IA-HT-2019-01

HOJA TÉCNICA

"Gestión de aguas y lodos residuales para plantas potabilizadoras de agua superficial"

Área Funcional Investigación Aplicada

UEN Investigación y Desarrollo

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo

AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS, ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI

Yo, Annette Henchoz Castro
_____

N° Cédula: 1-0725-0409
_____

Dependencia: Gerencia General

_____

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: centrodoc@aya.go.cr **N° Teléfono**: 2242-5487

Annette Henchoz Castro
Firmado digitalmente por Annette Henchoz Castro
Fecha: 2019.11.25 16:07:20 -06'00'

Firma: _____

1. Estado de la situación

Los procesos de potabilización remueven contaminantes del agua, en muchos de los sistemas de tratamiento a través del uso de productos químicos. Por las anteriores razones, se produce siempre, algún tipo de residuo. Los operadores de los sistemas de potabilización, deberán tratar y disponer de estos residuos (o aprovecharlos, en caso de que sea posible), de una manera costo efectiva y en cumplimiento con las regulaciones existentes; las cuales, cada día son más exigentes en cuanto a la caracterización de los residuos que se generan.

La gestión de los lodos en las plantas potabilizadoras de aguas superficiales, es un tema que ha venido tomando importancia en las últimas décadas en todo el mundo. En Costa Rica, para la mayoría de los sistemas de potabilización existentes, estos residuos son dispuestos en cuerpos de agua cercanos, provocando un impacto ambiental negativo y posiblemente de salud para los organismos que dependen de las aguas de estos cuerpos de agua.

Respecto a la legislación aplicable, se puede mencionar que existe un marco normativo de reglamentos que regulan la gestión de estos residuos, el cual se presentará en la siguiente sección de este documento.

Esta Hoja Técnica Conceptual, resume la investigación realizada sobre la gestión de aguas y lodos residuales generados en los sistemas de potabilización de aguas superficiales; que utilizan los procesos de: coagulación, mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración rápida y desinfección (ver Figura 1).

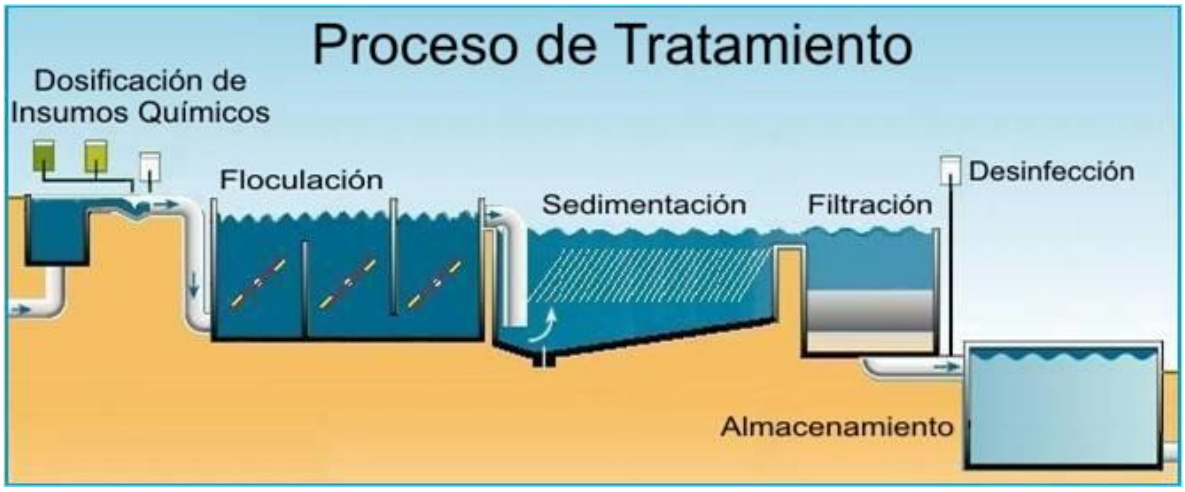

Figura 1 Proceso de potabilización, operaciones y procesos unitarios. (Fuente: PURIFICARAGUA. (2018). Madrid. Recuperado de: https://purificaragua.com)

Los procesos antes mencionados, remueven contaminantes del agua, dentro de los cuales se puede mencionar: turbidez, color y microorganismos. Para realizar estos procesos adecuadamente, se utilizan productos químicos como coagulantes

(sulfato de aluminio y sales de hierro) y polímeros sintéticos como ayudantes de coagulación y floculación.

Al remover estos contaminantes, se generan residuos en las operaciones y procesos. Estos residuos se convierten en las aguas y lodos residuales del proceso de potabilización. De la operación de sedimentación se generan residuos al purgar y lavar el sedimentador y de la operación o proceso de filtración, se generan residuos al limpiar los filtros mediante las operaciones de retrolavado y enjuague.

2. Legislación Aplicable

Sobre este aspecto, se destacan los siguientes reglamentos como parte de la legislación aplicable a este tema.

1. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.
2. Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos.
3. Reglamento general para la clasificación y manejo de residuos peligrosos.

En los siguientes apartados, se destacan los aspectos más importantes y que se consideran de mayor relevancia para AyA en la gestión de aguas y lodos residuales de plantas potabilizadoras, en lo que respecta a los distintos reglamentos mencionados.

2.1 Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Decreto N° 33601-MINAE-S

Respecto a la aplicación de este reglamento, se puede concluir lo siguiente:

1. Las aguas residuales y los lodos generados en los procesos de potabilización de aguas superficiales, se consideran como agua residual de tipo especial y lodos especiales respectivamente.

2. Existe la obligación del ente generador de un vertido, de realizar reportes operacionales sobre el vertido realizado.

3. Se establecen los parámetros físico-químicos y microbiológicos que deben ser analizados en las aguas residuales que se viertan en un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario; adicionalmente se establecen los límites para los parámetros establecidos.

4. Se establece la prohibición de verter lodos provenientes de sistemas de potabilización a los cuerpos de agua y al alcantarillado sanitario.

En los siguientes cuadros, se presentan los parámetros y límites máximos permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de las aguas residuales.

Cuadro 1 Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillado sanitario.

Parámetro	Límite Máximo
Demanda Bioquímica de Oxígeno $DBO_{5,\ 20}$ (mg/L)	300
Demanda Química de Oxígeno DQO (mg/L)	750
Sólidos suspendidos (mg/L)	300
Sólidos sedimentables (mL/L)	5
Grasas/aceites	50
Potencial hidrógeno	6 a 9
Temperatura	15°C ≤ T ≤ 40°C
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	5

Cuadro 2 Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.

Parámetro	Límite Máximo
Demanda Bioquímica de Oxígeno $DBO_{5,\ 20}$ (mg/L)	50
Demanda Química de Oxígeno DQO (mg/L)	150
Sólidos suspendidos (mg/L)	50
Sólidos sedimentables (mL/L)	1
Grasas/aceites	30
Potencial hidrógeno	5 a 9
Temperatura	15°C ≤ T ≤ 40°C
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	5

2.2 Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos. Decreto Ejecutivo N° 39316-S

De la lectura de este reglamento, se puede concluir lo siguiente:

1. Los lodos generados en el proceso de potabilización, se consideran como Lodos Especiales.

2. Los lodos generados en el proceso de potabilización no pueden ser utilizados como acondicionamiento en suelos.

3. Se establecen los parámetros de análisis obligatorios para la disposición de los biosólidos especiales en rellenos sanitarios, los cuales se presentan en el cuadro 3.

4. Los parámetros complementarios a analizar para disponer de los biosólidos, se establecen en el Reglamento sobre la Caracterización y el Listados de los Desechos Peligrosos Industriales, Decreto N°27000-MINAE.

Cuadro 3 Límites máximos permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de biosólidos de tipo especial

Parámetro	Relleno Sanitario
Porcentaje de humedad	70%
Poder Calorífico	NA
Potencial Hidrógeno	5 – 9
Parámetros complementarios	Ver Nota

Nota: Valores establecidos en Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales, si la actividad no se encuentra en este reglamento, se debe determinar su peligrosidad cumpliendo con lo que establece el Reglamento sobre el Procedimiento para llevar a cabo la Prueba de Extracción para determinar constituyentes que hacen un residuo peligroso por su toxicidad.

2.3 Reglamento general para la clasificación y manejo de residuos peligrosos. Decreto Ejecutivo 41527-S-MINAE

Este decreto establece en su artículo 5° que, se definen como residuos peligrosos aquellos señalados por los siguientes convenios internacionales y normativa nacional, de la siguiente manera:

A. Por la Ley No. 7438 del 6 de octubre de 1994 "Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Residuos Peligrosos y su Eliminación":

    1. Los residuos de cualquiera de las categorías enumeradas en el Anexo I del citado Convenio de Basilea.

    2. Los residuos no incluidos en el punto anterior, pero definidos o considerados peligrosos conforme a la legislación interna del país de exportación, de importación o de tránsito.

    3. Los residuos que pertenezcan a cualquiera de las categorías contenidas en el Anexo II del referido Convenio de Basilea y que sean objeto de movimientos transfronterizos, serán considerados "otros residuos" a los efectos del Convenio de Basilea.

    4. Los residuos listados en el Anexo VIII del citado Convenio de Basilea.

    5. Los residuos listados en el Anexo IX del citado Convenio de Basilea, si presentan algunas de las características del Anexo III de dicho Convenio.

B. Los residuos sujetos a control por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en la Decisión C (2001)107, disponible en la página web del Ministerio de Salud: www.ministeriodesalud.go.cr:

1. Residuos de cualquier categoría del Apéndice 1 de la Decisión C (2001) 107, a menos que no contengan ninguna característica contenida en su Apéndice 2.

2. Los residuos que no están considerados en el párrafo anterior, pero que están definidos o considerados como residuos peligrosos por la legislación nacional del país miembro de exportación, importación o tránsito.

3. Los residuos listados en el Apéndice 4 de la Decisión C (2001)107, a excepción de los residuos ordinarios residenciales.

C. Se considerarán residuos peligrosos aquellos señalados en el Anexo 1 de este reglamento y que puede ser encontrado en el sitio: www.ministeriodesalud.go.cr.

D. También se considerarán como residuos peligrosos aquellos que cumplan con los criterios de los artículos 3° y 4° del Decreto Ejecutivo Nº 27000-MINAE del 29 de abril de 1998 "Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales."

De acuerdo con lo establecido anteriormente, para el caso de lodos generados en plantas potabilizadoras de filtración rápida, empleando sulfato de aluminio como coagulante, se tiene lo siguiente:

Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Residuos Peligrosos y su Eliminación

- A.1. Considerando el origen de los lodos de potabilización, y con base en el hecho de que no es una sustancia pura, se considera que no se puede clasificar bajo estos criterios.
- A.2. No aplica.
- A.3. Considerando el origen de los lodos de potabilización, se considera que no se puede clasificar bajo estos criterios.
- A.4 Considerando el origen de los lodos de potabilización, se considera que no se puede clasificar bajo estos criterios.
- A.5. Considerando el origen de los lodos de potabilización, se considera que no se puede clasificar bajo estos criterios.

Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en la Decisión C (2001)107

- B.1. Considerando el origen de los lodos de potabilización, se considera que no se puede clasificar bajo estos criterios.

- B.2. No aplica.
- B.3. Considerando el origen de los lodos de potabilización, se considera que no se puede clasificar bajo estos criterios.

Reglamento general para la clasificación y manejo de residuos peligrosos. Decreto Ejecutivo 41527-S-MINAE

Según la categoría 1909, los residuos de la preparación de agua para consumo humano o agua para uso industrial, no se consideran como peligrosos.

Decreto Ejecutivo Nº 27000-MINAE del 29 de abril de 1998 "Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales"

Según el criterio 3.5 del artículo 3, se podría considerar la verificación por medio de pruebas microbiológicas a realizar por el Laboratorio Nacional de Aguas, si los lodos de potabilizadoras cumplen con característica de "biológico-infeccioso". Es decir, si posee bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de producir inflamación o infección.

Adicionalmente, se recomienda solicitar criterio oficial al respecto al personal a cargo de la Regencia Química y la Regencia Microbiológica en el AyA. Incluso, se podría generar la consulta formal respectiva a la Contraloría Ambiental del MINAE.

3. Caracterización de los lodos residuales

Para el desarrollo de esta sección del documento, se asume que la generación de lodos residuales del proceso de potabilización se produce mayoritariamente en la purga de los sedimentadores y en la limpieza de los filtros.

3.1 Purga de los sedimentadores

3.1.1 Volumen y caudal de la purga

De las determinaciones realizadas por la UEN de Investigación y Desarrollo con el apoyo de los funcionarios de la Dirección de Plantas Potabilizadoras de la GAM, se determina que, debido al diseño de los sedimentadores, las purgas de los mismos poseen las siguientes características:

1. Caudales instantáneos muy altos y por ende volúmenes muy importantes en poco tiempo.

2. Alta variabilidad de la calidad del lodo durante la purga respecto a la concentración de sólidos suspendidos [SS]; lo anterior, parece obedecer a que la mayor parte del lodo se acumula en las secciones cercanas a las entradas a los sedimentadores, provocando que al inicio de la purga la

concentración de [SS] sea baja, luego aumente y finalmente disminuya. Adicionalmente, se considera que parte del sobrenadante del agua clarificada sale en la purga del sedimentador, lo que hace que el lodo se diluya.

Con respecto a este tema, se recomienda que el diseñador de la planta potabilizadora, tome en consideración la posibilidad de que los sedimentadores cuenten con un sistema mecanizado de recolección y extracción (purga) de los lodos generados.

3.1.2 Caracterización de lodo de purga de sedimentador

3.1.2.1 Análisis residual básico

Como parte de la investigación desarrollada, se realiza una caracterización del lodo de purga de uno de los sedimentadores de la Planta Potabilizadora de Cartago, respecto a lo que se conoce como análisis Residual Básico. Para este análisis realizado, se toma una muestra compuesta y se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 4 Resultados de análisis residual básico a muestra compuesta de lodo de purga de sedimentadores de la Planta Potabilizadora de Cartago.

Parámetro	Resultado Promedio	Límite Máximo*
Potencial Hidrógeno	6.7	5 a 9
Sólidos Totales (mg/L)	5 260	--
Sólidos Disueltos (mg/L)	528	--
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	4 732	50
Sólidos Sedimentables (mL/L)	650	1
Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/L)	1 535	150
Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO_5, (mg/L)	16	50
Grasas y Aceites (mg/L)	10	30
Sustancias Activas al Azul de Metileno, SAAM, (mg/L)	< 0.05	5

*Para vertido en cuerpo receptor

Según los resultados obtenidos, del análisis puntual realizado a la muestra compuesta preparada para un lodo de purga de uno de los sedimentadores de la Planta Potabilizadora de Cartago, bajo el escenario del *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*, respecto a los límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor, se superan los límites máximos establecidos para los parámetros de Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Sedimentables.

3.1.2.2 Materia orgánica

La caracterización de lodos mediante la determinación del contenido de sólidos volátiles (SV), permite tener una idea de la cantidad de materia orgánica presente en el mismo. Este valor hace referencia a la materia que se elimina o volatiliza cuando una muestra de lodo se pone en un horno mufla a una temperatura de aproximadamente 550°C; la materia que se volatiliza es la materia orgánica.

Se procede a caracterizar para lodos de purga del sedimentador de la Planta Potabilizadora de Tres Ríos y de Cartago, la concentración de Sólidos Volátiles de los mismos. Se toman tres muestras de lodo de purga del sedimentador de la Planta Potabilizadora (PPot) de Tres Ríos, para realizar el análisis de Sólidos Volátiles. Las determinaciones de esta prueba se realizaron por funcionarios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Los Tajos. En el siguiente cuadro, se muestran los resultados obtenidos y el valor de la relación de sólidos volátiles - sólidos totales.

Cuadro 5 Sólidos totales (ST) y volátiles (SV) para lodo de purga de un sedimentador de la PPot de Tres Ríos.

Muestra	Sólidos Totales (mg/l)	Sólidos Volátiles (mg/l)	Relación Sólidos Volátiles / Sólidos Totales (%)
1	8 1882	1 4706	18.0
2	5 906	1 524	25.8
3	2 532	710	28.0

La relación SV/ST mencionada, representa una buena indicación de la fracción de materia orgánica presente en un lodo. Según von Sperling (2007), para distintos procesos de tratamiento de aguas residuales, los valores de SV/ST para lodos sin digestión, se encuentran en el rango de 0.75 a 0.80 y para lodos digeridos el valor oscila entre 0.60 a 0.65. Para los análisis puntuales mostrados en el cuadro 5, para lodos de la PPot de Tres Ríos, los resultados indican que este valor se encuentra entre un 0.18 y 0.28. Por lo anterior, se puede indicar que el contenido de materia orgánica expresado como fracción volátil, es suficientemente bajo para este caso específico, como para no recomendar la digestión de los lodos caracterizados en la PPot mencionada.

Respecto a la PPot de Cartago, se procede a tomar muestras de la purga de uno de los sedimentadores con el fin de analizar o caracterizar el contenido de materia orgánica de los mismo a través del ensayo de sólidos volátiles (SV). Esta determinación se realizó por funcionarios de la PTAR Los Tajos. En el siguiente cuadro, se muestran los resultados obtenidos y el valor de la relación de sólidos volátiles - sólidos totales.

Cuadro 6 Sólidos totales y volátiles para lodo de purga de un sedimentador de la PPot de Cartago.

Muestra	Sólidos Totales (mg/l)	Sólidos Volátiles (mg/l)	Relación Sólidos Volátiles / Sólidos Totales (%)
1	3 764	1 180	31.3
2	1 400	434	31.0
3	1 066	358	33.6

Como puede observarse, los valores obtenidos se encuentran en el rango de 0.31 a 0.34; siendo valores inferiores a los valores promedio para los lodos digeridos mencionados anteriormente. Es decir, estos lodos cuentan con un alto grado de estabilización, si se toman como referencia las condiciones típicas de lodos residuales de aguas domésticas.

3.1.2.3 Metales pesados

Con respecto a la caracterización de metales pesados, se toman muestras de lodo de purga de un sedimentador de la PPot de Cartago al inicio y a los 3 minutos de iniciada la purga, se colocan en un cono Imhoff y se dejan sedimentar por 1 hora. Se procede entonces a realizar un perfil de sólidos de las muestras obtenidas y se caracteriza adicionalmente, el sobrenadante de la prueba de Sólidos Sedimentables. Los valores obtenidos, se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 7 Metales pesados en lodo y sobrenadante de lodo de purga de sedimentador.

Parámetro / Descripción	Lodo de purga, 0 minutos	Sobrenadante de purga 0 min	Sobrenadante de purga 3 min	Límite máximo*
Aluminio (µg/l)	336 513	61 272	31 183.2	5 000
Cromo (µg/l)	37.8	6.2	4.2	1 500
Manganeso (µg/l)	3 960	2 662	615	No aplica
Hierro (µg/l)	140 229	14 551	9 417	No aplica
Cobalto (µg/l)	80.2	4.6	2.8	No aplica
Níquel (µg/l)	53.2	11.6	7.8	1 000
Cobre (µg/l)	613	43.6	27.2	500
Zinc (µg/l)	467	72.6	50	5 000
Arsénico (µg/l)	73.6	7.2	3.6	100
Selenio (µg/l)	15.6	1.2	0.4	50
Cadmio (µg/l)	2.2	0.4	0.2	100
Antimonio (µg/l)	0.4	ND	ND	No aplica
Mercurio (µg/l)	0.4	ND	ND	10
Talio (µg/l)	1.4	ND	0.2	No aplica
Plomo (µg/l)	86.2	35.6	11	500

*Límite máximo permisible para los parámetros obligatorios complementarios de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.

Como puede observarse del cuadro anterior, tanto en el lodo como en el sobrenadante, las concentraciones de aluminio y hierro representan la mayor parte de los metales analizados. Si se comparan los valores que se presentan en el cuadro anterior, con los valores máximos permisibles para parámetros obligatorios complementarios de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor, se puede indicar que el parámetro aluminio se excede tanto para el lodo de purga como para los sobrenadantes y en el caso del cobre se excede para el lodo de purga.

Según Conagua 2007, los lodos obtenidos en el proceso de clarificación utilizando sulfato de aluminio como coagulante, pueden caracterizarse dentro de los siguientes valores de orden.

Cuadro 8 Caracterización de lodos de plantas potabilizadoras que utilizan sulfato de aluminio, CONAGUA (2007).

Parámetro	Rango
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	30 a 300
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	30 a 5 000
Potencial Hidrógeno	6 a 8
Sólidos Totales (%)	0.1 a 4
Óxido de aluminio (%)	15 a 40
Sílice e inertes (%)	35 a 70
Materia orgánica (%)	15 a 25
Aluminio disuelto (mg/L)	0.024 a 0.450
Aluminio total (mg/L)	808.3 a 2 567
Manganeso disuelto (mg/L)	1.66 a 7.28
Manganeso total (mg/L)	46.5 a 73.9
Hierro total (mg/L)	100 a 222
Hierro disuelto (mg/L)	3.5 a 6.47
Carbón orgánico total (mg/L)	22.9 a 245
Giardia (quiste/L)	52.84 a 67.1
Cryptosporidium (quiste/L)	26.42 a 38.4

Algunos de los valores obtenidos de las determinaciones realizadas, se encuentran dentro de los valores que se presentan en el cuadro anterior; tal es el caso para los parámetros de: DQO, pH, ST y hierro.

3.1.2.1 Sedimentabilidad del lodo de purga. Velocidad de sedimentación del lodo de la PPot Tres Ríos

Los lodos producidos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, sedimentan y compactan de manera distinta. Existen métodos para determinar la sedimentabilidad del lodo, y se dividen en dos categorías: i) los que proporcionan

información sobre la velocidad de sedimentación y ii) los que generan información sobre la capacidad de compactación de los mismos. Para el documento que se presenta, se realizó la prueba de velocidad de la zona de sedimentación (VZS), según detalla Henze (2011).

Para realizar la prueba, se optó por tomar lodo concentrado del sedimentador de la planta potabilizadora de Tres Ríos y caracterizarlo en cuanto a la cantidad de Sólidos Suspendidos (SS) presentes. La prueba requiere realizar los ensayos a distintas concentraciones de SS, por lo que se tomó la muestra original y se diluyó con agua desionizada hasta alcanzar las concentraciones deseadas. Se trabajó con las concentraciones de SS que se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 9 Concentraciones de Sólidos Suspendidos para realizar la prueba de sedimentabilidad del lodo.

Número de muestra	Sólidos Suspendidos [SS], mg/l
1	1 962
2	2 616
3	3 019
4	3 924
5	5 232
6	6 016
7	7 037
8	8 057

La prueba consistió en poner el lodo obtenido de las diluciones mencionadas, en una probeta de 1.000 ml, dejar sedimentar el lodo y medir la variación de la interfase del lodo a través del tiempo. En la siguiente imagen, se presenta una serie de fotografías del proceso de sedimentación para la prueba realizada.

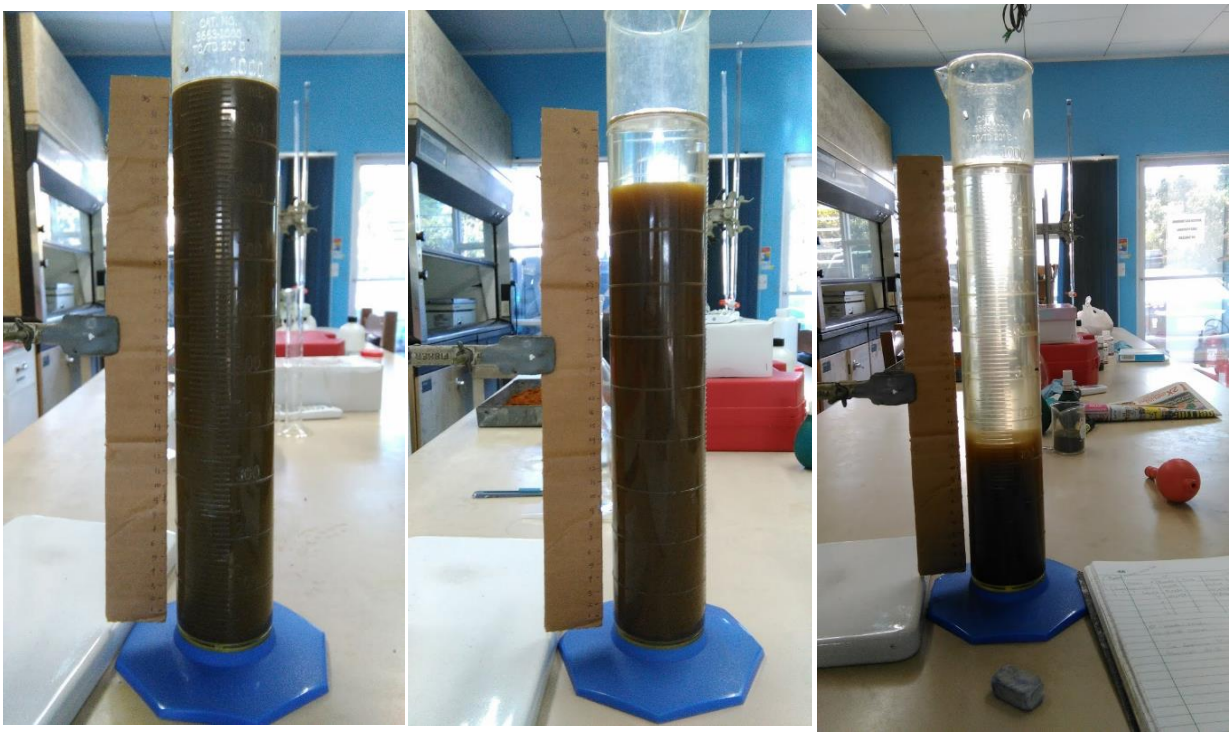

Figura 2 Fotografías de ensayo de velocidad de la zona de sedimentación.

En la siguiente figura, se muestra la representación gráfica de los datos obtenidos, para cada una de las concentraciones de SS evaluadas.

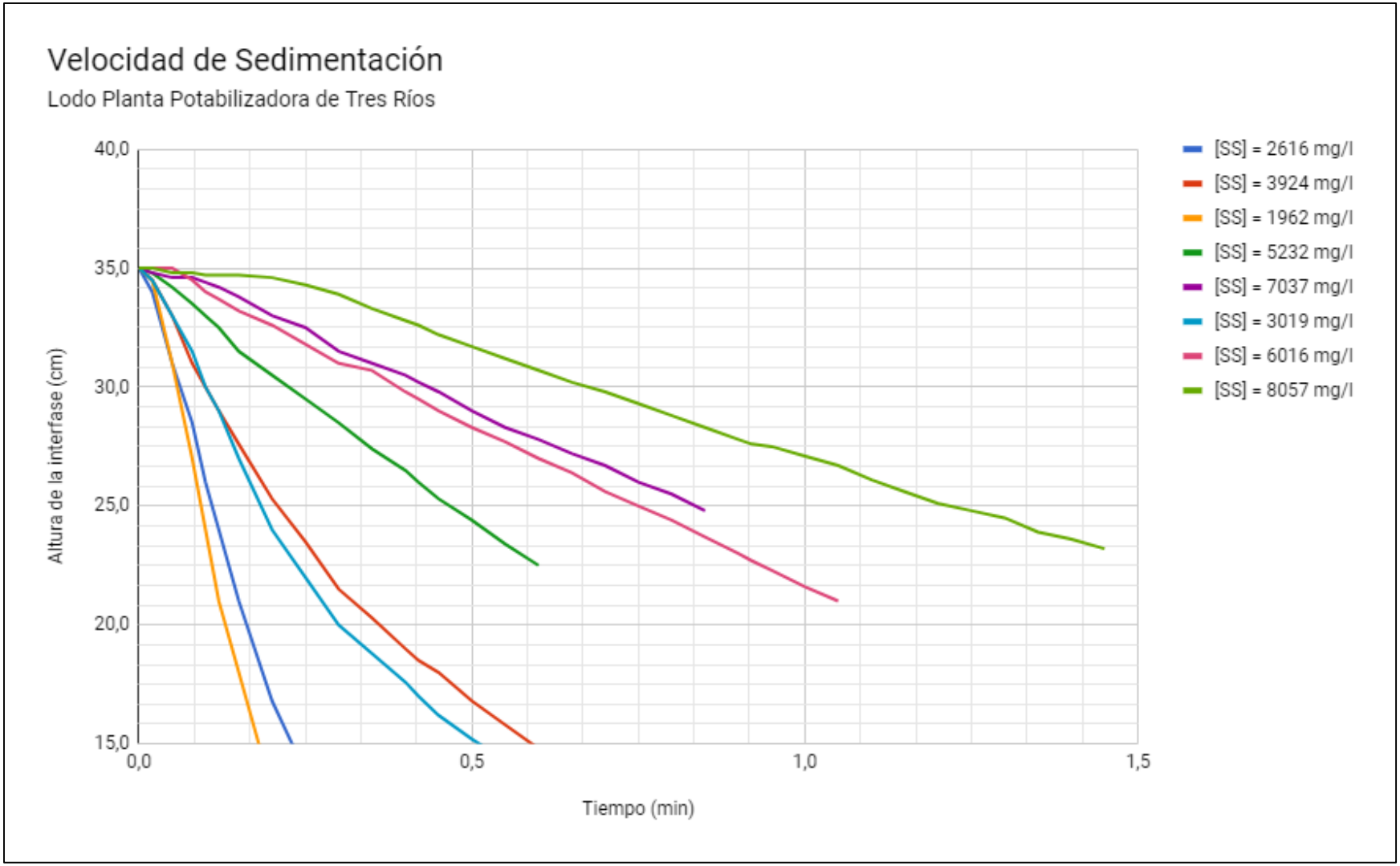
Velocidad de Sedimentación
Lodo Planta Potabilizadora de Tres Ríos
40,0
35,0
30,0
25,0
20,0
15,0
Altura de la interfase (cm)
0,0
0,5
1,0
1,5
Tiempo (min)
[SS] = 2616 mg/l
[SS] = 3924 mg/l
[SS] = 1962 mg/l
[SS] = 5232 mg/l
[SS] = 7037 mg/l
[SS] = 3019 mg/l
[SS] = 6016 mg/l
[SS] = 8057 mg/l

Figura 3 Variación de la altura de la interfase de lodos con el tiempo y a distintas concentraciones de SS

Como puede observarse de la gráfica anterior, entre más concentrado esté el lodo, menor es la velocidad de sedimentación y menor es la variación de la interfase del lodo con respecto al tiempo, es decir; la pendiente de los lodos más concentrados es menor a la de los lodos menos concentrados.

Una vez realizada la prueba para cada una de las concentraciones de SS mencionadas, se procede a realizar gráficas independientes de altura de interfase contra tiempo. La sección lineal de cada una de las gráficas, produce una pendiente que corresponde con la Velocidad de la Zona de Sedimentación del lodo a la concentración de trabajo. Las pruebas realizadas a concentraciones de SS bajas, muestran una alta velocidad de sedimentación, mientras que aquellas con muestras más concentradas, son más lentas.

Según Henze (2011), las velocidades de sedimentación se pueden trazar como una función de la concentración de SS, lo que resulta en una curva que puede ser descrita por una función exponencial llamada función Vesilind. Esta función es de la forma:

$$v_s = v_o \times e^{-phinX}$$

donde:

v_s: velocidad de sedimentación (m/h)
v_o: velocidad de sedimentación inicial (m/h), una extensión de la curva a la intersección de concentración con un valor de cero
phin: parámetro de sedimentación obstaculizada (l/g ó m^3/kg)
X: concentración de SS en (g/l o kg/m^3) en varias pruebas de VZS.

Al graficar la VZS contra la concentración de SS utilizada, se obtiene la función mencionada, la Relación de Vesilind. Para el lodo evaluado, se obtiene la relación que se presenta en la siguiente gráfica.

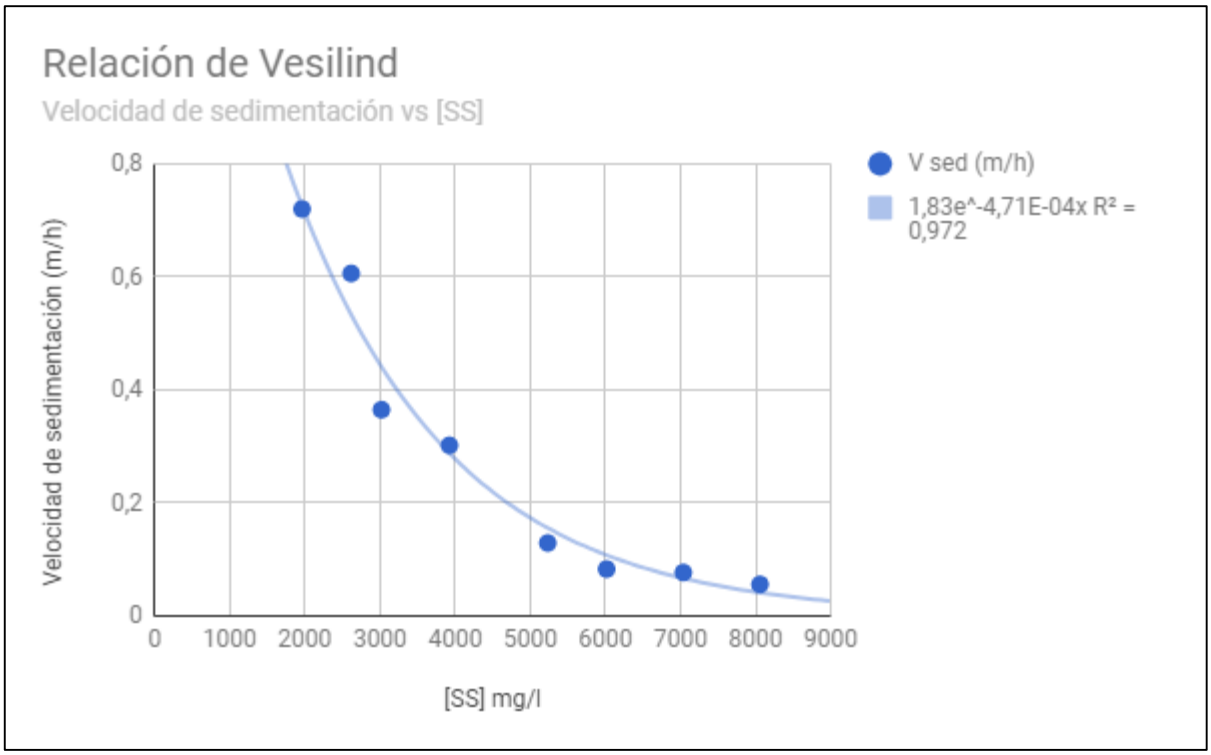

Figura 4 Relación de Vesilind

El gráfico anterior, relaciona la concentración de SS con la velocidad de sedimentación de los mismos. Los datos se ajustan mediante una ecuación exponencial con un valor de R^2 = 0.972. Para los parámetros descritos anteriormente, tenemos:

v_s: velocidad de sedimentación (m/h) = y (abscisas)
v_o: velocidad de sedimentación inicial (m/h), una extensión de la curva a la intersección de concentración con un valor de cero = 1.83
phin: parámetro de sedimentación obstaculizada (l/g ó m^3/kg) = 4.71×10^{-4}
X: concentración de SS en g/l o kg/m^3 en varias pruebas de VZS = x (ordenadas)

Al obtener el producto de la concentración de Sólidos Suspendidos (SS) por la Velocidad de la Zona de Sedimentación, se obtiene la carga de sólidos (Js) aplicada, para un valor dado de concentración de SS. En la siguiente imagen, se presenta de manera gráfica lo expresado.

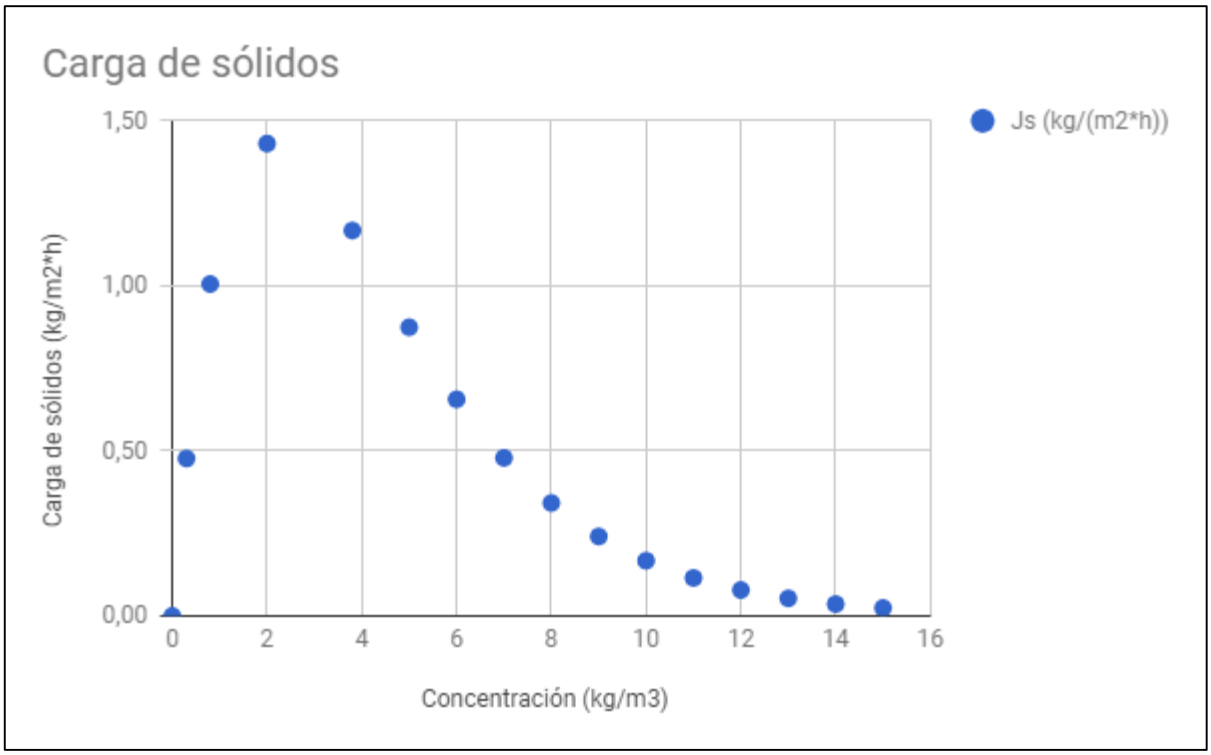

Figura 5 Carga de sólidos contra concentración de SS

Como puede observarse, para sedimentación a gravedad del lodo caracterizado y dependiendo de la concentración de SS del lodo, se pueden obtener valores de carga de sólidos que van desde aproximadamente 11 kg SS/m^2*d hasta aproximadamente 34 kg SS/m^2*d. Nótese que los valores de la gráfica están representados en kg SS/m^2*h para la carga de sólidos y en kg/m^3 para la concentración de SS.

Según Conagua (2007), para lodos de hidróxido de aluminio o hierro, la carga de sólidos se puede tomar entre 15 a 25 kg SS/m^2*d, valores similares a los obtenidos en la prueba realizada.

Según von Sperling (2007), dependiendo de la fuente del lodo, para aguas residuales domésticas y, para el dimensionamiento de espesadores a gravedad, se pueden utilizar los datos que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 10 Tasa de aplicación de sólidos para el dimensionamiento de espesadores a gravedad (von Sperling, 2007)

Fuente del lodo	Tipo del lodo	Tasa de aplicación de sólidos (kg ST/m²*d)
Primario	------	90 - 150
Lodo Activado	Convencional	20 - 30
	Aireación extendida	25 - 40
Filtro percolador	------	35 - 50

De los datos obtenidos de la prueba y comparándolos con los datos del cuadro anterior, se puede indicar que los valores de carga de sólidos para el lodo evaluado de la PPot, se encuentran similares a los datos para lodos activados. Es importante mencionar, que se deben realizar más ensayos de este tipo para los lodos de las plantas potabilizadoras con el fin de obtener valores más representativos para los mismos.

3.2 Limpieza de filtros

3.2.1 Volumen y caudal de agua para limpieza de filtros

Del trabajo realizado por la UEN de Investigación y Desarrollo con el apoyo de los funcionarios de la Dirección de Plantas Potabilizadoras de la GAM, se determina que la limpieza de los filtros posee las siguientes características:

1. Caudales instantáneos muy altos y por ende volúmenes muy importantes en poco tiempo.
2. Alta variabilidad de la calidad del agua de lavado durante la operación, respecto a la concentración de sólidos suspendidos [SS].

La estimación de la cantidad de agua utilizada para la limpieza de los filtros, que por consiguiente se convierte en un residuo a gestionar, depende de: las características del filtro, de la calidad del agua que recibe el filtro, la duración del lavado y la frecuencia de esta operación. Estos valores se pueden determinar de forma teórica o ser medidos en campo. Se debe tener presente que en algunas ocasiones se realiza el proceso de limpieza de los filtros pasando el agua tratada a contracorriente, a una tasa específica y durante un tiempo específico y adicionalmente, se realiza un enjuague del filtro pasando el agua en el sentido de filtración, pero no enviando el agua utilizada al depósito de agua tratada.

3.2.2 Caracterización de los residuos de la limpieza de filtros

3.2.2.1 Perfil de Sólidos

Respecto al perfil de sólidos, con el apoyo de los operadores, se tomó una muestra compuesta del agua de limpieza de los filtros de la Planta Potabilizadora de Tres

Ríos y se procedió a analizar la concentración de sólidos de la misma. Los resultados obtenidos, se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 11 Perfil de sólidos de muestra compuesta de retrolavado.

Muestra	Sólidos Totales (mg/l)	Sólidos Disueltos (mg/l)	Sólidos Suspendidos (mg/l)
Muestra compuesta	423	107	316

Como puede observarse, la concentración de SS de la muestra, es un valor bajo comparado con los obtenidos en las purgas de los sedimentadores, pero suficientemente alto como para incumplir con el Reglamento para el Vertido y Reuso de Aguas Residuales tanto para vertido en cuerpo receptor como para alcantarillado sanitario.

3.3 Caracterización mediante prueba de extracción de lodos deshidratados de la Planta Potabilizadora de Cartago

Se tomaron dos muestras de lodo deshidratado de los lechos de secado de la PPot de Cartago. La muestra 1 tenía 15 días de estar deshidratándose y la muestra 2 aproximadamente 5 meses. Se procedió a caracterizar algunos parámetros base y se le realizó adicionalmente la prueba de extracción al sólido, misma que se detalla en el *Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales*, Decreto N° 27000-MINAE. Los resultados obtenidos se presentan en los siguientes cuadros.

Cuadro 12 Datos base de lodo deshidratado.

Identificación	Humedad (%)	Poder Calorífico (cal/g)	pH	Aluminio total-base seca (%)
Lodo deshidratado por 5 meses	10.8	533	6.5	10.6
Lodo deshidratado por 15 días	74.9	151	7.5	10.2

Como se puede observar y tal y como es de esperar, el contenido de humedad de los lodos disminuye con el tiempo de deshidratado. Según los resultados obtenidos de las dos muestras de lodo deshidratado, tomadas de la Planta Potabilizadora de Cartago, y con un tiempo de deshidratado de 15 días y 5 meses respectivamente, se obtiene que la humedad de los lodos fue de 74,9% y de 10,8%; siendo el requerimiento del artículo 10 del *Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos*, Decreto Ejecutivo N° 39316-S, de 70% de humedad. Para el caso del lodo deshidratado por 15 días, se debe dejar secando un poco. Como puede observarse del cuadro anterior, las concentraciones de aluminio total en los lodos, representan valores muy importantes.

Cuadro 13 Resultados de la prueba de extracción al lodo deshidratado.

Parámetro/Descripción	Lodo deshidratado por 5 meses	Lodo deshidratado por 15 días
Arsénico (mg/l)	< 0,10 mg/l	< 0,10 mg/l
Bario (mg/l)	< 1,0 mg/l	< 1,0 mg/l
Cadmio (mg/l)	< 0,05 mg/l	< 0,05 mg/l
Cromo Total (mg/l)	< 0,05 mg/l	< 0,05 mg/l
Níquel (mg/l)	< 0,05 mg/l	< 0,05 mg/l
Mercurio (mg/l)	< 0,02 mg/l	< 0,02 mg/l
Plata (mg/l)	< 0,05 mg/l	< 0,05 mg/l
Plomo (mg/l)	< 0,10 mg/l	< 0,10 mg/l
Selenio (mg/l)	< 0,10 mg/l	< 0,10 mg/l

Según establece el *Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales*, Decreto N° 27000-MINAE, en su apartado 3.4 y respecto a las concentraciones máximas presentadas en el reglamento mencionado (cuadro 4 de este documento); las concentraciones presentes en el lixiviado de las muestras analizadas, son menores a las indicadas para considerar el residuo como peligroso por criterio de toxicidad.

4. Gestión de aguas y lodos residuales de Plantas Potabilizadoras

El objetivo de la gestión de residuos en una planta potabilizadora es:

1. La reducción del volumen de lodos generados en las plantas potabilizadoras.
2. La estabilización de la materia orgánica (en caso de ser necesario).
3. La reducción de organismos patógenos.
4. Facilitar las operaciones de tratamiento, transporte y disposición final de los mismos.

La literatura propone distintas etapas de tratamiento del lodo, dentro de las cuales se encuentran:

1. Espesado de lodos.
2. Acondicionamiento del lodo.
3. Desaguado del lodo.

4.1 Espesamiento de lodos

Se realiza primordialmente con el fin de reducir el volumen de residuos que van a requerir de tratamiento y disposición. Consiste en la remoción de exceso de agua de los lodos mediante la decantación y concentración de lodos por sedimentación (CONAGUA, 2007). Puede adicionalmente, ser realizada mediante equipo mecanizado de espesado o por flotación como la tecnología DAF "*dissolved air flotation*", flotación por aire disuelto.

Para el desarrollo de este documento, se centró la investigación en la tecnología de espesado por gravedad, al ser esta más convencional. El diseñador, dependiendo de la calidad y cantidad de los lodos generados, debe considerar las distintas alternativas de espesado existentes en el mercado.

4.1.1 Espesadores a gravedad

El parámetro de diseño crítico para los espesadores por gravedad es la carga, en términos del peso total de sólidos por unidad de superficie y por unidad de tiempo. El segundo parámetro considerado en el diseño de espesadores por gravedad, es la tasa superficial. La tasa superficial es importante debido a que una carga alta puede ocasionar el arrastre de sólidos en el agua decantada. Para el diseño de los tanques espesadores es deseable llevar a cabo pruebas de laboratorio o piloto para obtener los datos de diseño. (CONAGUA, 2007)

4.1.2 Lagunas para espesamiento

En estas lagunas se depositan los lodos y se decanta el sobrenadante a medida que se vaya espesando el lodo. Las lagunas se pueden diseñar para funcionar como lechos de secado, una vez que se alcanza el nivel de lodo de diseño (CONAGUA, 2007).

4.2 Acondicionamiento del lodo

El acondicionamiento de lodos de plantas potabilizadoras, se refiere a la variedad de técnicas, químicas y físicas, utilizadas para alterar las características del lodo, haciendo más eficiente la remoción subsecuente del agua. No existe una práctica de acondicionamiento única y ampliamente aceptada para un tipo dado de lodo, ya que un agente acondicionante que trabaje bien en una planta puede no trabajar en otra similar, y es necesario realizar pruebas de laboratorio. Las propiedades del lodo utilizadas para evaluar la efectividad de los agentes acondicionantes, incluyen la resistencia específica, el coeficiente de compresibilidad, el rendimiento y el tiempo de succión capilar. (CONAGUA, 2007).

En el documento denominado Hoja Técnica Conceptual "Acondicionamiento de lodos residuales por medio del uso de polímeros solubles en agua" del Área

Funcional de Investigación Aplicada de la UEN ID (2018), se detalla la teoría y uso de polímeros en la gestión de lodos residuales.

4.3 Desaguado del lodo

Tiene como objetivo el reducir el volumen de lodo y producir un material que sea apropiado para su disposición final o su recuperación. Los métodos de desaguado, pueden dividirse en:

1. Métodos naturales.
2. Métodos mecánicos.

4.3.1 Métodos naturales (lechos de secado)

Se utilizan para reducir el contenido de agua de los lodos antes de su disposición. Operan bajo el principio de extender el lodo y dejarlo secar. La mayoría del agua se remueve por drenado o decantación y el resto por evaporación, antes de que se alcance la concentración final deseada de sólidos. Pueden agruparse en varios tipos:

1. Lechos rectangulares convencionales. Utilizan capas de arena y grava con tuberías de drenaje subterráneas para recoger el agua.

2. Lechos de secado pavimentados.

3. Lechos de secado con malla de alambre.

4. Lechos rectangulares de vacío.

La remoción de agua del lodo por drenaje, es un proceso que implica que el agua se drena del lodo a través de la arena y sale por los tubos de drenaje, paso que puede durar algunos días hasta que la arena se tapa con las partículas finas o toda el agua libre se ha drenado. El agua que permanece después del drenaje y decantado inicial, se elimina por evaporación. (CONAGUA, 2007). Para el cálculo de los mismos se realiza un balance de masa del agua contenida en el lodo, el agua que drena del mismo, el agua que se evapora y del agua que pueda ser aportada por la lluvia (en caso de que no sean techados).

4.3.2 Métodos mecánicos

Los métodos mecánicos de desaguado, se pueden usar en aquellas situaciones en las que los métodos naturales no puedan construirse; debido a la falta de espacio o porque se requiera un contenido de sólidos muy alto. El diseño de las instalaciones adecuadas para el desaguado de lodos implica mucho más que la selección del equipo de un catálogo; requiere del análisis sistemático de una amplia gama de

opciones del sistema, características de lodos y variables específicas del sitio, incluyendo otros procesos de tratamiento. (CONAGUA, 2007). Entre los métodos mecánicos, destacan:

4.3.2.1 Centrifugación

Se aplica una fuerza centrífuga a una corriente de lodo, la cual acelera la separación de las fracciones líquidas y sólidas. El proceso involucra tanto la clarificación como la compactación; a través de la separación por diferencia en densidades entre los sólidos del lodo y el líquido circundante.

La centrifuga, puede desaguar muchos diferentes tipos de lodos; sin embargo, los parámetros de proceso para centrífugas sólo se pueden evaluar mediante pruebas continuas a escala piloto con los lodos que se pretende tratar. De los datos de prueba se pueden calcular los requerimientos tanto de capacidad como de carga de sólidos. El diseño limitante determina la selección final del equipo. (CONAGUA, 2007).

4.3.2.2 Filtro Banda

Utiliza bandas para desaguar los lodos en forma continua, mediante una combinación de drenado por gravedad y compresión. El funcionamiento para el desaguado del lodo se da mediante el acondicionamiento del lodo con polímero y entrada a sección de drenado por gravedad (banda continua porosa para el drenado), en esta última, se aplica el lodo uniformemente sobre la banda. El lodo espesado entra a la etapa de compresión donde se exprime entre dos bandas porosas a través del uso de rodillos. En la siguiente figura se presenta un ejemplo de un filtro banda.

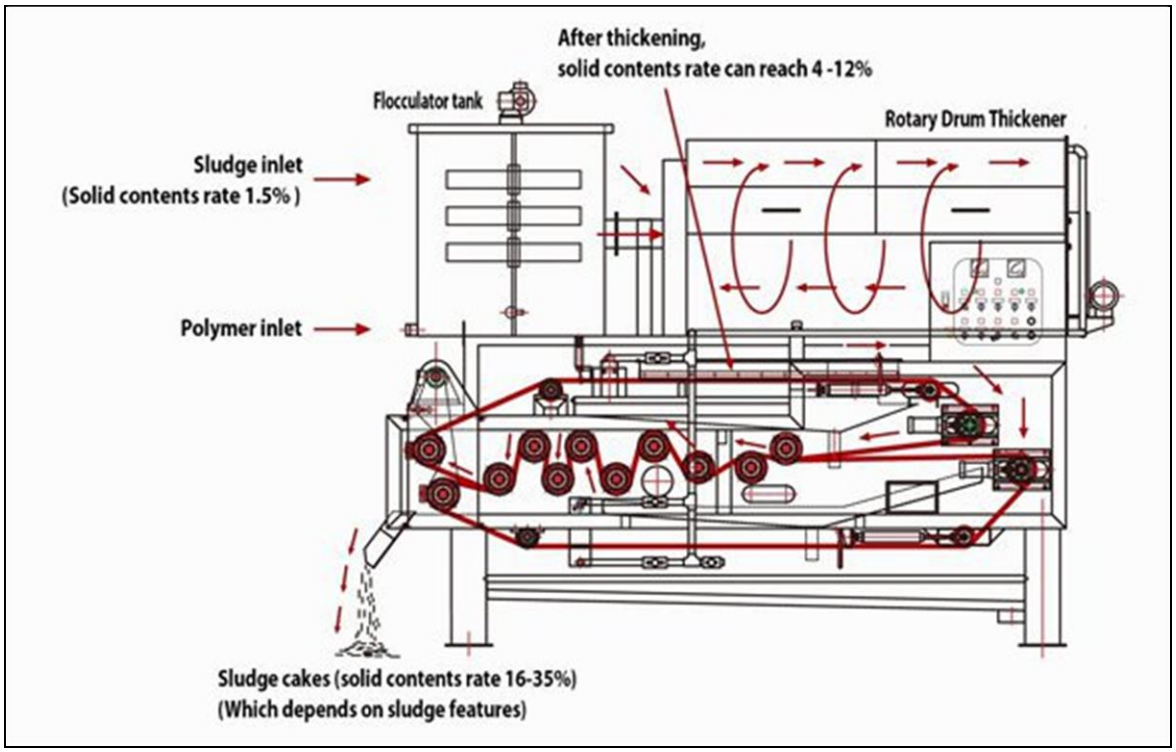

Figura 5 Filtro banda para lodos (Fuente: HAIBAR. Fabricante de equipos de separación de sólidos y líquidos. (2018). Recuperado de http://haibarmachines.com)

4.3.2.3 Filtro Prensa

La separación de los sólidos suspendidos del lodo, se genera a través de un diferencial positivo de presión. El lodo, se bombea al filtro bajo presión, haciéndolo pasar a través del medio filtrante y dejando una torta de lodo concentrado entre las placas. Al separar las placas, la torta cae en el suelo.

La principal ventaja de un sistema de filtro prensa consiste en que generalmente produce una torta más seca, que la de las demás alternativas. En casos donde el contenido de sólidos en la torta deberá ser mayor del 35%, los filtros prensa pueden ser una alternativa costeable. Los filtros prensa también tiene una operación adaptable a una amplia gama de características de lodo, confiabilidad mecánica aceptable, requerimientos comparables de energía a los sistemas de filtrado al vacío, y una alta calidad del filtrado, que disminuye los requerimientos de tratamiento de la corriente recirculada. Las principales desventajas de los filtros prensa son el alto costo inicial, cantidades importantes de químicos para acondicionamiento o de materiales de recubrimiento del filtro, la adherencia periódica de la torta al medio filtrante, que requiere remoción manual, y costos de operación relativamente altos. (CONAGUA, 2007).

4.3.2.4 Filtro (tornillo) prensa de anillas móviles

Es un equipo de deshidratación que está estructurado con un tambor inclinado, un sistema de filtración mediante una malla, tamiz o anillas que forma la pared exterior del cilindro y un tornillo transportador interno.

Una vez se acondiciona el lodo con polímero, el lodo floculado es transportado dentro del tornillo prensa. En la primera sección del tambor, es donde debe ocurrir el drenado del agua libre. Gradualmente, el lodo entrará en la zona de presión del sistema e incrementará su contenido de materia seca. A la salida del tornillo prensa, se contará con un sistema para regular la presión del mismo, lo que podrá provocar que más agua sea eliminada de la torta de sólidos mientras ésta progresa hacia la salida. El agua eliminada, se drena hacia la salida de agua filtrada, que se encuentra por debajo de la entrada de lodo. El equipo cuenta con un sistema para la limpieza de la malla o tamiz de filtrado.

El filtro prensa de anillas móviles, deberá estar estructurado con una combinación de un sistema de filtración que consiste de dos tipos de anillos y un tornillo. Los anillos tienen las siguientes características:

1. un sistema de anillos fijos
2. un sistema de anillos con movimientos

Los anillos fijos, forman un cilindro exterior, el cual es fijado mediante el uso de varias barras de seguridad. El sistema de anillos móviles se localiza dentro de los anillos fijos. Existe un espaciamiento entre los anillos fijos y los movibles, para que se permita, que el líquido filtrado pueda fluir afuera del sistema.

Adicionalmente, el sistema incluye el tornillo mencionado anteriormente; el cual encaja dentro del tambor o los anillos exteriores (fijos) y posee un espaciamiento que se reduce de manera gradual. El diámetro interno del sistema de anillos movibles es menor al diámetro del tornillo; lo anterior permite que cuando el tornillo rote, el sistema de anillos movibles también rote, haciendo que estos últimos se muevan constantemente en la circunferencia del tornillo.

El espaciamiento de los anillos fijos disminuye gradual y longitudinalmente. Al entrar el lodo en el tambor, de conformidad con el movimiento de rotación del tornillo, se genera el espesamiento y deshidratado del mismo. El movimiento constante de los anillos movibles dentro de los espacios del sistema de anillos fijos, previene la posibilidad u ocurrencia de taponamiento del sistema de filtración.

El filtro prensa de anillas móviles es un sistema muy similar en funcionamiento al sistema de deshidratado de lodo llamado Prensa de Tornillo. Por la anterior razón, no se detallará esta tecnología.

5. Criterios sanitarios

Como parte de la investigación realizada, se procedió a realizar una contratación denominada “Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras” (2018CDS-00060-PRI), para la misma, se generaron tres informes los cuales se recomienda estudiar. La investigación consistió en tomar lodo de la purga de un sedimentador de la Planta Potabilizadora de Tres Ríos y estudiar los siguientes procesos u operaciones:

1. Evaluación de distintos polímeros para el acondicionamiento del lodo del sedimentador mediante distintas pruebas.

2. Espesado de lodo de purga de los sedimentadores, por gravedad y con el uso de productos químicos como ayudantes de espesado.

3. Homogenizado del lodo espeso.

4. Acondicionamiento del lodo espeso.

5. Deshidratado de lodo espeso mediante las siguientes tecnologías:
    1. Filtro banda
    2. Filtro prensa de anillas móviles.

Con los resultados de la investigación mencionada y los trabajos realizados por la Unidad de Investigación Aplicada, de la UEN ID, se procede a detallar las operaciones y procesos unitarios mínimos recomendados que deben ser tomados en cuenta por los diseñadores de sistemas para la gestión de aguas y lodos residuales del proceso de potabilización.

5.1 Ecualizador de aguas y lodos de limpieza de filtros

Según la operación, calidad y cantidad de agua a tratar y características propias del sistema de potabilización, se determina la frecuencia de lavado de los filtros y las tasas y tiempos de retrolavado utilizados; con esta información se puede proceder a estimar la cantidad de residuos generados por cada limpieza de filtros, el total de residuos generados por cada limpieza y la frecuencia para la realización de la misma. Para estimar el volumen del tanque de ecualización, se recomienda utilizar la metodología presentada Tchobanoglous (2005); la cual se basa en un balance de flujos de entrada y salida al ecualizador y la estimación del volumen mínimo que debe tener el ecualizador para que las operaciones o procesos posteriores puedan ser dimensionadas adecuadamente.

5.2 Clarificación de lodos de limpieza de filtros

Para el dimensionamiento preliminar de los clarificadores para gestionar los lodos de la limpieza de los filtros, se utilizan las siguientes consideraciones:

1. La concentración de SST a la entrada del clarificador se puede obtener de un balance de masa de los residuos generados en la limpieza del filtro y dispuestos en el ecualizador de lodos de limpieza de filtros. Este valor se puede obtener de forma teórica, mediante determinaciones en sitio (en caso de plantas existentes) o mediante pruebas a escala piloto.

2. La salida de lodo espeso del clarificador se estima sea de aproximadamente 0.5% de Sólidos Suspendidos o Masa Seca.

3. La carga de sólidos por aplicar al clarificador se obtiene de las pruebas de velocidad de sedimentación realizadas para el lodo en estudio. De las pruebas realizadas por la Unidad de Investigación Aplicada, se obtiene un rango de valores recomendados que va desde los 11 kg SS/m^2*d hasta aproximadamente 34 kg SS/m^2*d; dependiendo de la concentración de Sólidos Suspendidos a la estrada del clarificador.

4. Se recomienda que la profundidad de la pared mojada del clarificador se encuentre entre 3 a 4 metros (Conagua, 2007).

5. Una vez realizada la estimación del área superficial del clarificador, se debe calcular la tasa hidráulica de carga (“Hydraulic loading rate” HLR). Según Conagua (2007), se recomienda utilizar un valor de HLR que se encuentre entre 4 a 8 m^3/m^2*d, para lodos de hidróxido de aluminio; según von Sperling (2007), se recomienda para lodos de aguas residuales domésticas, utilizar un valor de HLR que se encuentre entre 20 a 30 m^3/m^2*d. El diseñador debe seleccionar el valor adecuado para las aguas o lodos residuales a tratar. Para el caso de estudio realizado por la UEN de Investigación y Desarrollo, se determinó que, para las aguas de limpieza de los filtros, las cuales se espera que sedimenten adecuadamente y tienen una concentración de Sólidos Suspendidos baja; al calcular el valor de HLR basado en el área superficial del clarificador obtenida con la carga de sólidos por aplicar, se obtiene un valor alto de HLR. Por la anterior razón y por las características de las aguas de retrolavado, se considera que para el clarificador (a falta de otra fuente de información) se puede utilizar un valor de HLR dentro del rango recomendado por von Sperling. En caso de que inicialmente, el valor de HLR se encuentre entre los valores recomendados por Conagua, se considera que el mismo puede ser un valor aceptable, de manera conservadora y que no requiere que se modifique.

6. Según von Sperling (2007), se recomienda un tiempo de retención hidráulico (HRT) menor a 24 horas con el fin de evitar que las aguas o lodos residuales adquieran olores sépticos.

7. Se debe dejar previsto a la entrada del clarificador, un sistema de preparación y dosificación de coagulante y/o floculante, que puede ser utilizado para mejorar las características del espesado de las aguas residuales.

8. El agua clarificada, debe caracterizarse (calidad físico química como microbiológica) y se recomienda se evalúen las opciones de recirculado a la cabecera de la planta de tratamiento de aguas residuales, a cabecera de planta potabilizadora (en caso de ser posible) o de disposición a un cuerpo de agua cercano (en caso de que se cumpla con la normativa nacional).

5.3 Ecualización de lodos de purga de los sedimentadores

Para estimar el volumen del tanque de ecualización, se recomienda utilizar la metodología presentada por Tchobanoglous (2005); la cual se basa en un balance de flujos de entrada y salida al ecualizador y la estimación del volumen mínimo que debe tener el ecualizador para que las operaciones o procesos posteriores puedan ser dimensionadas adecuadamente.

Se debe tener presente que existen o se generan flujos producto de procesos posteriores que pudiesen convertirse en entradas al ecualizador de lodos de purga de los sedimentadores. Lo anterior, varía las características de propiedades físico químicas y cantidades de flujo de entrada y salida del ecualizador, por lo que se deben realizar balances de masa para sólidos y para flujos de entrada y salida en los distintos procesos u operaciones del sistema para gestión de lodos.

5.4 Espesado de lodos de purga de los sedimentadores

Para el dimensionamiento preliminar de los espesadores a gravedad para gestionar los lodos de la purga de los sedimentadores y el lodo espeso que se obtiene de los clarificadores de los lodos de limpieza de filtros, se utilizan las siguientes consideraciones:

1. La concentración de SST a la entrada del espesador se obtiene de un balance de masa en el homogenizador, el cual debe incluir todos los flujos que entran al mismo, incluyendo el lodo de los sedimentadores, el lodo de los clarificadores y todas las aguas residuales o lodos que se recirculen al homogenizador.

2. La salida de lodo espeso de esta etapa se estima debe ser de aproximadamente 3% Materia Seca.

3. La carga de sólidos a aplicar al espesador se obtiene de las pruebas de velocidad de sedimentación realizadas. De las pruebas realizadas por la Unidad de Investigación Aplicada, se obtiene un rango de valores

recomendados que va desde los 14 kg SS/m^2*d hasta aproximadamente 37 kg SS/m^2*d; dependiendo de la concentración de SS a la estrada del espesador.

4. Se debe dejar previsto a la entrada del espesador, un sistema de preparación y dosificación de coagulante y/o floculante.

5. Una vez realizada la estimación del área superficial del espesador, se debe calcular la tasa hidráulica de carga ("Hydraulic Loading Rate" HLR). Según Conagua (2007), se recomienda utilizar un valor de HLR que se encuentre entre 4 a 8 m^3/m^2*d, para lodos de hidróxido de aluminio; otras fuentes bibliográficas presentan valores superiores para HLR, pero para agua residuales de distinta procedencia. El diseñador debe seleccionar el valor adecuado para las aguas o lodos residuales a tratar.

6. El diseño más común de espesadores a gravedad consiste en un tanque circular (CONAGUA, 2007; Andreoli, 2007), alimentado en el centro, con equipos para remoción del lodo en el fondo del tanque y remoción del sobrenadante a través de su perímetro.

7. La profundidad de pared mojada varía entre 3 a 4 metros (CONAGUA, 2007).

8. La pendiente del piso, normalmente se encuentra entre 2:12 a 3:12, es mayor que la de los sedimentadores (CONAGUA, 2007).

9. Poseen una estructura de varillas que se mueve en la masa de lodo para ayudar a liberar agua retenida. Esta estructura soporta un sistema de rastras para la remoción de lodos concentrados.

10. El caudal de agua clarificada, debe caracterizarse (calidad físico química como microbiológica) y se recomienda se recircule a la cabecera de la planta de tratamiento de aguas residuales. El caudal de purga obtenido, con la concentración de sólidos suspendidos totales estimada, se enviará al proceso de deshidratación de lodos.

5.5 Ecualizador de lodos

Para el deshidratado de lodos, se propone contar previamente con un tanque de ecualización o tampón de lodo espeso, que tiene como función el almacenar temporalmente los lodos espesos con el fin de amortiguar los flujos de lodo a los equipos de deshidratado para el adecuado dimensionamiento de los mismos. Para estimar el volumen del tanque de ecualización, se utiliza la metodología presentada por Tchobanoglous (2005).

5.6 Acondicionamiento del lodo espeso

De las pruebas realizadas para la contratación mencionada (ver informes I, II y III del contrato 2018CDS-00060-PRI), se obtiene que el polímero que genera el mejor desempeño al menor costo posible, para el lodo evaluado (Planta Potabilizadora de Tres Ríos, sedimentador sector Orosi), es un floculante aniónico con las propiedades que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 14 Características del polímero para acondicionamiento del lodo de un sedimentador de la Planta Potabilizadora de Tres Ríos.

Parámetro	Descripción
Nombre	Chemifloc AN270-S
Tipo	Floculante
Carga	Aniónica
% Carga	20
Peso Molecular (Daltons)	10×10^6
Estructura	Lineal
Presentación	En polvo

Es importante destacar, que la selección de los productos químicos para acondicionamiento de los lodos de plantas potabilizadoras requiere de una caracterización detallada de estos lodos y de pruebas de desempeño, las cuales deben ser realizadas en laboratorio y a escala (de ser posible) y se realizan de acuerdo a los equipos que se desean evaluar; es decir, para los distintos equipos existentes de deshidratado, las pruebas pueden variar entre sí. Finalmente, es importante mencionar que cada caso para la gestión de lodos de una planta potabilizadora, es independiente de cualquier otro; es decir, lo que funciona para un sistema pudiese no funcionar para otro.

De las pruebas realizadas, para el lodo evaluado, se obtiene una dosis de polímero para deshidratación de 1.61 kg/ton MS (materia seca) (Informe Fase III, 2018CDS-00060-PRI). Algunas de las recomendaciones sobre equipos para preparación de polímeros, que se desprenden de los resultados obtenidos de la contratación 2018CDS-00060-PRI, "*Generación de criterios técnicos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales de plantas potabilizadoras*", se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 15 Recomendaciones sobre los equipos para preparación de polímeros.

Parámetro	Detalle
Tipo de equipo	Unidad de preparación continua automática.
Número de cámaras de la unidad	3 (Preparación - maduración – dosificación)
Tiempo de maduración	Depende del polímero, para el caso

Parámetro	Detalle
	en estudio 60 minutos
Bomba de dosificación de polímero	De cavidad progresiva con variación de frecuencia y válvulas de contrapresión; en caso de que se utilicen de diafragma, debe contar con "speed" and "stroke" para regular la dosificación, con válvula de contrapresión.
Bombas de alimentación de lodo	De cavidad progresiva con variación de frecuencia y válvulas de contrapresión.
Puntos de dosificación	Uso de mezclador estático, dejar varios puntos de inyección, así como toma muestras.

5.7 Deshidratado de lodo

De las pruebas realizadas y bajos las condiciones de estudio (tipo de lodo, concentración del mismo, equipos evaluados, etc.), para la contratación 2018CDS-00060-PRI, se determinó que el equipo que da el mejor rendimiento, entre los equipos evaluados (filtro de banda y filtro de anillas móviles), es el filtro de anillas móviles. Es importante destacar, que se considera que es muy difícil poder obtener con equipo de deshidratado mecanizado, valores de humedad menores a 75%; es decir, concentraciones de Sólidos Suspendidos superiores a 25%, como lo solicita el Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos.

Para el buen funcionamiento de los equipos de deshidratado mecanizado, se recomienda que el lodo espeso que llega a los mismos, posea una concentración de sólidos suspendidos superior al 3%.

5.9 Almacenamiento de lixiviados del proceso de deshidratado

Se debe contar con un tanque de almacenamiento de lixiviados producto de la deshidratación de los lodos. Para estimar el volumen del tanque mencionado, se utiliza la metodología presentada Tchobanoglous (2005).

A manera de esquema, las recomendaciones indicadas en los apartados anteriores, se resumen en la siguiente figura.

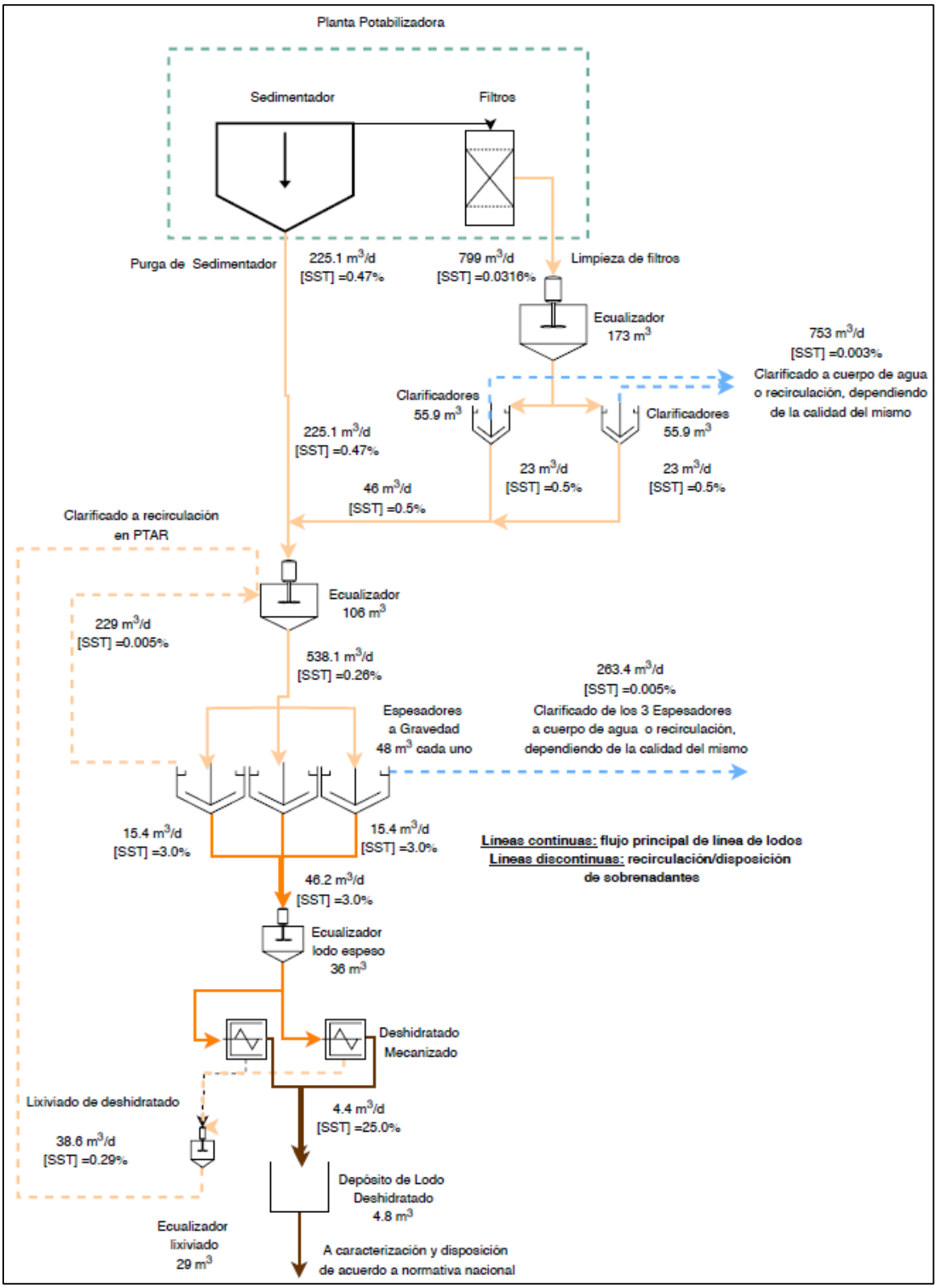

Figura 6 Esquema resumen de los procesos u operaciones mínimas para la gestión de lodos en plantas potabilizadoras.

6. Referencias

- Berzosa, M. Contratación Directa 2018CDS-00060-PRI. *Generación de criterios teóricos y prácticos para la deshidratación de lodos residuales en plantas potabilizadoras*. Informe Fase I, II y III. 2018.

- Comisión Nacional del Agua. *Guía para el Manejo, Estabilización y Disposición de Lodos Químicos*. CONAGUA. 2007.

- Crittenden, R. MHW's Water Treatment: Principles and Design. 3a Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. (2012)

- EPA. *Water Treatment Residuals Management for Small Systems*. Water Research Foundation. 2009.

- Henze, M et al. *Tratamiento Biológico de aguas residuales*. Principios, modelación y diseño. 2008.

- Lazo, P. Hoja Técnica Conceptual. *Acondicionamiento de lodos residuales por medio de polímeros solubles en agua*. UEN ID. 2018.

- Ministerio de Ambiente y Energía. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Decreto N°33601-MINAE-S. 2007

- Ministerio de Salud. Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos. Decreto N°39316-S. 2015.

- Solano, R. *Dimensionamiento del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante las tecnologías IFAS y MBR para su comparación con el prediseño existente de LAC. Tesis de Maestría*. UNA. 2018.

- Tchobanoglous, G; et al. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Metcalf & Eddy. 2005.

- von Sperling, M et al. *Sludge Treatment and Disposal*. Biological Wastewater Treatment Series. Volume Six. IWA. London. 2007.

Colaboradores:

Ing. Óscar Ramírez Sanchez **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**	Tec. Miguel Bertozzi Monge **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**
Ing. Natasha Rojas Valladares **-Área funcional Investigación Aplicada-**	Tec. Everardo Gutiérrez Solano **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**
Ing. Rodolfo Araya Álvarez	Tec. Rafael Orozco Campos

-Área funcional Investigación Aplicada-	**-Área funcional Investigación Aplicada-**
Lic. David Cambronero Bolaños **-Laboratorio Nacional de Aguas-**	Tec. Carlos Sanabria Gómez **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**
Ing. Olman Jiménez Rodríguez **- Planta Tratamiento Los Tajos-**	Técnicos de la PPot de Tres Ríos **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**
Lic. Ilena Vega Guzmán **- Planta Tratamiento Los Tajos-**	Técnicos de la PPot de Cartago **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**
Ing. Esteban Saborío Herrera **- Planta Tratamiento Los Tajos-**	

7. Información adicional

Ing. Andrés Lazo Páez
alazo@aya.go.cr
Director Investigación Aplicada
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados