

# Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata

*Contribution for improving the design, construction and operation of UASB reactors treating sewage – Part 3: Management of sludge and scum*

- **Fecha de entrada:**  
01/08/2018
- **Fecha de aprobación:**  
17/09/2018

Livia Cristina da Silva Lobato / Thiago Bressani Ribeiro / Bruno Sidnei da Silva / Carlos Andrés Días Flórez / Priscilla Natalie Pereira Neves/ Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)

DOI: 10.4322/dae.2018.040es

## Resumen

La ausencia o ineficiencia de rutinas operacionales adecuadas para el descarte de lodo excedente y remoción de la nata provoca graves problemas de operación y la pérdida de eficiencia del sistema de tratamiento como un todo. Con el fin de garantizar la adecuada gestión de esos subproductos sólidos, es imprescindible establecer rutinas operacionales para el manejo del lodo y de la nata que puedan ser implementadas efectivamente en los reactores UASB. Esta Nota Técnica (NT) tiene por objetivo presentar los problemas y sus respectivos orígenes relacionados al manejo inadecuado de estos subproductos sólidos, así como las posibles mejoras del diseño, la construcción y la operación en reactores UASB. En síntesis, las mejoras relacionadas a la gestión del lodo y la nata se refieren a los siguientes aspectos principales: i) sensibilización de usuarios y usuarias; ii) mejoras en el tratamiento preliminar; iii) cálculos más precisos de producción de lodo en los reactores, tomando en consideración la recepción de todas las posibles contribuciones a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR); iv) definición de las cantidades de lodo que serán mantenidas y que serán descartadas en el reactor; v) definición de la estrategia de descarte compatible con las características del sistema de deshidratación; vi) control sobre la recepción de efluentes no domésticos, vii) mejor control sobre la formación de nata en el compartimiento de sedimentación; y viii) utilización de separadores trifásicos equipados con dispositivos de remoción de nata. Es importante resaltar que la gestión integrada de subproductos sólidos (lodo y nata), al igual que en el caso del biogás, puede traer importantes beneficios para las PTARs.

**Palabras clave:** Biogás; deshidratación; grasas y aceites; reactores anaerobios; separador trifásico; tratamiento preliminar

**Livia Cristina da Silva Lobato** – Ingeniera Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctora en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG, Brasil. Miembro del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs *Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

**Thiago Bressani Ribeiro** – Ingeniero Ambiental de la Universidad Fundación Minera de Educación y Cultura (FUMEC), Brasil. Máster en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG, Brasil. Doctorando en Saneamiento de la Universidad de Ghent, Bélgica y de la UFMG, Brasil. Miembro del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs *Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

**Bruno Sidnei da Silva** – Ingeniero Ambiental de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Master en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Ingeniero de la Compañía de Saneamiento del Estado de São Paulo (Sabesp), Brasil.

**Priscilla Natalie Pereira Neves** – Ingeniera Ambiental de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Estudiante de Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG, Brasil.

**Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (\*)** – Ingeniero Civil de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil. Doctor en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Newcastle upon Tyne, UK. Profesor titular del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la UFMG, Brasil. Coordinador del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETEs *Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

(\*) **Dirección para correspondencia:** Avenida Antônio Carlos 6.627 – Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Bloco 1. Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901. e-mail: calemos@desa.ufmg.br

## Abstract

The absence and/or the non-effectiveness of suitable operational routines for the withdrawal of excess sludge and scum removal have resulted in serious operational problems and loss of efficiency of the sewage treatment system as a whole. In order to ensure the adequate management of these solid by-products, it is essential to establish operational routines for sludge and scum management that can be effectively implemented in UASB reactors. This Technical Note (TN) aims to present the problems and their respective origins related to the inadequate management of these solid by-products, as well as the possible improvements of design, construction and operation. In summary, the improvements refer to the following main aspects: i) users awareness; ii) improvements to the preliminary treatment; iii) more accurate calculation of the sludge production, taking into account the receipt of all possible contributions to the Sewage Treatment Plants (STPs); iv) definition of the quantities of sludge to be maintained and to be discharged from the reactor; v) definition of the disposal strategy and the characteristics of the dewatering system; vi) control over the reception of non-domestic effluents; vii) better control over the formation of scum in the sedimentation compartment; and viii) use of three-phase separators equipped with a scum removal system. It is important to emphasize that the integrated management of solid by-products (sludge and scum), as well as biogas, can bring important benefits to STPs.

**Keywords:** Anaerobic reactors; biogas; dewatering; oil and grease; preliminary treatment; three-phase separator.

## 1 INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales en los reactores anaerobios de manto de lodo y flujo ascendente (UASB, por sus siglas del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) genera subproductos sólidos (lodo y nata), los cuales deben ser adecuadamente gestionados con el fin de garantizar la eficiencia y las ventajas de este tipo de tecnología. Sin embargo, en gran parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Brasil esa gestión muchas veces es negligente, generando diversos problemas para el sistema de tratamiento.

Durante la puesta en marcha del sistema de tratamiento, la acumulación de lodo (biomasa y sólidos inertes) en los reactores UASB ocurre después de algunos meses de operación continua, a una tasa de acumulación que depende tanto del crecimiento de biomasa (síntesis de células microbianas) como también de la presencia de sólidos en suspensión inertes o no biodegradables. Estos últimos, aunque no forman parte de la biomasa responsable de la degradación de los compuestos orgánicos que in-

gresan al reactor, sí pueden contribuir de manera significativa con el aumento del *coeficiente de producción de lodo*, por lo que deben ser considerados en el cálculo de producción de lodo de los reactores anaerobios utilizados para el tratamiento de agua residual urbana.

Una de las principales características de los reactores UASB cuando son operados adecuadamente es su elevada capacidad de retención de lodo, resultando en edades de lodo elevadas y proporcionando un alto grado de estabilización del lodo. Esta elevada capacidad de retención de lodo es consecuencia de la existencia del separador trifásico, de las velocidades ascensionales impuestas al reactor y de la alta sedimentación según el tipo de lodo desarrollado en este sistema (LEITÃO *et al.*, 2010). Sin embargo, el reactor presenta una capacidad límite de retención y almacenamiento, definida principalmente por los volúmenes de sus compartimientos de digestión y de sedimentación. Estas capacidades no deben ser sobrepasadas, por lo que estrategias de descarte adecuadas deben ser adoptadas. De lo

contrario, se podría presentar la pérdida excesiva de sólidos y el deterioro de la calidad del efluente del reactor, además de otros problemas correlacionados, conforme lo descrito en la Parte 1 de esta colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018). En ese sentido, es fundamental que el lodo en exceso sea removido periódica y apropiadamente.

En relación a la nata en el interior de los reactores UASB, su formación, acumulación y tipo dependen esencialmente de la composición de agua residual afluente a la unidad, principalmente en lo que se refiere a la presencia de residuos (por ejemplo: cabellos, hisopos, toallas sanitarias, hilo dental, algodón, toallas húmedas, colillas de cigarrillos y materiales plásticos) y grasas y aceites. Así como el lodo, la nata también debe ser removida con la frecuencia debida, pues su acumulación puede llevar al bloqueo del paso natural del gas, perjudicando su colecta (LETTINGA & HULSHOFF POL, 1991) También puede ocasionar la disminución de la eficiencia del tratamiento debido a la pérdida de partículas de nata junto con el efluente del reactor (SATO *et al.*, 2006), entre otros problemas igualmente graves, conforme lo descrito en la Parte 1 de esta Colección de NTs (CHERNICHARO *et al.*, 2018) y detallados en secciones posteriores de esta Nota Técnica.

La ausencia o ineficacia de la gestión del lodo y de la nata puede comprometer la eficiencia del sistema de tratamiento como un todo. Es fundamental la necesidad de mejoras en el diseño y en la construcción de los reactores UASB, así como el establecimiento de rutinas operacionales adecuadas para el manejo de estos subproductos que puedan ser implementadas de forma efectiva durante el mantenimiento de los reactores UASB.

## 2 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS AL LODO EXCEDENTE

Diversos reactores UASB en Brasil operan con cantidades de lodo que sobrepasan sus capacidades de retención y almacenamiento. Esto produce una disminución de la capacidad de almacenamiento y de retención del lodo en el interior del reactor. Como consecuencia principal, por regla general esos reactores presentan pérdida excesiva de sólidos, los cuales impactan negativamente la calidad del efluente y la eficiencia física de remoción del material particulado. Adicionalmente, la pérdida de sólidos con el efluente de los reactores UASB puede acarrear la sobrecarga en las unidades de postratamiento, un ejemplo es la colmatación del medio de soporte de filtros biológicos percoladores (FBP) (Figura 1). También, el envío de lodo aerobio de la unidad de postratamiento (por ejemplo: filtros biológicos percoladores y lodos activados), para espesamiento y estabilización en los reactores UASB, ha sido observado como una de las causas de pérdida de sólidos en el efluente de los reactores. Sin embargo, experiencias prácticas indican que el establecimiento e implantación de protocolos operacionales para el envío de ese lodo a los reactores UASB y para los descartes de lodo excedente de esas unidades, de forma sistematizada y con una frecuencia adecuada, hacen frente a las dificultades reportadas en el manejo del lodo secundario aerobio generado en la unidad de postratamiento. Este tema es abordado con mayor detalle en la Parte 6 de esta Colección de Notas Técnicas (ALMEIDA *et al.*, 2018).



**Figura 1** – Impacto de la pérdida excesiva de sólidos sobre la unidad de postratamiento: a) colmatación del medio de soporte; b) inundación de filtros biológicos percoladores post-reactores UASB.

Una condición que aumenta la producción de lodo y consecuentemente impacta su gestión, es la recepción de contribuciones no consideradas durante la etapa de diseño de la PTAR (por ejemplo: lodos de tanques sépticos, lixiviados de rellenos sanitarios, lodo químico de plantas potabilizadoras de agua y efluentes no domésticos). Específicamente en relación al lodo de plantas potabilizadoras de agua, en la Figura 2 se ilustra el aspecto del lodo químico generado en la limpieza de floculadores y sedimen-

tadores en estado húmedo (Figura 2a) y después de su deshidratación (Figura 2b). Se percibe claramente, el aspecto “fangoso” del lodo, constituido básicamente por limo y arcilla. En la Figura 2c se muestra el impacto del vertido del lodo de planta potabilizadora en la red de alcantarillado de aguas residuales, siendo posible observar el aumento considerable, en cerca de 15 veces, del contenido de sólidos sedimentables en el agua residual que ingresa a la PTAR.



**Figura 2** – Lodo químico de una planta potabilizadora de agua: (a) retenido en tanque de almacenamiento luego del descarte de floculadores y decantadores; (b) luego de la etapa de deshidratación; (c) impacto sobre el contenido de sólidos sedimentables en el agua residual de una PTAR (cono a la izquierda: solo agua residual cruda - cerca de  $5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ; cono a la derecha: agua residual cruda + lodo químico de planta potabilizadora vertido en el alcantarillado sanitario - cerca de  $80 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

En estudios sobre la producción de lodo de una PTAR en escala plena, en la cual los reactores UASB fueron originalmente diseñados para tratar únicamente aguas residuales urbanas y el lodo secundario aerobio generado en la unidad de postratamiento, se ha observado que el coeficiente real de producción de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ) era aproximadamente el doble del valor considerado en el diseño. Al investigar la razón de la diferencia entre  $Y_{\text{lodo}}$  de diseño y  $Y_{\text{lodo}}$  de campo, se identificó que la PTAR recibía contribuciones no consideradas en el diseño, tales como lixiviado de rellenos sanitarios, lodo de tanque séptico y lodo químico de una estación de tratamiento de aguas fluviales. Es decir, las decisiones tomadas a nivel de gestión del lodo no consideraron si el sistema de deshidratación de la PTAR poseía capacidad para procesar la cantidad adicional de lodo que sería generada en los reactores UASB debido a esas contribuciones.

Normalmente, la ausencia o ineficacia de una rutina operacional para los descartes sistemáticos de lodo de los reactores UASB está relacionada a uno o más de los siguientes factores:

- Puntos de muestreo para el monitoreo de la concentración de lodo a lo largo del compartimiento de digestión del reactor en número insuficiente y/o instalados en posición incorrecta, no correspondiente con lo especificado durante el diseño (Figura 3).
- Tuberías de descarte de lodo en número insuficiente o mal distribuidas a lo largo de la altura del compartimiento de digestión (Figura 4).

- Manuales y/o directrices de operación de los reactores UASB y de los sistemas de deshidratación que no detallan adecuadamente los procedimientos a seguir por los operadores.
- Falta de remoción sistemática de lodo de los reactores UASB y de los lechos de secado como consecuencia de problemas logísticos y administrativos (por ejemplo: contrato de prestación de servicios referentes al transporte de lodo no compatible con la frecuencia necesaria de retiro de lodo, impidiendo el descarte de lodo del reactor).
- Fallas en los diseños de sistemas de deshidratación natural o mecanizada, dimensionados con capacidad inferior a las necesidades de procesamiento de lodo en la PTAR o incompatibles con las características del lodo a ser deshidratado, pues no consideran las particularidades del sitio, las condiciones climáticas y operacionales (por ejemplo: cantidad de operadores, transporte de lodo, disponibilidad de productos químicos y piezas de reposición, necesidad de mantenimiento preventivo y posibilidad de paros en equipos debido a la necesidad de mantenimiento correctivo).
- Equipos del sistema de deshidratación mecanizada (por ejemplo: bombas de lodo, dosificadores de polímetro y centrifugas) fuera de operación, como consecuencia de dificultades con el mantenimiento preventivo y correctivo de los mismos.



**Figura 3** – Instalación del punto de muestreo encima del límite del compartimento de decantación, en discordancia con el diseño.



**Figura 4** – Tubería de descarte de lodo posicionada muy cerca del deflector de gases, en discordancia con el diseño.

Además de los problemas relacionados con la gestión de lodo propiamente dicha, conforme lo abordado anteriormente, también existen problemas que son ocasionados por el funcionamiento inadecuado de las unidades que conforman el tratamiento preliminar, siendo común el ingreso de elevadas cantidades de sólidos (basura). Los residuos sólidos en mayor proporción (y en algunos casos la arena) se depositan en el fondo de los reactores y pasan a formar parte del lodo. La agregación de sólidos y arena al lodo puede resultar en la disminución del volumen útil de los reactores y, cuando son removidos, puede causar la obstrucción en las tuberías de lodo y perjudicar el funcionamiento del sistema de deshidratación. Además, resultará en la generación de un subproducto sólido (lodo deshidratado) con calidad estética desagradable. En la Figura 5 se presentan fotografías de sólidos retenidos en un tamiz de 6mm (Figura 5a) y sólidos que se adentraron en el reactor y pasaron a formar parte del lodo descartado y deshidratado en lechos de secado (Figura 5b).



**Figura 5** – a) Sólidos retenidos en una unidad de tamizado de 6mm; b) presencia de sólidos en lodo y en nata deshidratada en lechos de secado.

### 3 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS A LA GESTIÓN DEL LODO

De lo expuesto anteriormente se desprende que la correcta gestión del lodo producido en los reactores UASB y en la PTAR es fundamental. Adoptar las medidas que se describirán a continuación puede contribuir significativamente para mejorar la gestión del lodo, solucionando varios de los problemas que ocurren actualmente en las PTARs que utilizan reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales urbanas.

#### 3.1 Sensibilización de usuarios

Varios de los actuales problemas operacionales de las PTARs brasileñas son consecuencia de la inadecuada utilización de las instalaciones sanitarias en el interior de las residencias (y también de establecimientos comerciales, por ejemplo: restaurantes), lo que resulta en una alteración significativa de las aguas residuales generadas, en términos cualitativos y cuantitativos. Por ejemplo, la presencia excesiva de agua de lluvia, de detergente (surfactantes), de aceite de cocina y de sólidos (por ejemplo: cabello, hisopos, toallas sanitarias, hilo dental, algodón, toallas húmedas, colillas de cigarro y materiales plásticos). Así, la sensibilización de personas usuarias de los servicios de tratamiento de aguas residuales pasa a ser una acción esencial. Para ello es necesario crear espacios de diálogo en los que sea posible evaluar el nivel de conocimiento, la percepción y las perspectivas de la población en relación a la importancia del saneamiento en la comunidad, en especial para la generación, el tratamiento y la disposición de las aguas residuales. Además, en esos espacios es importante realizar debates sobre cómo cada persona usuaria es directamente responsable por el proceso en el origen, discutiendo acerca de lo que es razonable depositar en los servicios sanitarios.

#### 3.2 Mejora en tratamiento preliminar

Con el fin de reducir la entrada de detritos (desechos sólidos) y arena en los reactores UASB, un mayor cuidado en la selección de las unidades del tratamiento preliminar es de extrema importancia, siendo posible evitar que una fracción importante de esos sólidos forme parte del lodo (o de la nata) si las unidades del tratamiento preliminar son capaces de retener esos materiales. Entre las mejoras recomendadas, se pueden mencionar la utilización de rejillas ultrafinas y de tamices de pequeña abertura (3 a 4 mm). Otra posible mejora está asociada a la remoción de grasas y aceites, aguas arriba de los reactores UASB, en el tratamiento preliminar. Una alternativa que ha sido implementada en algunas PTARs que utilizan reactores anaerobios son los desarenadores aireados (flujo en espiral), conforme lo indicado en la Parte 2 de esta Colección de Notas Técnicas (BRESSANI-RIBEIRO *et al.*, 2018). Sin embargo, las escasas experiencias brasileñas reportadas en la literatura indican una baja eficiencia de estos equipos asociada a la remoción de grasas y aceites.

#### 3.3 Cálculo más preciso de la producción de lodo en los reactores UASB

Por lo general, las estimaciones de la producción de lodo son realizadas a partir del rango reportado en la literatura para el coeficiente de la producción de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ), el cual varía de 0,10 a 0,20 kgST.kgDQO<sup>-1</sup>. Sin embargo, ese rango de valores se refiere únicamente a la producción de lodo en un reactor UASB utilizado exclusivamente para el tratamiento de aguas residuales urbanas. En los casos en que los reactores reciben otros tipos de contribución (por ejemplo: lodo aerobio producido en la unidad de postratamiento, lodo de tanque séptico, lixiviado de relleno sanitario, efluentes no domésticos), el valor de  $Y_{\text{lodo}}$  será obviamente más elevado. Por lo tanto, se vuelve **imprescindible que el diseño defina el valor de  $Y_{\text{lodo}}$  con la máxima confiabilidad posible**, pues este valor impactará directamente en: i) la producción de lodo del reactor; ii) el dimensiona-

miento del sistema de deshidratación; y iii) el establecimiento de las rutinas operacionales de descarte del lodo.

En el caso de recepción de **lodo de tanque séptico** en reactores UASB, es necesario evaluar rigurosamente los volúmenes esperados y la posibilidad de **implementar una unidad específica para la recepción de ese tipo de contribución**, permitiendo la separación y envío del sobrenadante hacia el reactor, y el lodo espesado hacia un digestor complementario o, si estuviera bien estabilizado, directamente para la unidad de deshidratación.

En lo que respecta a la recepción de **lixiviado de relleno sanitario y de efluentes no domésticos (END)** en los reactores UASB, se deben considerar las siguientes condiciones:

- Lixiviados de rellenos sanitarios jóvenes (usualmente con menos de cinco años de operación) presentan concentraciones bastante elevadas de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sulfuros y amonio, de forma que eventuales impactos en la estabilidad y desempeño del reactor van a depender intrínsecamente del grado de dilución del lixiviado, en relación al caudal de agua residual afluente a la PTAR. Concentraciones más elevadas de DBO y de DQO en la mezcla de agua residual cruda y lixiviado contribuyen directamente al aumento de la producción de lodo en el reactor, sin embargo posibilitan el aumento en la producción de biogás, lo cual es de interés en los casos en que se realice el aprovechamiento energético de este subproducto. Al mismo tiempo, concentraciones elevadas de sulfuros y de amonio en la mezcla de agua residual cruda y lixiviado podrían causar toxicidad a los microorganismos anaerobios, principalmente las arqueas metanogénicas. Para que no haya riesgo de toxicidad, es importante verificar (y garantizar) que el factor de dilución sea elevado, para que las concentraciones de sulfuros y de amonio en la mezcla de agua residual y lixiviado resulten en valores mucho menores a los niveles considerados como tóxicos (CHERNICHARO, 2007).

- Lixiviados de rellenos sanitarios antiguos (normalmente con más de cinco años de operación) tienden a presentar elevadas relaciones de DQO/DBO (poca materia orgánica biodegradable), de tal forma que contribuyen poco al aumento de producción de lodo y de biogás en el reactor. Además, las concentraciones de sulfuros, amonio y compuestos recalcitrantes son típicamente elevadas, de forma que eventuales problemas de toxicidad continúan dependiendo de los factores de dilución de esos constituyentes, conforme a lo abordado anteriormente.

- En cuanto a los efluentes no domésticos (ENDs), la capacidad del reactor anaerobio en tratarlos conjuntamente con el agua residual urbana, depende intrínsecamente del tipo de END en cuestión. ENDs de naturaleza esencialmente orgánica y con bajas concentraciones de sólidos suspendidos (por ejemplo: efluentes de cervecerías, fábricas de refrescos) usualmente pueden ser recibidos sin mayores problemas, pero siendo necesario que durante el diseño se consideren los aspectos relacionados a la mayor producción de lodo y de biogás. También se deben considerar los riesgos de acidificación del reactor, en el caso de que la alcalinidad del agua residual no sea suficiente para la neutralización de los ácidos orgánicos formados a partir de esos ENDs (que se acidifican muy rápido). Para otros tipos de ENDs de naturaleza orgánica, se debe proceder a un análisis más riguroso, con atención especial a la presencia de elevadas concentraciones de sólidos suspendidos y de elementos potencialmente tóxicos (por ejemplo: sulfuros, amonio, metales pesados). ENDs de naturaleza inorgánica (por ejemplo: galvanoplastia) no deben ser enviados para su tratamiento en PTARs que utilicen procesos biológicos. Como complemento, se recomienda que las PTARs dispongan, como mínimo, de sensores de medición en línea de pH en la entrada del agua residual cruda, con el fin de hacer posible la identificación de cambios bruscos en los valores de ese parámetro. A pesar de la dificultad de implementar acciones de remediación cuando se detectan valores de pH fuera del rango usual del agua residual (6,5 a 7,5), el registro de mediciones podría ayudar

en la identificación del origen del problema y en la definición de las medidas a ser consideradas.

En relación al **lodo químico de plantas potabilizadoras, este no debe ser enviado a los reactores UASB** debido a que sus características pueden perjudicar el funcionamiento y la eficiencia del reactor. El lodo resultante de la limpieza de floculadores y decantadores, presenta un elevado contenido de sólidos inorgánicos - 0,5 a 1,0% (principalmente limo y arcilla). Por lo tanto, en caso de ser vertido en la red de alcantarillado sanitario, es muy probable que se acumule en el fondo de los reactores, reduciendo el volumen útil de los mismos. Además, esos sólidos son de difícil remoción con el sistema de extracción de lodo utilizado en los reactores UASB. En el caso de que sea considerada la posibilidad de enviar el lodo químico de planta potabilizadora a PTARs con reactores UASB, deberá ser realizado un estudio técnico riguroso que compruebe que los elementos contenidos en el lodo químico no ocasionarán la formación de bancos de sedimentos en el fondo del reactor. Además, se deben considerar eventuales riesgos de daños a las bombas y otros equipos (por ejemplo: centrífugas).

La recepción de lodo químico de planta potabilizadora en PTARs también puede generar impactos en la actividad microbiana, como se observó en el estudio realizado por Scalize (2003), al evaluar los efectos de la recepción de lodo de planta potabilizadora (con uso de sulfato de aluminio como coagulante) en los sedimentadores primarios de una

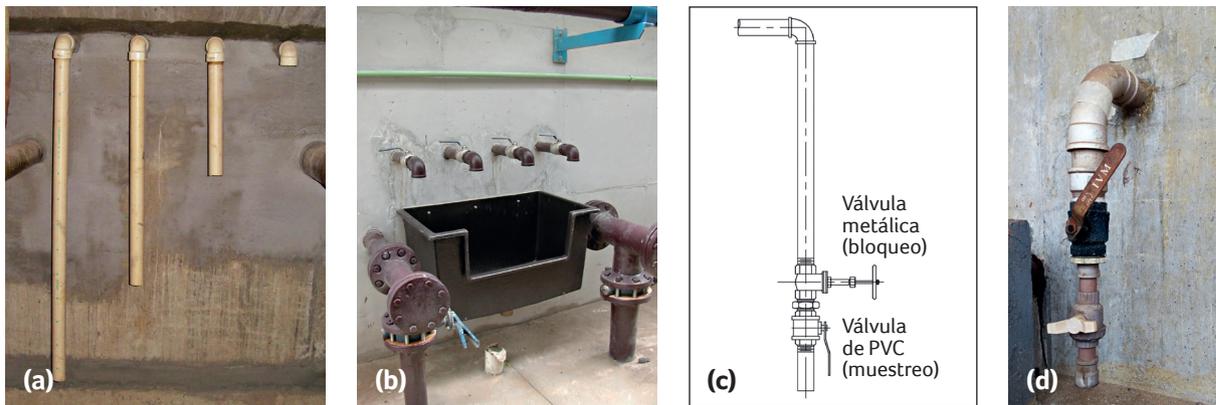
PTAR. A partir de pruebas de actividad metanogénica se observó una mayor producción de metano en el frasco control (que no contenía lodo de planta potabilizadora) y una decreciente producción de metano a medida que se aumentó la fracción de lodo de planta potabilizadora en los frascos. Además, especies de microorganismos del género *Methanothrix sp* fueron inhibidas, siendo encontradas en mayor número en el frasco control y en menor cantidad en los frascos donde se agregó lodo de planta potabilizadora. De esto es posible inferir que el lodo de la planta potabilizadora fue tóxico para los microorganismos metanogénicos, pudiendo perjudicar el proceso de digestión anaerobia.

### 3.4 Previsión del adecuado sistema de muestreo de lodo a lo largo de la altura del reactor

Para el establecimiento de estrategias de descarte (cantidad y frecuencia) es necesario el monitoreo continuo del lodo presente en el reactor, a partir de la determinación del perfil y de la masa de sólidos (CHERNICHARO, 2007). Para ello es esencial que el reactor disponga de un sistema de muestreo que permita la adecuada identificación de la altura y de la concentración de lodo en el interior del compartimiento de digestión del reactor, siendo necesarias las características descritas en el Cuadro 1 y ejemplificadas en la Figura 6.

**Cuadro 1** – Principales directrices para diseño y construcción del sistema de muestreo de lodo

- Previsión de puntos verticales de muestreo de lodo a lo largo de toda la altura del compartimiento de digestión del reactor, con una separación máxima de 0,50 m entre sí. El primer punto debe localizarse a la misma altura del descarte de fondo (0,20 a 0,30 m) y el último debe localizarse en la interface de los compartimientos de digestión y sedimentación. Los demás puntos de muestreo deben ser distribuidos equitativamente entre el primero y el último punto de muestreo, siendo lo ideal un mínimo de cuatro puntos de muestreo (Figura 6a).
- Previsión de una caja de maniobra para las válvulas de muestreo de lodo que permita el adecuado trabajo del operador, considerando la necesidad de manipulación de los frascos de muestreo y de limpieza de las instalaciones (Figura 6b).
- Las válvulas deberán ser de tipo bola, siendo recomendable el uso de una válvula metálica seguida de una de PVC en todos los puntos de muestreo de lodo (Figura 6c y 6d).
- Deben ser previstos conjuntos de puntos verticales de muestreo que permitan la caracterización representativa de lodo de todo el volumen del compartimiento de digestión del reactor.
- Las tuberías y válvulas de muestreo deben poseer un diámetro interno mínimo de 50 mm.



**Figura 6** – Sistema de muestreo de lodo de reactor UASB: a) vista interna de los puntos verticales de muestreo en el interior del compartimento de digestión, con una separación de 50 cm; b) vista externa de los puntos de muestreo y de la caja de maniobra de válvulas; c) y d) detalle de válvula metálica seguida de válvula de PVC.

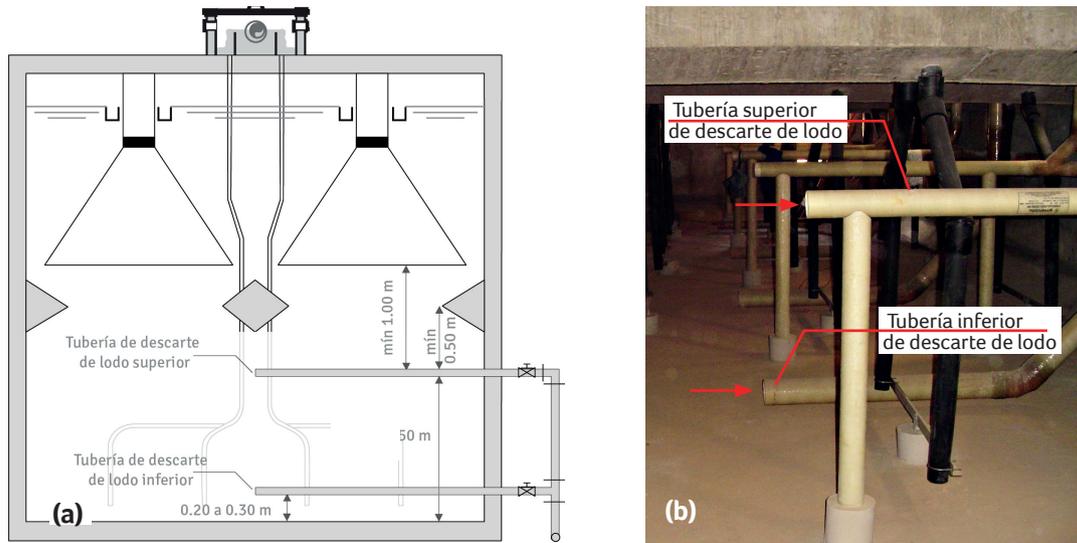
### 3.5 Previsión de un adecuado sistema de descarte de lodo de los reactores

Para brindar mayor flexibilidad operacional, se recomienda la previsión de conjuntos de tuberías de descarte de lodo en dos profundidades diferentes en el interior del compartimento de digestión del reactor: un **conjunto inferior**, localizado entre 0,20 y 0,30 m encima del fondo del reactor; y un **conjunto superior**, localizado entre 1,00 y 1,50 m encima del fondo del reactor. El conjunto inferior de tuberías permite el descarte de lodo más concentrado, que presenta mejores condiciones de sedimentación, mientras el conjunto superior permite el retiro de lodo menos concentrado, con peores condiciones de sedimentación (Figura 7). Esa configuración de sistema de descarte (superior e inferior) busca permitir la **remoción programada de lodo de peor calidad** (superior, me-

nos concentrado) y **la preservación de lodo de mejor calidad** (inferior, más concentrado), de modo a proporcionar: i) la obtención de una mayor edad de lodo y, consecuentemente, el descarte de un lodo más estabilizado; ii) el mantenimiento de un lecho de lodo denso en el fondo del reactor, de forma que pueda actuar como un filtro que auxilie en la retención de sólidos suspendidos por tiempo suficiente para que puedan ser hidrolizados; y iii) menor pérdida de sólidos para el comportamiento de sedimentación, reflejándose directamente en la mejoría de calidad del efluente del reactor. Además, la fracción de lodo descartada del fondo permite la remoción parcial de sólidos inertes (arena) que ingresaron en el reactor. El sistema de descarte de lodo debe presentar las características descritas en el Cuadro 2 y ejemplificadas en la Figura 7.

**Cuadro 2** – Principales directrices para diseño y construcción del sistema de descarte de lodo

- Previsión de conjuntos de tuberías de descarte de lodo en dos diferentes alturas del compartimento de digestión del reactor: tuberías inferiores localizadas entre 0,20 y 0,30 m del fondo; y tuberías superiores localizadas entre 1,00 y 1,50 m del fondo. Considerar que las tuberías superiores de descarte de lodo deben quedar posicionadas por lo menos 0,50 m abajo del deflector de gases, de modo que se permita la remoción efectiva de lodo menos concentrado (Figura 7a y 7b). De acuerdo con la NBR 12209, la tubería superior de descarte de lodo debe ser posicionada por lo menos 1,00 m abajo de la entrada al compartimento de sedimentación (ABNT, 2011) (Figura 7a).
- Previsión de una tubería de descarte de lodo del fondo para cada 20 a 30 m<sup>2</sup> de área del reactor. Para el descarte de lodo superior, menos concentrado, pueden ser utilizadas áreas de influencia más elevadas (30 a 50 m<sup>2</sup>), o evaluar la posibilidad de utilizar una única tubería, de gran diámetro, interconectada a ramales colectores, de 100 a 150 mm. La tubería de gran diámetro debe ser dimensionada con el fin de alcanzar una pérdida de carga próxima a cero, considerando el caudal total proveniente de la suma de los ramales de colectores interconectados a ella.
- Las tuberías y válvulas de descarte de lodo inferior deben poseer diámetro un interno mínimo de 150 mm. Para las tuberías y válvulas de descarte de lodo superior, puede ser adoptado un diámetro interno de 100 mm. Las válvulas deben ser, preferiblemente, de tipo cuchilla (guillotina).



**Figura 7** – Sistema de descarte de lodo del reactor UASB: a) representación esquemática e la posición de las tuberías inferiores y superiores de descarte de lodo; b) vista interna de las tuberías inferiores y superiores de descarte de lodo.

### 3.6 Definición de cantidades de lodo a ser mantenidas y descartadas en el reactor

Con el fin de evitar la pérdida indeseable de sólidos con el efluente final, se debe mantener la masa de lodo en el interior del reactor **entre un valor mínimo**, correspondiente a la biomasa suficiente para digerir la carga orgánica afluente, **y un valor máximo**, correspondiente a la capacidad de retención de lodo en el reactor UASB. El cálculo de masa mínima

es realizado a partir de la carga orgánica aplicada al reactor y de la actividad metanogénica específica (AME) del lodo anaerobio. La AME se define como la capacidad **máxima** de producción de metano por un grupo de microorganismos anaerobios, determinada en condiciones controladas de laboratorio, para permitir la actividad bioquímica máxima de conversión de substratos orgánicos en metano (CHERNICHARO, 2007).

**Ejemplo 1:** Calcular la masa mínima a ser mantenida en un reactor para el tratamiento de agua residual urbana. Considerar los siguientes datos de diseño:

- Población contribuyente:  $P = 10.000 \text{ hab.}$
- Contribución *per cápita* de DQO:  $QPC_{DQO} = 0,10 \text{ kgDQO.hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
- Eficiencia de remoción de DQO:  $E_{DQO} = 70\%$
- Actividad metanogénica específica del lodo:  $AME = 0,20 \text{ kgDQO}_{CH_4} \cdot \text{kgST}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (valor típico entre 0,10 e 0,20  $\text{kgDQO}_{CH_4} \cdot \text{kgST}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

Solución:

1) Carga orgánica aplicada ( $CO_{apl}$ ):

$$CO_{apl} = P \times QPC_{DQO} \qquad CO_{apl} = 10.000 \text{ hab} \times 0,10 \text{ kgDQO} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} = 1.000 \text{ kgDQO} \cdot \text{d}^{-1}$$

2) Carga orgánica removida ( $CO_{remov}$ ):

$$CO_{remov} = CO_{apl} \times E_{DQO} \qquad CO_{remov} = 1.000 \text{ kgDQO} \cdot \text{d}^{-1} \times 70\% = 700 \text{ kgDQO} \cdot \text{d}^{-1}$$

3) Masa mínima ( $M_{min}$ ):

$$M_{min} = \frac{CO_{remov}}{AME} \qquad M_{min} = \frac{700 \text{ kgDQO} \cdot \text{d}^{-1}}{0,20 \text{ kgDQO}_{CH_4} \cdot \text{kgST}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}} = 3.500 \text{ kgST}$$

Para definir la masa máxima de lodo que el reactor puede almacenar sin que se presente el escape de lodo hacia el compartimiento de sedimentación y pérdida excesiva de sólidos en el efluente, deben ser observados los resultados de monitoreo de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables en el efluente del reactor, así como las concentraciones de sólidos totales (ST) a lo largo de toda la altura del compartimiento de digestión (perfil del lodo). Con esto se busca inferir a partir de cuál masa de lodo en el interior del reactor inicia la mayor pérdida de sólidos y deterioro de la calidad del efluente. Otra posibilidad, cuando no se posee una serie histórica de datos que permita la definición de la masa máxima, es mantener la concentración de ST de lodo muestreado en el punto más elevado del compartimiento de digestión (localizado inmediatamente antes del deflector de gases) **siempre debajo de 0,5% ST**.

### 3.7 Definición de estrategia de descarte

A partir de la estimación de la producción de lodo en el reactor y de la masa de lodo a ser descartada, se calcula el volumen de lodo a descartar de acuerdo con la estrategia de descarte adoptada. Una estrategia que viene siendo recomendada es

la de **descartar por lo menos 50% de masa de lodo excedente a partir de la tubería superior** (1,00 a 1,50 m encima del fondo). Para compensar los mayores volúmenes de descarte resultantes de esta práctica, se debe prever en los nuevos diseños, una **unidad de espesado y homogenización de lodo** antes de la unidad de deshidratación. El espesado parcial del lodo permite que el sobrenadante sea retornado para el reactor UASB, y que la fracción más concentrada sea adecuadamente homogenizada para alcanzar el rango ideal de contenido de ST exigida por el equipo de deshidratación mecanizada. El descarte de lodo superior favorece el mantenimiento de bajas concentraciones de ST en la interface de los compartimientos de digestión y sedimentación, la cual debe permanecer siempre debajo de 0,5% ST, conforme lo comentado anteriormente.

Es recomendable el retiro programado y continuo de lodo excedente para que el reactor opere cíclicamente de la forma más estable posible. Los ejemplos siguientes ilustran los cálculos de las capacidades necesarias de sistemas de deshidratación natural y mecanizada para el procesamiento de lodo descartado, en función de la producción de lodo en el reactor anaerobio y de la estrategia de descarte adoptada.

**Ejemplo 2:** Dimensionar el sistema de deshidratación natural de lodo de reactores UASB, considerando los siguientes datos de diseño:

- Población contribuyente:  $P = 10.000$  hab.
- Carga orgánica aplicada:  $CO_{apl} = 1.000$  kgDQO. $d^{-1}$
- Coeficiente de producción de lodo en el reactor UASB (0,10 a 0,20 kgST.kgDQO $^{-1}$ ):  $Y_{lodo} = 0,20$  kgST.kgDQO $^{-1}$
- Masa específica del lodo (usualmente en el orden de 1.020 a 1.040 kgST.m $^{-3}$ ):  $\gamma = 1.020$  kgST.m $^{-3}$

Observación: Los ejemplos 2 y 3 contemplan únicamente el coeficiente de producción de lodo en el reactor UASB. En caso de que la PTAR reciba otros tipos de contribuciones (por ejemplo: lodo aerobio producido en la unidad de postratamiento, lodo de tanque séptico, lixiviado de relleno sanitario, efluentes no domésticos, entre otros) y/o sea adoptado el envío de lodo aerobio de la unidad de postratamiento (por ejemplo: FBP, lodos activados) para espesado y estabilización en los reactores UASB, se debe considerar en el cálculo del sistema de deshidratación el aumento en el valor del coeficiente de producción de lodo debido a esas contribuciones.

Solución:

1) Producción diaria de lodo en el reactor ( $P_{lodo}$ )

$$P_{lodo} = Y_{lodo} \times CO_{apl} \qquad P_{lodo} = 0,20 \text{ kgST.kgDQO}^{-1} \times 1.000 \text{ kgDQO.d}^{-1} = 200 \text{ kgST.d}^{-1}$$

2) Establecimiento de la rutina de descarte de lodo y tiempo del ciclo (tc) de los lechos de secado

Considerando:

- Frecuencia de descarte -  $f_d$ : 7 días
- Tiempo del ciclo de lechos de secado -  $t_c$ : 21 días
- El tiempo del ciclo de lechos de secado debe ser definido en función de las condiciones climáticas del sitio y aspectos operacionales de cada PTAR.

3) Volúmenes de lodo a descartar de cada punto (superior e inferior)

Considerando:

- Concentración esperada para el lodo superior e inferior:

- Lodo superior:  $C_{\text{lodo-sup.}} = 2\%$  (20.000 mgST.L<sup>-1</sup>)

- Lodo inferior:  $C_{\text{lodo-inf.}} = 5\%$  (50.000 mgST.L<sup>-1</sup>)

- Porcentajes de descarte de lodo superior e inferior:

- Lodo superior: 50% em massa

- Lodo inferior: 50% em massa

$$V_{\text{lodo}} = \frac{P_{\text{lodo}} \times f_d}{\gamma \times C_{\text{lodo}}}$$

$$V_{\text{lodo-sup.}} = \frac{200 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 7d \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot m^{-3} \times 2\%} = 34 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{lodo-inf.}} = \frac{200 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 7d \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot m^{-3} \times 5\%} = 14 \text{ m}^3$$

4) Masa de lodo excedente descartada de los reactores ( $M_{\text{lodo}}$ )

$$M_{\text{lodo}} = P_{\text{lodo}} \times f_d$$

$$M_{\text{lodo}} = 200 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 7d = 1.400 \text{ kgST}$$

5) Volumen de lodo excedente descartado de los reactores ( $V_{\text{lodo}}$ )

$$V_{\text{lodo}} = V_{\text{lodo-sup.}} + V_{\text{lodo-inf.}}$$

$$V_{\text{lodo}} = 34 \text{ m}^3 + 14 \text{ m}^3 = 48 \text{ m}^3$$

6) Dimensionamiento de los lechos de secado

- Altura de lámina de lodo en el lecho de secado ( $H_{\text{leito}}$ )

- Se adopta  $H_{\text{leito}} = 0,35 \text{ m}$ .

- Área necesaria para cada lecho de secado ( $A_{\text{leito}}$ )

$$A_{\text{leito}} = \frac{V_{\text{lodo}}}{H_{\text{leito}}}$$

$$A_{\text{leito}} = \frac{48 \text{ m}^3}{0,35 \text{ m}} = 137 \text{ m}^2$$

- Número de unidades y geometría de los lechos de secado

- Considerando la realización de descartes semanales y tiempo del ciclo de 21 días, se adoptan cuatro módulos.

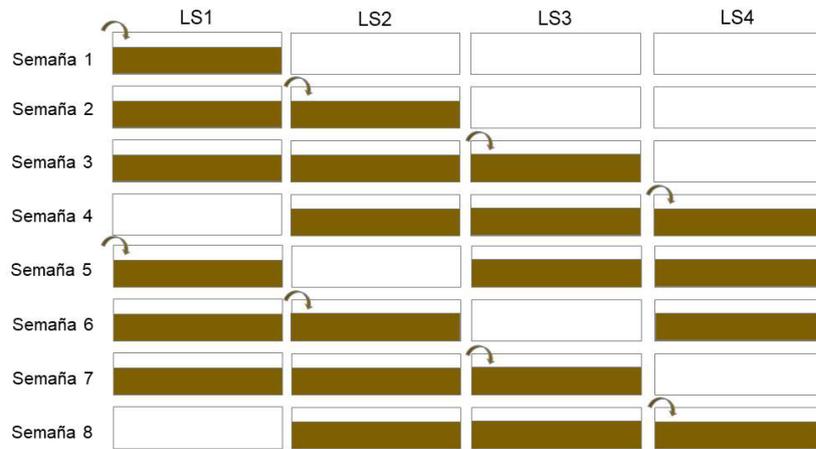
- Tasa de aplicación de sólidos resultantes en cada lecho de secado ( $T_{x-ST}$ )

$$T_{x-ST} = \frac{M_{\text{lodo}}}{A_{\text{leito}}}$$

$$T_{x-ST} = \frac{1.400 \text{ kgST}}{140 \text{ m}^2} = 10 \text{ kgST} \cdot m^{-2}$$

- De acuerdo con la norma NBR 12.209, la descarga de lodo en los lechos de secado no puede exceder la carga de sólidos en suspensión totales de 15 kgST-m<sup>-2</sup> de área de secado, en cada ciclo de operación (ABNT, 2011).

En la Figura 8 se presenta un esquema de la rutina de descarte de lodo y limpieza de los lechos de secado (LS).



**Figura 8** – Ilustración esquemática de la rutina de descarte de lodo y limpieza de lechos de secado del Ejemplo 2.

**Ejemplo 3:** Dimensionar el sistema de deshidratación mecanizada de lodo de reactores UASB, considerando los siguientes datos de diseño:

- Población contribuyente:  $P = 100.000$  hab.
- Carga orgánica aplicada:  $CO_{apl} = 10.000 \text{ kgDQO} \cdot d^{-1}$
- Coeficiente de producción de lodo en el reactor UASB (0,10 a 0,20  $\text{kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$ ):  $Y_{lodo} = 0,20 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$
- Masa específica del lodo (usualmente en el orden 1.020 a 1.040  $\text{kgST} \cdot \text{m}^{-3}$ ):  $\gamma = 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}$

Solución:

1) Cálculo de la producción diaria de lodo ( $P_{lodo}$ )

$$P_{lodo} = Y_{lodo} \times CO_{apl} \quad P_{lodo} = 0,20 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}^{-1} \times 10.000 \text{ kgDQO} \cdot d^{-1} = 2.000 \text{ kgST} \cdot d^{-1}$$

2) Cálculo de los volúmenes diarios de lodo a descartar de cada punto (superior e inferior)

- Concentración esperada para el lodo superior e inferior:

- Lodo superior:  $C_{lodo-sup.} = 2\%$  ( $20.000 \text{ mgST} \cdot \text{L}^{-1}$ )

- Lodo inferior:  $C_{lodo-inf.} = 5\%$  ( $50.000 \text{ mgST} \cdot \text{L}^{-1}$ )

- porcentajes de descarte de lodo superior e inferior:

- Lodo superior: 50% en massa

- Lodo inferior: 50% en massa

$$V_{lodo-sup.} = \frac{P_{lodo} \times 50\%}{\gamma \times C_{lodo-sup.}} = \frac{2.000 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3} \times 2\%} = 49,0 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$$

$$V_{lodo-inf.} = \frac{P_{lodo} \times 50\%}{\gamma \times C_{lodo-inf.}} = \frac{2.000 \text{ kgST} \cdot d^{-1} \times 50\%}{1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3} \times 5\%} = 19,6 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$$

3) Volumen diario de lodo a ser descartado ( $V_{lodo}$ )

$$V_{lodo} = V_{lodo-sup.} + V_{lodo-inf.} \quad V_{lodo} = 49,0 \text{ m}^3 \cdot d^{-1} + 19,6 \text{ m}^3 \cdot d^{-1} = 68,6 \text{ m}^3 \cdot d^{-1}$$

4) Concentración promedio de lodo enviado a la centrifuga ( $C_{\text{lodo-média}}$ )

$$C_{\text{lodo-média}} = \frac{C_{\text{lodo-sup.}} \times V_{\text{lodo-sup.}} + C_{\text{lodo-inf.}} \times V_{\text{lodo-inf.}}}{V_{\text{lodo}}}$$

$$C_{\text{lodo-média}} = \frac{2\% \times 49,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} + 5\% \times 19,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}}{68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}} = 2,8\%$$

5) Carga de sólidos a ser procesada diariamente por la centrifuga

$$CS = V_{\text{lodo}} \times \gamma \times C_{\text{lodo-média}} \quad CS = 68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3} \times 2,8\% = 1.959,2 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

6) Dimensionamiento del sistema de deshidratación mecanizada del lodo por medio de centrifuga

• Definición del número de centrifugas

- Se considera: 1 unidad en operación + 1 para relevo y respaldo.

- Se destaca que el número de unidades en operación y respaldo es función de la escala de la PTAR y de la cantidad de lodo generado, así como de la estructura de mantenimiento a ser implantada y de la disponibilidad de rutas alternativas de disposición de lodo.

• Definición de rutina operacional

- Se considera: 5 días por semana y 8 horas diarias de funcionamiento.

• Cálculo de la capacidad de centrifuga necesaria para procesar el lodo excedente ( $C_c$ ):

$$C_{c-volume} = \frac{V_{\text{lodo}} \times 7d}{5d} \quad C_{c-volume} = \frac{68,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 7d}{5d} = 96,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$C_{c-massa} = \frac{CS \times 7d}{5d} \quad C_{c-massa} = \frac{1.959,2 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 7d}{5d} = 2.742,9 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

- El sistema de deshidratación debe ser capaz de procesar diariamente  $96,0 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  o  $2.742,9 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$ , con el fin de compensar el no procesamiento durante los fines de semana.

- Considerando 8 horas diarias de funcionamiento, la centrifuga debe ser capaz de procesar  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  ou  $342,9 \text{ kgST} \cdot \text{h}^{-1}$ .

- Es importante resaltar que el volumen (y la masa) total del lodo a ser procesado diariamente deberá ser dividido por el número de reactores que integran la PTAR, de modo que se mantenga la masa de lodo en cada reactor siempre por encima de la mínima recomendada (ver Ejemplo 1). Además, el volumen a ser descartado de cada reactor debe ser dividido por el número de válvulas superiores e inferiores, siendo efectuado primero el descarte de la línea de lodo superior y después de la línea de lodo inferior.

- Para facilitar y agilizar la operación de descarte de lodo, una alternativa es realizar el descarte de lodo únicamente de algunos reactores por día, en esquema de rotación entre todos los reactores de la PTAR, de modo que la masa de lodo en cada reactor sea mantenida siempre por encima de la mínima recomendada.

• Selección de equipo

- Para la selección de equipo disponible comercialmente las siguientes informaciones deben ser enviadas a los proveedores: (i) caudal de agua residual afluente a la PTAR; (ii) volumen y carga de sólidos a ser procesados por día; (iii) concentraciones de sólidos del lodo a ser procesado; y (iv) datos sobre la rutina operacional (número de horas de funcionamiento por semana).

### 3.8 Definición de las características de los sistemas de deshidratación

Para el dimensionamiento del sistema de deshidratación de lodo, sea natural o mecanizado, además de la estimación de la producción de lodo considerando todas las posibles contribuciones que puedan impactar el coeficiente de producción de lodo ( $Y_{\text{lodo}}$ ), es de fundamental importancia considerar las particularidades de cada sitio, las condiciones climáticas, las condiciones operacionales, así como las cuestiones logísticas y administrativas. Además, **es esencial considerar la posibilidad de descartar el lodo a dos alturas**, conforme lo ejemplificado anteriormente, lo que produce un mayor volumen de lodo de descarte. Debe resaltarse que esta desventaja puede ser minimizada con la previsión de una unidad de espesamiento y homogenización de lodo, como se comentó anteriormente.

#### 3.8.1 Deshidratación natural

En PTARs con deshidratación natural en lechos de secado, los descartes deben ser realizados en lote, de modo que la frecuencia de descarte sea compatible con la capacidad de almacenamiento de lodo en los reactores, el tiempo promedio de secado (de acuerdo con las condiciones climáticas del sitio) y el contrato con el prestador de servicios referente al retiro y transporte de lodo deshidratado.

En relación al dimensionamiento de lechos de secado, se debe considerar la necesidad de modulación (en cantidad y dimensiones), la cual debe estar muy bien relacionada a la planificación (frecuencia y volumen) de descarte de lodo y de limpieza de los lechos de secado; de modo a evitar la realización de descartes sobre un descarte de lodo previo. O dicho de otro modo, realizar una descarga de lodo en los lechos de secado y luego realizar otra descarga sobre la anterior; pues esto puede acelerar la colmatación de estas unidades.

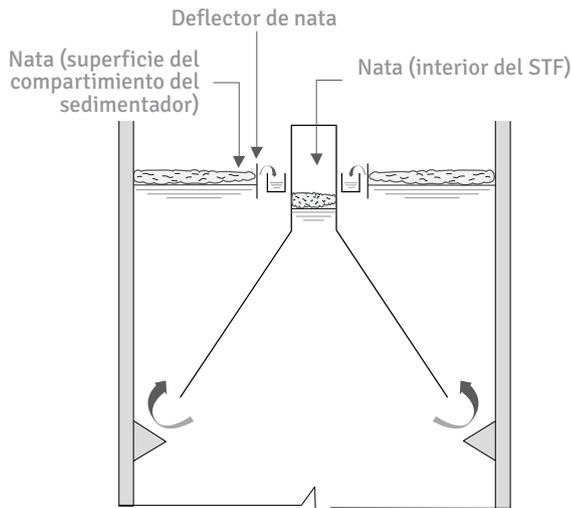
#### 3.8.2 Deshidratación mecanizada

En PTARs donde se utilicen procesos de deshidratación mecanizada, el descarte de lodo debe ser realizado diariamente y la magnitud de los descartes debe corresponder a la producción diaria de lodo, considerando todos los reactores. Sin embargo, esta rutina operacional debe ser adoptada solamente cuando la masa de lodo en los reactores esté abajo del valor máximo adoptado o la concentración de ST en el punto de muestreo superior sea inferior al 0,5%. En situaciones de exceso de lodo en los reactores UASB, las operaciones de descarte y de funcionamiento de sistema de deshidratación mecanizada deben ser intensificadas.

La definición de una rutina operacional de descarte de lodo debe ser compatible con los siguientes aspectos principales: i) la cantidad de operadores; ii) los contratos de prestadores de servicios referentes al transporte de lodo deshidratado y a la realización de mantenimiento preventivo y correctivo; iii) la posibilidad de paros en los equipos; y iv) la disponibilidad de productos químicos y piezas de reposición. Adicionalmente, se debe evaluar la posibilidad de redundancia de los equipos críticos y/o la previsión de lechos de secado, como alternativa en caso de paros y/o mantenimiento de equipos del sistema de deshidratación, evitando así situaciones de pasivo de lodo en el interior de los reactores, pues esto podría generar pérdida de sólidos con el efluente.

### 4 ORIGEN Y PROBLEMAS RELACIONADOS A LA ACUMULACIÓN DE NATA

En reactores UASB, la formación de nata puede ocurrir en dos sitios distintos: i) en la superficie del compartimento del sedimentador; ii) en el interior del separador trifásico (STF), en la interfase de liberación de los gases formados durante la digestión anaerobia (Figura 9).



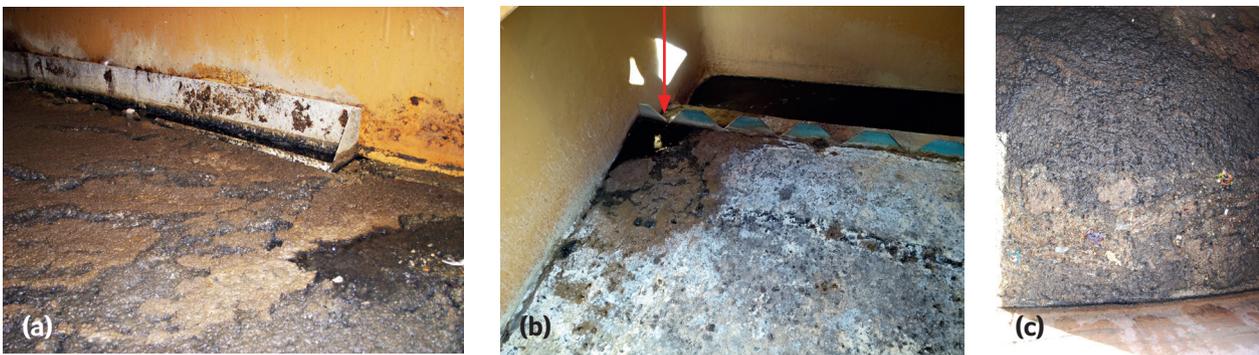
**Figura 9** – Identificación de puntos de acumulación de nata en reactores UASB.  
Fuente: Chernicharo (2007)

#### 4.1 Nata acumulada en la superficie del compartimento del sedimentador

La nata acumulada en la superficie de los compartimentos de sedimentación de los reactores UASB, aunque se caracteriza por ser un residuo muy concentrado, presenta coeficientes de acumulación relativamente bajos, siendo posible diseñar los compartimentos de sedimentación sin retenedores de nata con el fin de permitir que ese material sea descargado junto con el efluente sin deteriorar

excesivamente su calidad. Sin embargo, es **esencial garantizar la adecuada nivelación y fijación de las canaletas colectoras de efluente y el sellado completo de las juntas durante la instalación de los vertedores**, con el fin de evitar flujos preferenciales que produzcan la acumulación de nata en la parte superior de los compartimentos de sedimentación, conforme lo mostrado en las Figuras 10a y 10b.

Es importante resaltar que la tasa de acumulación de nata en los compartimentos de sedimentación depende también del adecuado manejo del lodo excedente. La ausencia o el descarte de lodo excedente en una frecuencia no compatible con la producción de lodo en el sistema puede generar una mayor pérdida de sólidos para el compartimento de sedimentación. Una vez en el sedimentador, ese lodo se agrega a la capa de nata y pasa a adquirir un aspecto de "lodo flotante" junto con la nata (Figura 10c). Esta situación tiende a agravarse cuando el reactor opera con sobrecarga hidráulica y velocidades ascensionales más elevadas que las previstas en el diseño. Si no es gestionado adecuadamente, la acumulación excesiva de nata en el compartimento de sedimentación puede contribuir al deterioro de la calidad del efluente del reactor UASB.



**Figura 10** – Acumulación de nata en el compartimento de sedimentación debido a: (a) canaletas colectoras de efluente desniveladas; (b) falta de sellado de juntas en la instalación de vertedores (el efluente pasa entre la placa vertedora en fibra de vidrio y la canaleta colectoras de concreto); (c) falta de descarte de lodo y sobrecarga hidráulica en el reactor.

## 4.2 Nata acumulada en el interior del separador trifásico

La ausencia o ineficacia de los dispositivos de remoción de la nata debido a las condiciones precarias de acceso, la falta de condiciones de seguridad ocupacional y la ausencia de un protocolo sistematizado para la remoción de ese material, puede llevar al espesamiento y solidificación de la capa de nata (Figura 11a).

Esta capa de nata puede impedir el paso natural del biogás generado en el reactor, pudiendo ocasionar su entrada en el compartimiento de sedimentación, comprometiendo la retención de sólidos y causando el deterioro de la calidad del efluente (LETTINGA e HULSHOFF, 1991; SOUZA *et al.*, 2006). En algunos casos, impedir el paso natural del biogás genera su acumulación y el aumento de la presión sobre la capa espesa de nata, resultando en la generación de

**esfuerzos estructurales elevados en las paredes del separador trifásico.** Dependiendo de la magnitud de esos esfuerzos y de la calidad estructural de las paredes del separador trifásico, pueden presentarse daños como desnivelamiento, torsión, incluso puede presentarse la ruptura de esta estructura (Figura 11b y 11c). Además, el rompimiento abrupto de la capa de nata por el biogás bajo una presión excesiva puede provocar el movimiento de placas solidificadas de nata y la torsión de las paredes del separador trifásico (RAMOS, 2008; MIKI, 2010; van LIER *et al.*, 2011). La posibilidad de ruptura del separador trifásico se encuentra fuertemente asociada al tipo de material empleado en esas estructuras, principalmente cuando son confeccionados con materiales de menor resistencia, por ejemplo lonas plásticas, placas y tejidos de asbesto, e incluso fibra de vidrio de calidad inferior.



**Figura 11** – (a) Nata solidificada en el interior de un separador trifásico; (b y c) Rompimiento del separador trifásico.

El paso del biogás al compartimiento de sedimentación también tiene un impacto directo en el aumento de los niveles de emisión de gases odorantes y de efecto invernadero. Adicionalmente, genera la reducción de la recuperación de biogás para fines de quema y/o aprovechamiento energético. En este caso son válidas las mismas consideraciones realizadas anteriormente para el “lodo flotante” que se agrega a la capa de nata del compartimiento del sedimentador, como consecuencia del exceso de lodo

en el compartimiento de digestión y de sobrecargas hidráulicas en el reactor.

También existen preocupaciones relacionadas a los sólidos no retenidos en el tratamiento preliminar y que ingresan al reactor. Una fracción significativa de residuos sólidos menos densos flotará y se agregará a la capa de nata en el interior del separador trifásico o en la superficie del compartimiento de sedimentación.

## 5 POSIBLES MEJORAS RELACIONADAS A LA GESTIÓN DE LA NATA

Adoptar las medidas descritas a continuación puede contribuir significativamente a mejorar la gestión de la nata. Cabe resaltar que las medidas de sensibilización de usuarios, y la mejora del tratamiento preliminar también son fundamentales para la gestión de este subproducto, debido a que gran parte de esos residuos sólidos pueden constituir la capa de nata. Además, las medidas descritas para la gestión del lodo impactan la formación y la acumulación de nata en los reactores UASB, por lo que deben ser consideradas junto con las medidas descritas a continuación.

### 5.1 Control sobre la recepción de efluentes no domésticos

Algunos tipos de efluentes no domésticos, tales como lodo de tanques sépticos y efluentes

industriales con elevado contenido de grasas y aceites (por ejemplo: lácteos, mataderos y sistemas frigoríficos), pueden contribuir al incremento de la formación y acumulación de nata en los reactores UASB y, consecuentemente, agravar los problemas mencionados anteriormente. Se recomienda, por lo tanto, un riguroso control en la recepción de estas y de otras contribuciones que puedan colaborar para el agravamiento de la formación de nata en los reactores UASB.

### 5.2 Mejor control sobre la formación de nata en el compartimiento de sedimentación

Para alcanzar un mejor control sobre la formación de nata en la superficie del compartimiento de sedimentación, se deben considerar las directrices presentadas en el Cuadro 3.

**Cuadro 3** – Principales directrices para el diseño, la construcción y la operación relacionadas con el control de formación de nata en el compartimiento de sedimentación

- Mejorar el diseño, la confección y la instalación de canaletas colectoras de efluente (garantizar una lámina vertedora mínima de 15mm y con fijación adecuada que garantice la nivelación y la resistencia a torsión).
- El correcto dimensionamiento de la estructura de descarga de agua residual y/o de la estación de bombeo de alimentación de los reactores, de modo a evitar sobrecargas hidráulicas y velocidades excesivas en los compartimientos de digestión y de sedimentación del reactor.
- Correcta gestión del lodo, de modo a evitar el paso excesivo y “flotación” de lodo en el compartimiento de sedimentación.

### 5.3 Utilización de separadores trifásicos equipados con dispositivo de remoción de nata

En la evaluación de las alternativas de mejoramiento de los reactores UASB, los diseños más recientes han incorporado canaletas de colecta de nata en el interior del separador trifásico (Figura 12), de forma a permitir la remoción hidrostática. Algunos diseños, adicionalmente incorporan aspersores con chorros presurizados de agua, con el

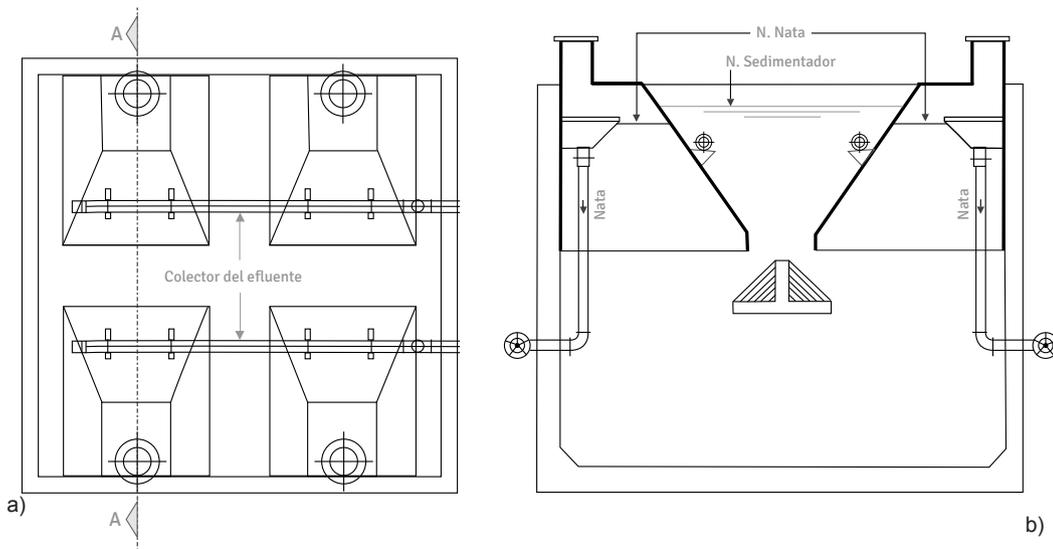
fin de auxiliar el arrastre de nata hacia los canales de colecta. No se tiene certeza acerca de la real necesidad de esos aspersores, teniendo en cuenta que la nata removida con mayor frecuencia (2 a 3 veces por semana) es bastante fluida y no necesita de chorros de agua para su remoción efectiva (ROSA *et al.*, 2012; SANTOS, 2014; DÍAZ FLÓREZ, 2016).



**Figura 12** – Separadores trifásicos con canaleta interna de colecta de nata: a) STF confeccionado en concreto y lona, con canaleta en aluminio; b) STF confeccionado en concreto, con canaleta en PRFV; c) STF confeccionado en PRFV, con canaleta en PRFV.

Una alternativa a la utilización de separadores trifásicos continuos (tronco-piramidal rectangular – ver Figura 13), equipados con canaletas largas, es la utilización de separadores trifásicos

menores, tronco-piramidales cuadrangulares, equipados con colectores de nata en la forma de copa en su parte interna, conforme lo mostrado en la Figura 13.



**Figura 13** – Separador trifásico tronco-piramidal cuadrangular equipado con colector interno de nata: a) vista en planta; b) corte transversal.

El procedimiento de remoción hidrostática se basa en la alteración del nivel de agua en el interior del separador trifásico, posibilitando el vertido de la nata hacia la canaleta interna al separador y su envío hacia la tubería de descarte externa al reactor. La alteración del nivel de agua en el interior del separador trifásico se

alcanza gracias al incremento o la reducción de la presión en la línea de gas comprendida entre el separador trifásico y el sello hidráulico localizado en la parte superior de cada reactor UASB. En la Figura 14 se muestra la representación esquemática del sistema para remoción hidrostática de nata.

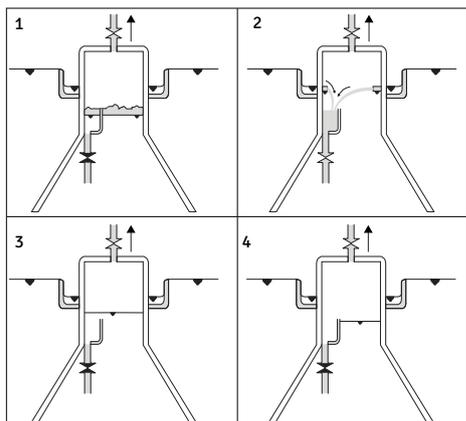


Figura 14 – Representación esquemática del sistema para remoción hidrostática de la nata.

Secuencia de procedimiento

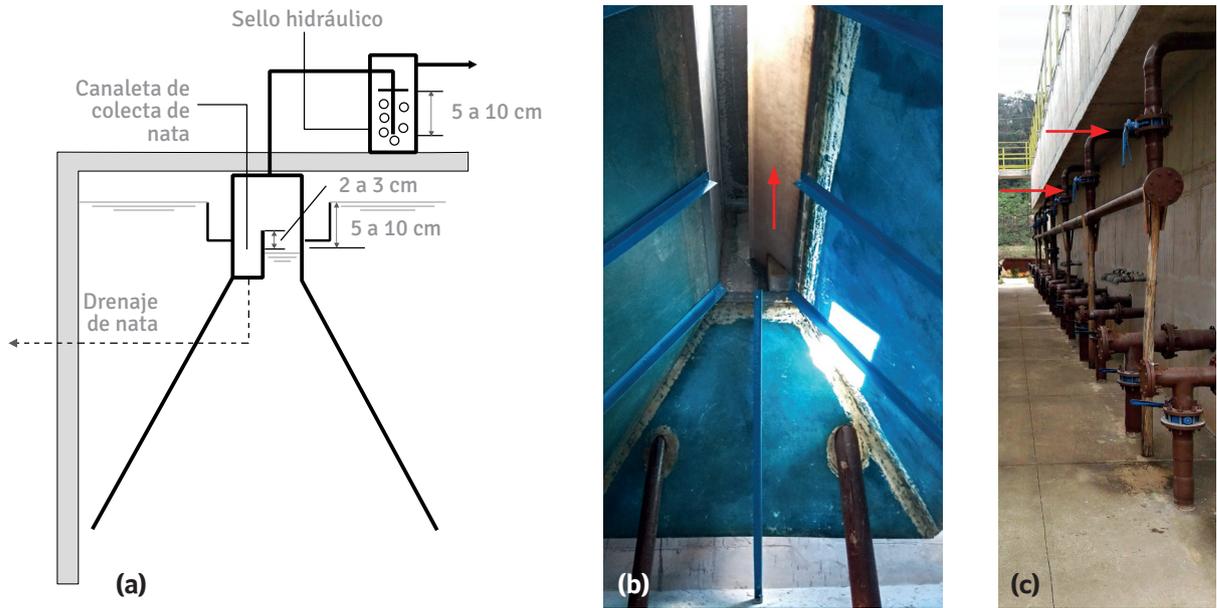
1. Niveles de nata durante la operación normal del reactor (línea de gas presurizada, de modo que mantenga el nivel de nata 2 a 3 cm abajo del borde superior de la canaleta interna).
2. Elevación del nivel de nata, conseguido gracias al alivio de la presión de la línea de gas, de forma a permitir la entrada de nata en la canaleta interna.
3. Cierre de la válvula de vaciado de la canaleta interna.
4. Aumento de la presión de la línea de gas, retornando a la condición operativa mostrada en 1.

Este dispositivo para remoción hidrostática fue probado con buenos resultados en reactores UASB en escala de demostración y plena, siendo observadas eficiencias de remoción entre 75% y 90% (ROSA *et al.*, 2012; SANTOS, 2014; DÍAZ FLÓREZ, 2016). Se resalta que este dispositivo solo funcio-

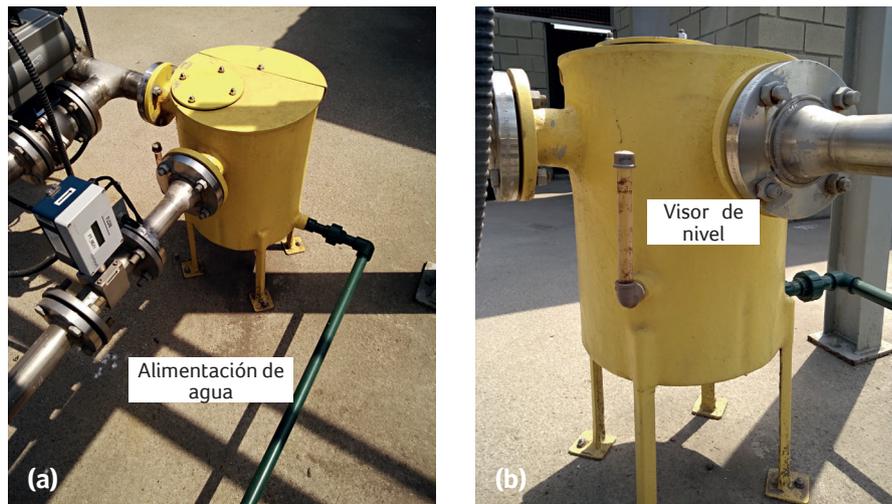
na adecuadamente para la remoción de nata en su estado fluido (no excesivamente espesada y solidificada). En el Cuadro 4 se presentan las principales directrices a ser consideradas en el diseño, construcción y operación de los dispositivos de remoción de nata.

**Cuadro 4 – Directrices para el diseño, la construcción y la operación del dispositivo de remoción de nata**

- La cantidad de nata acumulada en el interior del separador trifásico debe ser verificada para cada condición específica, considerando la calidad del agua residual cruda, la eficiencia del tratamiento preliminar y las características constructivas del reactor, al inicio de la operación del dispositivo de remoción de nata.
- El separador trifásico debe ser integrado al sello hidráulico para permitir el control de presiones internas y, consecuentemente, el ajuste de los niveles de agua en relación a la canaleta de colecta de nata (Figuras 15a y 16).
- Las canaletas de colecta de nata deben ser preferiblemente posicionadas junto a una de las paredes del separador trifásico y no en el centro. El posicionamiento de la canaleta junto a una de las laterales posibilita mayor área de lámina vertiente y mayor eficiencia en la remoción de nata. En la Figura 15b se muestra una canaleta de sección triangular.
- Correcto posicionamiento de la canaleta de colecta de nata durante la construcción, considerando que la instalación en niveles diferentes de los especificados en diseño puede inviabilizar la adecuada presurización y funcionamiento del dispositivo.
- Prever puntos de inspección y válvulas en las tuberías de salida de la nata de cada separador trifásico, con el fin de identificar puntos de obstrucción y pérdidas de carga hidráulica similares, la cual sólo se observa con la instalación de una válvula (Figura 15c).
- Prever boquillas de extracción a lo largo de la canaleta de colecta de nata, con el fin de permitir condiciones hidráulicas más adecuadas para el vaciado de la nata (Figura 17).
- Con base en las experiencias relacionadas al desarrollo del separador trifásico modular *Étsus-1000*, para la configuración de múltiples boquillas de extracción, un ancho de 15cm para la canaleta de colecta de nata es suficiente para garantizar caudales adecuados de vaciado, y también adecuadas tasas de liberación de biogás (tasa de liberación mínima  $1,0 \text{ m}^3 \text{ biogás} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) en el área exterior a la canaleta de colecta de nata.
- Garantizar la estanqueidad del compartimento de gas, de modo a permitir el establecimiento de pequeñas presiones en la línea de biogás (5 a 10 cm.c.a).
- La frecuencia ideal de remoción de nata en el interior de los separadores trifásicos debe ser establecida a partir de la inspección visual, que puede ser definida a partir de la abertura de las tapas de inspección de cierre hermético (o a través de visores transparentes, si estuvieran disponibles), antes y después de cada operación de descarte. La práctica operacional del reactor permitirá establecer la mejor rutina de descarte (frecuencia y tiempo de descarte, grado de abertura de las válvulas, volúmenes removidos).
- Siempre que sea posible, se deben colocar válvulas motorizadas para facilitar la operación de remoción de nata.



**Figura 15** – Dispositivo de remoción hidrostática de nata: (a) ilustración esquemática del control de presión y nivel de nata en el interior del STF; (b) vista de canaleta de colecta de nata en sección triangular; (c) válvulas en las tuberías de salida de nata de cada separador trifásico.



**Figura 16** - Selo hídrico utilizado para controle de pressão e nível de espuma: a) vista geral da instalação; b) detalhe do visor de nível.

### 5.3.1 Separador trifásico modular Étsus-1000

El separador trifásico modular Étsus-1000 (Figura 17) es un producto en fase final de desarrollo, fruto de la asociación entre la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), por medio del Instituto Nacional de Ciencias y Tecnología en Plantas de Tra-

tamiento de Aguas Residuales Urbanas (INCT ETES Sustentaveís - por sus siglas en portugués), con compañías estatales de saneamiento y fabricantes de elementos de fibra de vidrio. Este producto es confeccionado en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y busca contribuir para la solución

de diversos problemas operacionales de reactores UASB, tales como: i) el adecuado manejo de nata; ii) la colecta eficiente del biogás, sin pérdidas por fugas; iii) la adecuada colecta del efluente líquido tratado, evitando el desprendimiento de gases residuales y la presencia de cortos-circuitos hidráulicos. Las principales ventajas asociadas al producto son:

- Estructura modular de separación trifásica que incorpora aspectos de ligereza, resistencia, estanqueidad y facilidad de transporte e instalación.

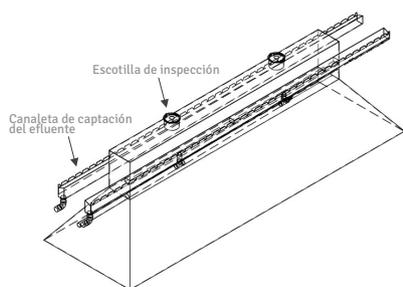
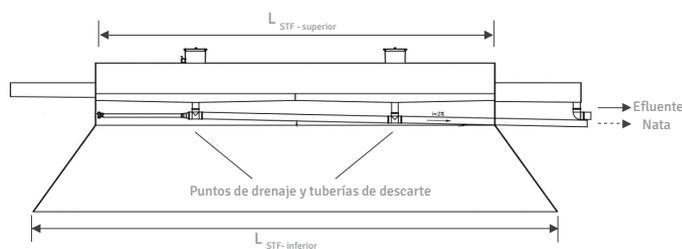


Figura 17 – Perspectiva esquemática del separador trifásico modular – Étsus 1000.



### 5.5 Manejo y disposición final

Luego de la remoción de la nata de los reactores UASB, el adecuado manejo y disposición final de este subproducto es de extrema importancia. En Brasil, algunas PTARs han considerado los lechos de secado como una etapa importante para su manejo. Sin embargo, la inclusión de una etapa previa de tamizado es necesaria, con el fin de separar la elevada cantidad de material grueso presente en la nata de la fracción tamizada. El material retenido en el tamiz debe ser enviado para su disposición final en relleno sanitario y la fracción tamizada debe ser enviada para su deshidratación en lechos de secado.

Adicionalmente, en función de los **elevados volúmenes del líquido descartado junto con la nata**, la fracción tamizada puede ser enviada a un **tanque de espesado** con el fin de separar la nata en tres fases: i) fracción sobrenadante; ii) fracción clarificada; iii) fracción sedimentada. Una investigación realizada en un sistema piloto de espesado indicó

- Incorporación del sistema de remoción de nata que se acumula en el interior del separador trifásico, contribuyendo directamente para la mejora de aspectos operacionales de los reactores UASB y de reducción y eliminación de emisiones odorantes y de pérdidas de biogás.
- Incorporación de sistema de colecta de efluente acoplado al cuerpo del separador trifásico, con un dispositivo de verificación de nivel.

que 5% de la nata tamizada corresponde a la fracción sobrenadante, 89% corresponde a la fracción clarificada y un 6% a la fracción sedimentada. La caracterización de la fracción clarificada presentó concentraciones medianas de ST, DQO, DBO y grasas y aceites dentro de los rangos usuales para el agua residual cruda; indicando, por lo tanto, que esa fracción puede ser retornada al inicio del sistema de tratamiento sin perjudicar el funcionamiento y la eficiencia de esas unidades. En ese sentido, la previsión de un tanque de espesado para recibir la fracción tamizada de nata es de gran importancia para permitir la separación de la fracción clarificada (que representa un gran volumen), para el retorno al tratamiento de la fase líquida. Con esto, únicamente las fracciones sobrenadantes y sedimentadas son encaminadas a la deshidratación en lechos de secado, en conjunto o separadas. Como el volumen de esas dos fracciones corresponde a un poco más del 10% del volumen total tamizado, la inclusión de la etapa de espesado, antes de la deshidratación en lechos de secado, contribuye para

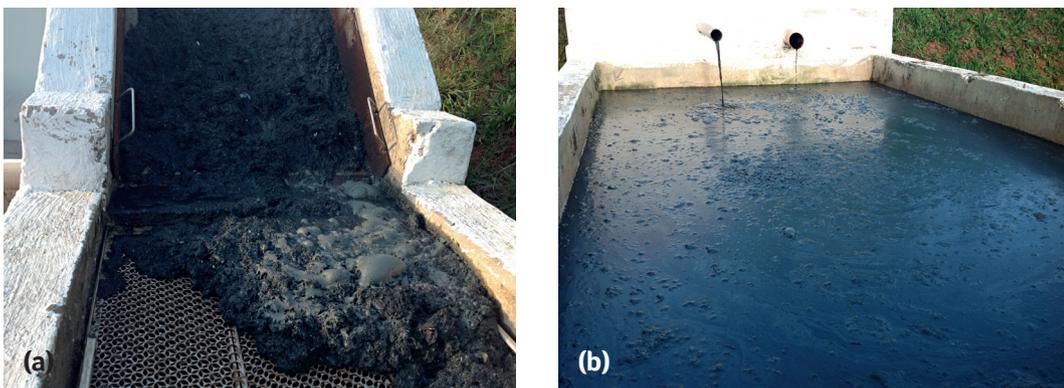
una reducción sustancial del área de esas unidades (DÍAZ FLÓREZ, 2016).

De esta forma, los diseños más recientes han recomendado que la nata (fluida) removida de reactores UASB sea enviada a una unidad de tamizado, seguida de una unidad de espesado, conforme lo descrito a continuación:

i) la unidad de tamizado (# 1,0 mm) permite la separación del material grueso (sólidos) contenidos

en la nata (Figura 18a), para la posterior disposición final en relleno sanitario;

ii) la unidad de espesado, localizada después de la unidad de tamizado, permite la separación de la fracción clarificada de las demás fracciones (sobrenadante y sedimentada), con el retorno de la fracción clarificada para la unidad de tratamiento preliminar, o para su propio reactor UASB, y las demás fracciones para los lechos de secado (Figura 18b).



**Figura 18** – a) Fracción gruesa de nata retenida en la unidad de tamizado; b) Fracción sobrenadante de nata enviada al lecho de secado.

## 6 GESTIÓN INTEGRADA DE LODO Y NATA

El uso de las mejoras presentadas en esta NT y la gestión integrada de los subproductos sólidos (lodo y nata) son de fundamental importancia para garantizar la eficiencia del sistema de tratamiento. En la Figura 19 se presentan alternativas para la gestión integrada de lodo y nata (y biogás), las cuales pueden traer importantes beneficios para las PTARs. Se destacan las siguientes posibilidades:

- Uso del biogás para el secado térmico del lodo y de la nata.

- Envío del lodo y de la nata para tanques de espesado, de modo a permitir la separación y retorno del exceso de agua para la unidad de tratamiento preliminar, o para el propio reactor UASB.

- Higienización del lodo y la nata en lechos de secado (calentados con biogás), en secadores solares o en secadores térmicos, los cuales pueden propiciar que el material deshidratado sea aprovechado en actividades agropastoriles o en unidades de aprovechamiento energético, en vez de disponerlo en rellenos sanitarios.

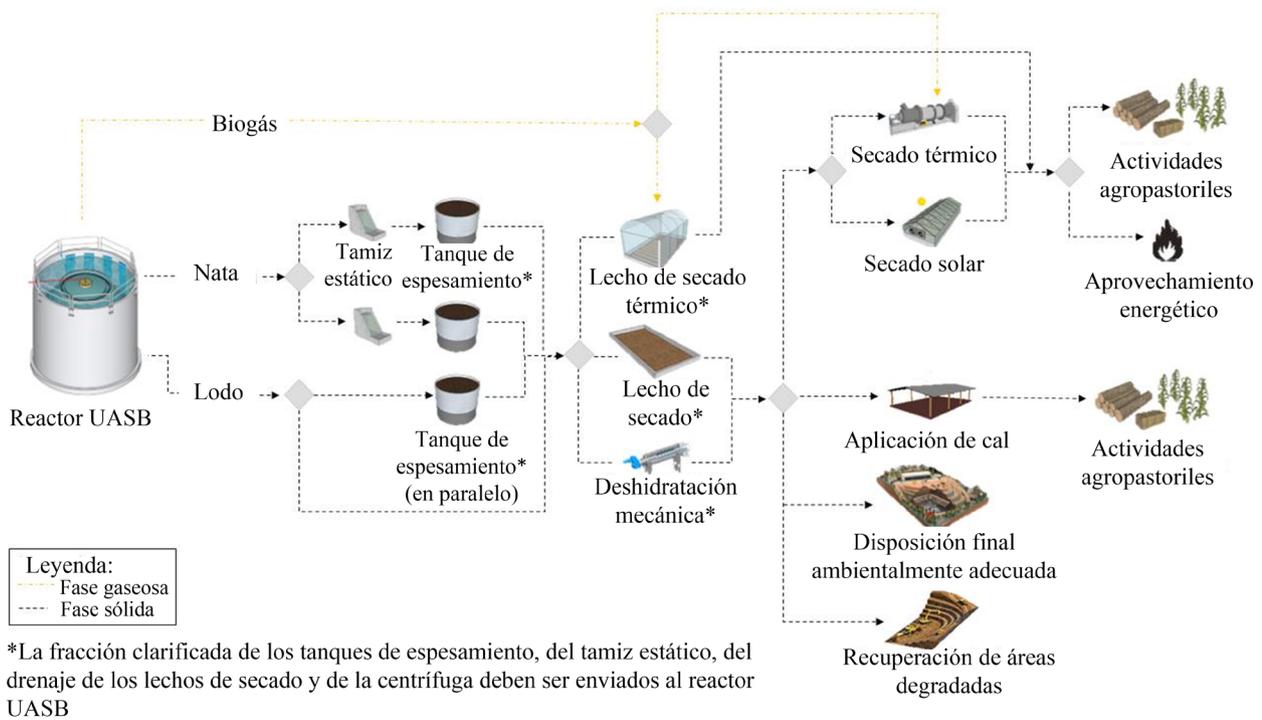


Figura 19 – Alternativas para la gestión integrada de lodo y nata.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las contribuciones de Isabel Cristina Chiodi de Freitas y Ayana Lemos Emrich en la elaboración de esta NT y a las empresas Biofibra y Fibrasa por el trabajo conjunto en el desarrollo del separador trifásico *Étsus-1000*. Agradecen el apoyo recibido por el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico - CNPq (*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*), por la Coordinación de Mejoramiento de Personal de Nivel Superior – CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*), por la Fundación de Amparo a la Investigación del Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais*) y del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de

Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (*INCT ETEs Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

Este trabajo forma parte de la serie de publicaciones del Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Plantas Sostenibles de Tratamiento de Aguas Residuales (*INCT ETEs Sustentáveis* por sus siglas en portugués).

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitarios de estações de tratamento de esgotos sanitários**. 2ª edición. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.
- ALMEIDA, P. G. S., BRESSANI RIBEIRO, T., SILVA, B. S., AZEVEDO, L. S., CHERNICHARO, C. A. L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 6: Calidad del efluente. *Revista DAE* – edición especial, v. 66, n. 214, p. 90-108, 2018.

BRESSANI-RIBEIRO, T., LOBATO, L.C.S., MELO, V.R., PEGORINI, E., NONATO, S., CHERNICHARO, C.A.L. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 2: Tratamiento Preliminar. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 17-29, 2018.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reactores anaeróbios**. 2<sup>a</sup> edición. Belo Horizonte: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CHERNICHARO, C. A. L., BRESSANI-RIBEIRO, T., PEGORINI, E., POSSETTI, G. R. C., MIKI, M. K., NONATO, S. Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 1: Temas de interés. **Revista DAE** – edición especial, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018.

DÍAZ FLÓREZ, C. A. **Avaliação de protocolos de descarte e desidratação da espuma acumulada no interior de separadores trifásicos de reatores UASB**. 2016, 83 p. Disertación (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LEITÃO, R. C., SANTAELLA, S. T., van HAANDEL, A. C., ZEEMAN, G., LETTINGA, G. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. In: **12th World Congress on Anaerobic Digestion**, 2010, Guadalajara, México. Proceedings... Guadalajara, México: International Water Association - IWA, 2010.

LETTINGA, G., HULSHOFFPOL, L.W. UASB - Process design for various types of wastewaters. **Water Science & Technology**, v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991.

MIKI, M. K. Dilemas do UASB. **Revista DAE**, v.183, n. 1504, p. 25-37, 2010.

RAMOS, R. A. **Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal**. 2008, 135 p. Disertación (Maestría en Tecnología Ambiental y Recursos Hídricos). Universidad de Brasília, 2008.

ROSA, A.P., LOBATO, L.C.S., CHERNICHARO, C.A.L., MARTINS, D. C. R. B., MACIEL, F. M., BORGES, J. M. Improving performance and operational control of UASB reactors via proper sludge and scum discharge routines. **Water Practice & Technology**, v. 7, n. 3, p. 1–11, 2012.

SANTOS, A. **Remoção, tratamento e valoração de espuma proveniente de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto doméstico**. 2014. 115 f. Tesis. (Maestría en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos). Escuela de Ingeniería, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014

SATO, N., OKUBO, T., OHASHI, A. & HARADA, H. Prospects for a self-sustainable sewage treatment system: case study on full-scale UASB system in India's Yamuna River Basin. **J. Environ. Manage.** v. 80, n.3, p. 198-207, 2006.

SOUZA, C. L., SILVA, S. Q., AQUINO, S. F. & CHERNICHARO, C. A. L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic wastewater. In: **4th World Water Congress**, Beijing, China. Proceedings...Beijing, China: International Water Association - IWA, 2006.

van LIER, J. B., VASHI, A., van der LUBBE, J., HEFFERNAN, B. Anaerobic sewage treatment using UASB reactors: Engineering and operational aspects. In: Fang, H.H.P. (Editor) **Environmental anaerobic technology: applications and new developments**. Imperial College Press -London-UK. p. 59-87, 2011.