- b) Parámetros ambientales.
- c) Parámetros que pudieran afectar el diseño o la operación.

Los criterios de diseño del UASB, los planos y los cálculos se presentan en el Anexo.

A continuación, se presentan los criterios de diseño para determinar las dimensiones de los elementos principales del Reactor UASB.

Tabla 7. *Tiempo de residencia hidráulica para un reactor UASB de una altura de 4 metros para el tratamiento de aguas residuales industriales.*

Temperatura del agua residual °C	Tiempo de residencia hidráulica	
	Promedio diario	Mínimo durante (4-6 h)
16-19	10-14	7-9
22-26	7-9	5-7
>26	6-8	4-5

Nota: La tabla muestra el tiempo de residencia hidráulica para reactores de altura de 4 metros (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 8. *Velocidades de flujo ascendente recomendados para el diseño de los reactores UASB.*

Gasto del afluente	Velocidad de flujo ascendente (m/h)
Flujo promedio	0.5-0.7
Flujo máximo	<0.9-1.1
Flujos picos temporales de (2-4 h)	<1.5

Nota: Las velocidades de flujo recomendadas para el diseño de los reactores UASB (Chernicharo, 2007).

Tabla 9. *Directrices para determinar el área de influencia de los distribuidores de flujo en el reactor UASB.*

Tipo de lodo	Carga orgánica aplicada (kg de DQO/m ³ .d)	Área de influencia de cada distribuidor (m ²)
Lodo denso y floculento (concentración > 40 kg SST/m ³)	<1.0	0.5-1
	1-2	1-2
	>2	2-3
Lodo medio floculento (concentración 20 a 40 kg SST/m ³)	<1-2	1-2
	>3	2-5
Lodo granular <20 kg SST/m ³	1-2	0.5-1
	2-4	0.5-2
	>4	>2

Nota: Determinación del área de influencia de los distribuidores de flujo (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 10. Criterios de diseño para reactores UASB.

Criterio	Parámetros	Intervalos de valores
Altura	Reactor	3 - 6 m
	Compartimento del sedimentador	1.5 - 2 m
	Compartimento del digestor	2.5 - 3.5 m
Remoción de DQO esperada	Remoción esperada para agua residual diluida	60 - 70%
	Remoción esperada para agua residual concentrada	80 - 90%
Distribución del afluente	Diámetro del tubo de distribución del afluente (mm)	75 - 100
	Diámetro de la desembocadura del tubo de distribución (mm)	40 - 50
	Distancia entre la parte superior del tubo de distribución y el nivel del agua en el sedimentador (m)	0.2 – 0.3
	Distancia entre la desembocadura y la parte inferior del reactor (m)	0.1 – 0.15
	Área de influencia de cada tubo de distribución (m ²)	2 - 3
Colector de biogás	Tasa de liberación mínima de biogás (m ³ /m ² *h)	1
	Tasa de liberación máxima de biogás (m ³ /m ² *h)	3 - 5
	Concentración de metano en el biogás (%)	70 - 80
Compartimento de sedimentación	La superposición de los deflectores de gas en relación con la abertura para el compartimento de la sedimentación (m)	0.1 - 0.15
	Pendiente mínima de las paredes del sedimentador (°)	45
	Pendiente óptima de las paredes del sedimentador (°)	50 – 60
	Profundidad del compartimento del sedimentador (m)	1.5 - 2
Colector del efluente	Inmersión del deflector de nata en el perforado de tubos de recolección (m)	0.2 – 0.3
	Número de vertedores triangulares (unidades/m ² del reactor)	1 - 2
Producción y muestreo del lodo	Rendimiento de la producción de sólidos (kgSST/kgDQO _{aplicada})	0.1 - 0.2
	Rendimiento de la producción de sólidos, en términos de DQO (kgDQO _{lodo} /kgDQO _{aplicada})	0.11 – 0.23
	Concentración de sólidos esperado en el exceso de lodo (%)	2 – 5
	Densidad del lodo (Kg/m ³)	1.020 – 1.040
	Diámetro de las tuberías de descarga del lodo (mm)	100 – 150
	Diámetro de las tuberías de muestreo del lodo (mm)	25 - 50

Nota: La tabla muestra los principales criterios de diseño de los reactores UASB (Chernicharo, 2007).

A continuación, se presentan las ecuaciones de diseño con las que se determinó las dimensiones de los elementos principales del Reactor UASB.

Tabla 11. Pasos a seguir en el diseño del reactor UASB.

Pasos	Observaciones
Datos de entrada	Gasto afluyente promedio: Q_{ip}
	Gasto afluyente máximo horario: Q_{max-h}
	DQO afluyente promedio (S_0):
	DBO afluyente promedio (S_0):
	Temperatura del agua residual:
Calcular la carga de DQO en el afluyente promedio (L_0)	$L_0 = S_0 * Q_{ip}$ Ec.3
Seleccionar el tiempo de retención hidráulico (t)	De acuerdo con la tabla 7 también $TRH = V/Q$ Ec.4
Determinar el volumen total del reactor (V)	$V = Q_{ip} * t$ Ec.5
Especificar el número de módulos del reactor (N)	Volumen menor a 1 500 m ³ (Metcalf & Eddy, 2003) Para sistemas pequeños, volumen < 500 m ³ (Chernicharo, 2007)
Calcular el volumen de cada módulo (V_U):	$V_U = \frac{V}{N}$ Ec.6
Establecer un valor para la altura del reactor (H):	Altura de 3 a 6 metros (Chernicharo, 2007) Altura de 6 metros (Metcalf & Eddy, 2003)
Determinar el área de cada módulo (A):	$A = \frac{V_U}{H}$ Ec.7
Calcular las dimensiones del área del reactor	Rectangular (largo y ancho) o circular (diámetro) $L = \sqrt{A}$ o $d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$ Ec.8 y Ec.9
Determinar la carga hidráulica volumétrica (CHV) y compararla con la Tabla 6	$CHV = \frac{Q_{ip}}{V}$ Ec.10
Determinar la carga orgánica volumétrica (COV) y compararla con: COV de 2 a 4 kg de DQO/m ³ d (Metcalf & Eddy, 2003)	$COV = \frac{Q_{ip} * S_0}{V}$ Ec.11
Velocidad de flujo ascendente, para Q_{ip}	$v = \frac{Q_{ip}}{A_t}$ Ec.12
Velocidad de flujo ascendente, para Q_{maxh}	$v = \frac{Q_{maxh}}{A_t}$ Ec.13
Comparar la velocidad del flujo ascendente	Ver los valores mostrados en la Tabla 8

Sistemas de distribución del agua residual (afluente)	Establecer el área de influencia de los tubos de alimentación de acuerdo con la Tabla 9
Calcular el número de tubos de distribución del agua residual (afluente)	$N_d = \frac{A_t}{A_d}$ Ec.14
Estimar la eficiencia de remoción de la DQO	$E_{DQO} = 100 * (1 - 0.68 * t^{-0.35})$ Ec.15
Estimar la eficiencia de remoción de la DBO	$E_{DBO} = 100 * (1 - 0.70 * t^{-0.50})$ Ec.16
Estimación de las concentraciones de DQO y DBO en el efluente final:	$C_{efl} = \frac{S_0 - (E * S_0)}{100}$ Ec.17
Estimación de la producción del metano	$DQO_{CH_4} = Q(S_0 - S) - Y_{abs} Q S_0$ Ec.18
	$K(t) = \frac{P K_{DQO}}{R (273+T)}$ Ec.19
	$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$ Ec.20
Estimación de la producción del biogás (considerando un contenido de metano de 75% en el biogás)	$Q_g = \frac{Q_{CH_4}}{0.75}$ Ec.21
Calcular la producción de lodo (PI)	$P_l = \gamma * DQO_{app}(L_0)$ Ec.22 Establecer un coeficiente del rendimiento de sólidos Y de acuerdo con la Tabla 8
Volumen del lodo (VI)	$V_l = \frac{P_l}{\gamma * (\frac{C}{100})}$ Ec.23 Establecer la densidad del lodo (Y) y una concentración esperada de la descarga del lodo (C), de acuerdo con la tabla 10

4.4. Evaluar la eficiencia de remoción del reactor UASB de contaminantes en el agua tratada para una buena calidad del efluente.

Estas ecuaciones permiten estimar las eficiencias de remoción de DQO y DBO de los reactores UASB que tratan aguas residuales industriales en condiciones tropicales (temperatura del agua residual entre 20 y 30°C) en función del tiempo de detención hidráulica (Fernandez & Seghezso, 2015).

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0.68 * t^{-0.35}) \quad \text{Ec.15}$$

Donde:

E_{DQO} = eficiencia del reactor UASB en términos de remoción de DQO (%).

t = tiempo de detención hidráulica (hora).

0,68 = constante empírica.

0,35 = constante empírica.

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0.70 * t^{-0.50}) \quad \text{Ec.16}$$

Donde:

E_{DBO} = eficiencia del reactor UASB en términos de remoción de DBO (%).

t = tiempo de detención hidráulica (hora)

0,70 = constante empírica

0,50 = constante empírica.

Sistemas de tratamientos para ARI:

Pretratamiento + UASB + Laguna Aeróbica. La eficiencia de remoción de los UASB:

DBO: 65-80%, DQO: 60-80%, SS: 60-70%, P: 30-40%.

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Criterios de diseño del reactor UASB.

5.1 Parámetros primarios de diseño.

Los dos parámetros básicos de diseño usados para dimensionar un reactor UASB (caudal y concentración). En el caso de ARI, el caudal es el parámetro decisivo. A continuación, se presentan los datos de la característica del agua residual de entrada al reactor UASB del matadero.

Tabla 12. Datos de entrada del reactor UASB.

Parámetros	Unidad	Entrada
pH		9.86
Temperatura	°C	34.09
Caudal	m ³ /d	691.20
DBO	mg/L	1527.41
DQO	mg/L	3544.75
SST	mg/L	1700.00
Nitrógeno Total	mg/L	180.21
Aceites y Grasas	mg/L	318.10

Caudal Medio: (Garcia, 2022).

$$Q_{ip} = Q + (\%Fugas \times Q) \quad Ec.1$$

$\%fugas=20\%$

$$Q_{ip} = 691.20 \text{ m}^3/d + (20\% \times 691.20 \text{ m}^3/d) = 829.44 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{ip} = 34.56 \text{ m}^3/h$$

Caudal de Diseño:

$$Q_{diseño} = Q_{ip} \times FMD \quad Ec.2$$

Factor medio de diseño: FMD= 1.5

$$Q_{diseño} = 829.44 \text{ m}^3/d \times 1.5 = 1244.16 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{diseño} = 51.84 \text{ m}^3/h$$

5.2 Parámetros ambientales.

La temperatura es el parámetro ambiental por excelencia y determina la viabilidad del tratamiento anaeróbico. La temperatura de entrada al reactor es de $T = 34.09^{\circ}\text{C}$.

5.3 Parámetros que afectan el diseño y la operación.

El parámetro externo que más afecta el diseño y la operación es la fluctuación horaria, diaria, semanal o mensual de caudal.

5.4 Suposiciones Básicas.

Carga de DQO en el afluente promedio:

$$L_0 = S_0 * Q_{ip} \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

L_0 = carga de DQO en el afluente promedio (L_0) kg/d.

S_0 = DQO afluente promedio kg/m^3 .

Q_{ip} = caudal afluente promedio m^3/d .

$$L_0 = 3.54 \text{ kg}/\text{m}^3 * 829.44 \text{ m}^3/\text{d} = 2940.16 \text{ kg}/\text{d}$$

Tiempo de retención hidráulico (TRH):

$$TRH = V/Q \quad \text{Ec.4}$$

También de acuerdo con la tabla 7 seleccionar el tiempo de retención hidráulico. El volumen dato del matadero.

Donde:

TRH = tiempo de retención hidráulica (h).

V = volumen m^3 .

Q = caudal m^3/h .

$$TRH = 720 \text{ m}^3 / 34.56 \text{ m}^3/\text{h} = 20.83\text{h}$$

Cálculo del volumen:

$$V = Q \times TRH \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

V = volumen del reactor m^3 .

Q = caudal m^3/h .

TRH = tiempo de retención hidráulico h.

$$V = 34.56 \text{ m}^3/\text{h} \times 20.83\text{h} = 720.00 \text{ m}^3$$

Numero de módulos del reactor:

Volumen menor a 1,500 m³ (Metcalf & Eddy, 2003) para sistemas pequeños, volumen < 500 m³ (Chernicharo, 2007).

(Metcalf)<1,500 m³: N = 2

Cálculo del volumen de cada módulo:

$$V_U = \frac{V}{N} \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

V_U = volumen de cada módulo m³.

V = volumen del reactor m³.

N = número de módulos.

$$V_U = \frac{720 \text{ m}^3}{2} = 360 \text{ m}^3$$

Altura del reactor:

Las velocidades de flujo impuestas al sistema dejan a los reactores con alturas útiles de entre 4 y 5 metros, distribuidas de la siguiente forma: altura del compartimento del sedimentador: 1.5 a 2.0 m; altura del compartimento de digestión: entre 2.5 y 3.5 metros (Chernicharo, 2007). Altura de 3 a 6 metros (Chernicharo, 2007) altura de 6 metros (Metcalf & Eddy, 2003) tabla 10.

Altura: H = 6 m

Área de cada módulo:

$$A = \frac{V_U}{H} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

A = área de cada módulo (m²).

V_U = volumen de cada módulo (m³).

H = altura del reactor (m).

$$A = \frac{360 \text{ m}^3}{6 \text{ m}} = 60 \text{ m}^2$$

Dimensiones del área del reactor:

$$L = \sqrt{A} \text{ o } d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad \text{Ec.8 y Ec.9}$$

Donde:

L = lados del reactor, tanto ancho como largo (m).

A = área del reactor (m^2).

$$L = \sqrt{60} m^2 = 7.75 m$$

Carga hidráulica volumétrica (CHV):

$$CHV = \frac{Q_{ip}}{V} \quad \text{Ec.10}$$

Donde:

CHV = carga hidráulica volumétrica (d).

Qip = caudal medio (m^3/d).

V = volumen del reactor (m^3).

$$CHV = \frac{829.44 m^3/d}{720 m^3} = 1.15 d$$

Carga orgánica volumétrica (COV):

$$COV = \frac{Q_{ip} * S_0}{V} \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

COV = carga orgánica volumétrica (kg DQO/ $m^3 \cdot d$)

Qip = caudal medio (m^3/d).

So = afluente promedio de DQO (kg/m^3).

V = volumen del reactor (m^3).

$$COV = \frac{829.44 m^3/d * 3.54 kg/m^3}{720 m^3} = 4.08 kg DQO/m^3 \cdot d$$

5.5 Proceso de diseño.

Velocidad de flujo ascendente, para Qip:

$$v = \frac{Q_{ip}}{A_t} \quad \text{Ec.12}$$

Donde:

v = velocidad ascensional (m/d).

Qip = caudal medio (m^3/d).

At = área transversal del reactor (m^2).

$$v = \frac{829.44 \text{ m}^3/\text{d}}{60 \text{ m}^2} = 13.82 \text{ m/d}$$

Velocidad de flujo ascendente, para Q_{maxh} :

$$v = \frac{Q_{maxh}}{A_t} \quad \text{Ec.13}$$

Donde:

v = velocidad ascensional (m/h).

Q_{maxh} = caudal medio (m^3/h).

A_t = área transversal del reactor (m^2).

$$v = \frac{34.56 \text{ m}^3/\text{h}}{60 \text{ m}^2} = 0.58 \text{ m/h}$$

Comparar la velocidad del flujo ascendente, ver tabla 8.

Sistemas de distribución del agua residual (afluente):

Establecer el área de influencia de los tubos de alimentación ver tabla 9. (lodo granular).

Numero de tubos de distribución del agua residual (afluente):

$$N_d = \frac{A_t}{A_d} \quad \text{Ec.14}$$

Donde:

N_d = número de tubos de distribución

A = área de la sección transversal del reactor (m^2)

A_d = área de influencia de cada distribuidor (m^2).

El agua residual influente se debe distribuir en el fondo del reactor tan uniformemente como sea posible, como se indica esquemáticamente en la Figura 8. Ver tabla 8.

$$A_t = \frac{720 \text{ m}^3}{6\text{m}} = 120 \text{ m}^2$$

$$N_d = \frac{120 \text{ m}^2}{3.5 \text{ m}^2} = 34.29$$

Estimación de la eficiencia de remoción de la DQO:

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0.68 * t^{-0.35}) \quad \text{Ec.15}$$

Donde:

E_{DQO} = eficiencia de remoción de DQO.

t = tiempo de retención hidráulico.

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0.68 * 20.83^{-0.35}) = 76.51\%$$

Estimación de la eficiencia de remoción de la DBO:

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0.70 * t^{-0.50}) \quad \text{Ec.16}$$

Donde:

E_{DQO} = eficiencia de remoción de DBO.

t = tiempo de retención hidráulico.

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0.70 * 20.83^{-0.50}) = 84.66\%$$

Estimación de las concentraciones de DQO y DBO en el efluente final:

$$C_{efl} = \frac{S_0 - (E * S_0)}{100} \quad \text{Ec.17}$$

Donde:

C_{efl} = estimación de concentración de DQO.

S_0 = concentración de afluente promedio de DQO kg/m^3 .

E = eficiencia de remoción de DQO.

$$C_{efl} = \frac{3.54 \text{ kg/m}^3 - (76.51 * 3.54 \text{ kg/m}^3)}{100} = 0.83 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{efl} = 832.78 \text{ mg/L}$$

$$C_{efl} = \frac{S_0 - (E * S_0)}{100}$$

Donde:

C_{efl} = estimación de concentración de DBO.

S_0 = concentración de afluente promedio de DBO kg/m^3 .

E = eficiencia de remoción de DBO.

$$C_{efl} = \frac{1.53 \text{ kg/m}^3 - (76.51 * 1.53 \text{ kg/m}^3)}{100} = 0.23 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{efl} = 234.25 \text{ mg/L}$$

Estimación de la producción del metano:

$$DQO_{CH_4} = Q(S_0 - S) - Y_{abs} Q S_0 \quad \text{Ec.18}$$

$$K(t) = \frac{P K_{DQO}}{R (273+T)} \quad \text{Ec.19}$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad \text{Ec.20}$$

Donde:

DQO_{CH_4} = concentración de metano en términos de DQO ($kgDQO_{CH_4}/d$).

Q = caudal medio (m^3/h).

S_0 = concentración promedio de DQO kg/m^3 .

Y_{abs} = coeficiente de producción de sólidos en el sistema, en términos de DQO (0.11 a 0.23 $kg DQO_{lodo}/ kg DQO_{aplicada}$).

S = concentración de DQO en el efluente final $0.83 kg/m^3$.

$$DQO_{CH_4} = 34.56 m^3/h(3.54 kg/m^3 - 0.83kg/m^3) - 0.23 * 34.56 m^3 * 3.54 kg/m^3$$

$$DQO_{CH_4} = 65.55 kgDQO_{CH_4}/d$$

$$K(t) = \frac{P K_{DQO}}{R (273 + T)}$$

Donde:

P= presión atmosférica (1 atm).

K_{DQO} = DQO correspondiente 1 mol de CH_4 (64 g DQO/mol).

R= constante del gas (0.08206 atm L/ mol K).

T = temperatura de operación del reactor ($^{\circ}C$).

$$K(t) = \frac{1 * 64}{0.08206 (307.24)} = 239621.74 kg/m^3$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

Donde:

Q_{CH_4} = Producción de metano volumétrico (m^3/d).

K(t) = Factor de corrección dependiendo de la temperatura de operación del reactor ($kg DQO/m^3$).

$$Q_{CH_4} = \frac{65.55 \text{ kgDQO}_{CH_4}/d}{239621.74 \text{ kg/m}^3} = 0.0002736 \text{ m}^3/d$$

Estimación de la producción de biogás considerando un 75% de metano:

$$Q_g = \frac{Q_{CH_4}}{0.75} \quad \text{Ec.21}$$

Donde:

Q_g = estimación de la producción de biogás.

Q_{CH_4} = producción de metano volumétrico (m^3/d).

$$Q_g = \frac{0.0002736 \text{ m}^3/d}{0.75} = 0.0003647 \text{ m}^3/d$$

Cálculo de la producción de lodos (PI):

Establecer un coeficiente del rendimiento de sólidos γ de acuerdo con la tabla 9.

$$P_l = \gamma * DQO_{app}(L_0) \quad \text{Ec.22}$$

Donde:

γ = Kg SST/Kg DQO aplicada; 0.15.

L_0 = carga de DQO en el afluente promedio kg/d.

$$P_l = 0.15 * 0.83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2940.16 \frac{\text{kg}}{d} = 367.2745 \text{ kg. SST/d}$$

Establecer el coeficiente de rendimiento de sólidos: Establecer la densidad del lodo (Y) y una concentración esperada de la descarga del lodo (C), de acuerdo con la Tabla 10.

$$V_l = \frac{P_l}{\gamma * \left(\frac{C}{100}\right)} \quad \text{Ec.23}$$

Donde:

V_l = volumen de producción de lodos (m^3/d).

P_l = producción de lodos

γ = densidad del lodo (usualmente en el orden de 1.020 a 1.040 kg/m^3).

C = concentración de sólidos en el lodo (%).

$$V_l = \frac{367.2745 \text{ kg SST/d}}{1030 \text{ kg/m}^3 * \left(\frac{3.50\%}{100}\right)} = 0.0001248 \text{ m}^3/d$$

Área de pasaje del líquido en la base del separador trifásico:

$$A_{aperturas} = \frac{Q}{V_{ascGLS}} \quad \text{Ec.24}$$

Donde:

$A_{aperturas}$ = área de pasaje de líquido en la base del separador trifásico (m^2).

Q = caudal de líquido (m^3/h).

$V_{asc GLS}$ = máxima velocidad ascensional permisible de líquido a la altura de la base del separador trifásico (m/h).

$$A_{aperturas} = \frac{34.56 m^3/h}{0.58 m/h} = 60 m^2$$

Área total necesaria para los separadores GLS:

Una vez que se conozca $A_{aperturas}$, se puede calcular el área total necesaria para todos los separadores GLS como:

$$A_{GLS} = A_{reactor} = A_{aperturas} \quad \text{Ec.25}$$

Donde:

A_{GLS} = área basal total de los separadores trifásicos (m^2).

$A_{reactor}$ = área total del reactor (m^2).

$A_{aperturas}$ = área total de las aperturas (m^2).

$$A_{GLS} = A_{reactor} = A_{aperturas} = 60m^2$$

Ángulo de las paredes del separador: se recomienda generalmente que este ángulo esté entre 45 y 60°.

Distancia entre la pared, el reactor y el separador GLS:

$$p = \frac{W_r - n_{GLS} \times W_{GLS}}{2 \times n_{GLS}} \quad \text{Ec.26}$$

Donde:

p = distancia entre el reactor y el separador GLS (m)

W_r = ancho del reactor (m).

n_{GLS} = número de separadores GLS

W_{GLS} = ancho de cada separador GLS (m).

$$p = \frac{7.75 m - 4 \times 1.90 m}{2 \times 4} = 0.2919 m$$

VI. CONCLUSIONES

Se caracterizó las propiedades químicas, físicas y biológicas del agua residual tratada en el reactor UASB, que fueron la base del desarrollo tecnológico del proceso de diseño y para determinar la calidad del agua residual de entrada al reactor del matadero a partir del caudal medio $829.44 \text{ m}^3/d$ y la concentración de DQO y DBO 1527.41 y 1527.41 mg/L respectivamente.

Se estableció la carga orgánica volumétrica que se trató en el reactor UASB para definir la carga o flujo másico de materia orgánica por unidad de volumen dentro del reactor dando como resultado una cov de 4.08 kg DQO/m^3d .

Se determinaron las dimensiones de los elementos principales del reactor UASB a partir de la metodología de diseño elaborando los planos de diseño del reactor del matadero.

Se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes del agua tratada en el reactor UASB en términos de DQO y DBO teniendo una concentración de salida de 832.78 mg/L y 234.25 mg/L respectivamente.

Se diseñó un reactor UASB para un sistema de tratamiento de agua residuales de un matadero en el cual se obtuvo una buena eficiencia de remoción de contaminantes bajo las condiciones mencionadas se obtuvieron eficiencias de remociones de 76.51% de DQO (demanda química de oxígeno), 84.66% de DBO (demanda bioquímica de oxígeno). Estimando la carga de concentración de la salida del reactor de 832.78 mg/L de DQO y 234.25 mg/L de DBO, también se estimó la producción de metano $65.55 \text{ kg DQO}_{CH_4}/d$ y una producción de lodos de 367.27 kg SST/d , para aprovechar estos subproductos del proceso del reactor del matadero.

VII. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos se pueden tomar las recomendaciones siguientes para futuros diseños afines a este tema:

- Antes del tratamiento anaerobio implementar unidades de pretratamiento para retener sólidos en suspensión y que no obstaculicen la operación del reactor.
- Después del tratamiento anaerobio implementar un postratamiento aerobio para oxidar y reducir la carga orgánica para obtener mejor calidad del agua residual.
- Hacer uso del caudal de biogás producido a partir de la descomposición de la materia orgánica como fuente de aprovechamiento de energía.
- Se recomienda aprovechar el volumen de lodo granular obtenido como subproducto del proceso del reactor UASB, como abono orgánico en el área de la agricultura.
- Se recomienda que el efluente tratado tenga un reúso en sistemas de riego para la agricultura en cultivos de irrigación de todo tipo de cultivos excepto verduras de hojas y vegetales que sean consumidos crudos.

VIII. NOMENCLATURA

LDM	Lagunas de Maduración	%
ARI	Aguas Residuales Industriales	%
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l
DQO	Demanda Química de Oxígeno	mg/l
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico	h
SST	Sólidos Suspendidos Totales	mg/l
d	Diámetro	m
h	Altura	m
A	Área	m
V	volumen	m ³
GLS	Gas-Líquido-Sólido	%
L	Lado	m
C	Concentración	%
COV	Carga Orgánica Volumétrica	kg
CHV	Carga Hidráulica Volumétrica	d
Q	Caudal	m ³ /d
Vasc	Velocidad Ascensional	%

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Arango, O., & Sanches, L. (26 de Octubre de 2009). *Scielo.Org.co*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612009000200004
- Bair, R., Eaton, A., & Rice, E. (2017). *Standard Methods*. Washington DC: American Public Health Association.
- Bermúdez, R., Rodríguez, & S. (22 de Febrero de 2011). *Aqualimpia.com*. Obtenido de <http://www.Aqualimpia.com>
- Caicedo, F. (2006). *Diseño, Construcción y arranque de un reactor UASB, piloto para tratamientos de lixiviados*. Colombia.
- Cakir, F., & Stenstrom, M. (2005). Greenhouse gas production: a comparison between aerobic and anaerobic waste water treatment technology water research. 4197-4203.
- Carvajal, E. (2014). *Repositorio.uisek.edu.ec*. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/1001>
- Castillo, E., & Solano, K. (2006). Evaluación Operacional de un sistema a escala de laboratorio de biopelícula anaerobia soportada para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *ION*. Vol.19, 18-22.
- Chan, Y., Chong, M., & Law. (2009). *Reactores Anaerobios*.
- Chernicharo, C. (2007). *Anaerobic Reactors, vol.4*. Brazil: IWA DESA.
- Company, H. (2000). *hach.com*. Obtenido de <file:///C:/Users/USER/Downloads/Water%20Analysis%20Manual-Spanish-Manual%20de%20Análisis%20de%20Agua.pdf>
- Fernandez, F., & Seghezzi, L. (2015). *Diseño de Reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*. Argentina.
- Fogler, H. (2008). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas, 3a. ed.* México: Prentice Hall.
- Gandarillas, V., Saavedra, O., Escalera, R., & Montoya, R. (16 de Junio de 2017). *Scielo.Org.bo*. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312017000100008&script=sci_arttext
- García, I. (2022). Selección de Tecnología y Cálculo del Caudal. Managua. Obtenido de <file:///C:/Users/USER/Downloads/Clase%20c,%20Selección%20de%20Tecnología%20y%20Cálculo%20de%20Caudal.pdf>

- <http://www.inaa.gob.ni>. (30 de Noviembre de 2017). Obtenido de <http://www.inaa.gob.ni/sites/default/files/inline-files/Decreto%2021-2017%20DISPOSICIONES%20VERTIDOS%20AGUAS%20RESIDUALES.pdf>
- Khan, A., & Gaur, R. (2011). *Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage*.
- Levenspiel, O. (2004). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. New York: Reverte, S.A.
- López, J. (Enero de 2011). *Repositorio.Usfq.edu.ec*. Obtenido de <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/750>
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Waste Water Engineering Treatment and reuse (4th edition)*. McGraw Hill.
- Pacheco, J., & Magaña, A. (2003). *Arranque de un reactor anaerobio ingeniería. vol.7*.
- Salazar, L., & Ludwing, U. (Junio de 2019). *Scielo.org.co*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532019000200319
- Vela, R., & Quipuzco, L. (3 de Julio de 2018). *Scielo.org*. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172018000300009
- Vilchez, H., Pinell, W., & López, F. (21 de Diciembre de 2015). *Camjol.info*. Obtenido de <https://camjol.info/index.php/elhigo/article/view/8628>
- www.inide.gob.ni. (Noviembre de 2012). Obtenido de <https://www.inide.gob.ni/docu/censos2005/VolVivienda/Vol%20II/Vol.II%20Vivienda-Municipios.pdf>

Anexos

X. Anexos

10.1 Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales.

1. Determinación del pH:

Parte 4000 constituyentes inorgánicos no metálicos, 4500-valor pH, 4500 B. Método electrométrico, pág. 4-95 (Bair, Eaton, & Rice, 2017).

Reactivos:

Preparación general.

Solución saturada de tratato de hidrogeno y potasio $\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6$.

Solución saturada de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Soluciones auxiliares.

Procedimiento:

Calibración del instrumento: los electrodos varían según el tipo de electrodos y el fabricante, por lo general tienen conductividad superior a $4000 \mu\text{m ho/cm}$. Un tampón de pH 4 es mejor para el electrodo de vidrio y se prefiere un electrodo de referencia de calomelanos y Ag/AgCl . Retire los electrodos del primer tampón, enjuáguelos con agua destilada, séquelos y sumerja en el segundo tampón. Registre la temperatura y ajuste el dial de temperatura en el medidor para que el medidor indique el valor del pH, utilice el valor de pH indicado en las tablas para el tampón a la temperatura de prueba. Si los valores de pH de la muestra varían mucho, estandarice cada muestra con un tampón que tenga un pH de 1 a 2 unidades de pH de la muestra.

Análisis de muestra: establezca el equilibrio entre los electrodos, agitando la muestra para garantizar la homogeneidad, revuelva suave para minimizar el arrastre de dióxido de carbono. Para muestras de alta fuerza iónica acondicione los electrodos después de limpiarlos sumergiendo la muestra por 1 min, seque sumerja en una porción nueva de la misma muestra y lea el pH.

2. Determinación de la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del agua residual:

Parte 2000 propiedades físicas de los agregados, 2550-Temperatura, 2550B. Métodos de laboratorio y campo, pág. 2-74 (Bair, Eaton, & Rice, 2017).

Procedimiento:

Laboratorio y otras mediciones no profundas: normalmente la temperatura se puede medir con cualquier termómetro de líquido en vidrio o electrónico con una lectura analógica o digital.

Mediciones de temperatura de profundidad: se pueden medir con un termómetro inversor, un termófono o un termistor. Un termómetro de tipo inversor, a menudo se monta en el aparato de agua, corrija las lecturas para los cambios debidos a las diferencias entre las temperaturas.

Calculo:

$$\Delta T = \left[\frac{(T^1 - t)(T^1 + V_0)}{K} \right] X \left[1 + \frac{(T^1 - t)(T^1 + V_0)}{K} \right] + L \quad \text{Ec.27}$$

Donde:

ΔT = la corrección se sumará algebraicamente a la lectura no corregida.

T^1 = inverso de lectura no corregida.

t = temperatura a la que se lee el termómetro.

V_0 = el volumen de la bombilla pequeña final del capilar hasta la graduación de 0°C.

K = constante dependiendo de la dilatación térmica relativa del mercurio y el vidrio (valor habitual $K=6100$).

L = corrección de calibración del termómetro en función de T^1 .

3. Determinación de SST (Sólidos Suspendidos Totales) (mg/L)

Parte 2000 propiedades físicas de los agregados, 2540 sólidos suspendidos totales, 2540 B. Método total de sólidos en suspensión secados a 103-105°C, pág. 2-70 (Bair, Eaton, & Rice, 2017).

Procedimiento:

Preparación del disco de filtro de fibra de vidrio: inserte el filtro con el lado arrugado hacia arriba del aparato de filtración, aplique vacío y lave el disco para eliminar rastro de agua. Retire el filtro del aparato de filtración y transféralo a un plato de pesaje inerte, si se utiliza un crisol de gooch, retire la combinación de crisol y filtro se seca en un horno a 103-105°C durante 1 h, enfriar y pesar. Si mide los sólidos volátiles a 550 ± 50°C durante 15 min en un horno de mufla.

Selección de filtros y tamaño de la muestra: elija volúmenes de muestra para producir entre 2,5 y 200 mg de residuo seco. Si la filtración tarda más de 10 min aumente el tamaño del filtro o reduzca el volumen de la muestra.

Análisis de muestra: mezcle la muestra y transféralo a un volumen medido a un recipiente de vidrio filtro de fibra con vacío aplicado. Lave el filtro con al menos tres volúmenes sucesivos de 10 ml de agua. Permita el drenaje y continúe aspirando hasta que se eliminen los restos de agua. Con unas pinzas retire el filtro del aparato de filtración y transféralo a un plato de pesaje inerte como soporte. Si usa crisol secar durante 1 h a 103-105°C, enfriar en desecador y pesar. Repita el ciclo

(secado, enfriamiento, desecación y pesaje) hasta el cambio de peso sea de 0,5 mg.

Calculo:

$$mg SST/L = \frac{(A-B) \times 1000}{Volumen de muestra ml} \quad Ec.28$$

Donde:

A= peso final del filtro + residuo seco, mg

B= peso del filtro, mg.

4. Determinación de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) (mg/L):

Parte 5000 componentes orgánicos agregados, 5210-DBO5, 5210 B. Método de prueba de DBO de 5 días, pág.5-5 (Bair, Eaton, & Rice, 2017).

Reactivos:

- a. Solución tampón de fosfato (buffer).
- b. Solución de sulfato de magnesio ($MgSO_4$).
- c. Solución de cloruro de calcio ($CaCl_2$).
- d. Solución de cloruro férrico ($FeCl_3$).
- e. Soluciones acidas y alcalinas.
- f. Solución de sulfito de sodio (Na_2SO_3).
- g. Inhibidor de la nitrificación.
- h. Solución de ácido glutámico (GGA).
- i. Solución de cloruro de amonio (NH_4Cl).
- j. Fuente de agua para preparar agua de dilución de DBO.

Procedimientos preparatorios:

- a. Muestreo y almacenamiento.
 1. Muestras al azar.
 2. Muestras compuestas.
- b. Preparación de muestras y pretratamiento.
 1. Todas las muestras comprobar el pH.
 2. Muestras que contengan compuesto de cloro residual.
 3. Muestras que contienen otras sustancias toxicas.
 4. Muestras súper saturadas con DO (tabla 4500-0:1 del estándar método).
 5. Muestras que contienen peróxido de hidrogeno.
- c. Selección y almacenamiento de la fuente de agua para la dilución de la muestra de DBO. (es decir agua destilada).
- d. Preparación de la suspensión de semillas.

Procedimiento de prueba:

- a. Preparación del agua de dilución: transfiera el volumen de trabajo deseado de la fuente, a una botella de tamaño adecuado (se prefiere el vidrio). Compruebe que la concentración de DO sea de al menos 7,5 mg/L. agregue 1 ml de solución buffer de fosfato de magnesio $MgSO_4$, $CaCl_2$ y $FeCl_3/L$ al agua de fuente preparada mezclar y llevar la temperatura a $20 \pm 3^\circ C$.
- b. Ajuste de la temperatura de la muestra: llevar la temperatura de la muestra a $20 \pm 3^\circ C$ antes de hacer las diluciones.
- c. Preparación de las diluciones: usando agua de dilución preparada como se indicó anteriormente, haga tres diluciones de la muestra preparada, al final de la prueba al menos una dilución que resulte en DO residual de 21,0 mg/L y una absorción de DO de 2,0 mg/L después de una incubación de 5 días.
 1. Diluciones preparadas en recipientes volumétricos: utilizando una pipeta de punta ancha o un cilindro graduado, agregue la cantidad de muestra deseada y mezcle bien la muestra antes de pipetear para evitar la pérdida de sólidos por sedimentación.
 2. Diluciones preparadas directamente en botellas de DBO: utilizando una pipeta volumétrica, agregue el volumen de muestra deseado en las botellas de DBO individuales. Mezcle bien la muestra antes de pipetear para evitar la pérdida de sólidos por sedimentación.
- d. Adición de suspensión de semillas: si se utiliza la siembra, agregue las suspensiones de semillas a los recipientes de dilución las botellas individuales de DBO antes de la dilución final como se describe en inciso c.
- e. Adición de inhibidor de nitrificación las muestras que pueden requerir inhibición incluyen entre otros efluentes tratado biológicamente. TCMP es el inhibidor de nitrificación preferido.
 1. Inhibición de la nitrificación usando TCMP: agregue 10 mg TCMP/L a la muestra diluida, 3 mg TCMP a cada botella de 300 ml.
 2. Inhibición de la nitrificación usando ATU, agregar 1 ml de solución, muestra diluida o 0,3 ml/300 ml, botella de prueba.
- f. Sellado de botellas: llene cada botella agregando suficiente agua de dilución para que la inserción del tapón no deje burbujas en la botella.
- g. Determinación del DO inicial: utilice la modificación de ácido del método yodo métrico (sección 4500-O.C del método estándar).
- h. Incubación de la muestra: incube a $20 \pm 1^\circ C$ los frascos de DBO tapados y sellados que contienen las diluciones deseadas. Excluya la luz para evitar el crecimiento de algas en las botellas durante la incubación.
- i. Determinación del DO final: después de 5 días \pm 6 h de incubación, determine el DO en todas las diluciones de muestras y blancos usando la modificación de ácido del método volumétrico (sección 4500-O.C del método estándar).

Calculo:

Para cada botella de prueba con al menos 2,0 mg/L de agotamiento de DO y al menos 1,0 mg/L de DO residual, calcule la DBO de la siguiente manera:

$$DBO = \frac{(D_1 - D_2) - (S)V_s}{P} \quad \text{Ec.29}$$

Donde:

D_1 = DO de la muestra diluida después de la preparación, mg/L.

D_2 = DO de la muestra diluida después de 5 días de incubación a 20 °C, mg/L.

S = consumo de oxígeno de la semilla (Δ DO/ml suspensión de semillas añadidas por botella (5210B.6d del método estándar), si $S=0$ las muestras no contienen semillas).

V_s = volumen de semilla en la botella de prueba respectiva, ml.

P = fracción volumétrica decimal de muestra utilizada; $1/p$ =factor de dilución.

5. Determinación de DQO (Demanda Química de Oxígeno) (mg/L):

Parte 5000 componentes orgánicos agregados, 5220-Demanda química de oxígeno (COD), 5220B. Método de reflujo abierto, pág. 5-17 (Bair, Eaton, & Rice, 2017).

Reactivos:

- a. Solución estándar de dicromato de potasio 0.04167 M ($K_2Cr_2O_7$).
- b. Reactivo de ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- c. Solución indicadora de ferroina.
- d. Valorante estándar de sulfato de amonio ferroso (FAS) 0,25 M.
- e. Sulfato de mercurio ($HgSO_4$).
- f. Ácido sulfámico.
- g. Patrón de hidrogenoftalato de potasio (KHP).

Procedimiento:

- a. Tratamiento de muestras con COD de >50 mg O_2/L : mezcle la muestra si es necesario y pipetee 50 ml en un matraz de reflujo de 500 ml. Para muestras con una DQO de 900 mg O_2/L , use una porción más pequeña diluida a 50 ml. Agregue 1 g de $HgSO_4$ perlas de vidrios y agregue 5,0 ml de ácido sulfúrico. Enfríe mientras mezcla para evitar pérdidas de materiales volátiles agregar 25,0 ml de solución de $K_2Cr_2O_7$ 0,04167 M y mezclar. Conecte el matraz al condensador y abra el agua de refrigeración, agregue el ácido sulfúrico restante 70 ml.
- b. Procedimiento alternativo para muestras con DQO bajo: siga el procedimiento anterior con dos excepciones:
 - ✓ Utilice el estándar 0,004167 M $K_2Cr_2O_7$.
 - ✓ Titule con el estándar 0,025 M FAS.

- c. Determinación de solución estándar: evaluar la técnica y la calidad de los reactivos realizando la prueba en una solución estándar de ftalato ácido de potasio.

Calculo:

$$DQO \text{ como } mg O_2/L = \frac{(B-A) \times M \times 8000}{ml \text{ de Muestra}} \quad \text{Ec.30}$$

Donde:

B= ml FAS utilizado para la muestra.

A= ml FAS usado para el blanco.

M= molaridad de FAS.

8000= miliequivalentes en peso de oxígeno x 1000 ml/L.

Los separadores trifásicos dispositivos más característicos y más importantes del reactor UASB. Cumplen muchas funciones.

Figura 4. Maqueta del separador GSL donde se pueden ver detalles de diseño (izquierda: corte transversal; derecha: vista de planta).

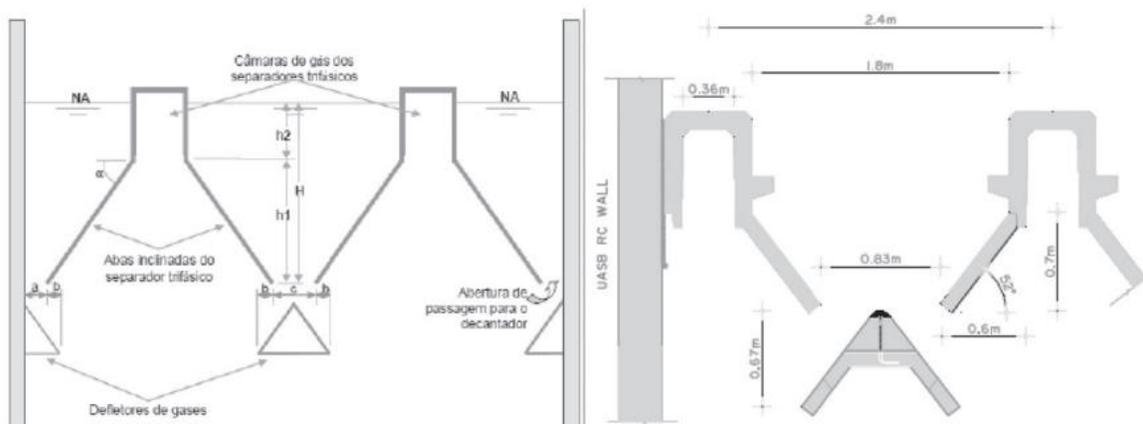


Figura 5. Los separadores GSL.

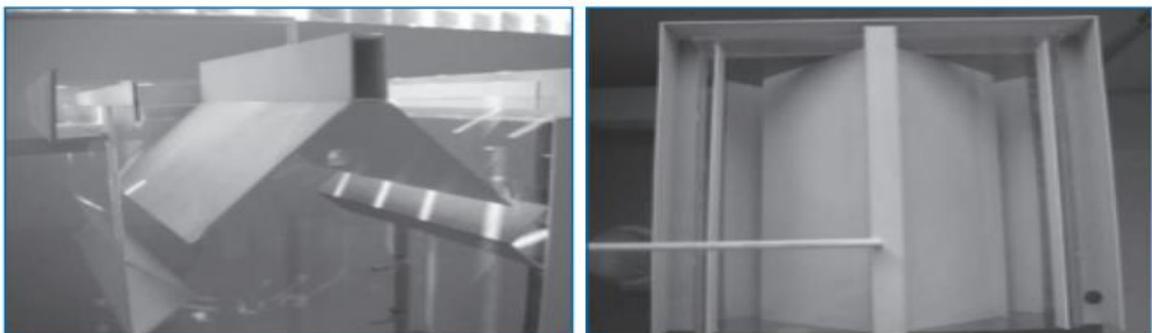
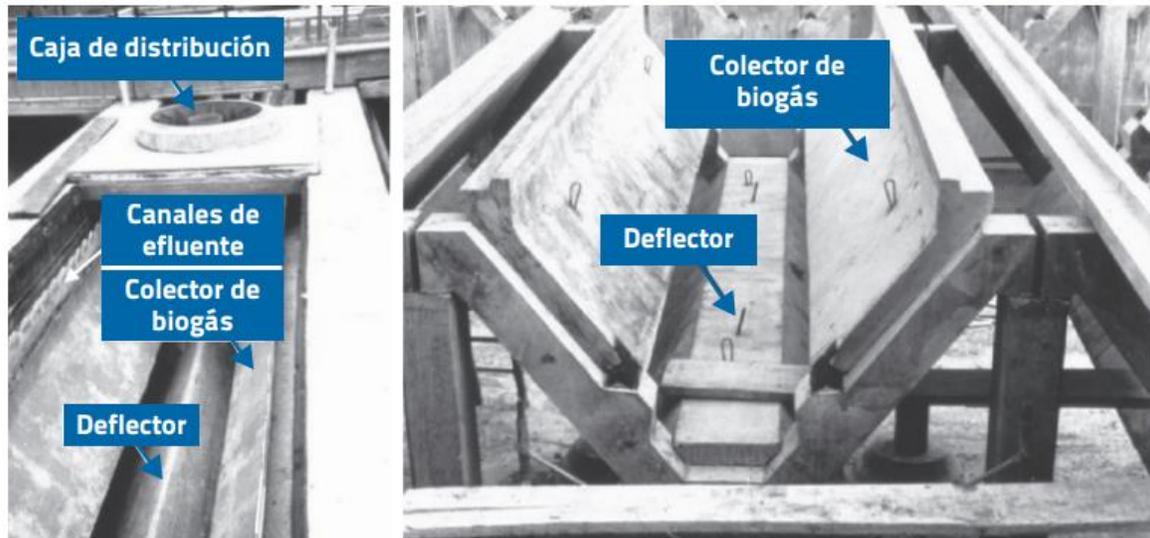
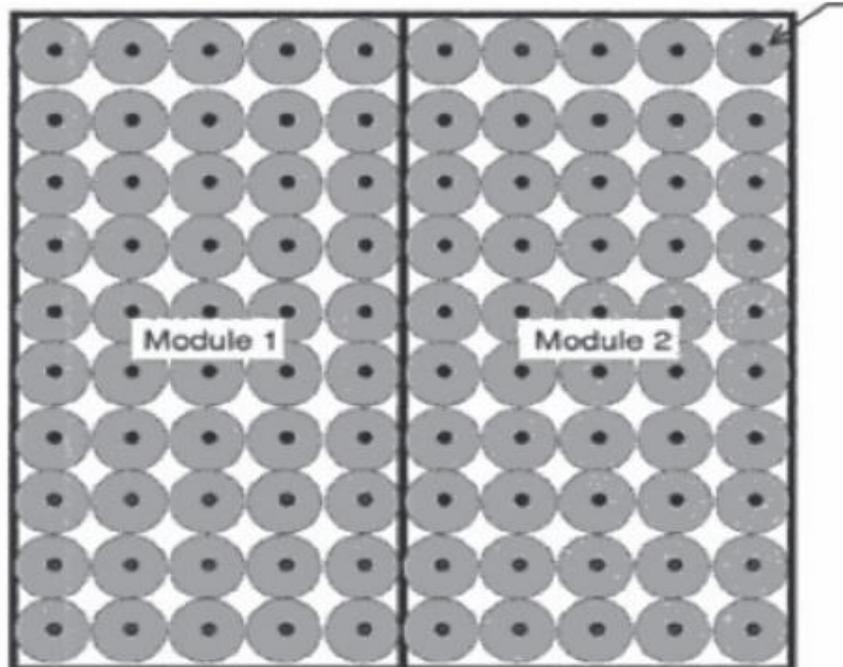


Figura 6. Partes del separador GSL.



En general se recomienda un área de liberación tal que permita el paso de entre 1 y 5 m³ de biogás por m² de área de liberación y por hora.

Figura 7. Distribución uniforme del influente del reactor UASB.

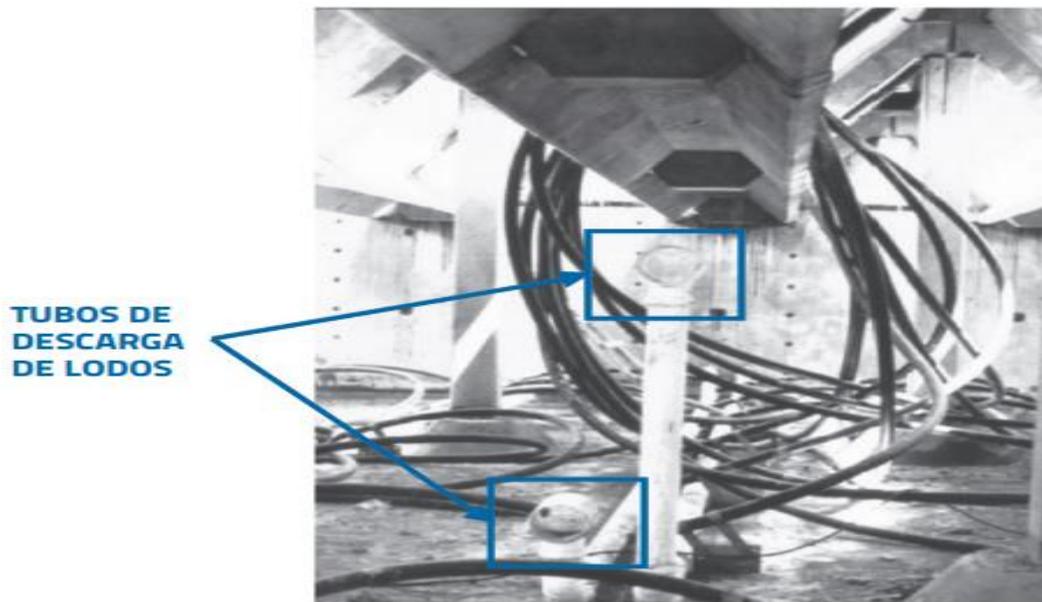


Puntos de descarga del lodo.

El lodo que se produce en el reactor UASB debe ser descartado de manera periódica una vez que el nivel del manto de lodo alcanzó el nivel óptimo. El primer tubo (empezando desde abajo) se debe colocar alrededor de 0.20 m sobre el sistema de inyección de influente y el último a unos 0.05 m por debajo de los deflectores de gases. El resto de los tubos (al menos uno más), se distribuyeron uniformemente entre estos dos puntos. En nuestro caso, se decidió instalar 6 tubos de descarga para poder caracterizar el lodo a diversas alturas.

En el extremo de los tubos de descarga dentro del reactor, es conveniente instalar un resguardo en forma de T para facilitar el muestreo del lodo y evitar obstrucciones (Figura 8).

Figura 8. Tubos de descarga en exceso en el interior del reactor UASB.



Lechos de secado de lodos.

Considerando que, bajo buenas condiciones climáticas, se necesitan alrededor de 3 días para secar una capa delgada de lodo (0.20 m), se puede estimar que los lodos producidos en el reactor UASB se pueden secar en un lecho de secado de 90 m² (3 módulos de 30 m²) (Figura 10). Si el tiempo de secado es más largo, el área de los lechos será más grande. Un ejemplo de lechos de secado natural de lodos anaeróbicos se puede ver en la Figura 9.

Figura 9. Lechos de secado de lodos anaeróbicos.



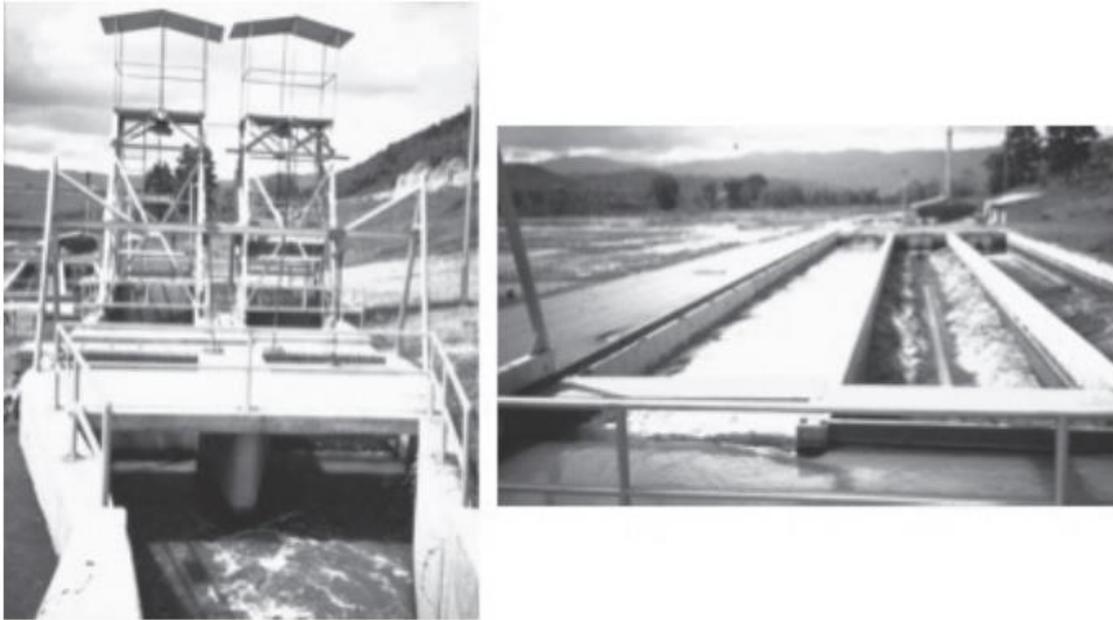
10.2 Puesta en marcha del reactor.

La puesta en marcha de un reactor UASB dura entre 2 semanas y 6 meses, dependiendo del tipo de agua residual, de la temperatura y de la disponibilidad de un inóculo adecuado. Para planificar este período crítico se recomienda siempre el asesoramiento de un especialista calificado. El tratamiento de ARI se puede iniciar sin necesidad de agregar ningún tipo de inóculo de lodo porque las bacterias anaeróbicas ya se encuentran presentes en suficiente cantidad en el líquido influente.

10.3 Tratamiento preliminar.

Como se indicó más arriba, el reactor UASB es sólo el proceso de tratamiento secundario (biológico) de una planta de tratamiento de aguas residuales. Antes del reactor UASB es necesario incorporar una serie de procesos unitarios a la planta de tratamiento para optimizar la eficiencia de remoción de contaminantes y proteger el reactor UASB de la presencia de elementos no biodegradables. En una planta de tratamiento de ARI es indispensable contar con rejas (gruesas y finas) y desarenadores (como los que se muestran en la Figura 10). También se recomienda instalar dispositivos para medir el caudal (por ejemplo, una canaleta Parshall).

Figura 10. Rejas (izquierda) y desarenador (derecha) requeridos para el tratamiento preliminar de la PTARI basada en el reactor UASB.



10.4 Post-tratamiento.

Uno de los aspectos más importantes del proceso anaeróbico que aplica reactores UASB es su capacidad para desarrollar y mantener lodos de alta actividad con excelentes características de sedimentación. Para ello, se deben tomar varias medidas en relación con el diseño y operación del sistema.

Los reactores UASB no eliminan totalmente los agentes contaminantes de las aguas residuales. Por lo tanto, dependiendo de las exigencias legales locales, puede ser necesario incorporar algunos procesos de post-tratamiento con la finalidad de remover la DQO restante, eliminar microorganismos patógenos, y reducir la concentración de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

Uso del efluente tratado.

Las opciones para post-tratamiento son abundantes. Sin embargo, antes de seleccionar un proceso determinado, es importante saber cuál será el destino final del agua tratada, que puede ser descargada en un cuerpo de agua receptor o puede ser reutilizada como agua de riego para la agricultura.

Descarga en un cuerpo receptor.

Si el efluente es transportado a un cuerpo de agua como un río o un lago, se deben respetar las normas locales. Generalmente, es necesario incluir un sistema de post-tratamiento de desinfección con el objetivo de eliminar microorganismos patógenos. Las opciones disponibles para este objetivo son múltiples, pero el sistema más

aplicado son las lagunas de estabilización (de maduración). La DQO y la DBO continuarán disminuyendo durante el post-tratamiento.

Reúso en agricultura.

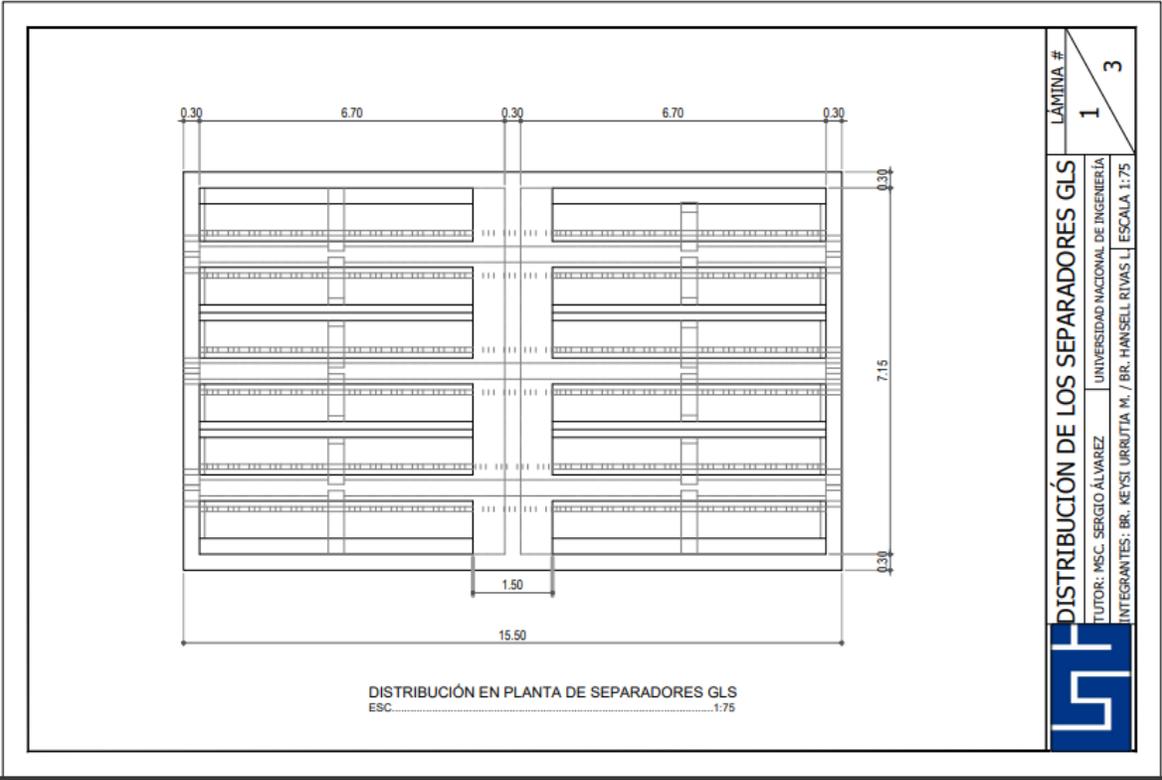
El reúso de efluentes tratados en agricultura es una opción muy interesante en la mayoría de los países en vías de desarrollo. El uso de aguas residuales para irrigación tiene muchas ventajas: reduce la demanda de agua dulce, proporciona una fuente de agua estable y confiable, sirve como sistema complementario de tratamiento de las aguas residuales, reduce la contaminación del agua dulce, protege la salud de la población aguas abajo, contribuye a la producción de alimentos y a la seguridad alimentaria, y promueve una agricultura más sustentable, entre otras ventajas. Sin embargo, también existen algunos riesgos relacionados con esta práctica que necesitan ser reducidos al mínimo a través de una gestión cuidadosa de las aguas residuales tratadas.

A continuación, se muestran una lista de los parámetros importantes de diseño de los reactores UASB.

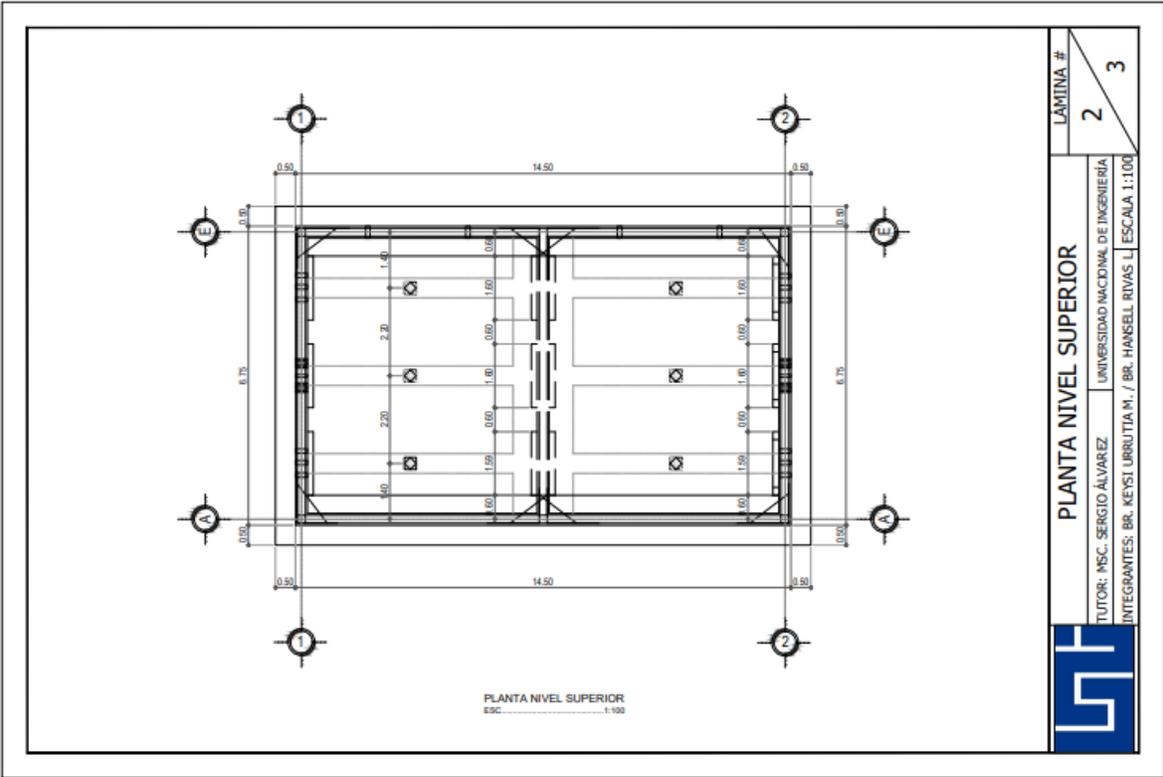
Tabla 13 Lista de parámetros importantes del diseño del reactor UASB.

Etapa	Parámetros	Diseño
Caudal	Q (m ³ /d)	691.20
	Lo (kg DQO/d)	2940.16
	TRH (h)	20.83
Reactor UASB	H altura del reactor (m)	6.00
	V volumen (m ³)	720.00
	L largo (m)	7.75
	Wr ancho (m)	7.75
	Vasc (m/h)	0.58
	COV (kg DQO/m ³ .d)	4.08
Separadores GLS	Unidades GLS	3
	LGLS (largo GLS) (m)	7.75
	WGLS (ancho) (m)	1.90
	GLS (altura GLS) (m)	1.20
	(ángulo GLS) (°)	52.5
	p (distancia reactor-GLS) (m)	0.30
Distribución Influyente	Número de puntos	34
	Numero de filas de puntos de inyección	5

Distribución de tuberías.



Planta nivel superior.



Elevación seccional de los separadores GLS.

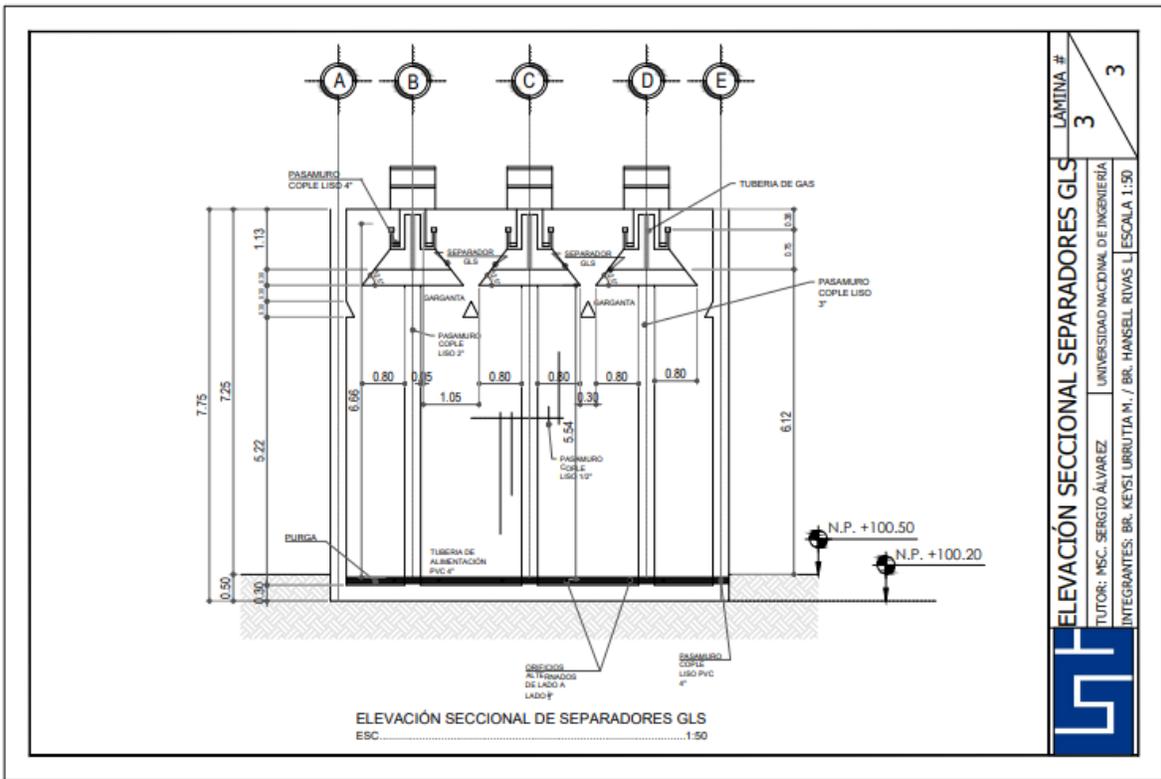


LÁMINA #	3
ELEVACIÓN SECCIONAL SEPARADORES GLS	
TUTOR: MSC. SERGIO ALVAREZ	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
INTEGRANTES: BR. KEYSI URRUTIA M. / BR. HANSEL RIVAS L	ESCALA 1:50